



Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla

Facultad de Ciencias de la Electrónica

**FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE UN
PROTOTIPO DE SISTEMA FOTOVOLTAICO**

Tesis presentada para obtener el grado de Licenciatura en
Ingeniería en Energías Renovables

Presenta:

Areli Pamela González Delgadillo

Director de Tesis:

Dr. Jesús Carrillo López

Asesores:

Dr. Israel Vivaldo de la Cruz

Dr. Godofredo García Salgado

Puebla, Pue., Noviembre 2021



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por darme la oportunidad de estudiar una carrera, por ser mi soporte y mi guía, en este caso, por inculcarme la importancia que tiene la formación académica.

A mi hermano mayor quien me ha apoyado y enseñado muchas cosas a lo largo de mi carrera y a mi hermano menor quien siempre me apoya e inspira.

A mis asesores de tesis, el Dr. Israel Vivaldo de la Cruz, el Dr. Godofredo García Salgado, y especialmente al Dr. Jesús Carrillo López, quien me brindó su apoyo, comprensión y conocimientos de manera incondicional.

Al Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores por permitirme trabajar en sus instalaciones y utilizar sus equipos para poder realizar este proyecto.

A la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado por financiar este proyecto.

En general, a los Maestros y Doctores que compartieron sus conocimientos a lo largo de la carrera.

Contenido

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN	5
JUSTIFICACIÓN	9
OBJETIVO GENERAL.....	10
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
Capítulo 2 MARCO TEÓRICO	11
Energía Solar.....	11
Semiconductores	12
Características eléctricas	16
Módulo Fotovoltaico.....	18
Iluminación	20
Flujo luminoso.....	20
Iluminancia.....	20
Luminancia o brillantez.....	20
Rendimiento luminoso	21
Color.....	21
Temperatura de color	21
Curvas fotométricas.....	22
Luminarias.....	23
Sistema Fotovoltaico.....	24
Baterías.....	25
Reguladores de carga	25
Inversores	26
Diseño y fabricación de un módulo fotovoltaico (MFV).....	27
Celdas Fotovoltaicas y cintas de interconexión	27
Encapsulado	28
Cubierta	29
Marco de soporte.....	29
Contactos.....	29
Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo	30

Radiación Solar	30
Ángulo de incidencia de radiación solar	32
Ubicación y orientación	34
Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico	36
Capítulo 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL	40
Dimensionamiento y fabricación del panel fotovoltaico	45
Cálculo de la Potencia Pico del Panel Fotovoltaico	46
Medición e Interconexión de Celdas Solares	47
Construcción del Marco de Soporte y Cubierta Frontal del Panel Fotovoltaico.....	49
Encapsulado del Panel Fotovoltaico	51
Cubierta Posterior del Panel Fotovoltaico.....	51
Obtención de la Curva I-V del Panel Fotovoltaico	53
Dimensionamiento de las Baterías.....	54
Dimensionamiento del controlador de carga	56
Dimensionamiento del inversor	57
Dimensionamiento de cables de conexión.....	58
Protecciones	61
Diagrama Unifilar	62
Diagrama de la Instalación	63
Instalación del sistema fotovoltaico.....	64
Capítulo 4 CONCLUSIONES	65
Bibliografía.....	66

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años, ha estado latente la preocupación de la humanidad por el cambio climático y las repercusiones negativas que esto traería. El cambio climático, entre otras cosas, tiene como consecuencia un aumento de temperatura en el planeta tierra; una de las principales razones de este aumento se debe al incremento de gases de efecto invernadero, entre los cuales se encuentran los más importantes como el vapor de agua (H₂O) y el dióxido de carbono (CO₂). Los gases de efecto invernadero permiten filtrar y contener parte de los rayos del sol, sin embargo, a pesar de que estos gases son componentes naturales del aire, la actividad humana se ha encargado de incrementarlos, principalmente el CO₂ procedente de la quema de combustibles fósiles, así que existe una mayor absorción de luz solar teniendo como resultado el calentamiento global [1].

La actividad humana y el crecimiento acelerado de la población han contribuido a la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, en su mayoría, las emisiones de CO₂ provienen de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica. Debido a esto, muchos países han tomado acción para hacer un cambio, creando acuerdos en los cuales los países que contribuyen a estas emisiones se comprometan a reducirlas, como lo es el caso del Protocolo de Kyoto, aprobado en 1997 y que entró en vigor en el año 2005. Posteriormente, en el año 2015, se dió a conocer el Acuerdo de París, en el cual se proponen metas para redoblar esfuerzos al combatir el cambio climático limitando el aumento de temperatura y las emisiones de gases de efecto invernadero. Estos antecedentes indican la necesidad de tomar medidas de mitigación, como lo es el uso de energías renovables [2] [3].

En México, esta transición tomó importancia hace algunos años, ya que en el 2014 la capacidad instalada de generación de energía mediante fuentes renovables representó un 25% de la capacidad total, aunque el 80% de ese porcentaje correspondían solo a la energía hidroeléctrica y eólica, a pesar de tener grandes oportunidades en otras fuentes limpias. Una de las fuentes más prometedoras es la energía solar, la cual ha ido tomando mayor importancia con el paso de los años ya que actualmente sus precios de producción son más accesibles, compitiendo con los precios de fuentes convencionales [4] [5] [6] .

Las energías renovables son aquellas que se encuentran disponibles en la naturaleza, las cuales son prácticamente inagotables. La principal fuente natural con la que contamos es el Sol, ya que a partir de él, se derivan las otras energías, como es el caso de la energía eólica, ya que la distribución de la energía solar recibida en la tierra influye en el movimiento de las masas de aire, de tal modo que da lugar a los vientos. En el caso de la biomasa, de alguna manera el origen es el Sol, ya que las plantas y árboles absorben la energía solar

para alimentarse. De igual forma con la energía geotérmica, mareomotriz e hidráulica, las cuales surgen a partir de procesos naturales en los que influye la luz solar. Se observa así que las energías renovables provienen del Sol de forma indirecta o directa [7] [8] .

Por el contrario de las fuentes no renovables, como lo es el petróleo, el sol es una fuente prácticamente inagotable, ya que lleva millones de años emitiendo radiación y a pesar de eso, el hidrógeno contenido en su núcleo es suficiente para seguir produciendo energía durante millones de años más. A pesar de que gran parte de la radiación solar es contenida en la atmósfera y otra es reflejada, la radiación que llega al suelo es equivalente a miles de veces el consumo energético que tenemos en la Tierra, lo cual es una gran ventaja, ya que sería capaz de cumplir con las demandas energéticas a pesar del crecimiento acelerado de la población que se ha mostrado en los últimos años.

Tomando en cuenta el potencial de la energía solar, debemos saber que no sólo basta con que exista, sino que es importante el desarrollo de esta tecnología para el aprovechamiento de la misma. Existen dos maneras en las que podemos aprovechar la energía solar, con sistemas pasivos o sistemas activos. Los primeros, no requieren de algún dispositivo específico para su aprovechamiento, utilizando la radiación para almacenamiento de calor, iluminación directa, etc, sin necesidad de que exista algún tipo de conversión realizada por algún dispositivo. En cuanto a los sistemas activos, ya se habla de colectores que permitan captar la radiación solar y posteriormente realizar algún tipo de conversión térmica o eléctrica. En estos sistemas se pueden utilizar los fotones contenidos en la radiación solar para obtener corriente eléctrica, lo que es conocido como efecto fotovoltaico [7].

En 1838 el físico francés Alexandre Becquerel descubrió el efecto fotovoltaico mientras experimentaba con una pila electrolítica con electrodos de platino; al exponerla al Sol, subía la corriente eléctrica. En los siguientes años, comenzaron a descubrir el potencial del selenio, creando celdas solares con este material para producir electricidad, sin embargo no se obtenían grandes cantidades de potencia. Hasta el año 1953, Calvin Fuller, Gerald Pearson y Daryl Chapin, quienes en busca de fuentes alternativas de energía descubrieron la celda solar de silicio, observaron que esta producía más electricidad e incluso podía hacer funcionar algunos dispositivos electrónicos. En el año de 1954 dieron a conocer su descubrimiento y para el año de 1956 ya estaban disponibles comercialmente. Sin embargo, su costo era demasiado elevado y fue hasta la década de los 70, donde el costo se redujo y, a partir de entonces, se han investigado las células fotovoltaicas de silicio comúnmente conocidas como celdas solares [9] [10].

Pero para el aprovechamiento de la energía solar, no es suficiente sólo contar con celdas solares de manera individual, ya que un conjunto de celdas solares interconectadas conforma un módulo fotovoltaico (MF). La instalación de estos módulos permite aprovechar la luz incidente en la zona donde se colocan, y en complemento con otros componentes, se puede aprovechar la energía eléctrica producida.

Estos elementos consisten de un inversor, ya que obtenemos corriente continua y, para poder alimentar diversos dispositivos, es necesaria la corriente alterna; también es necesario contemplar un sistema de almacenamiento, ya que la luz solar es intermitente debido a diversos factores, así que sólo se cuenta con ella en un número de horas limitado, por lo que es necesario almacenar la energía producida. Por lo regular este sistema consta de baterías recargables; finalmente se requiere un controlador de carga el cual distribuya correctamente la energía entre el inversor y el sistema de almacenamiento, verificando si es o no necesario almacenar la energía dependiendo si las baterías están cargadas o descargadas. Al conjunto de todos estos elementos se le llama Sistema Fotovoltaico (SF).

Como se mencionó anteriormente, no toda la radiación emitida por el sol llega a la tierra, pero además de eso no se recibe la misma cantidad en todo el mundo, existen diversos factores que influyen; la intensidad de la radiación recibida dependerá del espesor de la capa de aire, la ubicación geográfica, latitud, longitud, época del año, etc., estos factores serán indicadores para saber si es viable o no la instalación de un Sistema Fotovoltaico. En el caso específico de México tenemos una gran cantidad de este recurso disponible para su aprovechamiento, ya que de acuerdo a su latitud y longitud, nuestro país se encuentra situado en el llamado Cinturón Solar Global, teniendo de los índices de irradiación solar más altos en el mundo, con un promedio de 5kWh/m^2 [11] [12] [13].

Ante la necesidad de cambio y el campo de oportunidad que se tiene en México, se debe considerar no sólo el aprovechamiento de la energía por medio de tecnologías desarrolladas en el extranjero, sino considerar el desarrollo de una tecnología propia para beneficiarnos de nuestro potencial de irradiación solar y, de esta manera, obtener un desarrollo integral que nos permita aprovechar nuestros recursos disponibles con una tecnología desarrollada en nuestro país. [14] Aunque queda un largo camino por recorrer, se han mostrado avances significativos. Como un ejemplo, está considerado el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, donde hace 4 décadas se inició la fabricación de celdas solares de silicio monocristalino y de módulos fotovoltaicos a nivel de planta piloto.

Por otro lado, es cierto que durante las últimas dos décadas en México se han instalado algunas centrales fotovoltaicas de mediana capacidad en zonas del norte el país, principalmente, sin embargo, la totalidad de los paneles utilizados son traídos de otros países o fabricados en México por empresas extranjeras y con procesos extranjeros. Es importante aprovechar el potencial y los recursos existentes en el país para poder lograr un desarrollo integral. Un primer paso es el desarrollo de prototipos de MF's a partir de la formación de arreglos de celdas fotovoltaicas que cubran las necesidades requeridas, buscando alternativas en procesos y materiales para desarrollar módulos eficientes, con calidad, y a su vez reduciendo los costos de los materiales y procesos de fabricación.

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ha puesto gran atención en el desarrollo de proyectos que dirijan a la institución a la sustentabilidad, como el caso de la producción de energía a partir de fuentes renovables. Desde hace diez años, en el Centro de Investigación en Dispositivos Semiconductores (CIDS) del Instituto de Ciencias, se han desarrollado diversos proyectos en energía fotovoltaica; se han fabricado paneles fotovoltaicos y luminarias basadas en Led's, los cuales se han instalado en varios edificios de Ciudad Universitaria, como es el CUVyTT, donde se instaló un sistema de iluminación completo en el año 2013. Así mismo, se han instalado sistemas para bombeo de agua e iluminación externa en las instalaciones del CENAGRO, en el EcoCampus de Valsequillo.

En este proyecto que se propone como tema de tesis de Licenciatura, se contempla fabricar e instalar un prototipo de sistema de iluminación para emplearse en la iluminación periférica del Estadio Universitario BUAP. Este proyecto fue propuesto a la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado, el cual está aprobado, de tal modo que los fondos para financiarlo provienen de esa fuente. Los detalles técnicos se presentan más adelante, pero en una descripción general señalamos que el sistema fabricado se podrá instalar en uno de los postes que se encuentran en la periferia del estadio. El diseño, en términos de la geometría del panel y su potencia energética requerida se realizará como parte del trabajo. Así mismo, el uso de los materiales más apropiados y la fabricación misma del panel fotovoltaico, se contemplan en el proyecto. Se plantea construir los MF's a partir de celdas solares comerciales, teniendo seleccionadas actualmente, celdas de buena calidad y características eléctricas muy similares, además de un costo muy razonable.

Debe señalarse que desde el punto de vista de la globalidad en el proceso de fabricación de MF's, los dispositivos y materias primas, se obtienen usualmente de distribuidores especializados en la producción de insumos específicos, lo que obliga a conseguir los materiales de diversas fuentes. El enfoque de este proyecto en esa dirección, contempla la adquisición en la medida de lo posible, de materiales que puedan ser comprados en el mercado local, o bien importados, pero bajo la consideración de lograr costos de producción que sean comparables o menores a los costos de los MF en el mercado. Los cálculos de consumo energético, en correspondencia con las luminarias que se diseñarán y fabricarán, se llevarán a cabo, debiendo tomar en cuenta las capacidades de las baterías que se usarán para el almacenamiento de la carga. Se tomarán en cuenta también los calibres de los cables de interconexión y, finalmente, los controladores de carga para la protección del panel y las baterías. Todos los sistemas electrónicos y las baterías se colocarán en un gabinete metálico con ventilación, previamente diseñado para la protección de los componentes, contra lluvia, humedad y calor extremo.

La tesis comprende cuatro capítulos, correspondiendo a la Introducción el Capítulo 1. El Capítulo 2 contiene los elementos del Marco Teórico relativos a la Energía Solar y, específicamente sobre la Energía Fotovoltaica, que involucra a las celdas solares de silicio y a los paneles fotovoltaicos; contiene además conceptos fundamentales sobre iluminación en términos de sus propiedades y características; se presentan también los fundamentos de los sistemas de almacenamiento de carga, mediante el empleo de baterías y controladores de carga, así como la técnica de diseño y fabricación de los paneles fotovoltaicos que se emplearon en este trabajo.

El Capítulo 3 corresponde a la parte de desarrollo experimental, que comprende el proceso de fabricación de los diversos componentes que integran el sistema fotovoltaico. Se presentan también los resultados en cuanto a características eléctricas de los módulos fabricados, así como los resultados obtenidos para las luminarias. Se exhibe, finalmente, el sistema completo funcionando ya en condiciones de trabajo normales y el comportamiento mostrado en un período de varias semanas. En el Capítulo 4 se presentan las conclusiones sobre el trabajo del prototipo de sistema fotovoltaico e iluminación.

JUSTIFICACIÓN

Actualmente, el impacto que el cambio climático genera ya es perceptible, por tal motivo el mundo busca disminuir la dependencia de los combustibles fósiles mediante el aprovechamiento de los recursos renovables disponibles en cada país y de este modo tener una producción de energía más sostenible. El desarrollo de este proyecto respalda que el uso de la energía solar fotovoltaica puede aportar grandes beneficios a la necesidad de proteger el medio ambiente y de un crecimiento económico. Involucrarse en el diseño, fabricación y desarrollo de módulos fotovoltaicos permite encontrar alternativas durante el proceso que permitan mejorarlo, contribuyendo con una serie de innovaciones, como encontrar el tipo de cintas de interconexión y el proceso de soldar a las celdas solares, hallando temperaturas óptimas que a pesar de las condiciones desfavorables que se puedan tener en comparación con grandes industrias dedicadas a esta actividad, se obtengan resultados muy aceptables con calidades comparables a las comerciales. En el caso del encapsulante, comercialmente se utilizan laminadoras de un costo muy elevado cuya adquisición se justifica solamente en un nivel de producción industrial, por lo cual se empleará en este trabajo un material alternativo que garantiza propiedades de transparencia y hermeticidad por más de 30 años, teniendo una mayor garantía que los materiales utilizados en módulos comerciales (EVA, Etyl Vinil Acetato)

La Benemérita Universidad Autónoma de Puebla ha puesto gran atención en el desarrollo de proyectos que dirijan a la institución hacia la sustentabilidad, en este caso se busca sustituir la luminaria de alto consumo, que se tiene en la periferia del estadio universitario, por lámparas LED alimentadas por energía solar, con módulos fotovoltaicos diseñados y fabricados en la institución.

La fabricación de un MF implica tener laboratorios con condiciones específicas, además de contar con equipos de un costo elevado para su fabricación, debido a esto, es importante involucrarse en procesos de diseño y fabricación, que nos permitan buscar alternativas en materiales y procesos que no involucre el invertir en una gran infraestructura, y de este modo obtener un módulo con características similares a los que se encuentran disponibles comercialmente.

Por otra parte controlar los procesos de encapsulado, sellado y enmarcado, permite la optimización de las áreas en donde se colocarán los módulos fotovoltaicos, adecuando las dimensiones a las necesidades existentes. Fabricar nuestros propios MF's, nos permite usar geometrías especiales que no se encuentran disponibles comercialmente, así como personalizar su apariencia.

Se realizará un estudio del recurso solar disponible en Ciudad Universitaria para la sustitución del alumbrado de alto consumo de uno de los postes situados en la periferia del estadio universitario BUAP, así como un prototipo funcional de un MF a partir de la formación de arreglos de celdas fotovoltaicas comerciales, buscando alternativas en procesos y materiales para desarrollar módulos eficientes, con calidad y a su vez intentado reducir costos del mismo.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar, fabricar y desarrollar un prototipo de sistema fotovoltaico, con el fin de tener una iluminación autónoma en el exterior del Estadio Universitario BUAP, reestructurando las luminarias originales y utilizando un panel fotovoltaico fabricado a partir de celdas solares comerciales, que funcione acompañado de un controlador de carga, sistema de almacenamiento de carga y un inversor.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características de iluminación requeridas para la reestructuración de las luminarias.
- Conocer los procesos y las condiciones para fabricar un módulo fotovoltaico.
- Diseñar y fabricar un módulo fotovoltaico a partir de celdas solares comerciales.
- Realizar el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de carga.
- Realizar el dimensionamiento del controlador de carga.
- Realizar el dimensionamiento del inversor.
- Instalar el prototipo del sistema fotovoltaico obtenido, en la periferia del estadio universitario BUAP.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

Energía Solar

El Sol es una estrella que pertenece a nuestro sistema solar, el cual emite una gran cantidad de radiación; en su núcleo son producidas reacciones de fusión nuclear convirtiendo el hidrógeno contenido en helio, este proceso libera energía en una gran cantidad y esa energía llega a nuestro planeta tierra en forma de rayos solares. Parte de esa radiación entra a la Tierra de manera directa, sin embargo otra parte, al pasar por la atmósfera, sufre procesos de reflexión, atenuación y difusión, debido a la interacción con nubes, moléculas de ozono, dióxido de carbono, oxígeno, vapor de agua, etc [15].

La energía solar que llega a nuestro planeta puede ser aprovechada para cubrir nuestras necesidades y llegar a sustituir otras fuentes de energía que son usadas de manera convencional. En dos días el planeta recibe una cantidad de energía que equivale a las reservas existentes de petróleo, gas y carbón, lo cual se traduce a 60 veces el consumo de la sociedad humana, lo cual indica que la energía proveniente del sol tiene un gran potencial para satisfacer nuestras necesidades energéticas [16]. Sin, embargo el problema no es la energía que se tiene disponible, sino la manera en la que se puede aprovechar.

De manera general, el aprovechamiento de esta energía puede ser de forma térmica y fotovoltaica, sin mencionar la energía que aprovechamos de manera directa en nuestra vida diaria como iluminación natural, secado de ropa etc. En el caso de la energía solar térmica, se refiere al aprovechamiento de la energía por el calentamiento de algún medio para utilizar las temperaturas obtenidas como se muestra en la *Figura 2.1*, algunas de las aplicaciones son calentar agua, climatización de viviendas, calefacción, refrigeración, secado, etc.

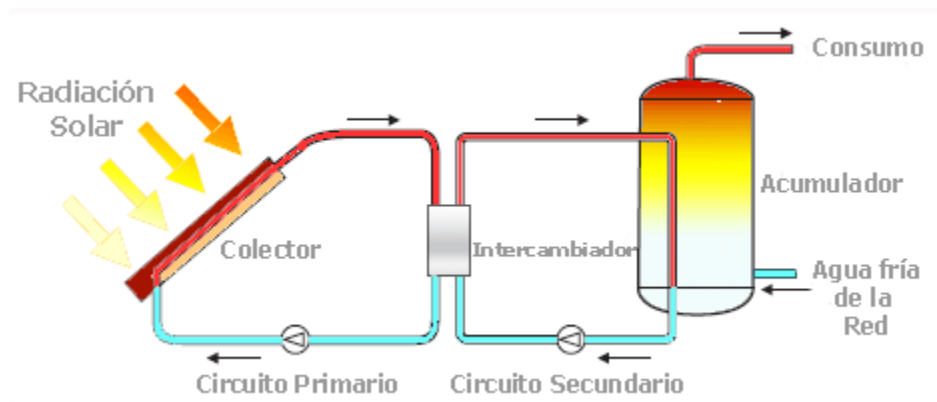


Figura 2.1 Esquema básico del aprovechamiento de energía solar térmica

Por otro lado se tiene la energía solar fotovoltaica, que a diferencia de la térmica, la radiación solar no se transforma en calor, sino que se convierte en electricidad mediante el efecto fotovoltaico, el cual consiste en que la luz pueda generar una corriente eléctrica al incidir en determinados materiales. Fue descubierto en 1839 por el físico francés Alexandre Bequerel pero fue hasta los años cincuenta del siglo XX que se encontró un material que presentaba el efecto fotovoltaico de manera eficiente: el silicio [16].

Así que la manera de realizar la conversión de energía solar a energía eléctrica, es mediante celdas fotovoltaicas o como comúnmente se le conocen, celdas solares. Una celda fotovoltaica está formada por una unión entre dos finas láminas de material semiconductor, una de tipo p y otra de tipo n (*Figura 2.2*). Cuando ambos materiales entran en contacto, el semiconductor tipo n pierde una cantidad de electrones que pasan a ocupar estados energéticos de baja energía, que existen libres en el material tipo p. Como ambas láminas eran inicialmente eléctricamente neutras, la de tipo p queda cargada negativamente debido a que ganó electrones y la tipo n positivamente, teniendo una diferencia de potencia en la zona de unión [15].

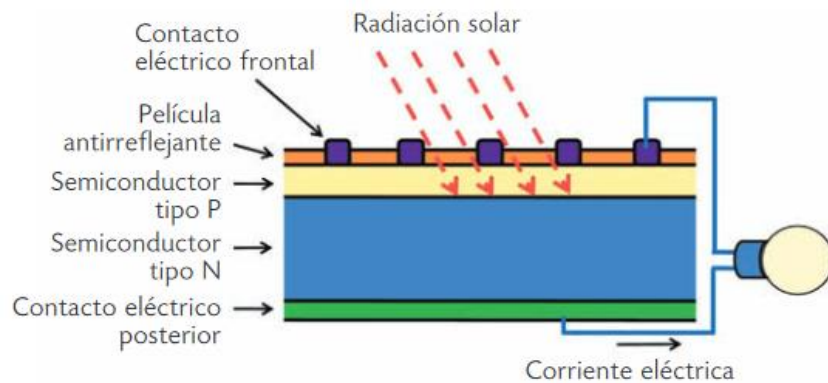


Figura 2.2 Estructura básica de una celda fotovoltaica [16]

Semiconductores

De acuerdo a las propiedades eléctricas de los materiales, se clasifican en tres grupos: conductores, semiconductores y aislantes. Un semiconductor se caracteriza por tener una conductividad eléctrica menor a la de un conductor metálico pero mayor a la de un aislante, los semiconductores más comunes son el germanio, carbón y el silicio. Un semiconductor en estado puro (intrínseco) no conduce bien la corriente, ya que el número de electrones libres en la banda de conducción es limitado al igual que los huecos presentes en la banda de valencia. Así que el semiconductor intrínseco se debe modificar añadiendo impurezas, incrementando el número de electrones libres o huecos para aumentar su conductividad. Existen dos tipos de semiconductores extrínsecos (impuros) el tipo p y el tipo n [17].

Bandas de energía

Para que un material pueda conducir electricidad es necesario que existan electrones que no se encuentren contenidos en la banda de valencia, sino que puedan desplazarse por la banda de conducción. Para que esto suceda el electrón requiere adquirir la cantidad necesaria de energía para pasar de una banda a otra, esta energía está dada por el espacio energético que se encuentra entre ambas bandas, a ese espacio se le conoce como banda prohibida, dichas bandas se encuentran ilustradas en la *Figura 2.3*.

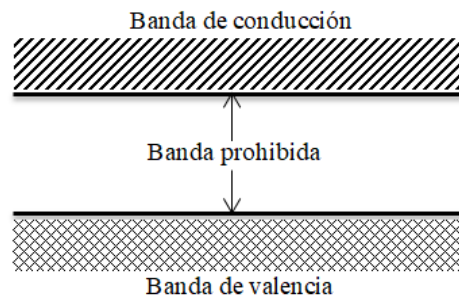


Figura 2.3. Diagrama de bandas de energía en un semiconductor

Unión p-n

En un material intrínseco a temperatura ambiente existen electrones de la banda de valencia que con esa energía calorífica pueden saltar a la banda de conducción, convirtiéndose en electrones libres, estos electrones dejan un espacio libre en la banda de valencia que se le denomina como hueco.

Para obtener un semiconductor extrínseco es necesario añadir impurezas al material; en el caso del semiconductor tipo n, estas impurezas darían lugar a electrones de conducción, teniendo como portadores mayoritarios electrones y como portadores minoritarios huecos. Por otra parte, en el semiconductor tipo p, se tiene como portadores de corriente mayoritarios a los huecos y los portadores minoritarios son los electrones.

Si se coloca un material tipo p junto con un material tipo n, algunos electrones de conducción de la región n cercanos a la región p se comienzan a esparcir a través de esta y se combinan con los huecos cercanos. Por cada electrón que se combina con un hueco en la región n cercana a la unión, crea una capa de cargas positivas, denominado ion positivo. También por cada electrón que se recombina con un hueco formado en la región p, queda un átomo de carga negativa, obteniendo un ion negativo. El resultado de este proceso de recombinación, cerca de la unión p-n, es que se acumulan una cierta cantidad de iones positivos y negativos hasta llegar a un equilibrio. Esta capa formada de iones se conoce como región de empobrecimiento o agotamiento, formando un potencial de barrera que obstruirá el paso de cualquier electrón evitando así que cruce la unión p-n (*Figura 2.4*).

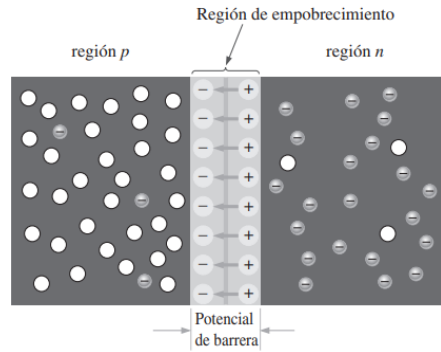


Figura 2.4. Unión p-n en equilibrio [17]

En la región de empobrecimiento existen cargas positivas y negativas, las fuerzas entre las cargas opuestas forman un campo eléctrico, el cual se puede modificar mediante la aplicación de un voltaje externo. Así que esta unión se puede polarizar de manera directa o inversa, para que el material permita la conducción de corriente o la evite, respectivamente.

En el caso de la polarización inversa, se coloca la terminal negativa de la fuente en la región p y la terminal negativa en la región n; de esta manera, al administrar voltaje lo que sucede es que no circula la corriente, ya que las cargas diferentes se atraen. Los electrones contenidos en la región n serán atraídos a la terminal positiva mientras que los huecos situados en la región p se atraen a la terminal negativa, teniendo como efecto la ampliación del potencial de barrera.

Cuando la unión es polarizada de forma directa, las terminales de la fuente de voltaje externa son colocadas al contrario que el caso anterior, la terminal negativa se conecta con la región n mientras que la terminal positiva con la región p, de esta manera se proporciona suficiente energía para que los electrones libres sobrepasen el potencial de barrera y, una vez estando en el lado p, estos electrones son atraídos por la carga opuesta conectada a esa región, mientras que los huecos de la región p se desplazan hacia el lado derecho de la unión, teniendo como resultado una circulación de corriente a través de la unión p-n (Figura 2.5).

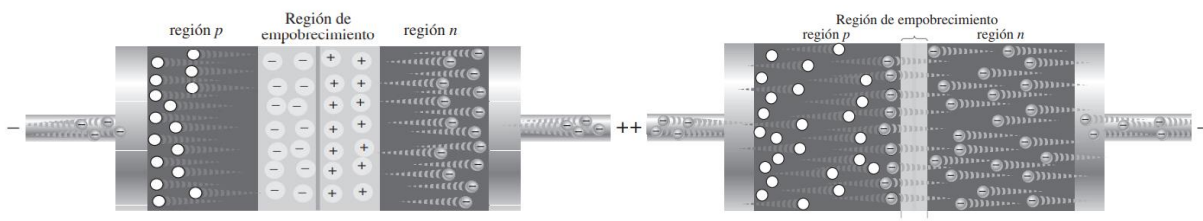


Figura 2.5. (a) Polarización inversa

(b) Polarización directa

Cualquier variación del voltaje aplicado en polarización directa reflejará cambios en la corriente obtenida. Se ha confirmado de manera experimental que la corriente varía con el voltaje externo de manera exponencial. Esta dependencia está dada como:

$$I = I_0 \left[e^{\left(\frac{V}{V_T}\right)} - 1 \right] \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde I_0 es la corriente de saturación, la cual típicamente es muy pequeña, V_T se refiere al voltaje térmico relacionado con la energía térmica de los electrones y huecos dentro del material y V es el voltaje aplicado [18]. De esta forma una celda solar es una unión p-n con dos contactos ohmicos que funciona mediante el efecto fotovoltaico generado con la incidencia de la luz.

Una celda solar es un dispositivo que convierte la energía solar incidente en energía eléctrica de manera directa, debido al efecto fotovoltaico. La luz solar está compuesta por fotones; cuando estos inciden sobre una celda solar, la absorción de fotones con una energía mayor a la del ancho de banda prohibida del material permite generar una corriente eléctrica, al igual que causa una generación de electrones y huecos por pares en ambas regiones del diodo.

En cuanto al material tipo n, se genera un exceso de huecos respecto de los que hay cuando el diodo está sin polarizar y en obscuridad; por el contrario, en el material tipo p serán los electrones los que aumentarán. Por otro lado, los portadores mayoritarios casi no se verán afectados ya que los electrones y huecos generados en las regiones son menores a la cantidad original en su respectiva región (*Figura 2.6*).

Los portadores minoritarios de cada región determinan el fenómeno, al romperse el equilibrio debido a la interacción del material con la radiación incidente. Estos portadores generados en cada lado de la unión se moverán en todas direcciones al chocar entre sí, pero la presencia del campo eléctrico en la unión los atraerá; de esta manera, los electrones generados por la luz comenzarán a circular desde la región p hacia la n, mientras que los huecos irán de la región n a la región p y luego empujándolos hacia el circuito externo.

Ya que los electrones y huecos tienen cargas negativas, al moverse en sentidos contrarios provocan una corriente eléctrica que tiene la misma dirección convencional, de tal modo que la corriente total es la suma de ambas corrientes. Así que si se conecta un conductor entre las terminales del dispositivo la corriente eléctrica circulará a través de todo el circuito obteniendo una fotocorriente en el mismo [18].

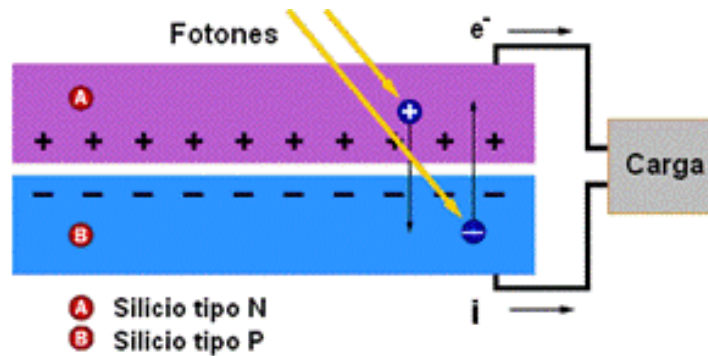


Figura 2.6. Generación de huecos y electrones al incidir fotones en una celda

Características eléctricas

Las características eléctricas de una celda fotovoltaica quedan definidas por medio del circuito equivalente mostrado en la Figura 2.7.

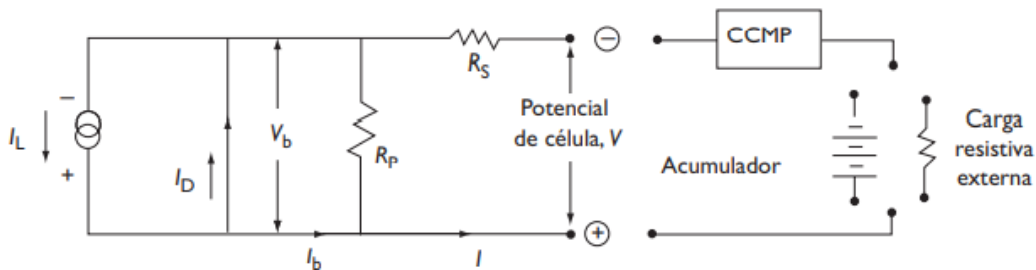


Figura 2.7. Circuito equivalente de una celda fotovoltaica y circuito de una carga externa con Control de Carga a Máxima Potencia (CCMP) y conexión a una batería para almacenamiento de la energía eléctrica.

Para alcanzar una eficiencia elevada en la transformación de energía luminosa a energía eléctrica se debe tomar en cuenta que:

- I_D debe tener un valor mínimo (por ejemplo, con una concentración alta de impurezas)
- R_P (resistencia en paralelo) debe tener un valor elevado
- R_S (resistencia en serie) tiene que ser pequeña, mediante contactos de baja resistencia
- Entre la resistencia interna de la celda y la resistencia de la carga externa debe existir un acoplamiento óptimo.

Generalmente, una celda solar es cuadrada, aunque existe una variedad de tamaños, es común encontrar celdas de 10 x10 cm; el voltaje promedio que producen es de 0.6 V y en cuanto a la corriente que generan será proporcional a la luz solar incidente, pero se

encuentra en un rango de 2.5 a 3 Amperes. Para las celdas solares modernas de 15.5 cm por lado, se logran obtener corrientes en corto circuito de hasta 9 Amperes.

Para conocer la eficiencia con la que una celda solar realiza la conversión de luz incidente en energía eléctrica se genera una curva I-V, como se muestra en la *Figura 2.8*, la cual se puede obtener sometiendo la celda a ciertas condiciones de iluminación. Esta curva nos puede proporcionar parámetros tales como la corriente de corto circuito, voltaje de circuito abierto, potencia máxima, factor de llenado o de forma y eficiencia.

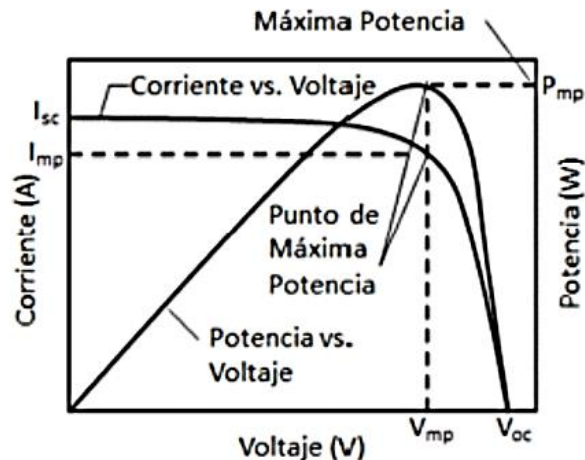


Figura 2.8. Curvas I-V y P-V de una celda solar

Corriente de corto circuito I_{sc} . Es aquella corriente generada cuando la resistencia externa es nula, esta corriente es directamente proporcional a la intensidad de la radiación solar incidente sobre la celda.

Voltaje de circuito abierto V_{oc} . Es el voltaje de una celda para una resistencia externa infinita, lo que es equivalente a tener el circuito abierto para una intensidad de corriente nula, este valor puede decrecer debido al incremento de temperatura.

Potencia máxima P_{mp} . Es la máxima potencia que puede suministrar la celda, cuando el valor de la resistencia externa corresponde al producto de la corriente y voltaje máximos, bajo ciertas condiciones de medida.

Corriente de máxima potencia I_{mp} . Corresponde a la corriente producida por la celda cuando la potencia de la misma es máxima.

Voltaje de máxima potencia V_{mp} . Voltaje producido cuando la potencia medida en la celda es máxima.

Eficiencia η (%). Define la eficiencia de conversión, la cantidad de potencia eléctrica que es capaz de convertir de acuerdo con la radiación que incide sobre la celda. Lo que se traduce a la siguiente ecuación.

$$\eta = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{P_{\text{radiación}}} * 100 \quad \text{Ecuación 2-2}$$

Factor de llenado FF . Se define como la relación entre la potencia máxima de la celda y el producto de la corriente en cortocircuito por el voltaje de circuito abierto. Este factor también puede disminuir con el aumento de temperatura en las celdas.

$$FF = \frac{(I_{mp})(V_{mp})}{(I_{sc})(V_{oc})} \quad \text{Ecuación 2-3}$$

Módulo Fotovoltaico

Un conjunto de celdas fotovoltaicas conectadas entre sí conforma un módulo fotovoltaico comúnmente conocido como panel solar. Se pueden realizar diversos arreglos para el diseño de un módulo fotovoltaico, sin embargo los 3 tipos de módulos fotovoltaicos más comunes son agrupaciones de 36, 60 y 72 celdas fotovoltaicas. Estos arreglos de celdas pueden ser en serie, paralelo o conexiones mixtas.

Conexión serie. Este tipo de conexión se hace de manera que el lado p esté conectado con el lado n de otra celda, sin importar cuantas celdas sean conectadas entre sí, en cada extremo debe quedar con un lado n y otro p (*Figura 2.9*). En este arreglo los voltajes de cada celda se suman mientras que la corriente se mantiene igual en todo el arreglo.

Conexión paralelo. Se unen los lados tipo p por un lado y los de tipo n por otro. El voltaje es el correspondiente a una celda; para este caso se suman todas las corrientes generadas por cada celda por lo tanto con esta conexión se consigue un aumento de corriente.

Conexión mixta. Se refiere a aquella conexión que combina ambos arreglos de celdas, serie y paralelo. En este caso sus características eléctricas dependerán del arreglo que se forma. El voltaje será la suma de los voltajes de las celdas conectadas en serie y la corriente total corresponderá a la suma de la corriente de las celdas en paralelo [19].

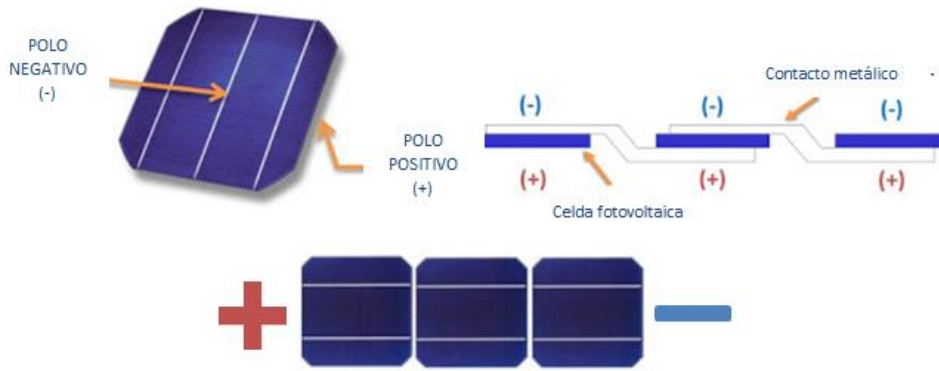


Figura 2.9. Ejemplo ilustrativo de conexión de celdas en serie

Por otro lado existen diferentes tipos de módulos de acuerdo a las celdas con las que se fabrican; aunque hay una gran variedad los tres más comunes son fabricadas con semiconductores monocristalinos, policristalinos y de lámina fina [20], como se muestra en la *Figura 2.10*.

Paneles solares monocristalinos. Estos paneles están fabricados con celdas de silicio, siendo actualmente este semiconductor el de uso más común. Para la obtención de este tipo de celdas, purifican el silicio para fundirlo y posteriormente cristalizarlo en lingotes redondos, para después cortarlo en finas obleas, redondas o bien cuadradas. Las celdas de silicio monocristalino tienen un color uniforme que puede ser azul claro o bien un tono de azul muy oscuro, lo cual depende del tipo de película anti reflejante que se use.

Paneles solares policristalinos. Las celdas con las que fabrican estos paneles, están hechas con un silicio menos puro, lo cual permite que sea más barato que las celdas de tipo monocristalinas; si se comparan ambos tipos de silicio, los paneles de silicio policristalino tienen un rendimiento más bajo. Estos paneles se pueden identificar con facilidad ya que la superficie de las celdas no es de un color uniforme sino que tiene zonas de colores diferentes.

Paneles solares de lámina fina. En estos paneles se utiliza el silicio amorfo el cual se caracteriza por no tener estructura cristalina por el caso contrario de los anteriores. Estas celdas se forman por varias capas de silicio que son depositadas al vacío. Lo que se hace normalmente es formar una celda continua que ocupe todo el módulo, ya que se pueden fabricar de tamaños diversos. La eficiencia de estos paneles disminuye con respecto al tiempo y tiene una menor tolerancia ante agentes externos [21].

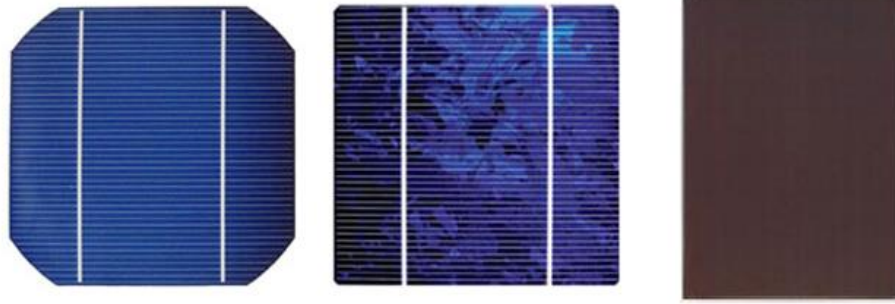


Figura 2.10. Diferentes celdas fotovoltaicas. Monocrystalina, policristalina y lámina fina.

Iluminación

La luminotecnia es el nombre que se le da a la ciencia que estudia diversas formas de producción de luz, control y aplicación de la misma, sirve para iluminar espacios con luz artificial y así cubrir necesidades específicas. La luz se compone de partículas energizadas denominadas fotones, cuya cantidad de energía y frecuencia determina la longitud de onda y el color. La unidad de medida de la luz de acuerdo al Sistema Internacional de Medidas son los Joules (J). Ya que no toda la luz produce una sensación luminosa, el ojo humano es sensible a determinada radiación y para cuantificarlas se deben definir las diferentes magnitudes de la luminotecnia [22].

Flujo luminoso

El flujo luminoso (ϕ) es la cantidad de luz emitida por una fuente luminosa en la unidad de tiempo sin importar la dirección, su unidad de medida es el Lumen (lm).

Iluminancia

Se define como el flujo luminoso que hay por unidad de superficie (S), el lux es su unidad de medida y su símbolo es (E).

$$E = \frac{\phi}{s} = \frac{lm}{m^2} = lux \quad \text{Ecuación 2-4}$$

Luminancia o brillantez

Es la intensidad luminosa (I) que se emite en una dirección determinada por unidad de superficie iluminada. Se puede ver como la luminosidad que una superficie crea sobre el ojo humano.

$$L = \frac{I}{S_{aparente}} = \frac{I}{S \cos \alpha} = \frac{cd}{m^2} \quad \text{Ecuación 2-5}$$

Rendimiento luminoso

La eficiencia de una fuente luminosa (η) es la relación que existe entre el flujo luminoso (ϕ) expresado en lumen y la potencia eléctrica consumida, su unidad de medida es el lumen/watt.

$$\eta = \frac{\phi}{w} = \frac{lm}{W} \quad \text{Ecuación 2-6}$$

Color

Los fotones viajan a través del espacio a la misma velocidad pero el campo electromagnético en algunos fotones fluctúa más que otros, esta fluctuación depende de la cantidad de energía que tenga el fotón, mientras más energía contiene el fotón la fluctuación (o frecuencia) es mayor. El ojo humano puede observar esta diferencia y es el efecto al que llamamos color. En la *Figura 2.11* se muestra la longitud de onda que corresponde al espectro electromagnético en el visible. Así que el color es la interpretación que hace nuestro sistema visual de la composición espectral de la luz que detecta el ojo. Un cuerpo iluminado absorbe todas las ondas electromagnéticas y refleja las restantes.

Es decir, la luz con una longitud de onda de 450 nm no es azul sino sólo es un efecto provocado en nuestro sistema visual.

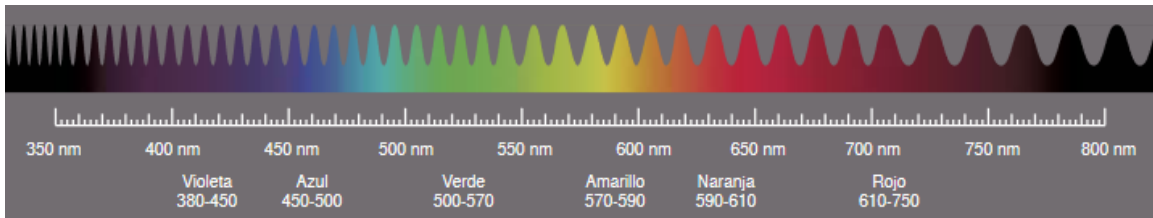


Figura 2.11. Longitud de onda de los colores

El color que presentan las lámparas se determina por su temperatura de color, se clasifican en luz fría con tonalidad azul, luz neutra con tonalidad blanca y luz cálida con tonalidad rojiza.

Temperatura de color

La temperatura de color es una medida científica utilizada para describir el nivel de “calidez” o “frialdad” de una fuente lumínica, basado en la luz que emite una fuente.

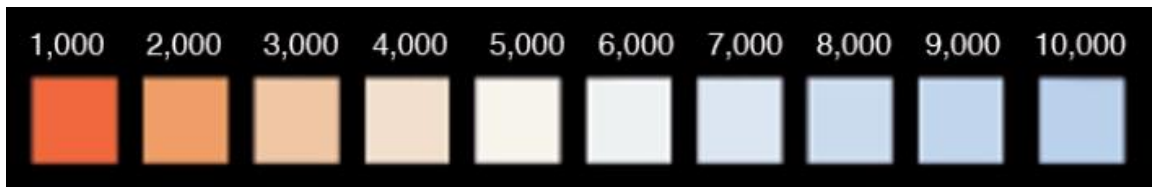


Figura 2.12. Temperaturas de color expresadas en grados Kelvin (K)

La luz solar corresponde a 5300 K, una lámpara incandescente convencional tiene unos 2700 K. De este modo una apariencia de color cálido estará por debajo de 3 300 K, el rango intermedio es 3 300 a 5 300 K mientras que la apariencia de color frío está por encima de 5 300 K (esto se muestra en la *Figura 2.12*) [23].

Curvas fotométricas

La luz emitida por una fuente de iluminación puede ser representada de manera gráfica, las curvas fotométricas son gráficas que marcan la distribución espacial de la luz referida en un plano cartesiano cuyas variables son la distancia y la intensidad luminosa. Desde luego, las curvas fotométricas dependerán fundamentalmente de las lámparas y la potencia que estas manejen. Generalmente las curvas fotométricas son empleadas para determinar las zonas de iluminación en espacios ya sea para casa habitación o bien en espacios públicos, como pueden ser los parques, o las vías de circulación de autos. En la *Figura 2.13* se muestran algunos ejemplos de curvas fotométricas, correspondiendo a diversas luminarias, con diferentes geometrías y potencias eléctricas.



Figura 2.13. Ejemplos de diferentes curvas fotométricas de acuerdo a su luminaria

Luminarias

De acuerdo a la Comisión Nacional de la Iluminación, las luminarias son dispositivos que transforman o filtran la luz emitida por las lámparas, junto con algunos elementos para fijar o proteger las lámparas. Existen muchos tipos de lámparas entre las cuales se encuentran las lámparas incandescentes, de descarga, de inducción, fluorescentes y de LEDs.

Lámparas incandescentes

La luz producida en estas lámparas es debido al calentamiento de un alambre o filamento que alcanza la incandescencia a causa de la circulación de corriente a través de él, por lo general se utiliza el tungsteno como material para este filamento. Las ventajas de estas lámparas son que su encendido es instantáneo, su costo es bajo y funciona bajo cualquier situación de encendido y como desventajas tiene una corta vida, baja eficiencia y alta sensibilidad a la variación de voltaje, afectando su eficiencia, tiempo de vida y flujo luminoso.

Lámparas de descarga

En estas lámparas se genera un arco eléctrico entre dos electrodos, a pesar de tener un arco pequeño genera mucho calor, luz y una alta presión en su interior. La luz es producida por excitación de gases o vapores metálicos, produciendo una tensión entre dos electrodos lo que tiene como consecuencia un flujo de corriente a través del tubo de descarga lleno de vapores metálicos. Este tubo contiene elementos que se gasifican y generan una radiación visible. Cuentan con ventajas como alta eficiencia, larga vida y buen control de luz. Su principal desventaja es la necesidad de balastos, la elevada temperatura que alcanzan y su alto consumo de potencia.

Lámparas fluorescentes

Estas lámparas producen luz gracias a un arco eléctrico que se forma entre dos electrodos y pasa a través de un tubo lleno de gas a baja presión y puede contener mercurio o un gas inerte; mientras, el material que se utiliza para los electrodos es el tungsteno el cuál es calentado y libera electrones. El gas es utilizado para facilitar el inicio del arco eléctrico dentro de la lámpara.

Lámparas de inducción

Este tipo de lámparas son como las fluorescentes a excepción que estas no tienen electrodos. Tienen una eficiencia alta, buen rendimiento de color y su tiempo de vida es de 70 000 a 100 000 horas. Con estas lámparas se tiene un ahorro de energía y en gastos de mantenimiento. Su fuente de energía es una bobina de inducción la cual es energizada; la bobina del secundario se representa por un gas a baja presión mezclado con vapor metálico

en el interior de la lámpara. Como consecuencia de la corriente inducida se aceleran las partículas del vapor metálico, dando como resultado la ionización de los átomos de vapor metálico y el incremento energético de los electrones libres. Cuando los electrones excitados se estabilizan se emite una radiación ultravioleta la cual choca con las capas fluorescentes dentro de la lámpara ocasionando que la luz sea emitida.

Lámparas LED

De sus siglas LED, un diodo emisor de luz, se puede decir que es una lámpara pequeña de estado sólido. Para que funcione requiere corriente directa, produce un haz estrecho y direccional por lo que el LED es ideal para iluminación de emergencia, decoración o señales de tránsito. Actualmente, los LEDs se aplican en otras áreas, ya que se hacen diversos arreglos con LEDs y se contienen en una carcasa para tener un equivalente a una lámpara; sus temperaturas de color son mayores a 3 000 K. Existen ventajas en el uso de estos dispositivos, tales como su bajo consumo energético, poco calor generado evitando un sobrecalentamiento y su duración esta entre 50 000 y 100 000 horas de vida.

Sistema Fotovoltaico

Nos referimos como un sistema fotovoltaico, a aquel conjunto de elementos que nos permitan el uso de energía eléctrica obtenida a partir de la energía solar. Un sistema fotovoltaico autónomo está constituido por un módulo fotovoltaico, baterías, inversor y un regulador de carga. Su estructura general se muestra por bloques en la *Figura 2.14*.

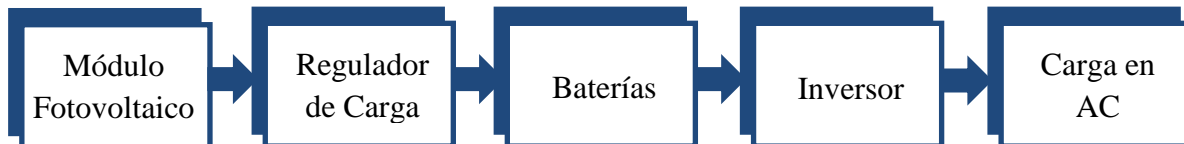


Figura 2.14. Diagrama de bloques de un Sistema Fotovoltaico Autónomo

Inicialmente se necesita el módulo para poder realizar la conversión de energía solar a energía eléctrica; debido a que estos dispositivos requieren de la luz solar, sólo operaran durante algunas horas del día, por ello es común utilizar algún sistema de almacenamiento; de este modo, las cargas que requieran energía durante las horas que el panel no esté operando, no interrumpirán su funcionamiento. A pesar de que existen formas diversas para realizar el almacenamiento de energía, la más común es con baterías y para garantizar que las baterías no se dañen, se requiere que estén suficientemente cargadas y que la energía generada por los módulos durante el día sea dirigida a dichas baterías; para esto es necesario utilizar un regulador o controlador de carga.

Ya que la energía generada por el sistema es de corriente directa, es necesario tener un inversor para poder convertir esa corriente directa a corriente alterna, si es que la aplicación así lo requiere; en el caso de que la carga funcione con corriente directa, no es necesario incluir este elemento.

Baterías

En un sistema fotovoltaico se utilizan baterías para poder proporcionar energía a las cargas que alimenta durante los periodos en los que no hay luz solar, como por ejemplo durante la noche o en días nublados en los que la radiación es menor o, por el contrario, cuando el sistema ha producido energía en exceso. Otra razón sumamente importante por la cual es necesario contar con baterías, es para mantener un voltaje de operación constante.

Existe una amplia variedad de baterías recargables que pueden ser utilizadas en los sistemas, tales como Plomo-Ácido, Níquel-Cadmio, Plata-Zinc, Plata-Cadmio, entre otras. Sin embargo, el requisito principal que debe cubrir una batería para ser utilizada en los sistemas fotovoltaicos es que deben soportar cargas y descargas profundas sin sufrir daño, además de su energía específica. Tomando en cuenta dichas características, una de las opciones más viables es la de utilizar baterías de Plomo-Ácido.

Uno de los parámetros relacionados con las baterías es el régimen de carga o descarga y la vida útil de la batería. Este régimen de carga o descarga es expresado en horas, dicho parámetro refleja la relación entre la capacidad nominal de una batería y la corriente a la que se carga o descarga. Por ejemplo, un régimen de descarga de 40 h para una batería con capacidad nominal de 200 Ah que se descarga a 5 A. Por otro lado, la vida útil de la batería lo determina el número de ciclos de carga-descarga que la batería puede soportar antes, teniendo como límite inferior el 20% de su capacidad nominal [24].

Reguladores de carga

Es importante que una batería no reciba una sobrecarga o una descarga muy profunda, para evitar daños o reducir su tiempo de vida útil, por ello debe de controlarse el flujo de carga que se tenga en el sistema fotovoltaico.

Los controladores o reguladores de carga, como su nombre lo indica, tienen la función de regular la energía proporcionada por los módulos fotovoltaicos. El regulador puede ser tipo paralelo o serie. Los de tipo paralelo funcionan con un transistor que deriva la corriente de los módulos hacia una carga resistiva de disipación; el tipo serie interrumpe la corriente hacia la batería en función de su voltaje; cuando el voltaje de la batería es menor al voltaje de equilibrio se enciende el interruptor que hará que la corriente fluya desde los módulos hacia las baterías hasta que vuelvan a alcanzar el voltaje de equilibrio, estos pueden ser montados en lugares pequeños, ya que su principal función no es disipar calor.

El controlador debe ser elegido para la capacidad correcta y las características deseadas de acuerdo a los requerimientos del sistema.

Cualquier sistema de energía debe incluir un controlador y una estrategia de control que determine las interacciones entre sus distintos componentes. El controlador, independientemente del tipo que sea, permitirá gestionar el flujo de energía del módulo a las baterías y la carga, basado en el voltaje de la batería y sus valores máximos y mínimos aceptables [24].

Existen reguladores que permiten que cuando las baterías tienen suficiente carga y los módulos siguen generando energía, se conecten directamente a los dispositivos que demanden la energía y se desconecten las baterías; en otros casos también puede administrar la energía que suministre a las cargas proporcionando una parte por los módulos y el resto por las baterías, claro que este tipo de reguladores suelen tener un mayor costo [18].

Inversores

Los aparatos que utilizamos en nuestra vida diaria como cargadores, televisión, computadoras, electrodomésticos etc., han sido diseñados para funcionar con corriente alterna (AC), es decir, esta corriente varía alternadamente entre valores positivos y negativos. En cambio, las baterías proporcionan corriente directa (DC), lo que significa que su polaridad es idealmente constante, por consiguiente, existen casos en los que en el sistema fotovoltaico se requiera convertir la energía en su forma DC a AC.

Para poder lograr esto, se utiliza un inversor que nos permita convertir esta corriente directa en corriente alterna. Los inversores se clasifican por la capacidad de potencia total, la cual varía desde algunas decenas o cientos de volts hasta megavolts, dependiendo de la aplicación requerida. El inversor se caracteriza por su eficiencia (η_{inv}) dependiente de la potencia. Además de convertir la corriente DC en AC, el inversor tiene como función mantener un voltaje constante en el lado DC y convertir la potencia de entrada (P_{in}) en potencia de salida (P_{out}) con la mayor eficiencia posible; esta eficiencia está dada por la ecuación 2-7 [24].

$$\eta_{inv} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{AC} I_{AC} \cos(\varphi)}{V_{DC} I_{DC}} \quad \text{Ecuación 2-7}$$

Dónde:

$\cos(\varphi)$ = Factor de potencia

I_{AC} = Corriente de salida del inversor en AC

V_{AC} = Voltaje de salida del inversor en AC

I_{DC} = Corriente requerida por el inversor en DC

V_{DC} = Voltaje de entrada para el inversor desde el lado DC

Diseño y fabricación de un módulo fotovoltaico (MFV)

Para realizar el diseño y fabricación de un módulo fotovoltaico se consideran algunos puntos generales, los cuales se enlistan a continuación:

1. Los materiales iniciales de las celdas deben ser de excelente pureza química.
2. El diseño de la celda debería mejorar la eficiencia de la generación de electricidad.
3. Las celdas deben ser producidas en serie con un costo mínimo, ser muy delgadas y con mayor área posible, esto último por razones de costos.
4. Probar y clasificar las celdas, para después interconectarlas y encapsularlas en módulos.
5. El diseño debe permitir fallas sin afectar el funcionamiento del sistema completo. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta la conexión de cadenas en paralelo, de tal modo que si falla una cadena, aún exista una generación de energía.
6. Los módulos suelen tener una garantía de al menos 20 años. El diseño debe tomar en cuenta el daño potencial del transporte, construcción de edificios en el sitio donde sea colocado, considerando la exposición a ambientes con cambios significativos de temperatura.
7. Los contactos eléctricos deben contar con una calidad mínima que les permita sobrevivir, evitar corrosión.
8. El módulo debe estar perfectamente sellado, de tal manera que no existan filtraciones de agua o polvo [25].

Celdas Fotovoltaicas y cintas de interconexión

La mayoría de las celdas solares fabricadas en todo el mundo son de silicio monocristalino, debido a su eficiencia, costo y el conocimiento de la tecnología de este material. Existen muchas variaciones en cuanto a los procesos de fabricación y mucha competencia comercial, por consecuencia existe una mejora continua en el desarrollo de celdas fotovoltaicas. Antes de trabajar con las celdas fotovoltaicas se clasifican, apartando las celdas que se encuentren defectuosas; la manera de clasificarlas es obteniendo la curva I-V de cada celda bajo ciertas condiciones de iluminación, verificando su funcionamiento correcto. El requisito fundamental en este proceso de verificación, es que las celdas solares presenten la mayor similitud posible en sus características eléctricas, en lo referente al voltaje a circuito abierto, corriente a corto circuito y factor de forma.

Para realizar un MFV se forman cadenas de celdas (*Figura 2.15*); es necesario que todas las celdas que se conecten tengan las mismas características eléctricas para evitar desequilibrios y tener un funcionamiento óptimo del módulo. Se pueden realizar conexiones en serie o paralelo dependiendo de los requerimientos del sistema.

La forma típica en paneles comerciales es el conectar todas las celdas en serie hasta conseguir el voltaje de las baterías que se utilicen, de este modo se conectan más paneles con las mismas características para obtener la potencia deseada. Para poder conectar las celdas fotovoltaicas se utilizan cintas delgadas de cobre y estaño, las cuales unen los diferentes polos de las celdas entre sí mediante soldadura de contacto, aunque este tipo de soldadura puede provocar daños físicos a la celda [26].

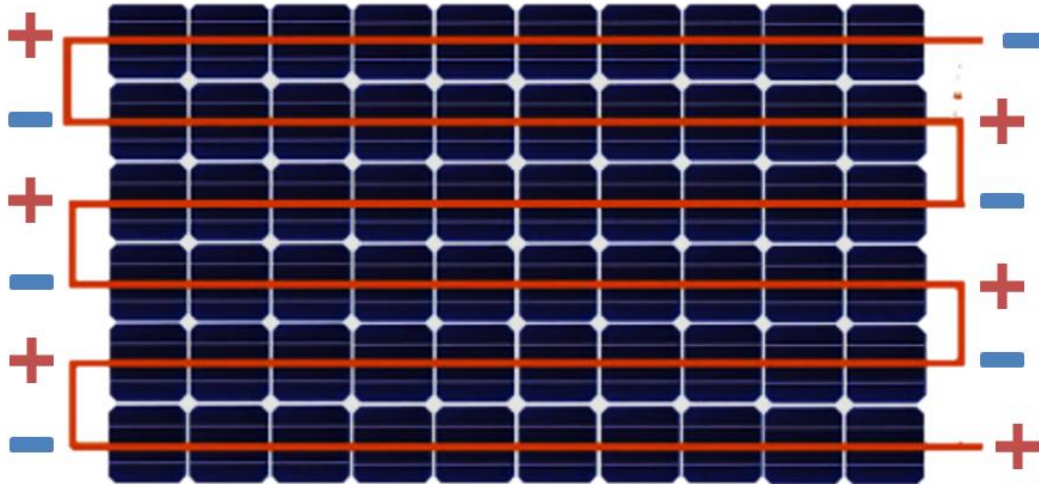


Figura 2.15. Ejemplo de conexión de celdas en serie para formar un módulo fotovoltaico

Encapsulado

Los MFV cuentan con un encapsulante el cual se encarga de proteger las celdas solares de los cambios de temperatura, exposición prolongada a los rayos ultravioleta, humedad, así como amortiguar posibles vibraciones o impactos que se puedan producir en su transporte o instalación; otra función que realiza este encapsulante es actuar como adhesivo entre las cubiertas del módulo fotovoltaico. Por estas razones el material debe contar con determinadas características, como proporcionar la suficiente rigidez a las celdas e interconexiones para evitar posibles fracturas.

Debe contar con ciertas propiedades de transparencia que no se deterioren con el tiempo y permitan una buena transmisión de la radiación solar. Los materiales más utilizados son siliconas, Etil-Vinil-Acetato (EVA) y Polivinil Butiral (PVB) entre otros. Es importante tomar en cuenta todo esto ya que de ello depende la durabilidad y el rendimiento del módulo y de este modo tener un tiempo de vida estimado de alrededor de 20 años o más.

Cubierta

La cubierta es la encargada de proteger las celdas fotovoltaicas de los agentes atmosféricos. En el caso de la cubierta frontal debe ser un material transparente que permita transmitir la mayor cantidad de luz posible; en los módulos comerciales comúnmente se utiliza el vidrio templado. Las ventajas de utilizar el vidrio templado son que cuenta con una alta transmisión de luz, baja reflexión al contar con una cara anti reflejante, mayor resistencia a los impactos y cambios repentinos de temperatura, ya que su temperatura máxima de trabajo es de 300° C. Otros fabricantes pueden utilizar acrílicos, siliconas o EVA.

En cuanto a la cubierta posterior, comúnmente es de color blanco para reflejar la radiación incidente entre los espacios formados en las celdas, ya que esta radiación incidente puede regresar a la parte frontal y ser refractada por las rugosidades del vidrio en su parte interior y finalmente terminen incidiendo en las celdas. Ésta cubierta se conforma usualmente por capas de TEDLAR (fluoruro de polivinilo), la cual tiene además un cierto contenido de aluminio el cual incrementa la disipación térmica del módulo.

Marco de soporte

El enmarcado del MFV es el encargado de dar soporte y rigidez al panel, que permita protegerlo de posibles golpes laterales que pudiese recibir, además que es el que finaliza el sellado del módulo y permite que las otras capas se compacten de una mejor manera. El aluminio anodizado es el material utilizado comúnmente para realizar el marco de soporte, las estructuras realizadas con este aluminio son aptas para todo tipo de clima además de una gran firmeza estructural.

Contactos

Los contactos nos permitirán utilizar la energía producida por el módulo fotovoltaico. Suelen ponerse en cajas de conexión para protegerlos de la intemperie y que pueden contener cables de salida. En esta caja también pueden estar contenidos los diodos de protección [27]. En la *Figura 2.16* se muestran las partes que constituyen el MFV.

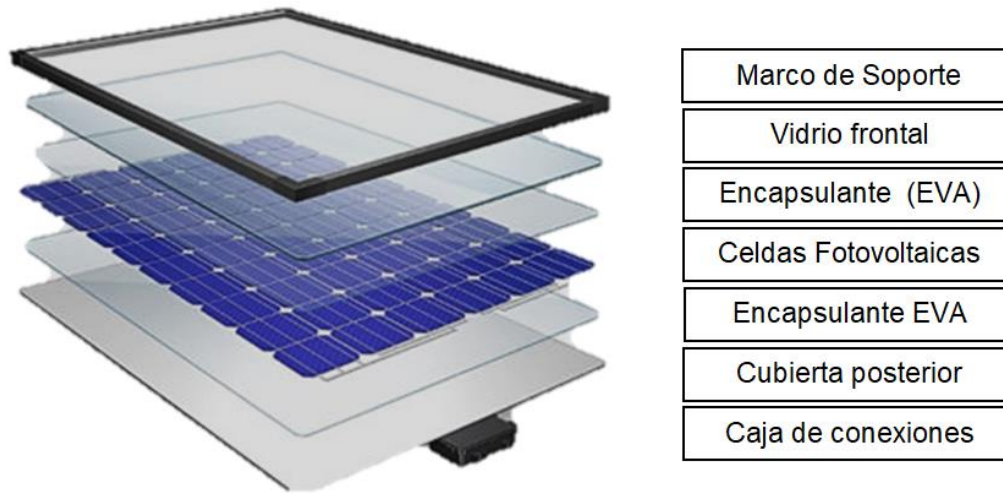


Figura 2.16. Partes de un módulo fotovoltaico

Diseño de un sistema fotovoltaico autónomo

El diseño de un sistema fotovoltaico autónomo es un concepto que abarca todas las tareas y especificaciones que se han de realizar y tomar en cuenta para que un sistema fotovoltaico funcione de manera satisfactoria, con la mayor fiabilidad. Existirán diversos factores que afectarán a este diseño tales como el consumo o perfil de consumo de las cargas que se van a alimentar, la instalación fotovoltaica y la radiación solar del lugar donde se ubicará la instalación [28].

Radiación Solar

La radiación emitida por el sol y su relación espacial con la tierra dan como resultado una intensidad de radiación solar casi fija fuera de la atmósfera terrestre. Se le conoce como constante solar (G_{sc}) a la energía del sol por unidad de área recibida, la cual tiene un valor estándar de 1367 W/m^2 . La radiación solar no llega de manera íntegra a la superficie terrestre, ya que al entrar por la atmósfera es dispersada; otra parte puede ser reflejada y otra es recibida de manera directa [29].

Radiación directa. Es aquella radiación recibida en la Tierra proveniente directamente del sol en línea recta, sin desviarse en su paso por la atmósfera terrestre.

Radiación difusa. Se refiere a la radiación solar dispersada por diferentes componentes en la atmósfera. La radiación difusa es recibida en la tierra a través de las nubes en el cielo.

Radiación reflejada. Corresponde a la radiación directa y difusa que es reflejada por el suelo u otras superficies.

Radiación global. Es la radiación total incidente sobre una superficie; por lo tanto es el resultado de la suma de todas las anteriores, en el caso de las superficies horizontales no se toma en cuenta la radiación reflejada. La *Figura 2.17* muestra las diversas componentes de la radiación global.

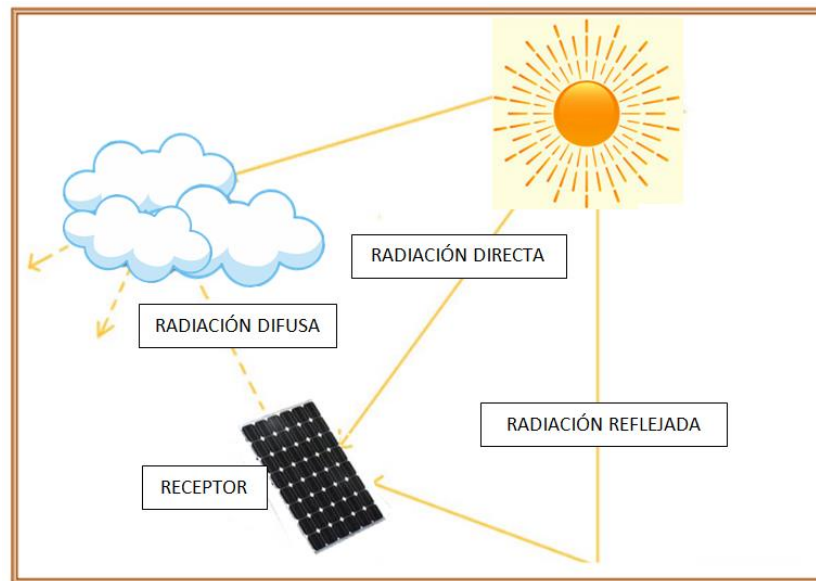


Figura 2.17. Radiación solar recibida en una superficie

Irradiación. Corresponde a la energía incidente por unidad de superficie en función del tiempo, su unidad de medida es kWh/m^2 . Habitualmente se mide la irradiación sobre el plano horizontal. Su valor anual varía de acuerdo a la latitud del lugar y a la estación del año.

Irradiancia. La velocidad a la que la energía radiante incide sobre una superficie por unidad de área, medida en W/m^2 . La Irradiancia varía diariamente debido al efecto de rotación de la tierra y de acuerdo a la estación su valor máximo se da en ciertas horas del día, principalmente al mediodía [29].

Ángulo de incidencia de radiación solar

Debido al movimiento de rotación de la Tierra, logramos percibir las diferentes posiciones del sol a lo largo del día, partiendo desde este hecho, podemos saber que el sol tiene diferentes ángulos de incidencia en una superficie a lo largo del día. Cuando se realiza la instalación de módulos fotovoltaicos se debe tomar en cuenta el ángulo de inclinación óptimo, para ello se debe tomar en cuenta la modificación del ángulo de incidencia de la radiación solar para lograr la máxima captación solar posible.

Declinación (d)

Ángulo formado por el sol y el cenit, ubicado en el plano del ecuador. Este ángulo varía a lo largo del año (*Figura 2.18*).

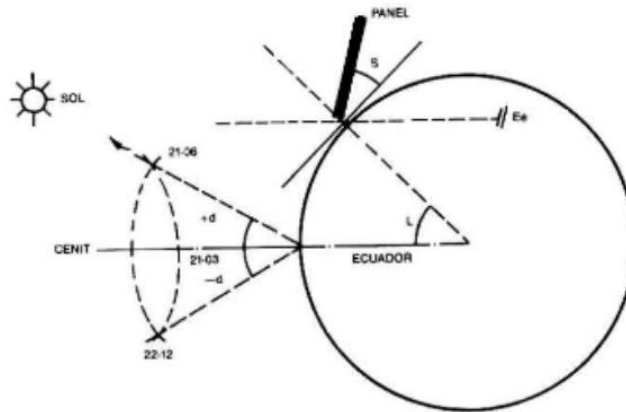


Figura 2.18. Ángulo de declinación

Inclinación (s)

Se refiere al ángulo formado por el módulo solo y la horizontal del terreno, este ángulo debe coincidir con la latitud del lugar donde se instale.

Orientación (g)

Es el ángulo formado por la perpendicular de la superficie del módulo y la dirección del meridiano (*Figura 2.19*). De forma general se toma hacia el sur en caso de estar en el hemisferio norte y hacia el norte en caso de estar en el hemisferio sur, el ángulo se considera positivo hacia el este y negativo hacia el oeste.

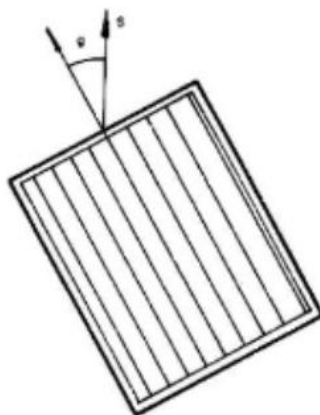


Figura 2.19. Ángulo de orientación

Ángulo Horario (w)

Este ángulo está formado por la dirección del meridiano y la sombra proyectada por una vertical, tomando el origen al medio día solar en el que el ángulo horario es 0° (Figura 2.20).

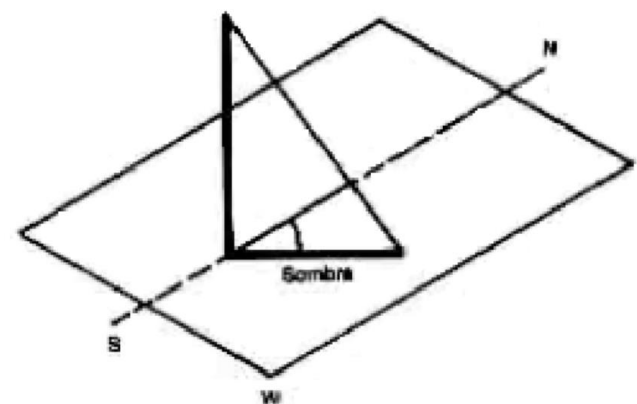


Figura 2.20. Ángulo horario

A partir de esto, el ángulo de incidencia de radiación solar (A) está formado por la normal de los módulos fotovoltaicos (\tilde{N}) y los rayos provenientes del sol, este ángulo depende de las variables mencionadas anteriormente, las cuales se ilustran en la Figura 2.20 y está dado por la Ecuación 2-9 [30].

$$\begin{aligned}
 A = \cos^{-1} & [\sin d * \sin L * \cos s] - [\sin d * \cos L * \sin s * \cos g] \\
 & + [\cos d * \cos L * \cos s * \cos w] \\
 & + [\cos d * \sin L * \sin s * \cos w * \cos g] \\
 & + [\cos d * \sin s * \sin g * \sin w]
 \end{aligned}$$

Ecuación 2-8

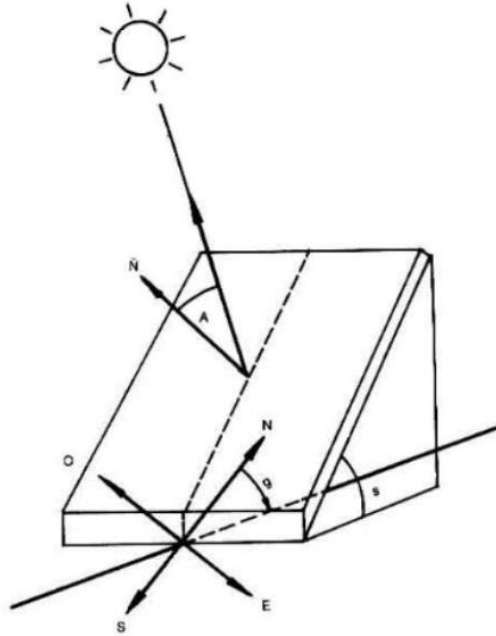


Figura 2.21. Ángulo de incidencia

Ubicación y orientación

Existen diversos aspectos para tomar en cuenta antes de la instalación de un módulo fotovoltaico, como el caso de la ubicación en la que se realizará la instalación y la orientación e inclinación en la que será colocado el módulo fotovoltaico, ya que la inclinación del MFV permite aumentar la captación de radiación solar.

El sistema de coordenadas geográficas permite especificar una ubicación en la tierra dada por dos ángulos, longitud y latitud (ver *Figura 2.22*). El plano de referencia tomado es el plano ecuatorial el cual es perpendicular al eje de rotación, La latitud se define como el ángulo entre el plano ecuatorial y un lugar en la superficie de la tierra. Para determinar la longitud, es necesario un plano perpendicular a la línea del Ecuador como el eje de rotación, este plano creará un círculo de intersección que va de un polo a otro; estos círculos son llamados meridianos. La radiación solar recibida en el planeta Tierra varía de acuerdo a la latitud del lugar y la época del año.

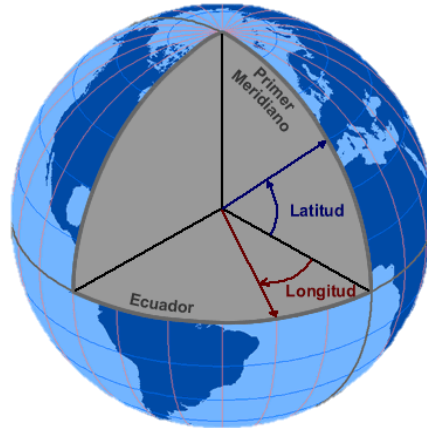


Figura 2.22. Latitud y longitud

La orientación del panel fotovoltaico optimizará la captación de los rayos solares, la inclinación de una superficie permite aumentar la captación de energía solar, por lo que es necesario buscar un ángulo de inclinación para orientar los paneles respecto al plano horizontal; en la mayoría de los casos el ángulo coincide con la latitud del lugar en el que se realizará la instalación. En forma general un MFV deberá estar orientado hacia el sur con una inclinación de aproximadamente 30° en la latitud que corresponde a la ciudad de México [31].

Existen diversos métodos de evaluación de orientación y ángulo de inclinación óptimo, como lo es el modelo difuso isotrópico, modelo de Lui y Jordan, modelo de Klucher o el modelo de Pérez, Ineichen, Michalsky y Stewart.

Además de tomar en cuenta la ubicación geográfica, un factor importante es en dónde será colocado el módulo fotovoltaico; se deben buscar lugares libres de sombras a todas horas, libres de impactos, pueden ser instalados en lugares altos, sobre techos o postes. También es importante utilizar una estructura de soporte adecuada para el MFV.

Dimensionamiento de un sistema fotovoltaico

La energía requerida que debe proporcionar el sistema FV dependerá de la potencia consumida por los equipos que se desee hacer funcionar y del tiempo total que estén operando cada día. Existe una variedad de métodos de dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos, pero de manera sencilla se puede realizar lo siguiente [32]:

1. Estimación del consumo

Es necesario calcular la energía requerida diariamente, para ello se determina la potencia de las cargas que tendrá el sistema, así como determinar el tiempo promedio que funcionará la carga que se conecte a los módulos. Se determinará dicha energía requerida con la siguiente ecuación

$$E = \sum P_i * t_d \quad \text{Ecuación 2-9}$$

Dónde:

E= Energía consumida (AC o DC) [Wh]

P_i= Potencia nominal [W]

t_d= Tiempo de uso diario [h]

Para hacer el cálculo del consumo eléctrico total se debe tomar en cuenta los rendimientos de las distintas etapas, de este modo la energía demandada por el sistema en un día estará dada por la ecuación 2-11 [33].

$$E_T = \frac{E}{R} \quad \text{Ecuación 2-10}$$

Donde R es un parámetro que considera el rendimiento global de la instalación, el cual está expresado en la ecuación 2-12

$$R = (1 - K_b - K_c - K_v) \left(1 - \frac{K_a}{P_d} N\right) \quad \text{Ecuación 2-11}$$

Dónde:

K_b = Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador

0.05 para sistemas que no demanden descargas intensas

0.1 para sistemas con descargas profundas

K_c = Coeficiente de pérdidas en el inversor

0.05 para inversores con onda sinusoidal pura

0.1 para inversores en otras condiciones de trabajo

K_v = Coeficiente de pérdidas varias, como efecto joule, rendimiento global de la red etc

0.05 a 0.15 (valores de referencia)

K_a = Coeficiente de autodescarga diaria

0.002 para baterías de baja autodescarga (Ni-Cd)

0.005 para baterías estacionaria de plomo-ácido

0.012 para baterías de elevada autodescarga (baterías de automotores)

P_d = Profundidad de descarga diaria de la batería

No deberá exceder el 80% de la capacidad nominal de la batería

N = Número de días de autonomía de la instalación

Se consideran los días en que el sistema deberá operar bajo una mínima irradiación y se consumirá más energía de la que el SFV pueda generar.

Valores de referencia de **2 a 5**.

2. Dimensionado de módulos fotovoltaicos

El número de módulos que se deben utilizar puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación

$$N_T = \frac{E_T}{P_p G_m P_G} \quad \text{Ecuación 2-12}$$

Dónde:

E_T = Consumo de energía total del sistema [Wh]

P_p = Potencia pico del módulo

G_m = Radiación global sobre una superficie inclinada

P_G = Factor global de pérdidas (varía entre 0.65 y 0.9)

3. Dimensionado del sistema de almacenamiento

Existe dos aspectos que se deben tomar en cuenta para hacer el dimensionado: la máxima profundidad de descarga, la cual se refiere al nivel máximo de descarga que se le permite a la batería antes de la desconexión del regulador. En baterías de plomo-ácido un valor adecuado es de 0.7, es decir, la carga mínima que deberá permanecer en la batería después del ciclo de trabajo, deberá estar entre el 25 y 30 %. El otro aspecto a tomar en cuenta es los días de autonomía, lo que nos indica el número de días consecutivos que en ausencia de sol, el sistema de almacenamiento es capaz de cubrir el consumo sin pasar la profundidad máxima de descarga de la batería.

Las siguientes ecuaciones expresan la capacidad que deberán tener las baterías para asegurar los días de autonomía.

$$C_n(Wh) = \frac{E_T N}{P_d} \quad \text{Ecuación 2-13}$$

$$C_n(Ah) = \frac{C_n(Wh)}{V_B} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

Dónde:

C_n = Capacidad nominal de la batería [Wh o Ah]

E_T = Consumo de energía total del sistema [Wh]

P_d = Máxima profundidad de descarga de la batería

V_B = Tensión nominal de la batería [V]

La batería se elegirá de tal forma que su capacidad nominal sea aproximada a la calculada, redondeando el valor para obtener un margen de seguridad.

4. Dimensionado del Controlador de Carga

El objetivo será obtener la corriente máxima que va a circular por la instalación, que en este caso corresponde a la corriente que produce el generador (los MFVs), particularmente cuando los MFVs se encuentran en corto circuito. La corriente I_{max} que produce el generador es la suma de las corrientes que producen los módulos funcionando. Se obtiene mediante la ecuación

$$I_{max} = I_{sc} N_T \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Dónde:

I_{max} = La corriente máxima que el regulador manejará

I_{sc} = La corriente máxima suministrada por cada MFV

N_T = Número de MFVs que integran el generador del sistema

5. Dimensionado del inversor

El voltaje de entrada al inversor no siempre será constante, por lo tanto, debe ser capaz de transformar distintos voltajes de un determinado rango, normalmente de un 15 %. Para dimensionar el inversor, debe ser tomada en cuenta la potencia que demanda la carga en AC, de modo que el inversor que se utilice debe tener una potencia igual o superior a la máxima demandada por la carga, evitando un sobredimensionamiento.

6. Dimensionado del cableado

Existen pérdidas debido a las caídas de tensión en los cables, la pérdida de energía debe ser menor que una cantidad prefijada, su valor puede calcularse con las siguientes ecuaciones.

$$P_{PC} = I^2 R_C \quad \text{Ecuación 2-17}$$

$$R_C = \frac{\rho L}{S} \quad \text{Ecuación 2-18}$$

Dónde:

P_{PC} = Potencia de pérdidas en el conductor [W]

I = Corriente que circula por el conductor [A]

R_C = Resistencia óhmica del conductor [Ω]

ρ = Resistividad del conductor [$\Omega \text{ mm}^2 / \text{m}$]

L = Longitud del conductor [m]

S = Sección transversal del conductor [mm^2]

Para calcular la sección transversal de los cables tomando en cuenta el valor de la caída de voltaje en los cables, se utiliza la *Ecuación 2-19* la cual se obtiene a partir de la *Ecuación 2-18*.

$$S = \frac{2\rho IL}{\Delta V} = \frac{2\rho LP}{V \Delta V} \quad \text{Ecuación 2-159}$$

Dónde:

ρ = Resistividad del conductor

P = Potencia activa de la carga

L = Longitud del conductor

V = Voltaje de alimentación

I = Corriente que circula por el conductor

ΔV = Caída de voltaje en los cables conductores

S = Sección transversal del conductor

Capítulo 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

En este Capítulo se presenta el proceso empleado para la fabricación del SFV completo. El procedimiento consiste en mostrar las técnicas empleadas para diseñar y construir las diferentes partes del sistema, de acuerdo a las especificaciones requeridas y, subsecuentemente, presentar los resultados obtenidos, básicamente eléctricos. En este Capítulo también se muestran los resultados del sistema completo, así como sus características de funcionamiento en un plano correspondiente al espacio real de aplicación.

Para realizar el diseño del sistema fotovoltaico autónomo (SFVA) destinado para usarse en iluminación, existen diversos factores que se deben tomar en cuenta y así poder obtener como resultado un conjunto de dispositivos, que acoplados funcionen de manera óptima. En primer lugar, como se señaló en el capítulo 2, se deben plantear de manera general los requerimientos del sistema, que en este caso se usará para el alumbrado en áreas de estacionamientos en espacios deportivos de la BUAP, específicamente del estadio Universitario BUAP.

El Capítulo 2 será la base para los cálculos requeridos en el diseño de las partes constituyentes. Según el procedimiento que se debe seguir, inicialmente se verán los requerimientos de energía que la carga demanda, para después proceder con el diseño y fabricación del MF. En principio se hará una descripción del espacio donde el prototipo de sistema FV estará instalado y las características de las luminarias, según su colocación, potencia de consumo requerido, período de tiempo de trabajo, etc. La *Figura 3.1* muestra el diagrama general del sistema FV autónomo, donde se aprecia que la luminaria con LEDs será esencialmente la única carga, si bien no se deberán despreciar las caídas de voltaje en las líneas de interconexión y demás dispositivos, lo cual se ha considerado en el Capítulo anterior.

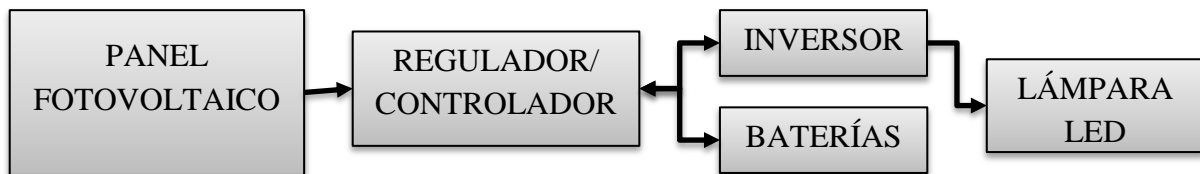


Figura 3.1. Diagrama general del sistema

El espacio destinado para la instalación del sistema será el exterior del estadio universitario BUAP, específicamente en el área de la periferia, que forma parte del estacionamiento para vehículos.

En esta área se encuentran ubicados los postes, donde en uno de ellos, concretamente el ubicado en la parte norte del estadio, se instalará el sistema autónomo que constará del MFV, las luminarias y la caja metálica que contiene el controlador de carga, el inversor y las baterías. Esta zona se ilustra en la *Figura 3.2* marcada por una línea de color rojo.

Como se mencionó antes, el requerimiento de partida será la carga demandada por las luminarias. El parámetro a determinar es la Iluminancia, expresada en Luxes. Esta consiste en el flujo luminoso en Lúmenes dividida por el área de iluminación. Normalmente el flujo luminoso se especifica por el vendedor, así como la potencia eléctrica de consumo de la lámpara. Por otro lado, se debe señalar que en términos de la carcasa metálica que contiene la lámpara, inicialmente se prefirió adoptar una cubierta del tipo suburbano fabricada con aluminio. Sin embargo, por razones de economía y durabilidad se decidió emplear las carcasas originales, es decir, aquellas que formaban parte de las luminarias alimentadas por energía convencional. A estas cubiertas se les adaptaría un nuevo dispositivo de iluminación, que en principio debía ofrecer mayores ventajas en eficiencia, costo, durabilidad y desde luego, menor potencia de consumo, pero cumpliendo con el requerimiento de iluminar adecuadamente la zona o área original.



Figura 3.2. Estadio universitario BUAP

Con relación a esta carcasa que se usó, un punto importante a considerar es el diseño de su construcción, en función de la protección contra el ingreso de partículas sólidas o líquidas, el cual debe cumplir con la norma internacional CEI 60529 (Degrees of Protection), de acuerdo a la cual, el requerimiento de protección para el uso en este caso debe ser IP65. Esto significa, considerando los dígitos 6 y 5, que el polvo no entra bajo ninguna circunstancia, así como una protección completa contra el ingreso de humedad. Respecto a este punto, se puede señalar que las luminarias que se han diseñado y fabricado en nuestro grupo, satisfacen totalmente estos requerimientos, lo cual se constata en los sistemas que se han instalado desde hace 8 años.

Con respecto a las carcassas que finalmente se usaron, que son las originales, éstas fueron reforzadas con sellos de goma y silicón en los marcos metálicos que sostienen el vidrio templado, así como los accesos de los cables de interconexión, lo que garantiza que la lámpara y las conexiones internas no sufran ningún deterioro por agentes externos.

Cabe mencionar que estas medidas fueron necesarias, una vez que las condiciones de sellado de las carcassas eran notablemente deficientes.

Con relación a los requerimientos de iluminación de la lámpara que debe usarse, se consideró la Norma NOM-013-ENER-2013, de la cual se obtiene un valor de Iluminancia promedio de 25 Luxes para estacionamientos abiertos. Empleando así mismo, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-STPS-2008, se tiene establecido que los niveles de iluminación para estacionamientos son:




Estacionamientos Cubiertos: 50 Luxes

Estacionamientos Abiertos: 20 Luxes

El área de iluminación para la luminaria original, de acuerdo a la geometría y dimensiones de la carcassa, así como la altura del poste se estimó entre 300 y 350 m², tomando en cuenta las dos luminarias colocadas en el poste, la cual fue calculada directamente cuando las luminarias originales estaban encendidas. Esto ofrece la mejor aproximación para ser empleada en el cálculo del flujo luminoso (ϕ), requerido para la lámpara que será instalada. Si se considera el promedio de las iluminancias establecidas por las normas, así como el área máxima de 350 m², resulta un flujo luminoso de 7800 Lumens, es decir, cada lámpara deberá emitir un flujo luminoso de 3900 Lumens.

En términos de la tecnología sobre el tipo de lámpara que será empleada, la mejor alternativa actualmente, fuera de toda discusión, es la de tecnología LED, ya que ofrece diversas ventajas como la durabilidad, el menor costo y, algo fundamental para la aplicación empleando módulos fotovoltaicos, que es el bajo consumo de potencia, aun teniendo flujos luminosos considerables. La *Tabla 3.1* muestra algunos ejemplos de luminarias comerciales con diferentes consumos de potencia y flujo luminoso.

Tabla 3.1. Tabla comparativa de luminarias disponibles en el mercado

Luminaria	Consumo (W)	Flujo luminoso (lm)	Voltaje de operación (V)
Philips Roadfocus 	72	8 140	120 – 277 (AC)
EPI-SL-EPCOM INDUSTRIAL 	60	7 200	12 / 24 (DC)
Luminaria “Mundo Lucido” 	100	8 000	110 – 240 (AC)

Se observa en la tabla anterior que las luminarias más comunes para el alumbrado público varían entre un consumo de 60 y 100 W en promedio y su costo depende de la marca. En este punto cabe mencionar que el consumo de cada lámpara de las luminarias originalmente instaladas era de 80 W, potencia suministrada por la red convencional. Para este trabajo es conveniente contar con lámparas de menor consumo, pero con características de iluminación que estén dentro de las normas establecidas, una vez que serán usadas en conjunción con MFVs y baterías para almacenamiento de carga.

En la *Figura 3.3* se muestra una buena alternativa de lámpara disponible en el mercado local.



Figura 3.3. Lámpara (Matriz de leds)

De acuerdo con los datos proporcionados por el fabricante, esta lámpara tiene las siguientes características:

- Potencia: 24 W
- Voltaje: 85-265 (VAC)
- Flujo luminoso: 4000 lm
- Temperatura de color 5600 K
- Duración: 35000 horas

Se observa que este arreglo de LEDs satisface el requerimiento de flujo luminoso, además de tener un consumo significativamente menor de las lámparas originales. Cuenta con una lámina de disipación de aluminio en la parte posterior, aunque será necesario incluir un disipador adicional, el cual será instalado dentro de la carcasa y en contacto con la cubierta para facilitar la disipación de calor. Esta clase de lámparas ha sido intensamente probada en nuestro laboratorio durante dos semanas funcionando sin interrupción, y sin haber mostrado algún cambio en sus características de iluminación. Adicionalmente, la lámpara funciona con el voltaje de línea (127 VAC), lo que permitirá emplear alambre de interconexión delgado, teniendo así un ahorro económico sin tener caídas de voltaje importantes.

Finalmente, la temperatura de color con valores de CCT (Temperatura de Color Correlacionada) más altos (5600 K) es recomendable en el caso de estacionamientos abiertos, ya que, según estudios de la DOE (Department of Energy) de Estados Unidos, esto produce luz más brillante que genera una percepción de mayor seguridad y comodidad.



Figura 3.4. Luminaria que será usada en la instalación del SFV autónomo

En la Figura 3.4 se muestra la luminaria terminada conteniendo el arreglo de LEDs. En el interior de la carcasa se incluyeron soportes metálicos que fijan el arreglo, así como se añadieron elementos de reflexión de lámina cromada para reducir pérdidas de luz por absorción.

Dimensionamiento y fabricación del panel fotovoltaico

Como se indicó en el Capítulo 2, para determinar la potencia que deberá entregar el panel fotovoltaico, es necesario conocer el Consumo Energético Efectivo que se determina por las Ecuaciones 2-10 y 2-11. Se considera la potencia de la lámpara seleccionada (*Figura 3.3*), tomando en cuenta que son dos lámparas de 24 W para la instalación y que funcionarán diariamente por un período de 11 horas. Considerando valores de 0.05 para los factores de corrección K_b , K_c y K_v , así como $K_a = 0.005$ para baterías de Pb-ácido y limitando la descarga de las baterías en un 30 %, algo que es muy recomendable ya que esto alarga de manera su vida útil, resulta un valor de $R = 0.836$. Esto da como resultado un Consumo Energético Efectivo o total de 631.6 Wh.

Los paneles solares FV producen energía según su tamaño, eficiencia y cuanta radiación solar reciban. Los disponibles en el mercado internacional tienen una eficiencia de conversión menor que el 20 %. La potencia que puede alcanzar un panel FV y la potencia que entrega son dos temas diferentes. Si un determinado panel FV está calificado para una cierta potencia, entonces rendirá hasta ese nivel con las condiciones más favorables de irradiancia incidente (1000 W/m^2). Para este trabajo de tesis uno de los objetivos es fabricar el panel FV o los requeridos, de acuerdo a la necesidad de proporcionar la energía necesaria para el consumo demandado.

En este caso, para poder determinar la potencia pico del panel solar que satisfaga la demanda diaria, se debe estimar el número de *Horas Solar Pico* que recibe el arreglo FV en la zona donde el sistema FV se habrá de instalar, siendo para este caso la ciudad de Puebla.

Se define como *HSP* el tiempo en horas en el que se produce la mayor cantidad de radiación solar en un día. Una Hora Solar Pico es una hora de 1000 W/m^2 de luz solar. En la *Figura 3.5* se aprecia la interpretación gráfica de *HSP*. Con esta aproximación se puede predecir cuánta potencia puede generar un determinado panel solar diariamente, multiplicando la potencia pico por la cantidad *HSP*.

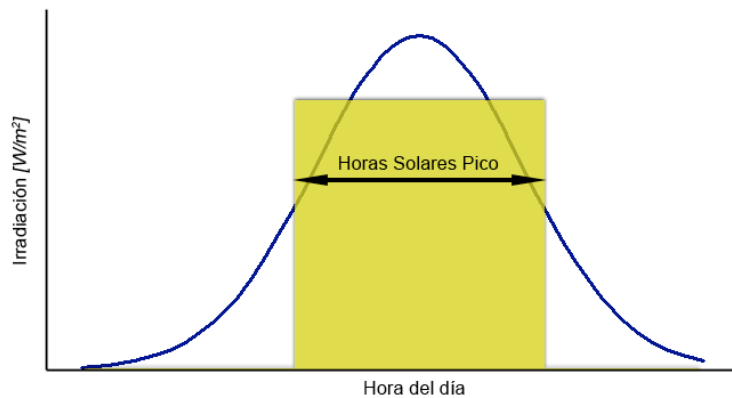


Figura 3.5. Interpretación gráfica de HSP

En la *Tabla 3.2* se muestran los valores de *HSP* de cada mes en la ciudad de Puebla, durante el periodo de años 2015-2020. A manera de ejemplo, se observa que en el año 2020 se tuvo como promedio un valor de *HSP* igual a $5.75 \text{ KWh/m}^2/\text{día}$; esto significa que la ciudad de Puebla recibe 1000 W/m^2 durante 5.75 horas promedio por día durante el 2020.

Los valores de la *Tabla 3.2* fueron obtenidos de la plataforma de la NASA, POWER, Data Access Viewer, Prediction of Worldwide Energy Resource.

Cálculo de la Potencia Pico del Panel Fotovoltaico

Una vez conociendo el Consumo Energético Efectivo igual a 631.6 Wh , el cálculo de la potencia pico W_p requerido para el panel fotovoltaico, se calcula mediante el valor *HSP* para la zona donde el sistema quedará instalado. En este caso empleando la *Tabla 3.2* se tomará el mes del año con el valor más bajo de *HSP*, el cual corresponde a Enero y tiene un valor de 4.36, de tal modo que la potencia pico requerida es igual a 144.9 W , por lo que se realizará un panel de 150 W , lo cual es una potencia más común en los PFV. Deberá tomarse en cuenta que el panel FV se orienta hacia el Sur y tiene una inclinación de 30° , de acuerdo a lo descrito en el Capítulo 2.

Tabla 3.2. Hora Solar Pico en función de la latitud de la Ubicación.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	An.
2015	4.88	5.57	5.52	6.19	5.74	5.56	5.9	5.83	4.65	4.93	4.49	4.44	5.31
2016	4.36	5.83	5.57	6.33	6.16	5.3	5.75	5.55	5.05	5.25	4.44	4.79	5.36
2017	5.52	6.05	6.16	6.59	5.69	5.95	5.31	5.71	4.56	4.96	5.74	5.26	5.62
2018	5.04	5.49	6.47	6.16	6.78	5.45	6.53	5.47	5.34	4.59	4.52	4.89	5.56
2019	5.2	5.99	6.57	6.69	6.6	6.61	5.81	6.31	5.47	4.84	4.73	4.94	5.73
2020	4.88	5.82	6.67	6.52	6.49	6.31	5.9	5.54	4.61	6.08	5.36	4.78	5.75

Fuente: NASA. POWER / Data Access Viewer

Medición e Interconexión de Celdas Solares

Se debe indicar que para la construcción de los paneles fotovoltaicos se usan celdas solares de silicio mono cristalino cuadradas de diferentes potencias; particularmente, para los paneles de 150 W_p se usan celdas de esquinas recortadas con tres colectores, como la mostrada en la Figura 3.6. Las celdas tienen dimensiones de 156 mm por lado, los colectores tienen un baño de plata y la película anti reflejante es de TiO₂ lo que produce la tonalidad azul. La parte posterior es cubierta en su totalidad por una película de aluminio con plata depositada por serigrafía. La potencia máxima de las celdas es de 4.3 W en condiciones de Irradiancia estándar (1000 W/m²) y se especifica una eficiencia en el rango 17-18 %. El panel fotovoltaico consta de 36 celdas conectadas en serie, lo que es un estándar normal para los módulos de 150 W.



Figura 3.6. Celda fotovoltaica de silicio monocristalino

Uno de los requerimientos más importantes que deben satisfacer las celdas solares para la fabricación de un panel fotovoltaico, es la similitud en sus parámetros eléctricos, los cuales pueden determinarse al medir la curva Corriente-Voltaje (I-V) de las celdas solares. Esto es debido a que el funcionamiento del panel estará determinado por la celda con los parámetros eléctricos más bajos.

De modo general, la curva I-V se obtiene iluminando la celda solar con un simulador solar y usando un dispositivo electrónico que permite un barrido de voltaje a la celda solar y leer los valores correspondientes de corriente. El arreglo empleado se muestra en la *Figura 3.7*.

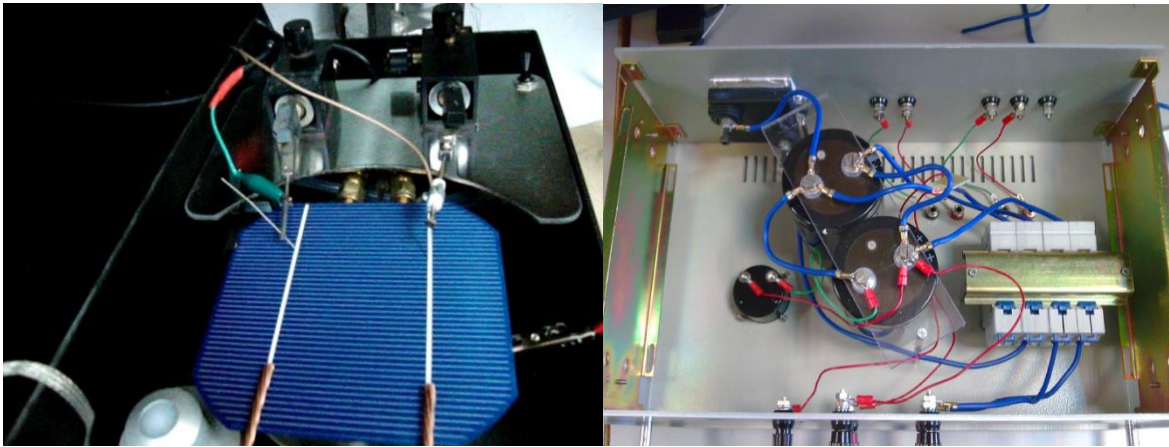


Figura 3.7. Celda solar con puntas de contacto y dispositivo electrónico para medir las curvas I-V de la celda solar bajo iluminación (1000 W/m²) con simulador solar.

Estas mediciones permiten clasificar a las celdas solares en diferentes grados de calidad dependiendo de la eficiencia medida. Sin embargo, es importante señalar que actualmente la similitud en las características eléctricas de las celdas solares que se han observado es muy notable, particularmente en las celdas de 4.3 W que se han adquirido en los dos últimos años. Este hecho ha permitido simplificar el proceso de medición de las celdas solares, limitándose a medir I_{sc} y V_{oc} , observando una dispersión muy pequeña en estos valores para cantidades de hasta 500 celdas solares medidas.

La siguiente etapa del proceso consiste en la interconexión de las cadenas de celdas solares. La intención es alcanzar valores de voltaje y/o corriente mayores con arreglos en serie-paralelo. Para el panel fabricado todas las celdas se conectaron en serie, con el objeto de lograr un voltaje de salida (18 – 19 V) que permitiera el uso de baterías de 12 V. En este caso, como una sugerencia de la Vicerrectoría de Investigación y Estudios de Posgrado, se utilizó una geometría no convencional para el panel que fuera estética y tuviera el distintivo de un producto tecnológico desarrollado y construido en nuestra institución. En este sentido se diseñó la geometría que se muestra en la *Figura 3.8*; las dimensiones corresponden al área requerida para colocar las 36 celdas solares.

Esta clase de geometrías no se consideran en los paneles comerciales, a menos que sean pedidos especiales para usarse en superficies con ciertas geometrías; en estos casos la cantidad mínima de paneles que el fabricante puede ofrecer es generalmente importante, además, los costos son frecuentemente más elevados. De acuerdo a la *Figura 3.8* el marco de soporte, el vidrio templado de la cubierta frontal y la cubierta de la cara posterior del panel deben guardar entonces la misma geometría y dimensiones similares.

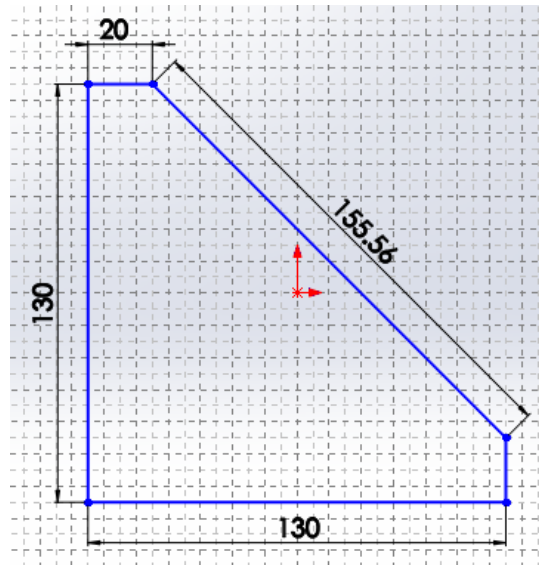


Figura 3.8. Geometría y dimensiones en cm del panel solar.

Construcción del Marco de Soporte y Cubierta Frontal del Panel Fotovoltaico

Para realizar la interconexión de celdas, es necesario tener disponible el marco de soporte del panel con el vidrio de la cubierta frontal ya pegado al marco. Esto es así ya que el arreglo de celdas ya interconectadas se coloca en la superficie interna de la cubierta. El marco de soporte consta de dos partes que tienen como función principal soportar la cubierta de vidrio y proporcionar la rigidez necesaria y el sellado adecuado a toda la estructura. Para la fabricación del soporte se emplea perfil de aluminio anodizado, tipo L con pecho de paloma para la parte frontal donde se monta el vidrio y de sección cuadrada en la parte posterior del panel, para dar la rigidez y el sellado necesario. La cubierta frontal del panel solar debe ser suficientemente transparente para permitir el paso de la luz, pero también debe soportar impactos de piedras u objetos que el viento transporte. Por estas razones se emplea un vidrio templado con el menor contenido posible de hierro. Este vidrio debe estar firmemente adherido con silicón al marco frontal.

Una vez teniendo preparada esta parte del panel solar, con cintas de cobre estañado comerciales, se realiza el soldado de las cintas conductoras a las celdas de manera individual, como se indica en la *Figura 3.9*. En general, para soldar las cintas se emplea un caudín de punta plana y fundente de ámbar.

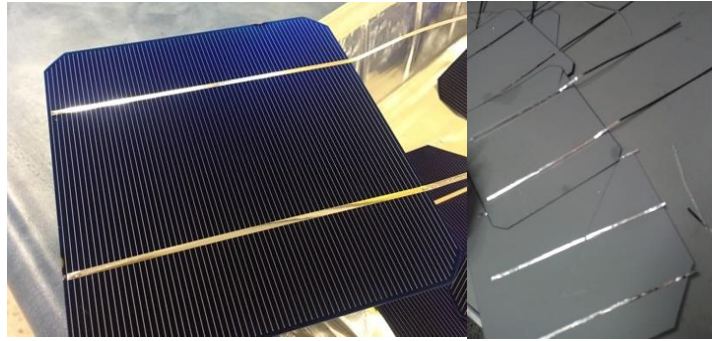


Figura 3.9. Celda solar con las cintas conductoras soldadas a los colectores.

Cabe señalar que las cintas conductoras no existen en el mercado nacional, por lo que originalmente fueron fabricadas usando lámina de Cobre niquelada y después cubiertas con una capa de estaño; después eran cortadas en cintas de 30 cm de largo y 2 mm de ancho. Actualmente este producto se importa a precios razonablemente bajos.

Una vez que las celdas tienen ya soldadas las cintas de conexión, se hacen las cadenas interconectando el número de celdas que cada cadena requiera, lo cual depende de la geometría del panel fotovoltaico. En el cálculo de las dimensiones del marco y el vidrio, debe considerarse la separación de 3 mm que existe entre celdas. En la *Figura 3.10* se muestra el arreglo de celdas solares sobre la cara interior del vidrio ya conectadas en serie, estando también las cintas terminales del arreglo colocadas donde estará la caja de contactos o de unión, en la cara posterior del panel.



Figura 3.10. Arreglo de celdas solares interconectadas en serie

La siguiente etapa de construcción del panel fotovoltaico es el encapsulado del arreglo de celdas solares.

Encapsulado del Panel Fotovoltaico

Como se menciona en el Capítulo 2, generalmente para el encapsulado en los paneles solares se usa un material llamado EVA (Etil-Vinil-Acetato), el cual se presenta en forma de películas elásticas. Para lograr un encapsulado adecuado de las celdas solares se emplean laminadoras de muy alto costo, las cuales disponen de planchas térmicas con temperatura controlada y bombas para crear vacío. Esto permite que el material primeramente derretido y después endurecido no presente burbujas de aire. El equipo requerido es de muy alto costo y se justifica la inversión sólo a nivel industrial. La desventaja que muestra el EVA es que después de pocos años empieza a tomar una tonalidad amarilla, lo cual reduce el paso de luz hacia las celdas solares.

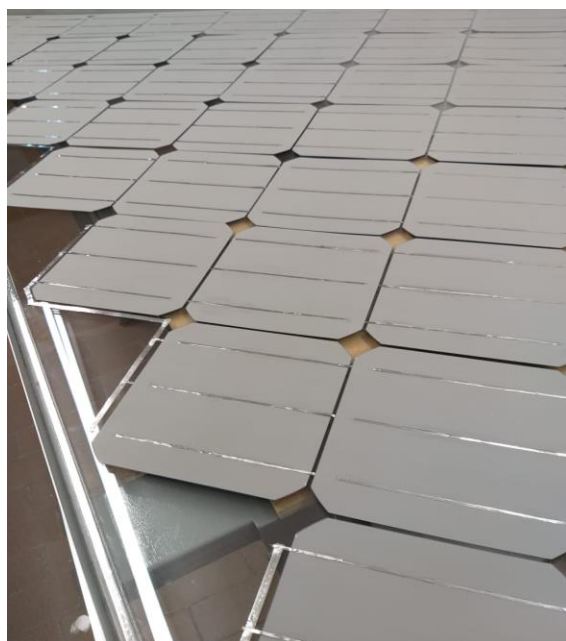


Figura 3.11. Arreglo de celdas solares ya encapsuladas

En este proyecto de tesis se optó por usar un gel derivado de silicón de baja viscosidad (Parte A + Parte B), el cual ofrece la ventaja de su fácil aplicación, reducida cantidad de burbujas de aire y excelente transparencia que dura más de 20 años, además de no requerir ninguna clase de equipo para depositarse, ya que cura a temperatura ambiente. En la *Figura 3.11* se observa el arreglo de celdas solares ya encapsuladas.

Cubierta Posterior del Panel Fotovoltaico

La etapa final del proceso de fabricación del panel fotovoltaico, consiste en colocar la cubierta de protección posterior. Se utilizó como cubierta posterior una lámina de TPT (Tedlar Poliester Tedlar) llamado así debido a la empresa que tiene la patente, pero se refiere al fluoruro de polivinilo, un material altamente inerte químicamente y resistente a

los factores externos como la humedad, los rayos UV, agua, vapor o cualquier tipo de suciedad. La cubierta de TPT deberá tener la geometría de la cubierta de vidrio y dimensiones que ajusten totalmente para cubrir el arreglo de celdas solares. También tendrá ya hechos los orificios por donde saldrán las terminales del arreglo de celdas, las que deberán conectarse a la caja de contactos o de unión que se coloca sobre la cubierta de TPT.

En esta parte del proceso de construcción del panel fotovoltaico se coloca al reverso, el marco de aluminio de sección transversal cuadrada de 1 pulgada, el cual dará la rigidez necesaria a todo el arreglo, a la vez que sirve para fijar bien la capa de TPT sobre el encapsulante, evitando así la entrada de agua, humedad o polvo al arreglo de celdas solares. Este marco posterior se fija firmemente usando silicón. Cabe mencionar que las partes del marco se cortan con una inglentadora, para lograr los ángulos requeridos y los cortes con la precisión requerida y, finalmente, se unen y pegan con una pasta automotriz a la que el agua y la temperatura elevada no le afectan.



Figura 3.12. Panel fotovoltaico finalizado

La caja de unión contiene ya los diodos de protección y, una vez conectadas las terminales externas del arreglo de celdas, se pega con silicón a la cubierta de TPT. En la *Figura 3.12* se muestra el panel fotovoltaico ya con el encapsulado, la cubierta de TPT, el marco posterior y la caja de unión ya sellada.

Una vez finalizado el proceso para la construcción del panel fotovoltaico, se le colocó en la parte de la cubierta posterior, de acuerdo a las indicaciones de la Vicerrectoría de Investigación, un decorado de vinil adhesivo similar a la decoración geométrica que tiene el Estadio Universitario BUAP. En la *Figura 3.13* se observan la cara frontal y la parte posterior del panel construido y listo para la caracterización eléctrica.

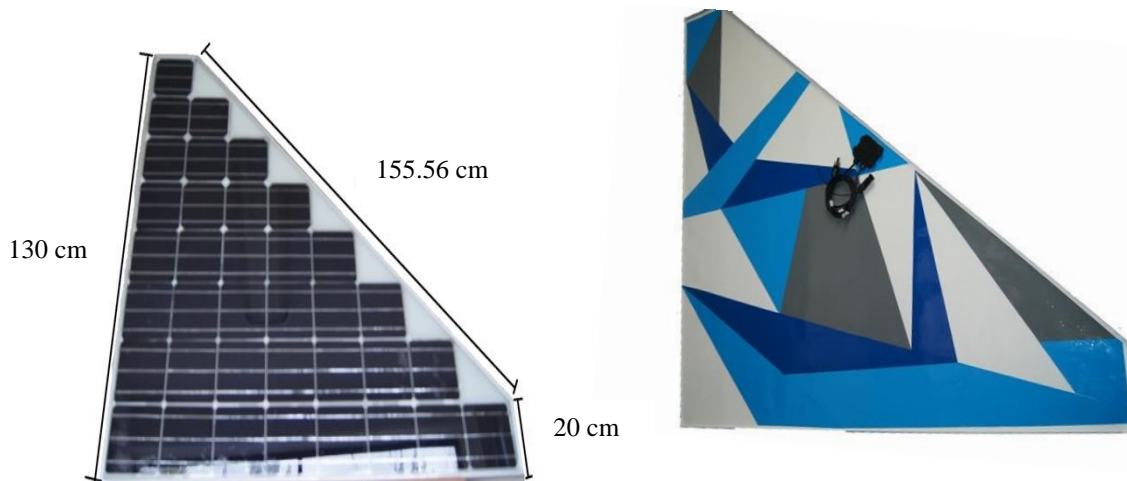


Figura 3.13. Imágenes de la parte frontal y cara posterior del panel fotovoltaico

Obtención de la Curva I-V del Panel Fotovoltaico

Ya concluido el panel solar FV en su construcción física, la parte restante es realizar la caracterización eléctrica y así poder constatar que los resultados en términos de los parámetros eléctricos, particularmente la potencia de salida, sea comparable a la que se calculó como necesaria para poder suministrar la energía del Consumo Energético Efectivo que demanda el sistema de iluminación. La caracterización del panel fotovoltaico se llevó a cabo en las instalaciones del Eco Campus Valsequillo de la BUAP, para lo cual se utilizó un arreglo de lámparas del tipo ELH, cuya emisión de radiación, bajo ciertas condiciones de voltaje, es muy aproximada a la solar.

Para esto se utilizó el dispositivo de la *Figura 3.7*, el cual permite obtener la curva I-V manejando corrientes de hasta 10 A. Se utilizó la campana para caracterización de MFVs con el arreglo improvisado de lámparas ELH, efectuando la medición en pocos segundos con el objeto de que el panel fotovoltaico no cambiara notablemente su temperatura, registrando la curva I-V en un osciloscopio y guardando el archivo de datos correspondiente.

Para determinar la Irradiancia y poder emplear los 1000 W/m^2 de Irradiancia requerida, según la distancia del panel al arreglo de lámparas, se utilizó un medidor de radiación. En la *Figura 3.14* se muestra la curva I-V resultante, con los parámetros eléctricos también indicados.

El principal resultado, con relación a cubrir los requerimientos del sistema de iluminación para lograr su adecuado funcionamiento, fue la potencia de 155 W_p que el panel fotovoltaico puede proporcionar.

Por otro lado, es razonable tener una eficiencia del panel fotovoltaico (15.5 %) menor que la especificada por el fabricante para las celdas solares (18-19 %), lo cual ocurre por diversas causas, pero básicamente por resistencias que se producen por las interconexiones entre las celdas solares.

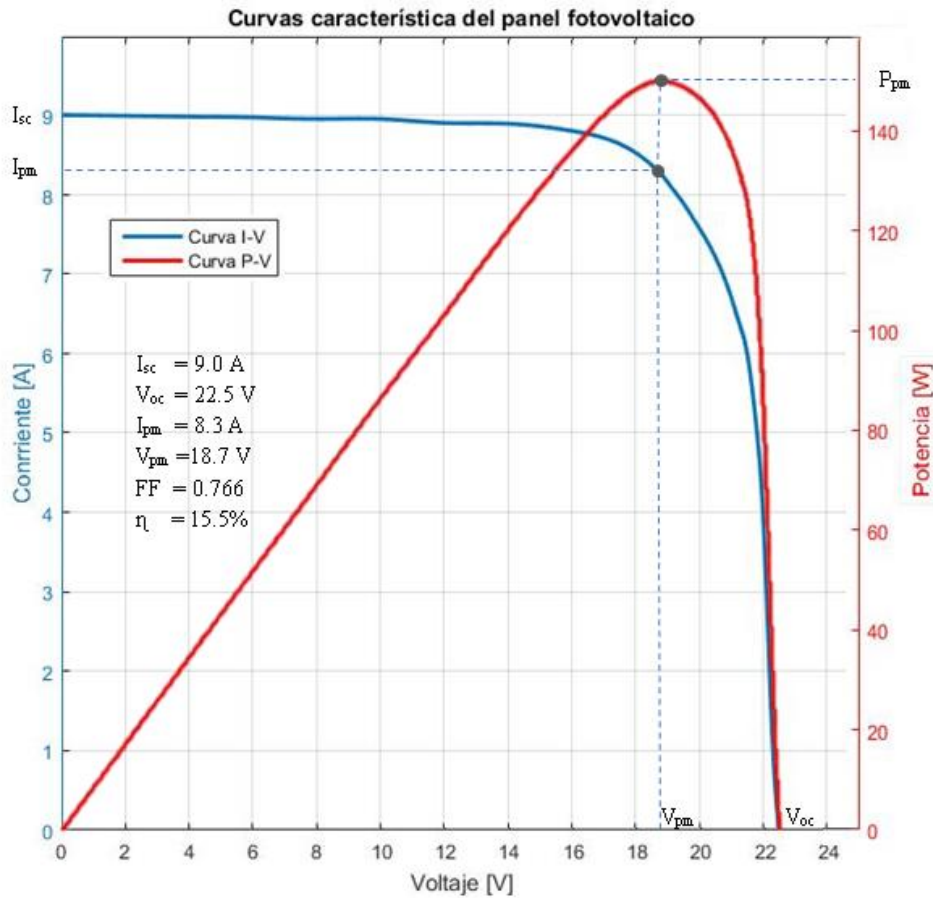


Figura 3.14. Curva I-V del panel fotovoltaico construido

Dimensionamiento de las Baterías

De acuerdo a lo expuesto en el Capítulo 2, el dimensionamiento del banco de baterías requiere conocer el consumo energético efectivo o total, E_T, que se calculó para determinar la potencia pico del MFV, el número de días de autonomía, N, el voltaje nominal de las baterías que se van a utilizar V_B y la máxima profundidad de descarga P_d, que se pretende usar durante el ciclo de iluminación.

Para el sistema de almacenamiento de energía se planteó en este proyecto usar baterías de plomo-ácido para uso solar, ya que permiten usar un ciclo profundo de descarga; se eligió un voltaje nominal de 12 V, pues este debe ser compatible con el voltaje del panel fotovoltaico. Por otro lado, se debe señalar que en el cálculo del coeficiente R en la ecuación 2.12, se consideró un valor para K_a de 0.005 que corresponde a las baterías de plomo-ácido.

Es conocido que descargas profundas de las baterías reducen considerablemente su vida útil, por lo que se fijó una profundidad máxima de descarga para las baterías del 30 %.

La profundidad de descarga se maneja en la programación del controlador de carga que se utilizará. Por otro lado, se tomó sólo un día de autonomía. De este modo, usando las ecuaciones 2.14 y 2.15, se calcula el valor de la potencia nominal de la batería, que resulta en $C_n(\text{Ah}) = 175.4 \text{ Ah}$.

Tabla 3.3. Capacidades de baterías y voltajes nominales

Capacidad de baterías			
2 V	6V	8V	12V
1235 Ah	225 Ah	170 Ah	115 Ah
	260 Ah		120 Ah
	315 Ah		150 Ah
	390 Ah		200 Ah
	460 Ah		225 Ah

En la *Tabla 3.3* que indica diversas capacidades de las baterías en función del voltaje nominal, se observa que una buena opción es utilizar baterías de 115 Ah, debido a la disponibilidad de las mismas y a su vez, se logra una mayor capacidad de almacenamiento de carga. De este modo se tiene que $175.4 \text{ Ah}/115 \text{ Ah} = 1.52$, lo que significa que es necesario un sistema de almacenamiento que contenga 2 baterías, ya que una sola batería no podría cubrir la demanda requerida diariamente. También se debe tomar en cuenta que durante el año habrá días nublados consecutivos en determinada época, ya que en estos casos no tendremos energía suficiente para proporcionar a las lámparas durante los periodos nocturnos, así que es necesario tener carga extra almacenada para esos días con un nivel de radiación bajo.

Sin embargo, es importante señalar que a pesar de tener baja radiación en días nublados, seguirá habiendo generación de potencia por el panel fotovoltaico, si bien ésta será menor que en los días soleados. En la *Figura 3.15* se muestra el tipo de batería que se adquirió, así como sus especificaciones. Cabe señalar que esta marca de batería se ha usado desde hace varios años en los sistemas construidos en el CIDS-ICUAP, con buenos resultados en términos de durabilidad.



Figura 3.15. Batería solar de 115 Ah y voltaje nominal de 12 V adquirida para el sistema Fotovoltaico Autónomo de iluminación en este trabajo de tesis.

Dimensionamiento del controlador de carga

Es necesario contar con un regulador de carga que administre la energía producida y la energía consumida. Para realizar el dimensionamiento del regulador se requiere obtener la corriente máxima que circulará por la instalación. Como se señaló en el Capítulo 2, esta corriente es igual a la corriente en corto circuito producida por el panel fotovoltaico en corto circuito, I_{sc} multiplicada por el número de paneles fotovoltaicos, N_T , de acuerdo a la ecuación 2.16. Puesto que se maneja sólo un panel fotovoltaico se tiene que $I_{max} = I_{sc} = 9$ A. Esto significa que el controlador de carga en el caso extremo deberá soportar una corriente de 9 A. En la Tabla 3.4 se indican las capacidades en manejo de corriente y voltaje para una variedad de controladores que existen en el mercado. La opción que se eligió fue el controlador de 10 A con la posibilidad de usar 12 o 24 V.

Tabla 3.4. Capacidades de varios Controladores de carga

Capacidad de controladores			
12 V	24V	12/24V	48V
6 Amp	10 Amp	10 Amp	15 Amp
10 Amp	20 Amp	15 Amp	30 Amp
15 Amp	30 Amp	20 Amp	45 Amp
20 Amp	40 Amp	30 Amp	60 Amp
30 Amp	60 Amp	40 Amp	80 Amp
40 Amp	80 Amp	60 Amp	
		80 Amp	

En la figura 3.16 se muestra el controlador adquirido para este trabajo de tesis, el cual también cuenta con programación nocturna.



Figura 3.16. Controlador de carga de 10 A y 12/24 V

Dimensionamiento del inversor

Debido a que las luminarias con base en LEDs utilizan corriente alterna, fue necesario emplear un inversor. Para dimensionar el inversor se toma en cuenta la potencia demandada por las lámparas. Tomando en cuenta que la potencia total requerida por los arreglos de LEDs es de 48 W, se adquirió un inversor que maneja hasta 75 W como potencia de salida con voltaje alterno de 127 VAC y voltaje de entrada de 12 VDC, ya que es la mínima potencia disponible para los inversores comerciales. En la *Figura 3.16* se muestra el inversor adquirido. Cabe comentar que esta clase de inversores tiene un funcionamiento, durabilidad y costo muy aceptables, y generalmente forma parte de los sistemas de iluminación de bajo consumo, que en el CIDS-ICUAP se han instalado en algunas localidades de la BUAP.



Figura 3.17. Controlador de 75 W de tipo automotriz

Dimensionamiento de cables de conexión

Para la selección de los cables que interconectan las partes del sistema se utilizan las ecuaciones 2-18 y 2-19 presentadas en el Capítulo anterior, para calcular la sección transversal S del cable y poder determinar el calibre correspondiente.

$$R_c = \frac{\rho L}{S}$$

$$S = \frac{2\rho IL}{\Delta V} = \frac{2\rho LP}{V \Delta V}$$

La cantidad de cable requerida depende de la altura de los postes; además, se indica que el calibre del cable que se determine para la conexión entre el panel fotovoltaico y el controlador de carga, se usará también para conectar el controlador con las baterías y el inversor, según se muestra en el diagrama unifilar. En principio, para determinar de un modo directo el calibre de este cable, se usa la corriente de corto circuito $I_{sc} = 9.0$ A, que es la corriente máxima que se produce en el sistema. De acuerdo a la *Tabla 3.5* que muestra la Norma Oficial Mexicana 310-15(b)(16), se puede elegir un conductor THW calibre 14, el cual soporta adecuadamente la corriente de 9.0 A.

Tabla 3.5. Calibre de Alambre de Cobre-Amperaje, 310-15(b)(16) NOM

AMPERAJE - CABLE DE COBRE			
Tipo de aislante	TW	RHW, THW, THWN	THHN, XHHW-2, THWN-2
Nivel de temperatura	60°C	75°C	90°C
Calibre de cable	Amperaje soportado		
14 AWG	15 A	15 A	15 A
12 AWG	20 A	20 A	20 A
10 AWG	30 A	30 A	30 A
8 AWG	40 A	50 A	55 A
6 AWG	55 A	65 A	75 A
4 AWG	70 A	85 A	95 A
3 AWG	85 A	100 A	115 A
2 AWG	95 A	115 A	130 A
1 AWG	110 A	130 A	145 A
1/0 AWG	125 A	150 A	170 A
2/0 AWG	145 A	175 A	195 A
3/0 AWG	165 A	200 A	225 A
4/0 AWG	195 A	230 A	260 A

Sin embargo, si bien el cable calibre 14 tendrá la capacidad para manejar esta corriente, la caída de voltaje en los cables podría ser considerable. En este sentido, se puede utilizar como un criterio de pérdida un porcentaje específico, el cual de acuerdo a la NOM 001 SEDE 2012 usualmente se toma un máximo del 3 % por circuito y un máximo del 5 % desde el origen de la fuente de tensión hasta el último dispositivo que utiliza la energía, de acuerdo al Boletín 54 de Arreguín Ingeniería.

En este caso se toma el 3 % o equivalentemente, 0.39 V, considerando un voltaje nominal de 13 V para las baterías, que es el caso cuando la batería se encuentra cargada cerca del 100%.

Después, deberá calcularse la sección transversal S del cable, lo cual se realiza usando la Ecuación 2-19. El valor de la sección transversal S toma en cuenta las caídas de voltaje en ambos cables que interconectan el panel fotovoltaico con el controlador de carga.

Se considera un cable de Cobre por lo que mediante la *Tabla 3.6* se tiene que la resistividad $\rho = 0.0178 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. La longitud $L = 12 \text{ m}$, la corriente corresponde a la de corto circuito $I_{sc} = 9.0 \text{ A}$ y la caída de voltaje $\Delta V = 0.39 \text{ V}$. De este modo se obtiene que $S = 9.86 \text{ mm}^2$.

Tabla 3.6. Resistividades de varios conductores

Material	Resistividad	Unidades
Plata	0.01	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Cobre	0.0178	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Oro	0.024	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Aluminio	0.0283	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Hierro	0.1	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Estaño	0.139	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
Mercurio	0.942	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$

De la *Tabla 3.7* se observa que el calibre 7 para el cable satisface el requerimiento de una caída de 0.39 V (o bien el 3 %) en el conductor que interconecta el panel con el controlador de carga.

Tabla 3.7. Calibre para cable de Cobre y su sección transversal

AWG	Diam. mm	Area mm ²	AWG	Diam. mm	Area mm ²
1	7.35	42.40	16	1.29	1.31
2	6.54	33.60	17	1.15	1.04
3	5.86	27.00	18	1.024	0.823
4	5.19	21.20	19	0.912	0.653
5	4.62	16.80	20	0.812	0.519
6	4.11	13.30	21	0.723	0.412
7	3.67	10.60	22	0.644	0.325
8	3.26	8.35	23	0.573	0.259
9	2.91	6.62	24	0.511	0.205
10	2.59	5.27	25	0.455	0.163
11	2.30	4.15	26	0.405	0.128
12	2.05	3.31	27	0.361	0.102
13	1.83	2.63	28	0.321	0.0804
14	1.63	2.08	29	0.286	0.0646
15	1.45	1.65	30	0.255	0.0503

Debe aclararse, sin embargo, que en el dimensionamiento de los cables que conducen las mayores corrientes del sistema, se asumieron condiciones que en la práctica normalmente no ocurren, como es el manejo de la corriente de corto circuito. Pero este es un criterio del dimensionamiento que brinda también seguridad y hace confiable el funcionamiento del sistema.

Para el dimensionamiento del cable que interconecta el inversor con las lámparas, se ha considerado una caída de voltaje de sólo 0.2 V para todo el circuito de conexión, que es considerablemente menor al 3 % que se empleó en el caso previo; esto es debido a que las lámparas deben funcionar con el mayor voltaje posible que proporciona el inversor. De este modo su iluminancia no se verá notablemente afectada y el espacio estará dentro de las normas establecidas. Para esto se tiene que el material y longitud del cable son los antes utilizados, la potencia total de ambas lámparas es de 48 W, el voltaje de línea de 125 V y la caída de voltaje de 0.2 V. Utilizando la *Ecuación 2-19* el cálculo resulta en un valor de $S = 0.82 \text{ mm}^2$. Nuevamente, mediante la *Tabla 3.7* se observa que el calibre 18 sería suficiente para tener una caída de 0.2 V; por razones de disponibilidad del material, se empleó el cable de calibre 16, lo que garantiza una caída de voltaje aún menor.

Protecciones

Es importante contemplar protecciones para evitar el daño en los diferentes elementos del sistema. El criterio para realizar el dimensionamiento de protecciones, necesita contemplar que los dispositivos de protección frente a sobrecorrientes deben poder transportar no menos del 125% de la suma de las corrientes en cortocircuito de todos los módulos fotovoltaicos en paralelo [34]. Considerando que solo es un panel fotovoltaico, se toma en cuenta los 9 A correspondientes a la corriente de corto circuito, tal que se deberán tener como protección, interruptores termomagnéticos de 15 A, así como fusibles para la protección de los paneles.

Una vez finalizado totalmente el proceso de construcción y adquisición de las partes que constituyen el sistema fotovoltaico autónomo, se procedió a ensamblar el circuito que comprende las baterías, el controlador de carga, el inversor. Para proteger al conjunto de dispositivos eléctricos de la lluvia, polvo y humedad, se construyó un gabinete de lámina galvanizada el cual se muestra en la *Figura 3.18*.



Figura 3.18. Gabinete para protección de los Dispositivos electrónicos

El gabinete tiene las dimensiones requeridas para contener las baterías y demás dispositivos electrónicos, así como los orificios para entrada y salida de cables. Además, se incluyeron rejillas con filtros para la ventilación pero evitando la entrada de polvo.

Diagrama Unifilar

La representación eléctrica del sistema es representada en el siguiente diagrama realizado con el software de uso libre profi CAD, donde se puede observar la colocación de las protecciones correspondientes para el SFV.

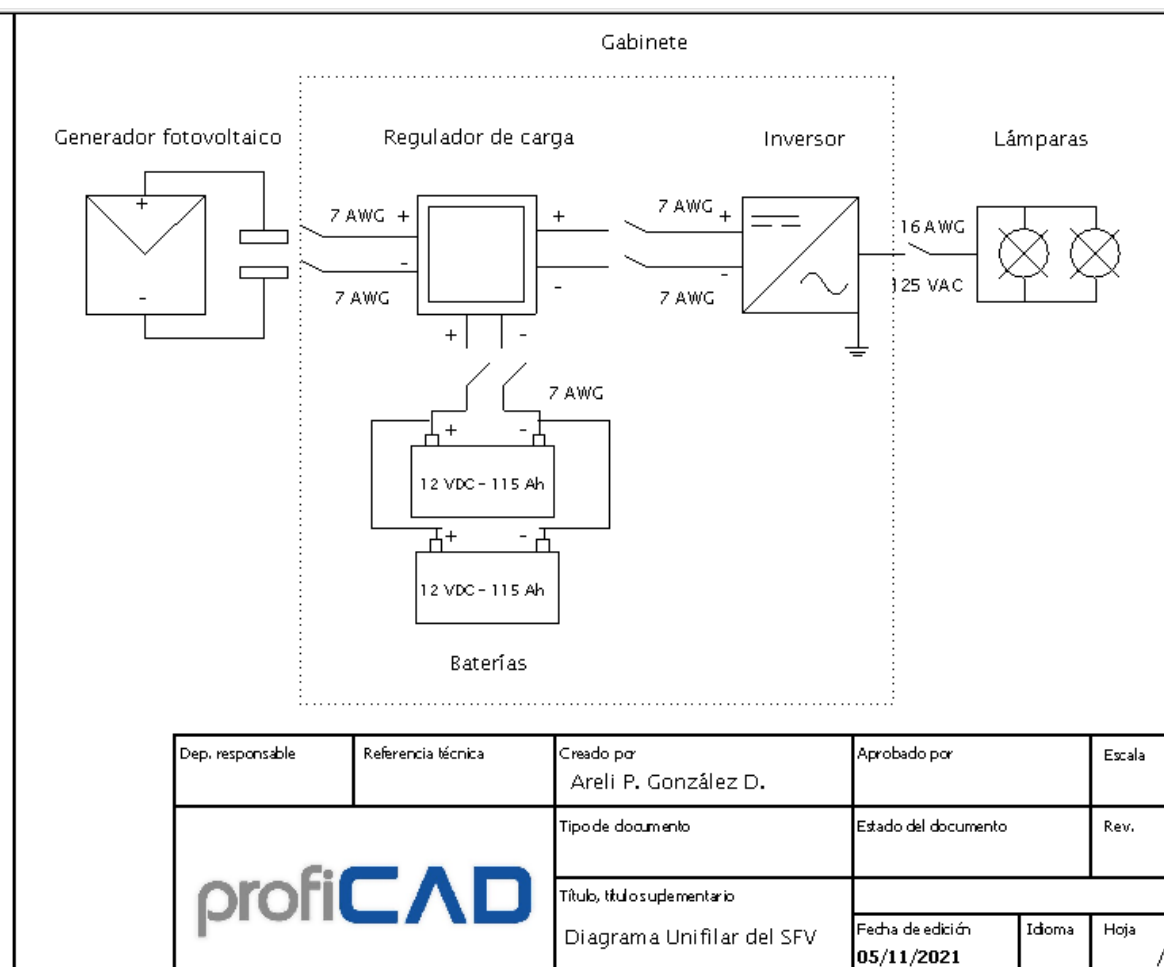


Figura 3.19. Diagrama unifilar del sistema fotovoltaico

Diagrama de la Instalación

En la siguiente figura se muestra un diagrama gráfico de la instalación del prototipo del SFV.

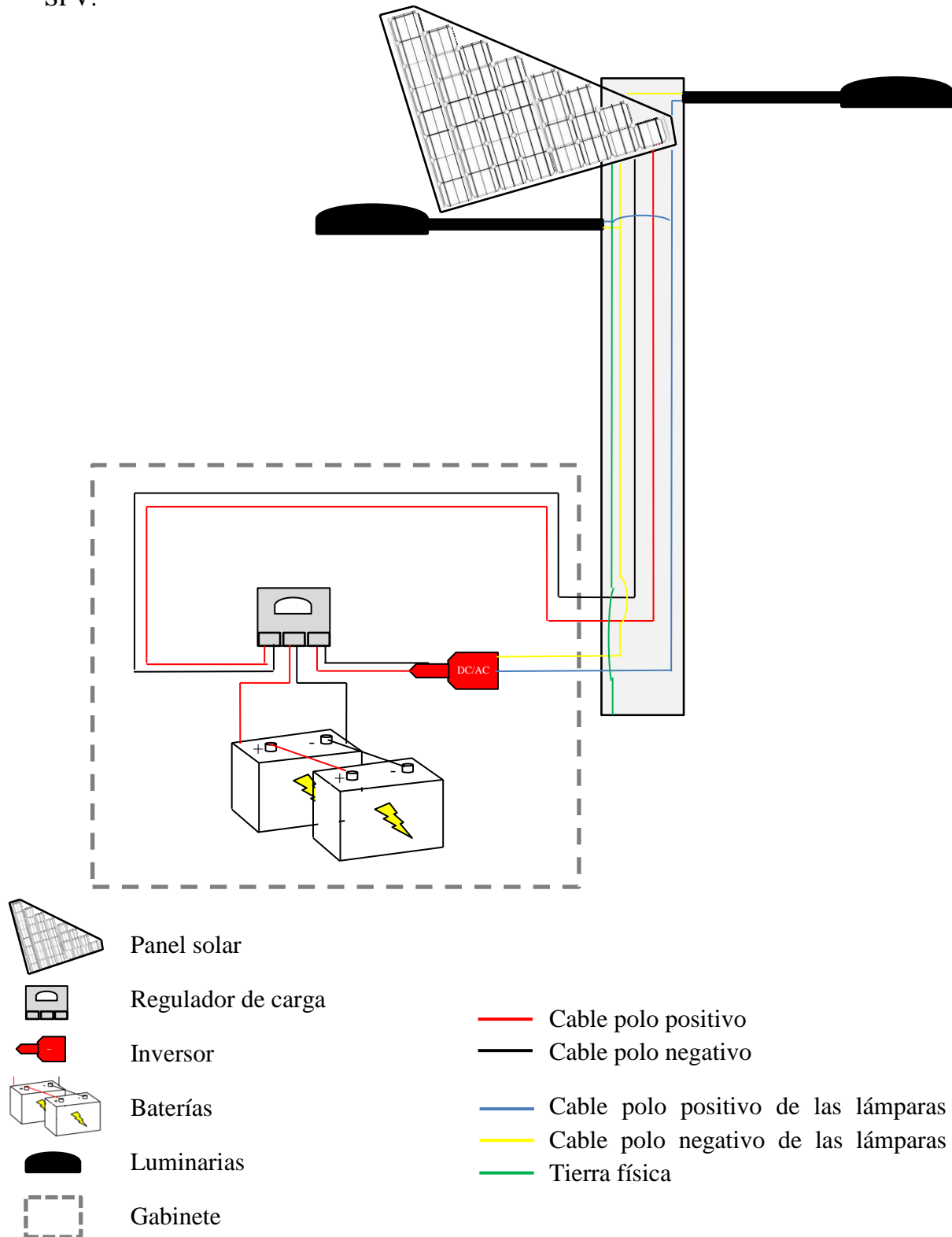


Figura 3.20. Diagrama de la instalación fotovoltaica

Instalación del sistema fotovoltaico

La instalación del sistema fotovoltaico autónomo para iluminación, como se mencionó anteriormente, se realizó en el poste ubicado en la parte norte del Estadio Universitario. El gabinete se aseguró en la base del poste. La instalación del panel fotovoltaico se indica en la *Figura 3.19 (a)*, donde se aprecia el tipo de cinturones circulares que fijan la posición del panel fotovoltaico y, a la vez, permiten su rotación. Este mecanismo es necesario considerando las diferentes orientaciones de la sección transversal del poste, según sea su colocación en la periferia del estadio. Como culminación de este trabajo de tesis, se muestra en la *Figura 3.19 (b)* el sistema fotovoltaico completo con las luminarias funcionando. Este sistema fue instalado en Enero de 2020.



Figura 3.21. (a) La instalación del panel fotovoltaico; (b) El sistema fotovoltaico autónomo en funcionamiento

Capítulo 4

CONCLUSIONES

En términos de ahorro de energía, el prototipo de sistema fotovoltaico autónomo construido consume una tercera parte del sistema de iluminación original, el cual funcionaba íntegramente con energía convencional.

El prototipo de módulo fotovoltaico desarrollado y construido en este trabajo de tesis, con alternativas diferentes al proceso de fabricación utilizado en los módulos comerciales, satisface adecuadamente los requerimientos de consumo energético determinado en el dimensionamiento de las luminarias.

La reducción en la eficiencia de conversión en el panel fotovoltaico construido, de sólo dos puntos porcentuales, comparada con la eficiencia original de las celdas individuales, refleja que las alternativas empleadas en su construcción, como el encapsulado en gel que no requiere tratamientos térmicos y altas presiones que degradan la eficiencia, ofrecen diversas posibilidades para poder optimizar el proceso de construcción de los paneles solares.

El desarrollo del marco de soporte y sellado, durante el proceso de construcción del panel fotovoltaico, representa una aportación original y valiosa a la tecnología de fabricación de estos sistemas, por sus características de rigidez y eficacia en el sellado, así como su fácil ensamblado. Además, ofrece ventajas de disponibilidad del material en el mercado local, considerando que el marco comercial es un producto que se importa con un alto costo.

Se observó que mediante un proceso de tratamientos térmicos a baja temperatura aplicado a las celdas solares, se lograron soldaduras de calidad y apariencia comparables a las obtenidas en un proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos comerciales, además de que las celdas no sufren doblamientos durante el proceso de soldadura.

La construcción de un panel fotovoltaico funcional en este trabajo de tesis, con una geometría no convencional, abre la posibilidad de ofrecer versatilidad en su geometría, que pueda satisfacer demandas en áreas específicas o de carácter estético y decorativo, como puede ser en centros históricos, parques y jardines.

Bibliografía

- [1] J. Martínez y A. Fernández Bremauntz, Cambio climático: una visión desde México, México: Instituto Nacional de Ecología.Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2004.
- [2] G. Alarco, «Crecimiento económico y emisiones de CO2 por combustión de energéticos en México, 2005-2030,» *Economía Mexicana Nueva Época*, vol. XV, n° 2, pp. 291-325, 2006.
- [3] J. Campo Robledo y W. Olivares, «Relación entre las emisiones de co2, el consumo de energía y el pib: el caso de los civets,» *Semestre Económico*, vol. 16, n° 33, pp. 45-65, 2013.
- [4] S. Rodríguez y J. A., «Energía renovable en México: Retos y Oportunidades,» *ESPACIOS*, vol. 40, n° 25, p. 29, 2019.
- [5] R. Alexandri Rionda y L. A. Muñoz Cano, «PROSPECTIVA DE ENERGÍAS RENOVABLES 2016-2030,» SECRETARÍA DE ENERGÍA, México, 2016.
- [6] J. Ramos Gutiérrez y M. Montenegro Fragoso, «La generación de energía eléctrica en México,» *Tecnología y ciencias del agua*, vol. 3, n° 4, pp. 197-211, 2012.
- [7] F. Jarabo Friedrich y N. Elortegui Escartin, Energías Renovables, Madrid, España, 2000.
- [8] A. Crespo Martínez y J. Fernández González , Energías Renovables para el Desarrollo, Paraninfo, 2003.
- [9] J. N. Oviedo Salazar, M. H. Badii y A. Guillen, «Historia y Uso de Energías Renovables,» *Daena: International Journal of Good Conscience*, vol. 10, n° 1, pp. 1-18, 2015.
- [10] J. Perlin, *The Silicon Solar Cell Turns 50*, 2004.
- [11] H. Ulloa, M. García y A. Pérez , «CLIMA Y RADIACIÓN SOLAR EN LAS GRANDES CIUDADES:,» *Investigaciones Geográficas*, n° 56, pp. 165-175, 2011.
- [12] A. Limón Portillo, *Energía solar en México: su potencial y aprovechamiento*, Centro de Investigación Económica y Presupuestaria:<https://ciep.mx/energia-solar-en-mexico-su-potencial-y-aprovechamiento/>.

- [13] J. F. Martí, «El Mercado de la Energía Solar en México,» CDMX, 2015.
- [14] V. Cañavera García y N. Ortiz Juárez, *OBTENCIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DE CELDAS SOLARES*, México: INSTITUTO CULTURAL COPÁN , 2015.
- [15] J. González Velasco, *Energías Renovables*, Reverté, 2009.
- [16] C. Arancibia Bulnes y R. Best y Brown, «ENERGÍA DEL SOL,» *Ciencia - Academia Mexicana de Ciencias*, vol. 61, nº 2, pp. 10-17, 2010.
- [17] T. L. Floyd, *Dispositivos Electrónicos*, México: PEARSON EDUCACIÓN, 2008.
- [18] A. Morales Acevedo, *La Electricidad que Viene del Sol: Una Fuente de Energía Limpia*, México, 2003.
- [19] R. M. Mujal Rosas, *Tecnología Eléctrica*, Universidad Politécnica de Cataluña, 2009.
- [20] S. Torres Pacheco y F. Jurado Pérez, «Eficiencia en paneles solares,» *Revista del Diseño Innovativo*, vol. 2, nº 2, pp. 9-21, 2018.
- [21] A. Vega Marcos , *Estudio comparativo dedistintas tecnologías fotovoltaicas*, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [22] A. Leon, *LIGHTING*, Hawai: ATLANTIC INTERNATIONAL UNIVERSITY, 2007.
- [23] G. Ruiz Esparza, *MANUAL DE ILUMINACIÓN VIAL*, México: Secretaría de Comunicaciones y Transpsortes, 2015.
- [24] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, Academic Press, 2009.
- [25] J. Twidell y T. Weir, *RENEWABLE ENERGY RESOURCES*, New York: Routledge, 2015.
- [26] C. Bolzi y J. Fernández Vázquez, «DESARROLLO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PANELES SOLARES PARAMISIONES SATELITALES ARGENTINAS - PRIMER MÓDULO PARA ENSAYOS,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 7, nº 1, 2003.
- [27] M. Barrera Traver y F. Fuentes Moragrega, *FABRICACIÓN DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS*, Universitat Jaume I.

- [28] J. Aguilera y L. Hontoria, *Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos*, CIEMAT.
- [29] J. Duffie y W. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, New Jersey: WILEY, 2013.
- [30] D. J. Camacho Molina, *IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO AUTÓNOMO MÓVIL de 1000 W*, UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR, 2012.
- [31] J. E. Braun y J. C. Mitchell, *Solar geometry for fixed and tracking surfaces*, 1983.
- [32] J. Aguilera y L. Hontoria, «Dimensionado de sistemas fotovoltaicos autónomos,» CIEMAT.
- [33] M. Roitman, A. Mestrallet y M. D. Aramburu, «Dimensionamiento de un sistema de energía solar fotovoltaica para una vivienda familiar de la Ciudad de Córdoba,» *REVISTA FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES*, vol. 2, nº 2, p. 39, 2015.
- [34] SESLab, «<https://seslab.org>,» 2015. [En línea]. Available: https://seslab.org/fotovoltaico/2_protecciones_elctricas_en_sistemas_fotovoltaicos.html. [Último acceso: 2021].