



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN ENERGÍA – FUENTES RENOVABLES

**COMPARACIÓN DEL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DE TRES SISTEMAS  
FOTOVOLTAICOS INTERCONECTADOS A LA RED DE 3 KW CON  
DIFERENTES TECNOLOGÍAS (CIGS, CDTE Y P-SI)**

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

ING. SAMUEL ROJAS LÓPEZ ZALASAR

TUTOR:

DR. AARÓN SANCHEZ JUÁREZ  
Instituto de Energías Renovables

TEMIXCO, MORELOS

Junio 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por medio del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM) por la educación que me ha brindado a lo largo de mi estancia en él.

Al CONACYT por el apoyo recibido para la realización de la maestría en Ingeniería en Energía.

Se agradece el apoyo económico recibido por parte del Instituto de Energías Renovables (IER-UNAM), a través del **Centro Mexicano de Innovación en Energía Solar (CeMIE-Sol)** dentro del Proyecto Estratégico **No 29** así como del **Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación (FORDECYT)** por medio del cual fue posible desarrollar la investigación.

A mi asesor el Dr. Aarón Sánchez Juárez por su apoyo en su área de especialización como en el área personal.

A los miembros de mi comité tutorial:

Dr. Dalia Martínez Escobar  
Dr. Aarón Sánchez Juárez  
Dr. J. Jasón Flores Prieto  
M.C. José Ortega Cruz  
Dr. Sergio Alberto Gamboa Sánchez

Por sus comentarios y observaciones.

A Rodiberto Peña, Edgar Fernando Solares, Edson Osvaldo Ángel que colaboraron en la integración del sistema Fotovoltaico y análisis de datos bajo estudio.

## Contenido

INTRODUCCIÓN .....	5
OBJETIVO PRINCIPAL .....	7
CAPÍTULO 1: LAS ENERGÍAS RENOVABLES .....	8
1.1 Antecedentes .....	8
1.2 Energías renovables y Cambio climático .....	9
1.2.1 Desarrollo sostenible .....	10
1.2.2 Efecto invernadero .....	11
1.3 Estado actual de las energías renovables .....	13
1.3.1 Panorama mundial .....	13
1.3.2 Panorama en México .....	17
1.3.2.1 Capacidad instalada .....	18
1.3.2.2 Proyectos en marcha .....	19
1.3.2.3 Inversión extranjera directa .....	19
CAPÍTULO 2. ENERGÍA SOLAR. DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS .....	21
2.1 Introducción .....	21
2.2 Radiación solar .....	22
2.3 Módulos Fotovoltaicos .....	25
2.4 Parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico .....	28
2.5 Tecnologías fotovoltaicas para aplicaciones terrestres y oferta comercial .....	31
2.5.1 Tecnología de silicio .....	31
2.5.2 Tecnologías de película delgada .....	33
2.5.2.1 Módulos de Silicio amorfo .....	33
2.5.2.2 Módulos de Telurio de Cadmio (CdTe) .....	34
2.5.2.3 Módulos de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS) .....	35
2.6 Sistemas Fotovoltaicos .....	35
2.6.1 Componentes de un sistema fotovoltaico .....	36
2.7 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos .....	37
2.7.1 Sistemas Fotovoltaicos Autónomos .....	38
2.7.2 Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red .....	39
2.7.3 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos .....	40
2.8 Arreglos Fotovoltaicos .....	41
2.9 Dimensionamiento de uno sistema Fotovoltaico .....	43
2.10 Aplicaciones de los sistemas Fotovoltaicos .....	46
CAPÍTULO 3: PLATAFORMA SOLAR FV .....	49

3.1 Descripción general de la plataforma solar fotovoltaica .....	49
3.2 Tecnologías fotovoltaicas Instaladas (CIGS, Si-P y CdTe) .....	50
3.2.1 Configuración de los subsistemas FV .....	51
3.2.2 Características eléctricas de los subsistemas FV.....	52
3.2.3 Características eléctricas a STC de las tecnologías instaladas.....	53
3.2.4 Características eléctricas a PTC.....	55
3.3 Rendimiento térmico .....	57
3.4 Diagrama unifilar del SFV .....	59
3.4 Cálculos eléctricos del Sistema Fovoltaiico .....	62
3.4.1 Cálculo de protecciones .....	62
3.4.2 Caída de tensión.....	63
3.4.3 Selección de los conductores .....	63
3.6 Diagramas unificares de toda la Instalación FV. ....	64
3.7 Fotografías de la instalación mecánica y eléctrica del SFV .....	65
<b>CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>67</b>
4.1 Introducción .....	67
4.2 Descripción de equipo a utilizar .....	68
4.2.1 Sensores utilizados.....	69
4.2.1.1 Sensores de Voltaje y Corriente .....	70
<b>CAPITULO 5. RESULTADOS .....</b>	<b>84</b>
5.1 Introducción .....	84
5.2 Calculo de pérdidas energéticas .....	84
5.2.1 Perdidas por temperatura.....	84
5.3 Comparación del Rendimiento energético de las tres Tecnologías FV .....	84
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>88</b>
Bibliografía .....	89

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial hay una concientización cada vez mayor sobre la importancia de la energía renovable y sus rendimientos globales, las cuales son críticas no sólo para atender el cambio climático, sino para crear nuevas oportunidades económicas y proporcionar acceso a la energía a millones de personas que aún no cuentan con servicios modernos para el suministro de energía. Durante la década pasada, y particularmente en años recientes, han sido posibles avances en tecnologías de energía renovable, incrementos en la capacidad de generación a nivel mundial, así como rápidas reducciones de costos gracias al apoyo brindado por las políticas económicas, mismas que han atraído una cantidad significativa de inversiones e impulsado la baja de costos, por medio de economías de escala. En 2014 la energía renovable siguió desarrollándose, aun con el creciente consumo de energía a nivel mundial y el dramático declive en los precios del petróleo durante la segunda mitad del año como telón de fondo. También en 2014, la energía renovable se extendió significativamente en términos de capacidad instalada y energía producida; mientras que las inversiones en energía renovable en el sector energético superaron las inversiones netas para plantas de energía de combustibles fósiles. El crecimiento más rápido y el incremento más sustancial en la capacidad renovable se vieron en el sector eléctrico, las tecnologías dominantes fueron: eólica, solar fotovoltaica (FV) y energía hidráulica. Por otro lado, el desarrollo de la calefacción, el enfriamiento y el transporte basado en tecnologías renovables aún se queda atrás con respecto a la energía renovable. Los precios bajos de combustibles fósiles, los subsidios a éstos y la competencia con otras posibles inversiones (como mejoras en la eficiencia energética u otros sistemas de energía renovable), desaceleraron el potencial del sector de climatización con energía renovable. A pesar de que hay mucho potencial y puntos de entrada para la energía renovable en el sector transporte, su desarrollo se ha visto limitado; mientras que la prioridad de las políticas, los mercados y las industrias se ha centrado en los biocombustibles líquidos. El apoyo a las políticas para

energías renovables ha contribuido al crecimiento del volumen del mercado y a una competencia mundial alta. Las significativas reducciones en los costos, especialmente para la energía solar FV y la eólica, han jugado un papel en la creciente electrificación del transporte y de los aparatos de calefacción. Este hecho también ha resaltado el potencial para una mayor superposición entre los sectores en un futuro cercano. En muchos países las energías renovables son altamente competitivas con los combustibles convencionales, particularmente en el sector eléctrico. En países en desarrollo, los sistemas de generación distribuida de energía ofrecen la oportunidad sin precedentes de acelerar la transición a servicios modernos de energía y de incrementar el acceso. Aunque los costos bajos del sistema solar FV le han proporcionado a la tecnología la fuente de energía más económica para la electrificación no conectada a la red, las mayores barreras del 2014 fueron contar con el financiamiento o con el equipo necesario para el uso de este tipo de energía. Está claro que las energías renovables se han convertido en unos de los recursos principales de energía. La experiencia del 2014 demostró que la penetración y el uso de fuentes de energía tanto variables como no variables se encuentran en franco crecimiento y, por lo tanto, contribuyen a la diversificación de la mezcla de energía. A pesar de que muchas tecnologías de energía renovable han experimentado una expansión rápida, el crecimiento de la capacidad de generación, así como las mejoras en la eficiencia energética se encuentran debajo del porcentaje necesario para alcanzar las metas de la iniciativa Energía Sostenible para Todos (SE4ALL por sus siglas en inglés), las cuales consisten en duplicar el nivel de uso de energía renovable, duplicar las mejoras mundiales en eficiencia energética, y proporcionar acceso universal a la energía para el año 2030.

## OBJETIVO PRINCIPAL

Estudiar, evaluar y comparar el rendimiento energético de tres tecnologías fotovoltaicas (Cobre, Indio, Galio, Selenio (CIGS), Silicio Policristalino (P-Si) y Telurio de Cadmio (CdTe) ) interconectadas a la red en las mismas condiciones mecánicas, eléctricas y ambientales, para esto se implementó un sistema de monitoreo de 19 variables, ambientales y eléctricas, para obtener parámetros de voltaje, corriente y potencia de cada tecnología así como temperatura ambiente, temperatura de los módulos, velocidad del viento e Irradiancia. Dicho sistema de monitoreo estará en servicio durante 4 meses con lo cual bastará para determinar el rendimiento de cada tecnología FV, una vez analizados los datos podremos caracterizar cada tecnología ya que todos los módulos son nuevos y poder observar si presentar algún tipo de degradación en la potencia.

## CAPÍTULO 1: LAS ENERGÍAS RENOVABLES

### 1.1 Antecedentes

Quizás el momento más decisivo para la humanidad haya sido el descubrimiento del fuego, y gracias a él, la humanidad comenzó a ser capaz de controlar y modificar muchos procesos que hasta ese momento dependían únicamente de la naturaleza. Desde entonces la energía ha sido un elemento indispensable en la satisfacción de las necesidades cotidianas de todas las formas organización social, partiendo de los usos y equipos más elementales, como la cocción de alimentos con los fogones de tres piedras, hasta los sofisticados aparatos electrónicos dedicados exclusivamente al ocio y el entretenimiento en las sociedades post-industriales.

Desde la perspectiva humana, la energía es entonces, ubicua y permanente. Ubicua, porque el hombre en tanto ente biológico y social depende de ella, ya sea como la radiación solar indispensable para las funciones biológicas o para los ciclos agrícolas, o como la fuerza motriz del viento o del agua requerida para impulsar los antiguos molinos de granos, o los modernos equipos de generación eléctrica. Y es permanente, porque las necesidades pasadas, presentes y futuras de energía son determinadas y conducidas por tres factores principales: el crecimiento de la población, el desarrollo económico y el progreso tecnológico (Nakicenovic, Gmblery Me Donald, 1998).

Durante la mayor parte de la historia humana, el sistema energético dependió de los flujos naturales de energía y de la fuerza animal y humana para proveer los servicios requeridos en la forma de calor, luz y trabajo. La única forma de transformación conocida era de la energía química a la energía calorífica y luminosa, mediante la quema de leña o de velas. Fue a partir de la Revolución Industrial cuando el sistema energético mundial pasó por dos transiciones altamente significativas; la primera de ellas fue iniciada por una innovación tecnológica radical: la máquina de vapor alimentada por carbón. Con ella se realizó la primera conversión de recursos energéticos fósiles en trabajo, lo que

implicó la posibilidad de separar geográficamente y en gran escala el origen de las fuentes energéticas respecto a su lugar de consumo final. El carbón podía ser transportado y almacenado en donde se le requiriera, dotando de recursos energéticos a casi cualquier región, lo que antes sólo era posible si existían abundantes recursos hidráulicos en el sitio (Nakicenovic, Grüblery Me Donald , 1998).

La segunda gran transición fue la creciente diversificación de las tecnologías de uso final energético y de las fuentes de abastecimiento de energía. La introducción de la electricidad fue quizás el factor más importante para que esta transición ocurriera, ya que la energía eléctrica podía ser fácilmente convertida en luz, calor o trabajo en los lugares de uso final. Una segunda innovación fue el motor de combustión interna, el cual revolucionó los patrones de transporte individual y colectivo. Sin embargo, junto con esto se dio una creciente dependencia del petróleo como el energético primario que cubriría las necesidades cada vez mayores de combustibles para generación eléctrica y para transporte.

## 1.2 Energías renovables y Cambio climático

Las energías renovables son las que proceden de fuentes de energía inagotables. Son energías limpias porque las emisiones de contaminantes, así como los gases de efecto invernadero asociados a su producción y consumo son insignificante en relación a las energías convencionales y no generan residuos peligrosos. Estas energías aumentan la seguridad de un país al no depender del exterior y es una fuente de crecimiento económico y empleo.

Podemos dividir las energías renovables en energías renovables gestionables o intermitentes. Las energías renovables gestionables son aquellas capaces de almacenar la energía y producir electricidad en función a la demanda. Gracias a esta capacidad, las energías como la termosolar y la geotérmica son capaces de configurar redes eléctricas estables. Gracias a la gestionabilidad, estas energías renovables no requieren centrales energéticas de reserva que, en la actualidad, son plantas infrutilizadas. Las energías renovables gestionables son, por tanto, aquellas

que sirven como base para el sistema energético y que a su vez lo hacen sostenible.

Las energías renovables intermitentes son fuentes generalmente predecibles pero discontinuas, supeditadas a la presencia de un elemento natural que no puede ser controlado por el ser humano, como el viento o la luz del sol. La intermitencia propia de estas fuentes de energía supone que las redes eléctricas deben estar preparadas para funcionar con o sin su aportación. Para ello, los sistemas energéticos cuentan con centrales energéticas gestionables de reserva que puedan generar energía cuando existe una demanda energética que estas fuentes no pueden cubrir.

Las proyecciones de la Agencia Internacional de la Energía estiman que podría generarse el 18% de la energía primaria a través de fuentes de energías renovables en el año 2035, y que el aumento de renovables en China será mayor que el de la Unión Europea, Estados Unidos y Japón juntos.

Sin embargo, a pesar de estos positivos augurios, su crecimiento no siempre es sencillo ni suficiente con respecto a la evolución de la demanda en países emergentes y en desarrollo, ni resulta fácil o ajeno a las controversias cuando se trata de sustituir la oferta en mercados maduros.

### 1.2.1 Desarrollo sostenible

Históricamente; el hombre ha construido diferentes instrumentos para mantener, atender y satisfacer necesidades de desarrollo y progreso económico, cultural y tecnológico. Estas necesidades son originadas en principio para lograr beneficio social. No obstante, el camino que ha elegido para tratar de alcanzar estos objetivos son: el de un desarrollo y el de un crecimiento dispar; que si bien produce satisfactores, al mismo tiempo transforma y explota al sistema natural de manera excesiva y no organizada o no sostenida.

La explotación tecnológica permite al hombre mantener el nivel y estilo de vida que desea, y el que ha seguido a la sociedad en general. Sin embargo, este proceso se ha traducido en agotamiento de recursos, destrucción de los

ecosistemas naturales, pérdida de la fertilidad y deterioro de los suelos agrícolas, etcétera.

Se entiende entonces por Desarrollo Sostenible el atender y satisfacer las necesidades de desarrollo y progreso económico, cultural y tecnológico, evitando el agotamiento de recursos, destrucción de los ecosistemas naturales, pérdida de la fertilidad y deterioro de los suelos agrícolas, protegiendo así el medio ambiente nacional y mundial para el beneficio de las generaciones futuras y mejorando constantemente la calidad de vida.

La demanda de energía y de servicios conexos, con miras al desarrollo social y económico y a la mejora del bienestar y la salud de las personas, va en aumento. Todas las sociedades necesitan de servicios energéticos para cubrir las necesidades humanas básicas (por ejemplo, de alumbrado, cocina, ambientación, movilidad y comunicación) y para los procesos productivos. Desde 1850, aproximadamente, la utilización de combustibles de origen fósil (carbón, petróleo y gas) en todo el mundo ha aumentado hasta convertirse en el suministro de energía predominante, situación que ha dado lugar a un rápido aumento de las emisiones del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

### 1.2.2 Efecto invernadero

El clima de la Tierra está dirigido por un flujo de energía continuo desde el Sol. Aproximadamente un 30 % es devuelto al espacio en forma inmediata, pero la mayoría del restante 70 % pasa a través de la atmósfera para calentar la superficie terrestre. La Tierra debe enviar esta energía de vuelta al espacio en la forma de radiación infrarroja. Estando mucho más fría que el Sol, la Tierra no emite energía como luz visible. En cambio, emite radiación infrarroja o radiación térmica. Los gases de efecto invernadero en la atmósfera bloquean la radiación infrarroja y no le permiten escapar directamente desde la superficie del planeta al espacio. De esta manera, al aumentar la concentración de gases de invernadero, se incrementa la cantidad de calor atrapado en la atmósfera, dando origen al Calentamiento Global del Planeta.

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que genera la prestación de servicios energéticos han contribuido considerablemente al aumento histórico de las concentraciones de esos gases en la atmósfera. En el Cuarto Informe de Evaluación (CIE) del IPCC se concluyó que "la mayor parte del aumento observado en el promedio de las temperaturas desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente<sup>2</sup> al aumento observado en las concentraciones de GEI antropogénicas". Los datos recientemente obtenidos confirman que el consumo de combustibles de origen fósil representan la mayor parte de las emisiones mundiales de GEI de origen antropogénico<sup>3</sup>. Las emisiones siguen aumentando y, al término de 2010, las concentraciones de CO<sub>2</sub> eran ya superiores a 390 ppm, un 39% por encima de los niveles preindustriales. Hay diversas opciones para disminuir las emisiones de GEI del sistema energético, sin dejar por ello de cubrir la demanda mundial de servicios energéticos. En el CIE se evaluaron algunas de estas opciones, como las relativas a la conservación y eficiencia energéticas, el reemplazo de combustibles de origen fósil, las energías renovables, la energía nuclear, o la captura y el almacenamiento del dióxido de carbono. Para evaluar completamente una cartera de opciones de mitigación habría que evaluar sus respectivos potenciales de mitigación, su contribución al desarrollo sostenible y todos los riesgos y costos concomitantes. El presente informe se centrará principalmente en el papel que podría desempeñar una amplia utilización de tecnologías de la energía renovable incorporadas a una cartera de opciones de mitigación. Además de su gran potencial para mitigar el cambio climático, las energías renovables pueden aportar otros beneficios. Si se utilizan de forma adecuada, las energías renovables pueden contribuir al desarrollo social y económico, favorecer el acceso a la energía y la seguridad del suministro de energía, y reducir sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud. En la mayoría de las situaciones será necesario adoptar políticas orientadas a fomentar modificaciones al sistema energético que incrementen la proporción de la energía renovable en el conjunto de energías. La adopción de tecnologías de la energía renovable ha aumentado rápidamente en los últimos años, y las proyecciones indican que su porcentaje de utilización aumentará sustancialmente en los escenarios de mitigación más ambiciosos. Para conseguir los aumentos de inversión necesarios en materia de tecnología e infraestructura será necesario adoptar políticas adicionales.

## 1.3 Estado actual de las energías renovables

### 1.3.1 Panorama mundial

A nivel mundial hay una concientización cada vez mayor sobre la importancia de la energía renovable y la eficiencia energética, las cuales son críticas no sólo para atender el cambio climático, sino para crear nuevas oportunidades económicas y proporcionar acceso a la energía a miles de millones de personas que aún no cuentan con servicios modernos para el suministro de energía. Durante la década pasada, y particularmente en años recientes, han sido posibles avances en tecnologías de energía renovable, incrementos en la capacidad de generación a nivel mundial, así como rápidas reducciones de costos gracias al apoyo brindado por las políticas económicas, mismas que han atraído una cantidad significativa de inversiones e impulsado la baja de costos, por medio de economías de escala.

En 2014 la energía renovable siguió desarrollándose, aun con el creciente consumo de energía a nivel mundial (particularmente en los países en desarrollo), y con el declive dramático en los precios del petróleo durante la segunda mitad del año como telón de fondo. A pesar de que el uso de energía estuvo en aumento, por primera vez en cuatro décadas las emisiones mundiales asociadas con el consumo de energía se mantuvieron estables en 2014; al tiempo que la economía mundial creció. Esta estabilización se debe tanto a la continua y cada vez mayor penetración de la energía renovable, como a las mejoras en eficiencia energética. El mundo entero está cada vez más consciente de que las energías renovables (y la eficiencia energética) son críticas para atender los problemas del cambio climático, crear nuevas oportunidades económicas, y proporcionar acceso a la energía a los miles de millones de personas que aún no cuentan con servicios modernos para el suministro de electricidad. A pesar de que la discusión se encuentra limitada por el momento, las energías renovables también son un elemento importante para la adaptación al cambio climático, pues se mejoraría la resistencia de los sistemas de energía existentes y se garantizaría la entrega de servicios energéticos aún en

condiciones climáticas inestables. La energía renovable proporcionó un estimado 19,1% del consumo mundial total de energía en 2013, mientras que el crecimiento en la capacidad y generación continuaron su expansión durante el 2014. La capacidad de calentamiento creció con un paso constante, y la producción de biocombustibles para transporte aumentó por segundo año consecutivo, después de su disminución en el período 2011-2012. El crecimiento más rápido, así como el incremento más sustancial en capacidad de generación se dieron en el sector eléctrico, encabezados por las energías hidráulica, eólica y solar FV. Muchos factores que han sido responsables por este crecimiento, incluyendo el apoyo a políticas de energía renovable y la creciente competitividad de costos de las fuentes renovables. En muchos países, las energías renovables son altamente competitivas con las fuentes convencionales de energía. Al mismo tiempo, el crecimiento sigue siendo moderado debido a los subsidios disponibles para los combustibles fósiles y para la energía nuclear, particularmente en países en desarrollo. Aunque Europa permaneció como un mercado importante y un centro de innovación, la actividad continuó dirigiéndose hacia otras regiones. Una vez más en 2014, China lideró con el mayor número de capacidad de generación de energía renovable instalada, mientras que Brasil, India y Sudáfrica reportaron una gran porción de capacidad añadida en sus respectivas regiones. Asimismo, un número creciente de países en desarrollo en toda Asia, África y América Latina se convirtieron en fabricantes e instaladores importantes de tecnologías de energía renovable. De manera paralela con el crecimiento en los mercados de energía renovable, 2014 tuvo avances significativos en el desarrollo y el empleo de los sistemas de almacenamiento de energía en todos los sectores. Durante el año también se pudo percibir una mayor electrificación en el transporte y en los aparatos de calefacción, lo que resalta el potencial para una mayor superposición entre sectores en un futuro cercano.

En 2015 las energías renovables representaron aproximadamente el 58,5% de las adiciones netas en la capacidad mundial de generación de energía. Las energías hidráulica, eólica y solar FV dominaron el mercado. Hacia el final del año, las energías renovables constituyeron un estimado del 27,7% de la capacidad generadora de energía del planeta, misma que es suficiente para abastecer cerca del 22,8% de la electricidad mundial. Las fuentes variables de

energía renovable están logrando niveles altos de penetración en varios países. Como respuesta, los legisladores de algunas jurisdicciones están pidiendo a las empresas prestadoras de estos servicios que actualicen sus modelos de negocios y la infraestructura de sus redes eléctricas. Australia, Europa, Japón y América del Norte han experimentado un crecimiento significativo en el número de “pro-sumidores” residenciales, que son consumidores de electricidad que producen su propia energía. También en 2014, grandes corporaciones e instituciones de todo el mundo se comprometieron a comprar electricidad renovable, o a invertir en su propia capacidad de generación de energía renovable.

A pesar de que hay mucho potencial y puntos de entrada para la energía renovable en el sector transporte, su desarrollo se ha visto limitado; mientras que la prioridad de las políticas, los mercados y las industrias se ha centrado en los biocombustibles líquidos.

En la siguiente tabla se muestra el panorama sobre las Energías renovables en el 2015, se observan las inversiones económicas y la capacidad instalada en energías renovables.

Tabla 1 Indicadores de Energías Renovables 2015

		2014	2015
<b>INVERSIONES</b>			
Inversiones nuevas (anuales) en electricidad y combustibles renovables <sup>1</sup>	Miles de millones de dólares (USD)	273	<b>285,9</b>
<b>ELECTRICIDAD</b>			
Capacidad de electricidad renovable (total, sin incluir hidráulica)	GW	665	<b>785</b>
Capacidad de energía renovable (total, incluyendo energía hidráulica)	GW	1.701	<b>1.849</b>
 Capacidad de energía hidráulica <sup>2</sup>	GW	1.036	<b>1.064</b>
 Capacidad de bioenergía <sup>3</sup>	GW	101	<b>106</b>
 Generación de bioenergía (anual)	TWh	429	<b>464</b>
 Capacidad de energía geotérmica	GW	12,9	<b>13,2</b>
 Capacidad de energía solar FV	GW	177	<b>227</b>
 Energía solar térmica de concentración	GW	4,3	<b>4,8</b>
 Capacidad de energía eólica	GW	370	<b>433</b>
<b>CALOR</b>			
 Capacidad de calentamiento solar de agua <sup>4</sup>	GW <sub>th</sub>	409	<b>435</b>
<b>TRANSPORTE</b>			
 Producción de etanol (anual)	billones de litros	94,5	<b>98,3</b>
 Producción de biodiésel (anual)	billones de litros	30,4	<b>30,1</b>

Tabla 2 Países líderes en Energía Renovables

	1	2	3	4	5
Inversión en electricidad y combustibles renovables (sin incluir energía hidráulica mayor a 50 MW)	<b>China</b>	Estados Unidos	Japón	Reino Unido	India
Inversión en electricidad y combustibles renovables por unidad de PIB <sup>1</sup>	<b>Mauritania</b>	Honduras	Uruguay	Marruecos	Jamaica
Capacidad de energía geotérmica	<b>Turquía</b>	Estados Unidos	México	Kenya	Alemania/Japón
Capacidad de energía hidráulica	<b>China</b>	Brasil	Turquía	India	Vietnam
Capacidad solar FV	<b>China</b>	Japón	Estados Unidos	Reino Unido	India
Capacidad de energía solar de concentración (CSP) <sup>2</sup>	<b>Marruecos</b>	South Africa	Estados Unidos	-	-
Capacidad de energía eólica	<b>China</b>	Estados Unidos	Alemania	Brasil	India
Capacidad de calentamiento solar de agua	<b>China</b>	Turquía	Brasil	India	Estados Unidos
Producción de biodiesel	<b>Estados Unidos</b>	Brasil	Alemania	Argentina	Francia
Producción de etanol combustible	<b>Estados Unidos</b>	Brasil	China	Canadá	Tailandia

**Capacidad o generación total al final de 2015**

	1	2	3	4	5
<b>ELECTRICIDAD</b>					
Electricidad renovable (incl. hidráulica)	<b>China</b>	Estados Unidos	Brasil	Alemania	Canadá
Energía renovable (hidráulica no incl.)	<b>China</b>	Estados Unidos	Alemania	Japón	India
Capacidad de energía renovable <i>per capita</i> (sin incl. hidráulica <sup>3</sup> , entre los 20 líderes)	<b>Dinamarca</b>	Alemania	Suecia	España	Portugal
Generación de bioenergía	<b>Estados Unidos</b>	China	Alemania	Brasil	Japón
Capacidad de energía geotérmica	<b>Estados Unidos</b>	Filipinas	Indonesia	México	Nueva Zelanda
Capacidad de energía hidráulica <sup>4</sup>	<b>China</b>	Brasil	Estados Unidos	Canadá	Rusia
Generación de energía hidráulica <sup>4</sup>	<b>China</b>	Brasil	Canadá	Estados Unidos	Rusia
Energía solar térmica de concentración (CSP)	<b>España</b>	Estados Unidos	India	Marruecos	Sudáfrica
Capacidad solar FV	<b>China</b>	Alemania	Japón	Estados Unidos	Italia
Capacidad solar FV <i>per capita</i>	<b>Alemania</b>	Italia	Bélgica	Japón	Grecia
Capacidad de energía eólica	<b>China</b>	Estados Unidos	Alemania	India	España
Capacidad de energía eólica <i>per capita</i>	<b>Dinamarca</b>	Suecia	Alemania	Irlanda	España
<b>CALOR</b>					
Capacidad del captador solar de agua <sup>5</sup>	<b>China</b>	Estados Unidos	Alemania	Turquía	Brasil
Capacidad de calentamiento del captador solar de agua <i>per capita</i> <sup>5</sup>	<b>Austria</b>	Chipre	Israel	Barbados	Grecia
Capacidad de calor geotérmico <sup>6</sup>	<b>China</b>	Turquía	Japón	Islandia	India
Capacidad de calor geotérmico <i>per capita</i> <sup>6</sup>	<b>Islandia</b>	Neuva Zelanda	Hungría	Turquía	Japón

(\* REN21\_GSN2016\_KeyFindings\_sp\_05)

Está claro que las energías renovables se han convertido en unos de los recursos principales de energía. La experiencia del 2014 demostró que la penetración y el uso de fuentes de energía tanto variables como no variables se encuentran en franco crecimiento y, por lo tanto, contribuyen a la diversificación de la mezcla de energía. A pesar de que muchas tecnologías de energía renovable han experimentado una expansión rápida, el crecimiento de la capacidad de generación, así como las mejoras en la eficiencia energética se encuentran debajo del porcentaje necesario para alcanzar las metas de la iniciativa Energía Sostenible para Todos (SE4ALL por sus siglas en inglés), las cuales consisten en duplicar el nivel de uso de energía renovable, duplicar las mejoras mundiales en eficiencia energética, y proporcionar acceso universal a la energía para el año 2030.

### 1.3.2 Panorama en México

La reciente Reforma Energética, prevé y promueve el fortalecimiento de las energías renovables. Durante el primer semestre del 2015 se alcanzaron los siguientes hitos en la implementación de la Reforma del sector eléctrico, los cuales se espera tenga un impacto directo sobre el cumplimiento de las metas a 2018 y 2024:

Envío a la Comisión Federal de Mejora Regulatoria (COFEMER) del Anteproyecto de las disposiciones administrativas de carácter general sobre la Evaluación de Impacto Social en el sector energético.

Publicación de los requisitos para la adquisición de Certificados de Energías Limpias en 2018, el cual será de 5.0% en el periodo comprendido entre el 1 de enero y el 31 de diciembre. Expedición de las disposiciones administrativas de carácter general para la solicitud de permisos de generación de energía eléctrica.

Expedición de los criterios mediante los que se establecen las características específicas de la infraestructura requerida para la Interconexión de Centrales Eléctricas y Conexión de Centros de Carga.

Recepción y revisión de las solicitudes de áreas geotérmicas realizadas por la CFE a la SENER (Séptimo Transitorio de la Ley de Energía Geotérmica).

Publicación del Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional 2015 - 2029.

Por otro lado, el 11 de agosto de 2014 la CFE se convirtió en una Empresa Productiva del Estado, por lo que el término de Servicio Público, usado en Informes anteriores, dejó de tener vigencia.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Energías Renovables (INER), México cuenta con abundantes recursos para la generación de electricidad con fuentes renovables. Existe un potencial probado para generar hasta 13,167 GWh/año de electricidad. Sin embargo, esta estimación se incrementa si consideramos las reservas probables y probadas.

Tabla 3 Potencial de generación eléctrico con energías renovables (GWh/año)

Recursos	Geotérmica	Mini hidráulica	Eólica	Solar	Biomasa
<b>Posible</b>	16,165	-	87,600	6,500,000	11,485
<b>Probable</b>	95,569	1,805	9,597	-	391
<b>Probado</b>	892	1,365	9,789	542	579

Prospectiva de Energías Renovables 2013/2027 / Inventario Nacional de Energías Renovables, SENER

### 1.3.2.1 Capacidad instalada

Al cierre del primer semestre de 2015 la capacidad de generación mediante energías renovables sumo 16953.2 MW, lo que represento al 25.3% de la capacidad de generación total, con lo cual las energías renovables en el país crecieron 9.6% respecto al mismo periodo del 2014.

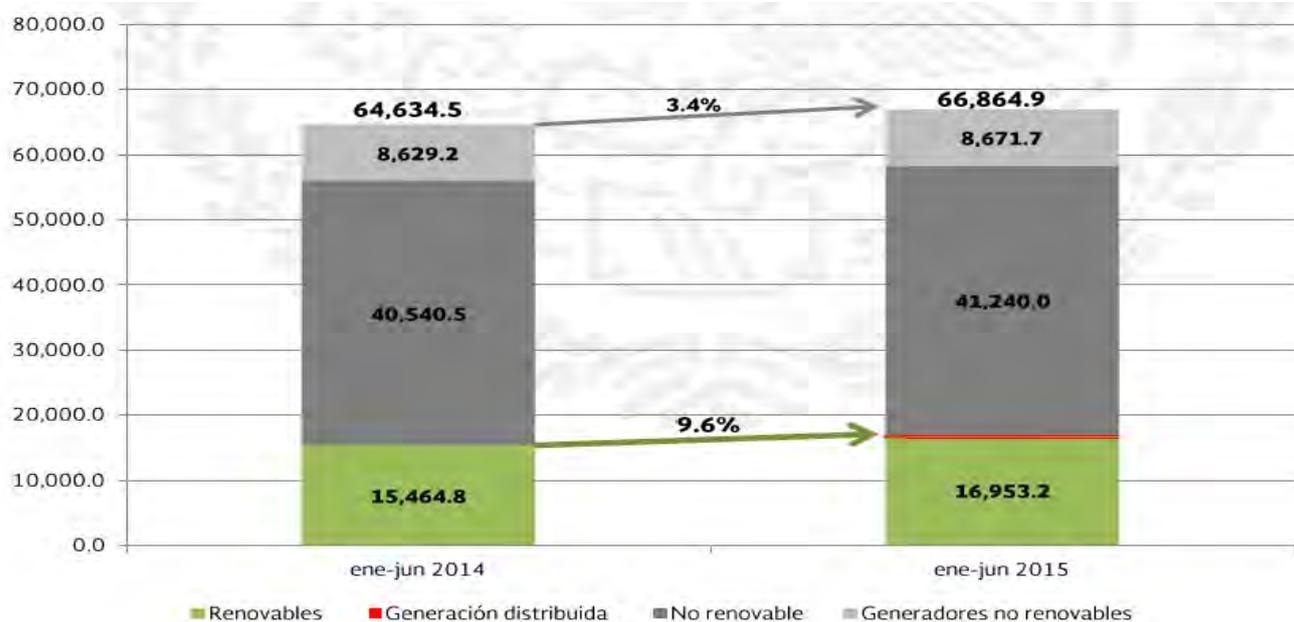


Figura 1 Crecimiento de la capacidad instalada de energías renovables en el SEN al primer semestre del 2015 (MW).

(Prospectiva de Energías Renovables 2013/2027 / Inventario Nacional de Energías Renovables, SENER)

### 1.3.2.2 Proyectos en marcha

En enero de 2015, la Comisión Reguladora de Energía (CRE) registro 9,520 MW en proyectos que se encuentran en etapa de construcción y por iniciar obras y la meta del gobierno federal es alcanzar una participación del 35 % en la generación total de electricidad con tecnologías limpias para el año 2024.

Tabla 4 Capacidad autorizada en proyectos de energías renovables por entidad (mw).

ENTIDAD FEDERATIVA	HIDROELECTRICA	BIOENERGIA	GEOTERMICA	SOLAR	EÓLICA	TOTAL
1 Oaxaca	47	0			1,292	1,339
2 Coahuila		5		333	501	838
3 Sonora	37	0		755	27	818
4 Tamaulipas		0		90	603	693
5 Chihuahua	10	1		676		687
6 Baja California	28	0		45	559	632
7 Veracruz	534	0		1	40	575
8 Puebla	135	0		30	366	531
9 Durango	30	0		292	121	443
10 Zacatecas		0		240	180	420
11 Nuevo León		3			302	305
12 San Luis Potosí		1		90	200	291
Otros	304	78	65	1,281	220	
<b>Total</b>	<b>1,125</b>	<b>88</b>	<b>65</b>	<b>3,833</b>	<b>4,410</b>	<b>9,520</b>

### 1.3.2.3 Inversión extranjera directa

Cada vez más empresas transnacionales pertenecen al sector de energías renovables están prefiriendo invertir en México considerando un destino atractivo y confiable, tanto desarrolladores de proyecto como empresas proveedoras de equipos ya cuentan con presencia en el país.

Tabla 5 Proyectos de inversión extranjera directa 2010-2014\*

	Eólica	Solar	Biomasa	Marina	Total
España	3,831	1,710	15		5,556
Estados Unidos	3,240	435			3,675
Alemania	995	500			1,495
Portugal	280	280			560
Reino Unido		500	10		510
Bermuda		500			500
Italia	326				326
Israel				280	280
Taiwán		280			280
Francia		190			190
<b>Total</b>	<b>8,672</b>	<b>4,395</b>	<b>25</b>	<b>280</b>	<b>13,372</b>

Tabla 6 Proyección de capacidad adicional instalada 2018-2028 (MW)\*

	2018	2024	2028	% Part
Eólica	7,608	10,260	11,585	59%
Geotermia	178	258	338	2%
Bioenergía	92	494	671	3%
Solar FV	543	1,941	3,121	16%
Hidráulica < 30 MW	110	352	502	3%
Hidráulica > 30 MW	1,230	3,017	3,544	18%
<b>Total</b>	<b>9,761</b>	<b>16,322</b>	<b>19,761</b>	

En 2014 la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica en operación alcanzo los 66 MW, sin embargo, en Enero de 2015 la CRE registro 3,833 MW en proyectos que se encuentran en etapas de construcción y por iniciar obras.

Tabla 7 Proyectos por la CRE para la generación de energía solar

	# de proyectos	En Construcción MW	Por iniciar obras MW	Total	% Part
Sonora	25	237	518	755	19%
Chihuahua	20	181	495	676	17%
Coahuila	12	184	149	333	9%
Durango	14	156	136	292	8%
BCS	10	117	97	214	6%
Zacatecas	8	60	180	240	6%
Jalisco	11	149	70	219	6%
Guanajuato	9	64	149	214	6%
Sinaloa	6	150	30	180	5%
Aguascalientes	6	60	120	180	5%
Tamaulipas	3	90		90	2%
SLP	3	30	60	90	2%
Otros	17	271	80	351	9%
<b>Total</b>	<b>144</b>	<b>1,749</b>	<b>2,084</b>	<b>3,833</b>	

(\*[http://mim.promexico.gob.mx/JS/MIM/PerfilDelSector/EnergiasRenovables/Sector\\_ER\\_ESP.pdf](http://mim.promexico.gob.mx/JS/MIM/PerfilDelSector/EnergiasRenovables/Sector_ER_ESP.pdf))

## CAPÍTULO 2. ENERGÍA SOLAR. DISPOSITIVOS FOTOVOLTAICOS

### 2.1 Introducción

El Sol es una fuente inagotable de energía debido a las reacciones nucleares. La energía irradiada por el Sol procede de la fusión de átomos de deuterio para dar átomos de helio. El astro irradia un segundo más de energía que la consumida por la humanidad en toda su historia. Una parte de esta energía llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética. Bajo la perspectiva humana, la fuente de energía solar puede considerarse como inagotable, el Sol ha brillado en el cielo desde hace unos 4,500 millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia. Al menos, los científicos especulan que la edad restante de esta estrella es de más de 5,000 millones de años.

El Sol, es fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el ser humano ha utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas nuestras necesidades si aprendemos cómo aprovechar de forma adecuada la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Sería poco racional dejar de aprovechar, por todos los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable, que puede liberarnos definitivamente de la dependencia de los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural), ya que son recursos finitos que inexorablemente van a agotarse; de ahí su denominación de "recursos no renovables".

Por fortuna, existen también las "energías renovables", que se definen como formas de energía natural que tienen una fuente prácticamente inagotable con respecto al tiempo de vida de un ser humano en el planeta, y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable. Dentro de estos tipos de energía se encuentran: la solar, la eólica (viento), la mini hidráulica (ríos y pequeñas caídas de agua), la biomasa (materia orgánica), la geotermia (calor de las capas internas de la Tierra) y la oceánica, principalmente. Las energías renovables ofrecen la oportunidad de obtener energía útil para diversas aplicaciones, su aprovechamiento tiene menores impactos ambientales que el de las fuentes convencionales y poseen el potencial para satisfacer todas nuestras

necesidades de energía presentes y futuras. Además, su utilización contribuye a conservar los recursos energéticos no renovables y propicia el desarrollo regional.

La energía solar es la energía radiante emitida por el Sol y recibida por la Tierra en forma de ondas electromagnéticas. El Sol emite continuamente radiación a todo el espacio y por consiguiente a la Tierra, recibiendo aproximadamente  $1.7 \times 10^{11}$  MW, de tal medida que la Tierra es un gran colector de energía; Con la energía recibida en una hora aproximadamente nuestro planeta es suficiente para satisfacer la demanda anual de la población mundial.

Hay dos formas conocidas es que el humano puede aprovechar la energía solar; Una es por medio de procesos foto térmicos para el calentamiento de fluidos y genera calor de procesos y la segunda, es por medio del efecto fotoeléctrico por medio de los módulos fotovoltaicos y la unidad mínima en la que se realiza dicho efecto se le llamada celda solar, los cuales convierten la luz solar en electricidad sin usar ningún proceso intermedio. A la integración de módulos fotovoltaicos en conjunto a las cargas eléctricas (dispositivos eléctricos) se le llama Sistemas Fotovoltaicos.

Debido al alto costo de producción de las diferentes tecnologías fotovoltaicas las aplicaciones estuvieron acotadas en proyectos en proyectos donde el precio del producto no era limitante como es el caso de aplicaciones espaciales. La meta ha sido obtener un producto de alta eficiencia y económico para que pueda ser aplicado en sitios en donde se desee una generación de energía limpia.

## 2.2 Radiación solar

La luz solar es un conjunto de radiaciones electromagnéticas similares a las ondas de radio pero de mayor frecuencia. La mayor parte esta situadas en la parte del visible con una parte importante en el infrarrojo y una mínima en el ultravioleta del espectro electromagnético, las longitudes de ondas se encuentras en 0.2 y 0.3 micras, conocida como banda solar. Del total de la energía contenida en esas longitudes de onda, el 7% está en la región del

ultravioleta, el 46,8% en la visible y el resto en la banda del infrarrojo cercano, conforme son mostrados en la figura 2.1. La radiación emitida por cuerpos a 100 ó más, 1000 °C por ejemplo, ocurre en la región del infrarrojo, entre 0.7 y 100µm. La región de longitudes de onda superiores a 3,0 µm se conoce como banda de emisión.

La descripción de la radiación solar tiene como base su naturaleza espectral y direccional, y puede entenderse como una distribución continua y no-uniforme de varios componentes monocromáticos, que explica la variación de la intensidad de radiación en función de la longitud de onda. Su naturaleza direccional puede simplificarse admitiendo que la radiación es emitida de modo uniforme en todas las direcciones, es decir, la distribución y la superficie emisora son perfectamente difusas.

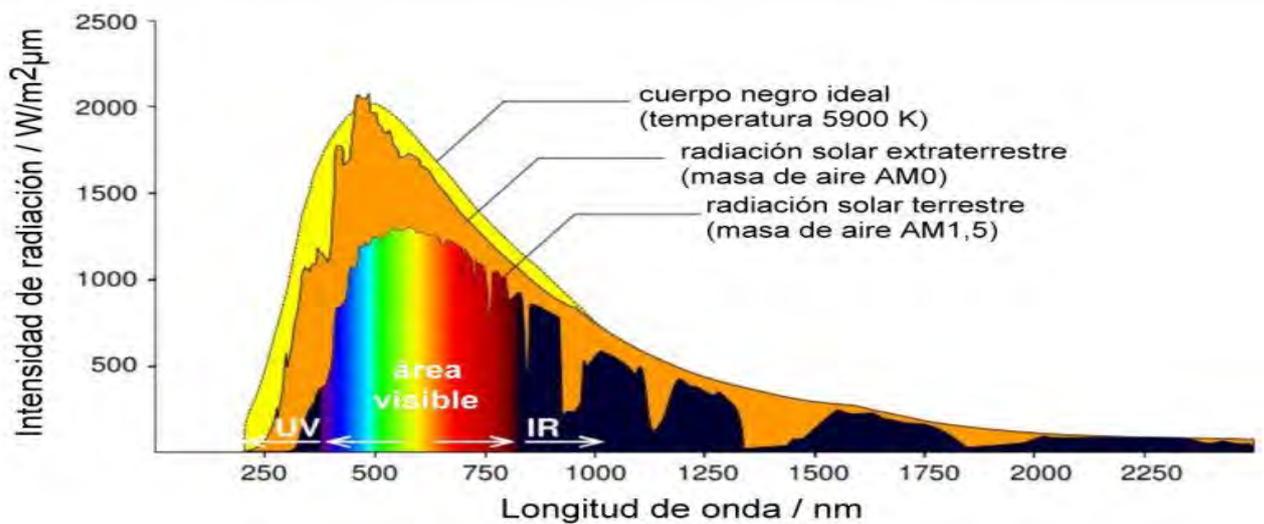


Figura 2 Espectro de radiación solar

( 1© Wikimedia Creative Commons Lincence

La proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente:

Ultravioleta: 7%

Luz visible: 43%

Infrarrojo: 49%

El resto: 1%

Las características más importantes que presenta la radiación solar en la Tierra:

- Gran dispersión del espectro de radiación solar por lo tanto baja intensidad
- Variabilidad en el tiempo por lo cual provoca intermitencia.

Estos dos principales problemas son importante cuando se desea aprovechar la energía procedente del sol, desde el punto de vista de los sistemas que utilizan la energía solar, interesa cuantificar la cantidad de energía disponible que incide en una superficie en la Tierra y de su relación respecto a parámetros geográficos y climatológicos.

Se utilizan habitualmente dos términos, Irradiación e Irradiancia, cuyas definiciones son ligeramente diferente. Irradiación se refiere a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo, mientras que el termino Irradiancia se refiere a la potencia instantánea recibida, en términos de unidades la Irradiancia se mide en  $W/m^2$ , mientras que la irradiación en  $Wh/m^2$ .

La irradiancia proviene del Sol que se recibe sobre una superficie perpendicular al Sol en el exterior de la atmosfera, puede considerarse como una constante e igual a  $1,367 W/m^2$ . Debido a los movimientos de rotación y translación de la Tierra en torno al sol y debido a los efectos de difusión de la atmosfera terrestre, la Irradiancia recibida en la atmosfera de la tierra presenta unas variaciones temporales bien definidas en unos casos (Variaciones día/noche, verano/invierno) y estocásticas en otros (presencia de nubes). Otros efectos importantes es la posición de la superficie captadora respecto de la incidencia de los rayos solares (ángulo de inclinación y orientación). La irradiación solar instantánea que incide sobre la superficie terrestre varía durante el día desde cero  $W/m^2$  a la salida del sol, un valor máximo hacia el mediodía y otra vez cero cuando el sol se pone. La irradiancia solar máxima que se produce hacia el mediodía, puede ser igual o mayor que  $1\ 000 W/m^2$  cuando la componente difusa es mínima y el lugar geográfico propicio.

Tipos de Radiación

Radiación directa: llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

Radiación Difusa: Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación se denomina difusa, va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

Radiación Reflejada: Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

Radiación global: Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones.

### 2.3 Módulos Fotovoltaicos

Las células fotovoltaicas convierten la energía de la luz emitida por el Sol en energía eléctrica. Aunque el fenómeno fotoeléctrico fue descubierto en 1837, el proceso de producción de corriente en un material sólido con la ayuda de la luz solar no fue entendido completamente hasta 100 años después. El rendimiento de conversión, esto es, la proporción proporcional de luz solar que la célula convierte en energía eléctrica, es fundamental en los dispositivos fotovoltaicos (FV) ya que el rendimiento hace de la energía solar FV una energía más competitiva con otras fuentes.

El efecto FV es la base del proceso mediante el cual la célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones o dicha de otra forma, partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV, pueden ser reflejados, absorbidos o pasar por el material y únicamente los fotones absorbidos pueden generar electricidad. Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a

un electrón de un átomo de la célula, con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su depósito normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.

Las células solares se fabrican a partir de materiales semiconductores, esto es, son materiales que actúan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se aumenta su energía. Actualmente la mayoría de las células FV esta basadas en silicio, sin embargo se están investigando en otros tipos de materiales como el Arsénico de Galio, Cobre-Indio—Galio-Selenio (CIGS), CdTe, etc.

Cuando la luz solar incide sobre las células FV partir de los materiales semiconductores, los fotones que llegan con la luz solar son capaces de transmitir su energía a los electrones de valencia del semiconductor para que rompa el enlace que los mantiene unidos a los átomos respectivos (formación de pares electrón-huecos). Por cada enlace roto queda un electrón libre para circular dentro del sólido, la falta del electrón en el enlace roto se le llama hueco, también puede desplazarse libremente en el sólido, transfiriéndose de un átomo a otro debido al desplazamiento del resto de los electrones de los enlaces. Los huecos se comportan en muchos aspectos como partículas con carga positiva igual a la del electrón. El movimiento de los electrones y huecos en direcciones opuestas generan una corriente eléctrica en el semiconductor capaz de circular por un circuito externo y liberar en él energía cedida por los fotones al crear los pares electrón-hueco; Para separar los electrones de los huecos e impedir que restablezcan el enlace, se utiliza un campo eléctrico que hace que ambos circulan en direcciones opuestas, dando lugar a una corriente en el sentido del citado del campo eléctrico.

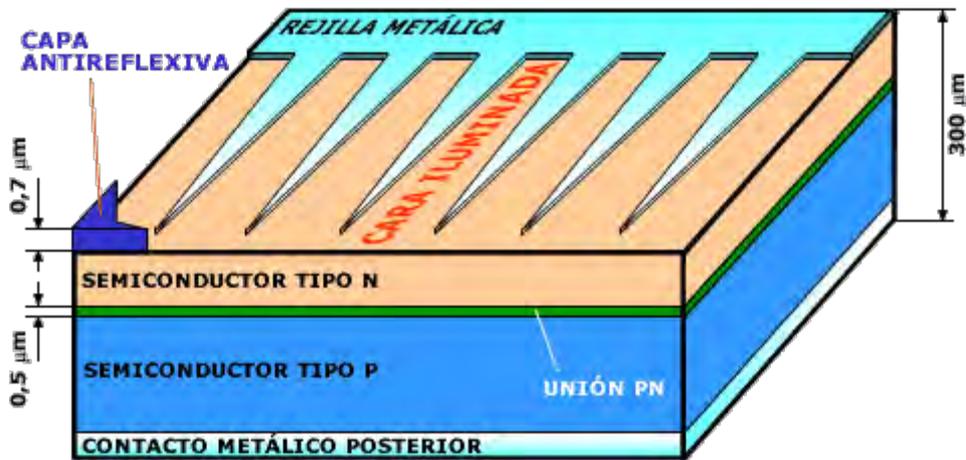


Figura 3 Estructura de una célula fotovoltaica

([https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/03\\_celula/01\\_basico/3\\_celula\\_04](https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/03_celula/01_basico/3_celula_04))

Los primeros dispositivos FV tenían rendimiento de 1-2% mientras que actualmente el rendimiento de los módulos FV están alrededor de 10-25% en función de su tecnología, también con los años los costos de fabricación de estos dispositivos ha disminuido considerablemente con los años.

Un módulo fotovoltaico consiste en un conjunto de células FV eléctricamente conectadas unas a otras conectadas eléctricamente en serie y/o paralelo, encapsuladas, montadas en un laminado y en una estructura de aluminio. Se pueden encontrar módulos de diferentes tamaños y formas, y pueden estar hechos de diferentes materiales, sin embargo el encapsulado más utilizado es un módulo está compuesto por “vidrio+eva(etilvenilacetato)+tedlar”.

Los módulos estaban diseñados principalmente para suministrar eléctricamente a determinado voltajes normalmente a 12 o 24 V para aplicaciones de baterías y la corriente producida depende del nivel de insolación. La estructura del módulo (principalmente de aluminio) protege a las células FV del medioambiente haciéndolas que sean muy fiables eléctricamente y durables (aproximadamente 20 años). Aunque con un solo módulo puede ser suficiente para muchas aplicaciones y es habitual conectar dos o más módulos para formar un generador FV. Los generadores o módulos FV producen corriente continua (DC) y pueden ser conectados en serie y/o paralelo para producir cualquier tensión o

corriente para satisfacer la potencia requerida según sea la aplicación del usuario.

Las células solares constituyen un producto intermedio de la industria fotovoltaica: proporcionan valores de tensión y corriente limitados, en comparación a los requeridos normalmente por los aparatos convencionales son extremadamente frágiles, eléctricamente no aisladas y sin un soporte mecánico. Después son ensambladas de la manera adecuada para constituir una única estructura: los módulos fotovoltaicos.

El módulo fotovoltaico es una estructura robusta y manejable sobre la que se colocan las células fotovoltaicas. Los módulos pueden tener diferentes tamaños (los más utilizados tienen superficies que van de los 0.5 m<sup>2</sup> a los 1.3 m<sup>2</sup>) y constan normalmente de 36 a 70 células conectadas eléctricamente en serie.

#### 2.4 Parámetros eléctricos de un módulo fotovoltaico

La potencia eléctrica de un módulo FV depende de su área activa, el número de células, de su interconexión eléctrica y por supuesto de las condiciones de irradiancia y temperatura a las que el módulo se encuentra expuesto. Si un dispositivo con terminales aparece una diferencia de potencial (voltaje) debido a la exposición de la luz solar, se dice que en el dispositivo se está llevando a cabo el Efecto FV. En estas condiciones, si en las terminales del dispositivo se conecta una carga eléctrica, se producirá una corriente eléctrica capaz de realizar un trabajo en dicho elemento.

Los cuatro factores que determinan la potencia de salida de un módulo FV son:

- Rendimiento de sus células FV
- Resistencia de la carga (el punto de trabajo en la curva I-V)
- La irradiancia
- Temperatura de la célula (relacionada con la temperatura del medio ambiente)

El rendimiento de las células está definido por el proceso de fabricación de las mismas, los módulos comerciales disponibles actualmente poseen rendimientos en el rango 10-25% de conversión de la energía solar en electricidad.

Existe una competencia sana entre instituciones científicas internacionales. En los laboratorios se lograron eficiencias de más de 45%. Lamentablemente faltan años, hasta que estos productos de mejor eficiencia sean disponibles comercialmente a precios aceptables.

Para celdas de un elemento, William Shockley y Hans Queisser determinaron que teóricamente se puede convertir un máximo de 33.7% de la energía solar en electricidad. Para lograr más, hay que usar celdas combinadas de varias capas o de concentración. Para silicio, el elemento más usado, este límite es de 29%. Para el uso común se usan paneles de silicio por su alta fiabilidad a precios razonables. Paneles de celdas monocristalinas son las más eficientes, seguidas por las policristalinas.

Mientras los mejores paneles monocristalinos superan ligeramente el 20%, la mayoría de los paneles en producción hoy captan alrededor del 16% de la energía disponible de la luz. Los paneles amorfos y otros de capa fina pocas veces superan el 10%. Para usos especiales (por ejemplo satélites y el Mars Rover) se producen módulos de arseniuro de galio (GaAs) que alcanzan una eficiencia de 30% o unir varios elementos en células fotovoltaicas multiunión, superando 45% en laboratorios (vea gráfica).

Para un módulo FV, la corriente fotogenerada es directamente proporcional a la irradiancia incidente y aumenta muy ligeramente con la temperatura. El voltaje de circuito abierto es prácticamente independiente de la irradiancia y disminuye cuando aumenta la temperatura.

# Best Research-Cell Efficiencies

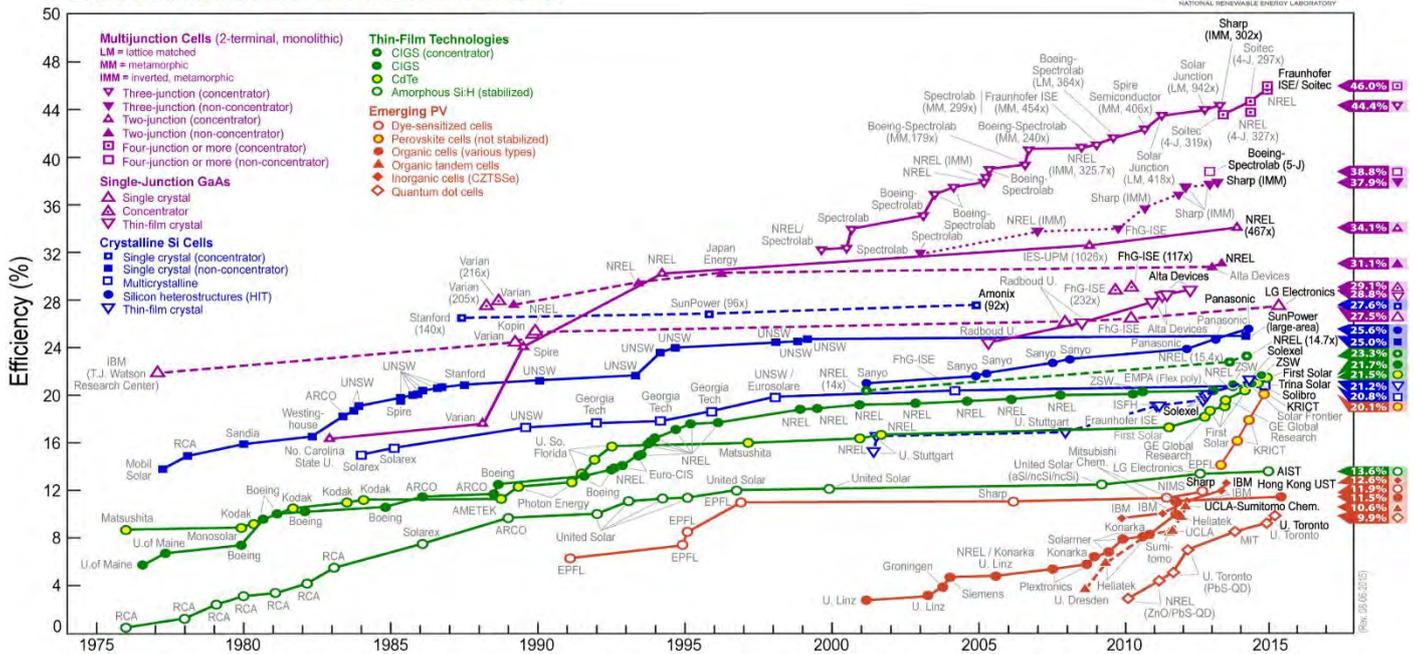


Figura 4 Eficiencias en las celdas fotovoltaicas 2016.

(National Renewable Energy Laboratory, NREL)

Las principales características eléctricas de un módulo fotovoltaico son:

Potencia de Pico (Wp): potencia suministrada por el módulo en condiciones estándar STC (Radiación solar = 1,000 W/m<sup>2</sup>, Temperatura = 25 °C; A.M. = 1.5).  
Correspondientes al par máximo I-V.

Corriente de máxima potencia (I<sub>mp</sub>): Es el valor de la corriente suministrada en el punto de máxima potencia y corresponde a un determinado de voltaje.

Tensión de máxima potencia (V<sub>mp</sub>): Es el valor de voltaje suministrado en el punto de máxima potencia y corresponde a una determinada corriente.

Corriente de corto circuito (I<sub>sc</sub>): Es la máxima corriente que producirá el módulo bajo condiciones estándar STC correspondientes a un voltaje igual a cero.

Tensión de circuito abierto (V<sub>oc</sub>): Es el máximo voltaje del dispositivo bajo unas condiciones estándar STC correspondientes a una corriente igual a cero.

Factor de forma (FF): Es el valor correspondiente al cociente entre P<sub>max</sub> y el producto de I<sub>sc</sub> x V<sub>oc</sub>. Puede venir expresado en tanto por ciento o tanto por 1, siendo el valor 100% el que corresponderá a un hipotético perfil de cuadrado, no

real. Nos da una idea de la calidad del dispositivo fotovoltaico, siendo éste tanto mejor cuánto más alto sea su factor de forma [1].

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (1)$$

## 2.5 Tecnologías fotovoltaicas para aplicaciones terrestres y oferta comercial

El silicio es el material más conocido y utilizado para la fabricación de células con aplicaciones comerciales, siendo a la vez uno de los materiales más abundantes de tierra, 20%, en forma de minerales de SiO<sub>2</sub> y silicatos. Sin embargo para la producción de células solares se necesita material de elevada pureza, que hay que fabricarlo. El silicio es un elemento de muy alta resistencia a alta resistencia ataque químicos.

### 2.5.1 Tecnología de silicio

#### Módulos de Silicio monocristalino

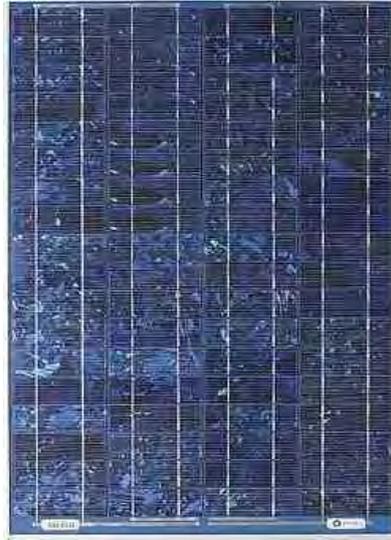
El lingote de silicio monocristalino tiene forma cilíndrica, 13-20 cm de diámetro y 200 cm de largo, y se obtiene por el crecimiento de un cristal filiforme en rotación lenta. Después, este cilindro se corta en obleas de 200 a 250 micras de espesor y la superficie superior es tratada para obtener “microsurcos” diseñadas para minimizar las pérdidas por reflexión. La principal ventaja de estas celdas es la eficiencia (18-22%), junto con una alta duración y las células fabricadas con esta tecnología se caracterizan generalmente por un color homogéneo azul oscuro.



*Figura 5 Módulo fotovoltaico de silicio monocristalino*

### Módulos de silicio Policristalino

Los cristales que constituyen este tipo de celdas se unen tomando diferentes formas y direcciones. De hecho las coloraciones que típicamente presentan los paneles de silicio policristalino son causadas por la diferente dirección de los cristales y en consecuencia presentan un comportamiento diferente con respecto a la luz. El lingote de silicio policristalino se obtiene por fusión y fundición del silicio en un molde con forma de paralelepípedo. Las obleas así obtenidos son de forma cuadrada y tienen estrías típicas de 180-300 micras de espesor. La eficiencia es menor en comparación con el silicio monocristalino (15 a 20%). De todos modos la duración es larga (comparable a la de silicio monocristalino) y el rendimiento se mantiene a lo largo del tiempo (80% de la eficiencia inicial después de 20 años). Las celdas elaboradas con dicha tecnología se pueden reconocer por el aspecto de la superficie donde los granos de cristal son muy visibles.



*Figura 6 Módulo fotovoltaico policristalino*

## 2.5.2 Tecnologías de película delgada

Aunque el silicio mono y policristalino denominan con claridad el mercado fotovoltaico, el gran aumento de ventas y fabricación hacen que el mercado fotovoltaico dependan muy fuertemente de la disponibilidad de la materia prima. Es por ello que se están desarrollando nuevos procesos tecnológicos orientados a la optimización del material base (fabricación de células cristalinas más delgadas, mejora de los procesos de corte, crecimiento de láminas de silicio de igual espesor al de la célula evitando el desperdicio de material en el proceso de corte) así como la utilización de nuevos materiales denominados películas delgadas. El nombre de lámina delgada es debido a que estas células son capas finas (5-6 micras) depositadas en sustratos baratos y accesibles (plásticos y vidrios).

### 2.5.2.1 Módulos de Silicio amorfo

Con un rendimiento relativamente bajo de entre un 10 y 20 por ciento, el silicio amorfo sale peor parado que las dos tecnologías de silicio cristalino. Sin embargo, el mejor comportamiento en condiciones de luz difusa y la fabricación

más económica debido al empleo de menos material son ventajas importantes de las células de capa fina producidas con silicio amorfo con respecto a las células de silicio cristalino. Para la fabricación se decanta una capa de silicio de menos de 1  $\mu\text{m}$  de grosor sobre vidrio u otro material de sustrato.

Los sólidos amorfos, como el vidrio común, son materiales en los que los átomos no están situados en ningún orden especial, No forman estructuras cristalinas y contiene un gran número de defectos estructurales y de enlaces. El coeficiente de absorción del silicio amorfo es 40 veces mayor que la del silicio monocristalino, por lo tanto la capa de 1 micra puede absorber el 90 % de la energía utilizable. Este factor junto con el hecho de que se puede producir a bajas temperaturas y puede ser depositado en sustratos de baja calidad influye en el bajo costo de fabricación.

Debido a sus propiedades especiales, las células de silicio amorfo suelen tener una capa ultrafina de 0.008 micras, una capa intrínseca 0.5-1 micras y una capa  $n^+$  0.02 micras. Actualmente se están fabricando módulos de silicio amorfo de dos y tres uniones, e incluso combinaciones de capas de silicio amorfo con silicio cristalino. El silicio amorfo tiene una desventaja de una degradación en potencia continua en el tiempo de operación, no obstante la simplicidad de los procesos de fabricación hace que se ms barato que el de silicio cristalino.

#### 2.5.2.2 Módulos de Telurio de Cadmio (CdTe)

El acrónimo CdTe corresponde a la combinación de telurio y cadmio que da lugar a la formación de telurio de cadmio (CdTe). El CdTe tiene un Gap de 1.44 eV también posee un elevado coeficiente de absorción, utilizando CdS como capa ventana. Uno de los problemas es su elevada resistencia eléctrica, solventada mediante la adición de una capa de ZnTe entre el CdTe y el contacto posterior. Este material es más económico que el silicio, pero también menos eficiente. Al contener cadmio, un metal pesado, suele garantizarse la retirada de los paneles tras su desinstalación. Hoy en día, con esta tecnología se alcanza un rendimiento máximo del 16 por ciento. Según datos de los fabricantes, los módulos solares

de CdTe superan en rendimiento a las células solares cristalinas en condiciones de poca luz o de temperaturas elevadas.

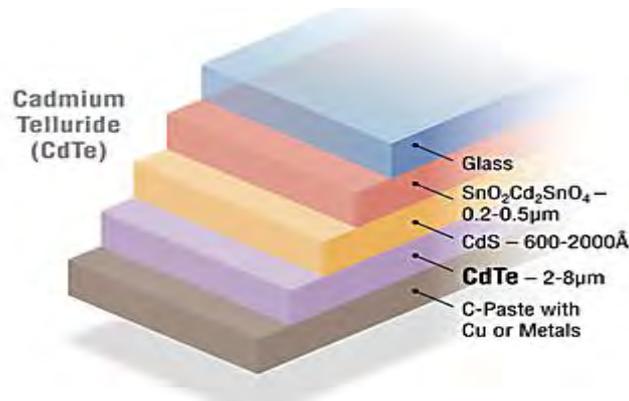


Figura 7 Estructura de una celda de Telurio de Cadmio (CdTe).

### 2.5.2.3 Módulos de Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS)

Otra tecnología de capa fina es la CIGS. CIGS es el acrónimo de los elementos cobre (C), indio (I), galio (G) y selenio (S). Actualmente se alcanzan rendimientos de entre el 20 y el 23 por ciento. Esta tecnología posee un alto potencial de desarrollo ya que, con el rendimiento máximo actual alcanzado de 14,6 por ciento (superficie total de paneles solares) en la producción comercial y los costes de fabricación relativamente bajos, el nivel de precios de la electricidad generada a partir de energía solar se acerca cada vez más al nivel de precios de la producción de electricidad a partir de combustibles fósiles. Por un lado, el panel solar CIGS ofrece la ventaja de una baja carga estática gracias a sus células ligeras y, por otro, es capaz de captar la radiación solar directa e indirecta, siendo por ello también apto para su uso tanto sobre tejados planos como en invierno.

## 2.6 Sistemas Fotovoltaicos

Un sistema Fotovoltaico (FV) es una instalación basada en módulos fotovoltaicos para producir energía eléctrica. Está formado por varios módulos fotovoltaicos conectados en serie y/o paralelo, y a su vez cada módulo fotovoltaico está

formado por unidades básicas llamadas células fotovoltaicas. Los módulos fotovoltaicos transforman la luz generada por el Sol directamente en energía eléctrica. Una de las principales características de los generadores fotovoltaicos que los diferencia de otras fuentes de energía renovables es que únicamente producen electricidad cuando reciben la luz del Sol y además la cantidad de energía es directamente proporcional a la irradiancia que incide sobre su superficie.

La energía solar Fotovoltaica (FV) está indicada por un amplio abanico de aplicaciones donde se necesita generar electricidad, ya sea para satisfacer las necesidades energéticas de aquellas que no disponen de la red eléctrica (sistemas fotovoltaicos autónomos) y los que generan la energía eléctrica y se inyecta a la red eléctrica (sistemas Fotovoltaicos interconectados a la red). La energía solar fotovoltaica contribuye al desarrollo de zonas rurales aisladas (electrificación rural) pero también se utiliza en aplicaciones tecnológicas más complejas como el suministro energético a los repetidores de telefonía móvil.

### 2.6.1 Componentes de un sistema fotovoltaico

Se puede decir que un sistema fotovoltaico completo está compuesto por tres subsistemas.

- Dispositivos fotovoltaicos: Células, módulos, generadores, etc., que son los encargados de convertir la luz solar a energía eléctrica en DC.
- Acondicionador de electricidad: es el subsistema encargado de convertir la energía eléctrica en DC a AC y/o DC a DC según sea el caso.
- Cargas y consumos.

#### Elementos

- Radiación: Es la energía solar en forma de luz, es el combustible del sistema solar fotovoltaico.
- Módulos FV: Los módulos FV generan la electricidad DC directamente a partir de la luz solar, El número de módulos FV en un sistema viene

determinado por las necesidades de potencia y por la radicación solar disponible.

- Estructuras soporte: Las estructuras sirven para el soporte e instalación de módulos FV.
- Regulador de Cargar: Actúan como unión entre el generador Fotovoltaico, las baterías y los distribuidores de energía, es el encargado de proteger y garantizar el correcto mantenimiento de la carga de la batería, evitar sobretensiones y sobre descargas que puedan provocar un deterioro o destruirlas.
- Acumuladores o baterías: Almacenan la energía eléctrica producida por el generador FV para poder utilizarla en periodos en los que el generador FV está inactivo y se almacena en forma de energía electroquímica.
- Inversores: Encargados de convertirla corriente DC producida por el generador FV en corriente AC, necesaria para satisfacer energéticamente una demanda de electricidad o para inyectar la energía producida en AC a la red eléctrica.
- Cableado/conexiones: Para asegurar un efectivo funcionamiento se requiere un correcto dimensionamiento de cableado e interconexión entre los diferentes componentes del sistema.
- Elementos de protección: Interruptores de desconexión, diodos de boqueo, etc., Dispuestos entre diferentes elementos del sistema para proteger la descarga y derivación de elementos en caso de fallo o situaciones de sobrecarga.

## 2.7 Tipos de Sistemas Fotovoltaicos

Un sistema Fotovoltaico consiste en la integración de varios componentes, cada uno de ellos cumpliendo con una o más funciones específicas, a fin de que esta pueda suplir la demanda de energía eléctrica impuesta por el tipo de carga, usando como fuente la energía solar.

Se pueden realizar una clasificación de los sistemas fotovoltaicos en función de si están o no conectados a la red convencional:

- Sistemas fotovoltaicos autónomos
- Sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica
- Sistemas Fotovoltaicos Híbridos: Combinados con otro tipo de generación de energía eléctrica

Su objetivo es satisfacer total o parcial la demanda de energía eléctrica en aquellos lugares donde no se cuenta con la red eléctrica o el acceso a la misma es difícil, empleando un sistema de acumulación de energía para hacerle frente a los periodos en los que la generación es nulo o inferior al consumo.

Estos sistemas constituyen una de las mejores alternativas para el abastecimiento de energía eléctrica en lugares aislados de la red eléctrica, esto implica que el sistema fotovoltaico debe estar dimensionado de forma que permita, durante las horas de luz solar, la alimentación de la carga y de la recarga de las baterías de respaldo.

#### 2.7.1 Sistemas Fotovoltaicos Autónomos

Los sistemas fotovoltaicos autónomos están constituidos, principalmente, por los módulos fotovoltaicos, que constituyen el generador de energía eléctrica, las baterías para almacenar la energía y utilizarla en los momentos de ausencia de la radiación solar, y la carga eléctrica que se va a consumir mediante equipos eléctricos domésticos y/o industriales, frecuentemente se localizan en lugares aisladas donde la energía eléctrica es inaccesible por la red de potencia eléctrica.

Las baterías, el almacenamiento de la energía eléctrica, convierten a estos sistemas en una fuente fiable de energía, ya sea de día o de noche, independientemente de las condiciones climáticas. Luminarias, sensores, TV, equipos de audio, herramientas, etc., pueden ser usados con estos sistemas. De esta forma se genera energía por el día y se almacena el excedente en las baterías para su uso en la noche. El número de baterías debe estar en correspondencia con el consumo energético de la carga y el número de horas de autonomía (ausencia de radiación solar) al cual se aspira.

El empleo de las baterías tiene dos inconvenientes fundamentales: el aumento de los costos del sistema y el hecho de que sólo puede extraerse 80% de la energía almacenada. Además estos sistemas funcionan con corriente directa (DC) y existen equipos que trabajan con alterna (AC), donde es necesario un convertidor de DC/AC (Inversor), que en la actualidad transfieren la energía eléctrica directa en alterna con una eficiencia de conversión máxima de 95%.

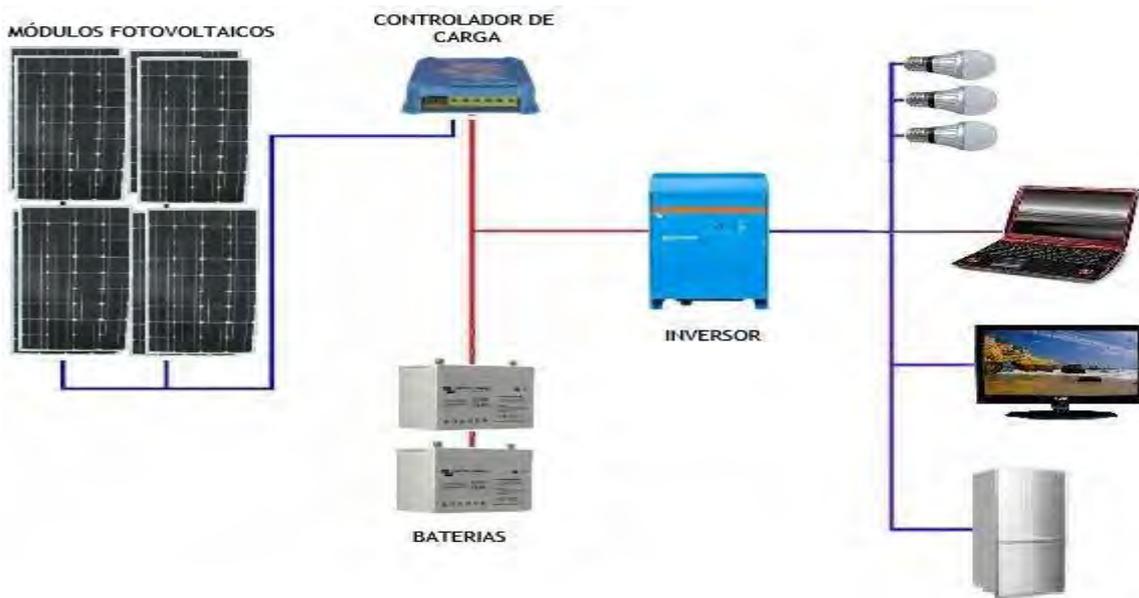


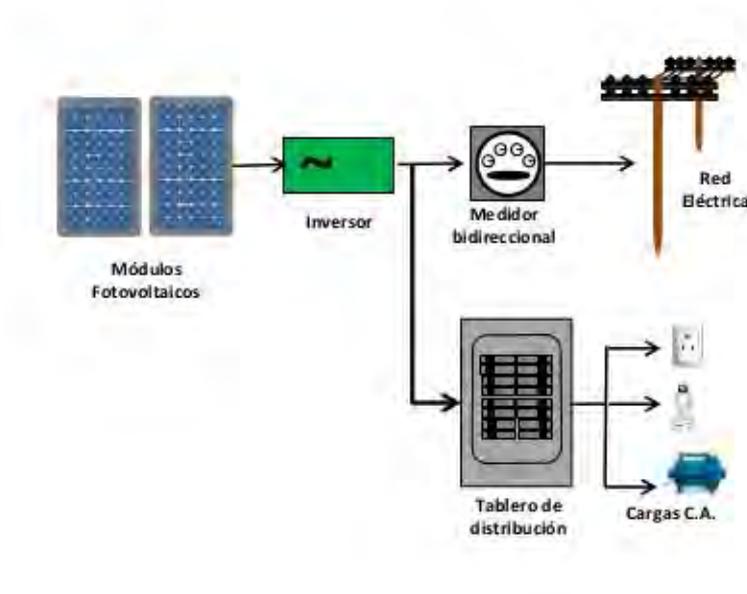
Figura 8 Componentes de un sistema Fotovoltaico Autónomo

## 2.7.2 Sistemas Fotovoltaicos Interconectados a la Red

Los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica presenta algunas características que lo hacen atractivos en términos económicos para el usuario ya que no cuentan con acumuladores, en este caso las cargas son alimentadas utilizando la energía generada por el sistemas fotovoltaico y en caso de ser necesario se complementa utilizando la energía de la red eléctrica. Durante horas de baja demanda del usuario por lo general el sistema provee energía a la red eléctrica mientras que el periodos de alta demanda de energía y poco energía solar es la red eléctrica la que provee de energía al usuario. Un sistema de este tipo, desde el punto de vista de la continuidad del servicio, resulta más fiable que uno aislado pues en caso de avería tiene el respaldo de la red eléctrica.

Otro tipo de estos sistemas interconectados a la red son las centrales FV de generación eléctrica, con potencias nominales superiores a los 100 KWp, suelen disponer de una conexión a la red eléctrica en media y alta tensión, disponiendo de un centro de transformación.

Desafortunadamente la electricidad generada con sistemas FV todavía cuesta considerablemente más que la generada convencionalmente. Además las centrales FV producen energía únicamente durante las horas de luz solar por lo cual su potencia de salida es variable.



*Figura 9 Sistema Fotovoltaico interconectado a la red*

### 2.7.3 Sistemas Fotovoltaicos Híbridos

Los sistemas Híbridos combinan varios tipos de fuentes de generación de electricidad para cumplir con las demandas de consumo. Cuando un sistema FV incorpora a otro sistema generador de energía se le denomina sistema híbrido, es muy común que se incluyan generadores diésel, eólicos, pequeñas plantas hidroeléctricas y en general cualquier tipo de fuentes energéticas.

Una configuración común es la utilización de generadores auxiliares (diésel, gasolina o propano), Este tipo de energía auxiliar tiene una gran ventaja ya que producen energía en AC y puede utilizarse directamente por los consumidores.

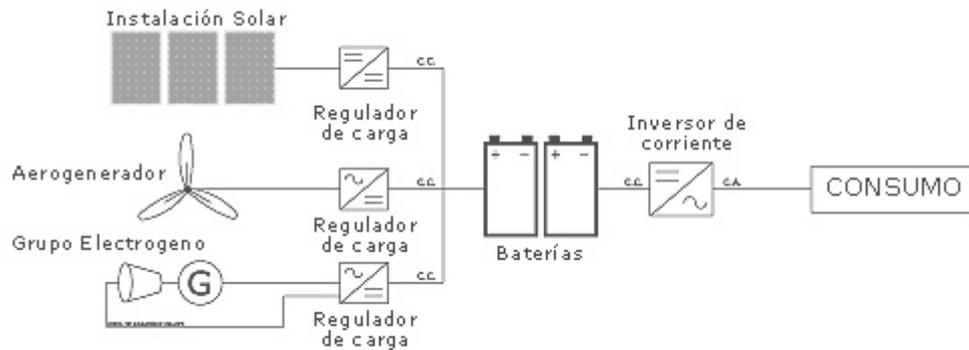


Figura 10 Esquema del sistema fotovoltaico híbrido.

([ecoener.es/solar-fotovoltaica-hibridos](http://ecoener.es/solar-fotovoltaica-hibridos))

## 2.8 Arreglos Fotovoltaicos

Cuando la potencia demandada es alta, es necesario hacer un análisis de la configuración del sistema para alimentar esa energía. En el caso del acoplamiento directo módulo- carga, se identifica una serie de especificaciones en el cual operará la carga eléctrica, para que la carga eléctrica cumpla su perfecto funcionamiento de operación debe de haber una combinación serie y/o paralelo de módulos para satisfacer sus especificaciones.

Habiendo estimado el número de módulos necesarios para proporcionar la energía eléctrica total, es necesario estimar la energía que producirá el sistema durante todo el día, multiplicándola por la insolación (horas luz solar en todo el día) entonces la energía eléctrica que se genere será consumida por la carga acoplada. El arreglo Fotovoltaico puede tener potencias desde unos cuantos watt hasta potencias del orden de Mega watt.

Los módulos conectados en serie forman una estructura llamada panel y la estructura formada con los paneles conectados en paralelo reciben el nombre de Arreglo Fotovoltaico. Es importante aclarar que los arreglos fotovoltaicos deben de construirse usando módulos cuyas características eléctricas sean idénticas para evitar los desbalances y la posibilidad de formar puntos calientes.

## Conexión de módulos en serie y paralelo

Debido a su pequeña potencia, las células se asocian en serie y en paralelo en módulos FV, que además aportan un soporte rígido y una protección contra los efectos ambientales. En los sistemas convencionales se disponen módulos con diferentes configuración en cuanto al número de células y conexión serie /paralelo. Si la potencia suministrada por un módulo FV no es suficiente para la una aplicación de terminada, se realizan asociaciones serie y paralelo de modulo para formar un generador fotovoltaico.

Cuando los módulos se configuran en serie, circula la misma corriente a través de ellos y el voltaje resultante es la suma de los voltajes de cada módulo. Y ahora, Cuando se asocian en paralelo, por el contrario, el voltaje es el mismo mientras que ahora se suman las corrientes del por cada valor de la tensión, esto sucede para módulos idénticamente eléctricos.

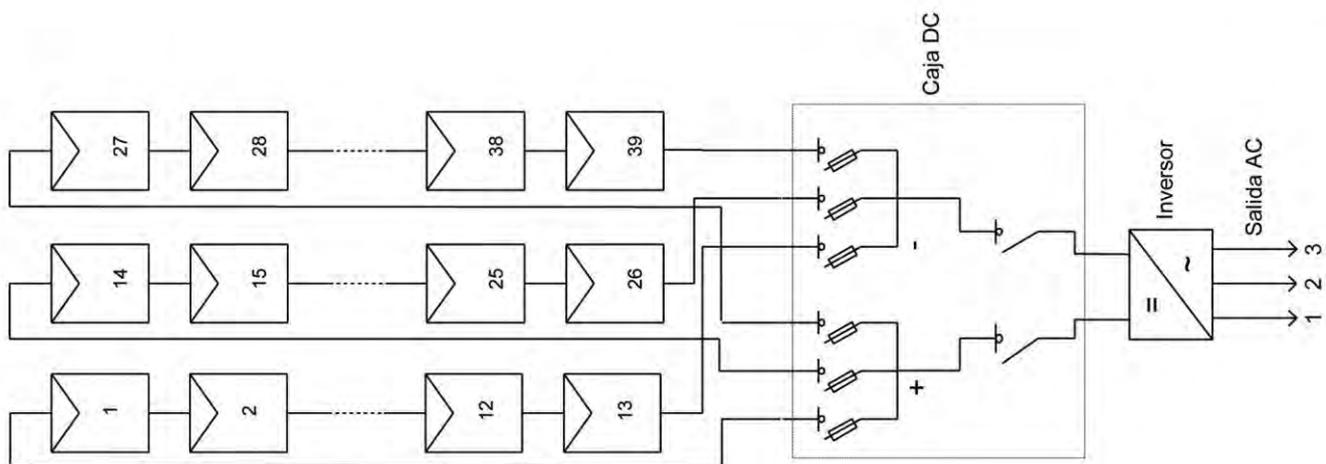


Figura 11 Conexión serie/paralelo de módulos FV con idénticas características eléctricas para un Sistema FV.

En la configuración eléctrica de dicho arreglo, está formado por 13 nódulos en conectado en serie (formando el panel que dará el voltaje de operación de la carga o acondicionador), y 3 paneles en paralelo que generarán la corriente necesaria que consumirá la carga. Diga configuración suele simplificarse como 13x3P (23 módulos en serie y 3 paneles en paralelo).

Si cada módulo entrega un voltaje de  $V$  y una corriente  $I$ , a final el sistema tendrá unas características eléctricas de Voltaje  $V_{Total}=23V$  y una corriente de  $I_{Total}= 3I$ .

## 2.9 Dimensionamiento de uno sistema Fotovoltaico

Para poder determinar la estimación energética del SFV, tenemos que considerar que tanto nos afectan los coeficientes de temperaturas en los parámetros eléctricos de los módulos FV de acuerdo a su tecnología, para eso tenemos que entender los principales factores que afectan la eficiencia de un módulo FV.

### Efecto de la intensidad luminosa

En todas las celdas solares la corriente fotogenerada  $I_{sc}$  es proporcional a la irradiancia y bajo condiciones de cortocircuito, está corriente se la llamado corriente de cortocircuito. La fig. xxx muestra el comportamiento típico de la curva  $I_{sc}$  vs  $V_{oc}$  para diferentes valores de irradiancia  $G$  (se usará el símbolo de  $G$  para la Irradiancia en lugar de  $I$  para no confundirla con la corriente). Como se observa dicha figura el valor de  $I_{sc}$  disminuye gradualmente en la misma proporción que lo hace la Irradiancia ( $G$ ) y también el voltaje a circuito abierto disminuye ligeramente al decrecer la irradiancia. Este mismo efecto sucede en el voltaje para el punto de Máxima potencia ( $P_{max}$ ).

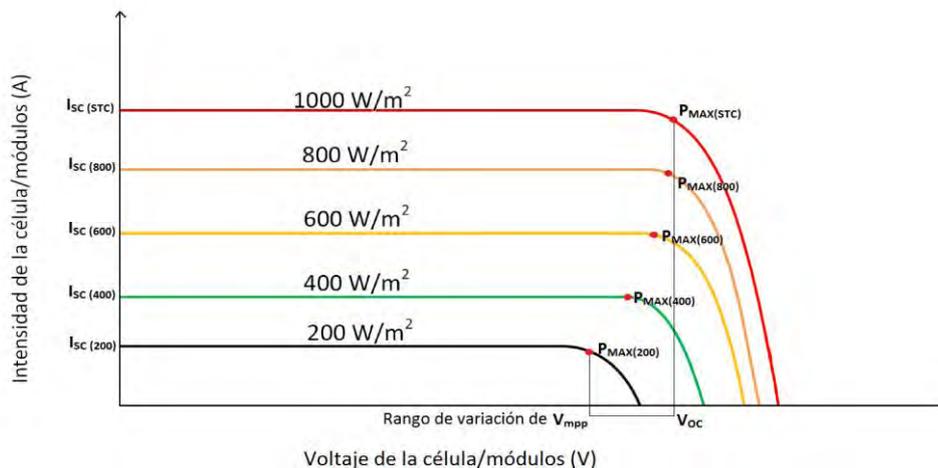


Figura 12 Efecto de la Irradiancia sobre las características eléctricas de la celda/modulo.

## Efecto de la temperatura

Las celdas solares al estar expuestas al sol se calientan como cualquier captador solar, este aumento de la temperatura afecta las características de las mismas. La figura xxx muestra el comportamiento simulado de los parámetros eléctricos de una celda solar ideal en función de la temperatura de la celda,  $T_c$ . Se observa que  $I_{sc}$  aumenta ligeramente mientras que el  $V_{oc}$  disminuye drásticamente. La ligera ganancia de  $I_{sc}$  y disminución del  $V_{oc}$  cuando la temperatura de la celda/módulo aumenta, trae como consecuencia que sus efectos se vean reflejados tanto en la potencia generada por la celda/módulo como su eficiencia.

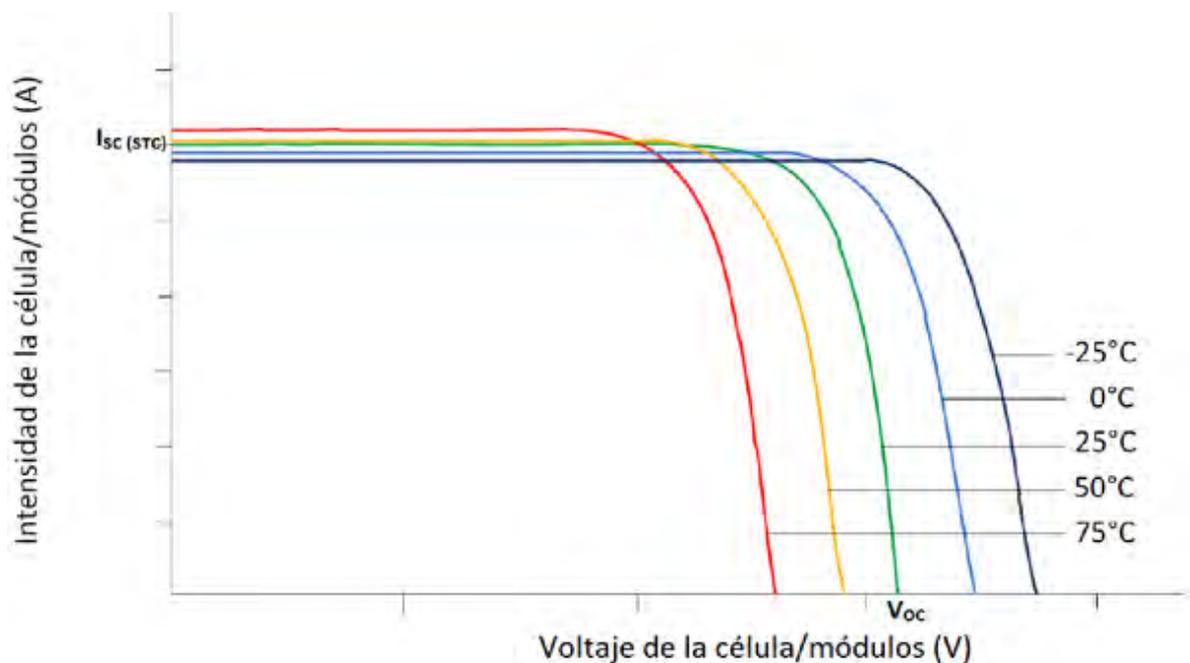


Figura 13 Efecto de la temperatura sobre los parámetros eléctricos de la celda/módulo solar.

(<http://www.energiasrenovables.com/ficheroenergias/fotos/fotovoltaica/ampliada/f/Eduardo-Collado-13-7-2015.Figura-1.jpg>)

La temperatura que puede alcanzar la celda solar, cuando está en operación en un módulo (a la que se le llamará temperatura de operación), depende de la irradiancia, temperatura ambiente, velocidad de viento y del tipo de encapsulamiento, a través del cual se disipa el calor. Una relación empírica que establece la temperatura que alcanzara el módulo, bajo condiciones de equilibrio térmico, en función de la irradiancia que recibe a una velocidad de viento de 1m/s:

$$C_{cell} = T_{amb} + CG \quad (2)$$

Donde  $C_{cell}$  es la temperatura de la celda,  $T_{amb}$  es la temperatura ambiente donde se instalará el SFV,  $G$  es la Irradiancia que es igual a  $1000 \text{ W/m}^2$  y  $C$  es una constante empírica que depende del tipo de módulo (según fabricante), Se ha estimado un valor promedio con la siguiente expresión:

$$c = \frac{T_{NOCT} - 20^{\circ}\text{C}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (3)$$

Dónde:

$C$ = Constante de propagación

$T_{NOCT} = 45^{\circ}\text{C}$

NOCT (Normal Operating Cell Temperature): Es la temperatura normal de la celda en operación bajo condiciones estándares con temperatura ambiente de  $20^{\circ}\text{C}$  y con una irradiancia de  $800 \text{ W/m}^2$ .

$$c = \frac{45^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}}{800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}} \quad (4)$$

$$c = 0.03125 \frac{^{\circ}\text{C m}^2}{\text{W}} \quad (5)$$

Sin embargo si no hay viento, la conste  $C$  puede llegar a valores de hasta  $0.04^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$ . Así que la temperatura normal de operación de un módulo puede estar comprendida por el intervalo de  $25$  a  $70^{\circ}\text{C}$  dependiendo de la velocidad de viento y magnitud de la irradiancia.

Basándose en la determinación del generación y de los consumos de energía, y en el conocimiento de los componentes que se van a utilizar, se puede calcular el tamaño necesario (dimensionamiento) del generador fotovoltaico ya sea autónomo o interconectado a la red y los más importante, la radiación solar que existe en el lugar.

Instalación: Se espera que el sistema FV estén en operación durante un determinado número de años (vida útil del módulo FV, que en la actualidad se estiman a más de 20 años): la operación sin fallos y con el mínimo mantenimiento es esencialmente para conseguir mayor rentabilidad económica y de fiabilidad.

El proceso de instalación, incluyendo el diseño del cableado, conectores, fusibles, interruptor, seccionador y montaje del generador FV, y debe de operar de modo seguro y eficiente durante los años de vida útil.

El diseño del sistema FV debe y es necesario realizar guías detalladas de la instalación (o hacer referencia explícita a guías ya elaboradas) además de seguir la normatividad aplicable a los sistemas eléctricos en baja tensión.

Después de la instalación, el suministrador debería realizar una puesta en operación del sistema, mediante una serie de medidas y verificación básicas que aseguren la correcta operación del mismo.

Normalmente la responsabilidad del suministrador de un sistemas FV no termina en el diseño e instalación del mismo, sino que debe incluir buena información al usuario final sobre cómo funciona y como opera su sistema y una información clara de la garantías y el suministros del material básico para un buen mantenimiento y reparación.

En la actualidad existe una amplia normativa (por ejemplo la IEC) aplicables a los sistemas FV (tanto autónomos como conectados a la red) y a sus componentes que el diseñador debo conocer y aplicar. Además las instalaciones fotovoltaicas deberán cumplir con la norma NOM-001-SEDE-2012.

## 2.10 Aplicaciones de los sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas Fotovoltaicos autónomos son lo que utilizan baterías y aparatos de regulación y control, el almacenamiento de la energía eléctrica en baterías hace de los sistemas FV autónomos una fuente de energía eléctrica la cual podemos utilizar de día como de noche.

Aplicaciones:

- Ciudades y centros urbanos
- Uso residencial
- Telecomunicaciones
- Abastecimiento para comunidades rurales
- Satélites espaciales

Los sistemas Fotovoltaicos interconectados no almacenamos la energía en baterías sino que la energía generada la enviamos a la red eléctrica y tomamos la energía de está durante las noches.

- Aplicaciones:
- Ciudades
- Uso residencial
- Uso comercial
- Uso Industrial

*Tabla 8 Ventajas y desventajas de los SFV autónomos e interconectados a la red eléctrica*

SISTEMA FV	INTERCONECTADOS	AISLADOS
Costos iniciales	Económicos	Costoso por las baterías
Costos de mantenimiento	Limpieza solo de módulos	Limpieza de módulos y banco de baterías
Flexibilidad	Energía ilimitada, Respaldo de la red	Energía limita por baterías
Independencia	Depende del SEN	Independiente del SEN

Obligaciones	Contrato de CFE	No debes de pedir permiso a nadie
Implementación	Menos costos y fácil instalación	Complicada por las baterías

## CAPÍTULO 3: PLATAFORMA SOLAR FV

### 3.1 Descripción general de la plataforma solar fotovoltaica

En la plataforma solar Fotovoltaica tiene la misión de realizar investigación científica y aplicada en energía, con énfasis a Sistemas Fotovoltaicos, que coadyuven al desarrollo de tecnologías energéticas sustentables; llevar a cabo estudios, asesorías y capacitación a los distintos sectores de la sociedad; formar recursos especializados, y difundir los conocimientos adquiridos para el beneficio del país.

En el mismo laboratorio de ensayo se preocupa por la calidad de la tecnología Fotovoltaica que se fabrica y comercializa en nuestro país y que fomenta el uso de productos certificados. A través de ensayos y procedimientos estandarizados internacionalmente evaluamos técnicamente el desempeño eléctrico, durabilidad y confiabilidad de los módulos fotovoltaicos así como de sus aplicaciones en sistemas energéticos para sus diferentes usos.

En la Plataforma Solar Fotovoltaica se encuentra instalado un sistema Fotovoltaico interconectado a la Red eléctrica del Instituto de Energías Renovables 5ubicado en Temixco, Morelos, México, con las siguientes coordenadas 18.839251, -99.235372 con una potencia pico de 9kWp. El sistemas fotovoltaico consta de 3 subsistemas y cada uno tiene una capacidad de 3 kWp. Cada arreglo fotovoltaico se encuentra a una inclinación aproximadamente a la latitud del lugar, está es igual a 15° y se encuentran expuestos a las mismas condiciones ambientales y el diseño eléctrico es similar en cada arreglo.

El 1 de Abril de 2016 entro en operación la planta Fotovoltaica de 9 kWp que consta de tres tecnologías (CIGS, Si-P, CdTe), desde que la planta empezó a inyectar energía a la red eléctrica se estuvo monitoreando durante los cuatro

meses que estuvo instalada la planta, se tomaron los valores de producción mensual en corriente directa y en el punto de salida del inversor hacia la red eléctrica, así como diferentes variables para determinar el comportamiento de los diferentes sistemas fotovoltaicos interconectados a la red.



Figura 14 Lugar de la instalación del Sistema Fotovoltaico Interconectado a la Red

### 3.2 Tecnologías fotovoltaicas Instaladas (CIGS, Si-P y CdTe)

En nuestro caso de estudio se eligió tres tecnologías previamente ya instaladas pero no conectadas, para llevar a cabo la comparación del rendimiento energético, en si diseño de instalación se buscó la manera de optimizar el espacio como se muestra en el anexo.. dónde se muestra las características de la configuración de las instalaciones fotovoltaicas, en el mismo anexo se puede ver el recorrido del cableado cada cadena.

Tabla 9 Características eléctricas de los módulos a estudio a STC.

Tecnología	CIGS	SI-POLY	CdTe
Marca	Tsmc solar	INNOTECH SOLAR	CALYXO
Modelo	TS-150C2	DB-E250	CX3 75
Pp (W)	150	250	75.0

Voc (V)	86.6	37.6	62.0
Isc (A)	2.62	8.79	1.95
Vmp (V)	65.5	31.0	46.3
Imp (A)	2.29	8.22	1.65
Eficiencia %	13.8	15.2-15.8	-
Coeficiente			
Pp	-0.30 %/°C	-0.38 %/°C	-0.25 %/°C
Voc	-0.29 %/°C	-0.32 %/°C	-0.25 %/°C
Isc	0.01 %/°C	0.077 %/°C	0.02 %/°C

### 3.2.1 Configuración de los subsistemas FV

El Sistema Fotovoltaico de la plataforma solar ocupa un área de 93.578 m<sup>2</sup> y está compuesto por un total de 12 kWp, como ya habíamos mencionado tiene tres tecnologías las cual estuvieron bajo estudio durante 4 meses, aparte hay otra tecnología la cual es de Silicio monocristalino con una potencia instalada de 3 kWp la cual no se estudió. Viendo el sistema fotovoltaico de frente, las tecnologías sembradas de izquierda a derecha es la de Teluro de Cadmio (CdTe), Silicio Policristalino (p-Si), Silicio monocristalino (m-Si) y Cobre-Indio-Galio-Celenio (CIGS) con un área cada una de 30.132 m<sup>2</sup>, 20.036 m<sup>2</sup>, 20.040 m<sup>2</sup>, 23.374 m<sup>2</sup> respectivamente.

El primer subsistema del Planta Fotovoltaica es de 3 KWp con tecnologías de película delgada de material Cobre-Indio-Galio-Selenio (CIGS), está tecnología es de la marca TSMC SOLAR modelo TS-150C2, cada módulo es de 150 Wp y tiene una eficiencia de 13.8 % a condiciones STC\* con un total de 20 módulos los cuales conforman el subsistemas de 3 kWp, la configuración de los módulos generadores está dada por 5 módulos en serie (cadena) por 4 cadenas en paralelo (5Sx4P), proporcionando así la energía al inversor.

El segundo subsistemas de 3 kWp, es de tecnología de Silicio policristalino (Si-P) con una potencia pico de 250 W cada módulo y con una eficiencia de 15.2-15.8 % a condiciones STC, el sistema está compuesto por un total de 12 módulos en serie, a diferencia de las otras tecnologías estos módulos proporcionan 4 veces más corriente provocando el uso de cable de mayor calibre, fusibles de mayor capacidad e incluso mayor riesgo de choque eléctrico en el mantenimiento.

El tercer subsistema de 3kWp interconectado a la red es de tecnología Teluro de Cadmio (CdTe), al igual que el primer subsistema esté también es de película delgada, pero este módulo es 100 % vidrio y sin marco de aluminio estos módulos tiene una potencia pico de 75 W y con un total de 40 módulo formamos la planta de estudio de esta tecnología. Su configuración del SFV para poder acoplarlo al inversor está basada en 8 módulos en serie por 5 cadenas en paralelo (8Sx5p).

Las tres tecnologías están conectados a tres inversores eléctricamente idénticos de la marca SMA, modelo Sonny Boy 4000-US, Potencia nominal es de 4000 Wac con una amplia ventana de operación de voltaje en AC (mínima de 183vac, nominal de 208 vac y máxima de 229vac) y una frecuencia (Hz) de 59.3 hasta 60.5 de acuerdo a la red, en las parte de DC maneja un sistemas máximo de 600 Vdc con una corriente de hasta 18 Adc con dos puntos de máxima potencia (MMTP) entre 220-480 Vdc, su protección contra intemperie es de grado IP 54 tipo 3R con una eficiencia de conversión de 96.5 %. Los tres inversores no son nuevos, ya tiene un uso aproximado de 10 años con un sistemas de 9 kWp con tecnología de silicio monocristalino divididos en 3 kWp por inversor, durante el tiempo que estuvieron nunca presentaron fallas.

### 3.2.2 Características eléctricas de los subsistemas FV

Los tres subsistemas fotovoltaicos (CIGS, P-Si y CdTe), tienen instalado tres inversores de mismo modelo SB4000US de la marca SMA, por lo cual era necesario configurar los subsistemas de tal modo que eléctricamente fuesen idénticos o en su defecto muy parecidos de tal manera que o puedan afectar su

eficiencia y puedan acoplarse a la ventana de operación del punto de máxima potencia del inversor para poder obtener el máximo rendimiento de los mismos.

### 3.2.3 Características eléctricas a STC de las tecnologías instaladas

Dado que existen varios procesos de fabricación de módulos FV y que hay muchos laboratorios que se dedican a la investigación básica y desarrollo tecnológico en dicha área, es importante tener estándares de mediciones bajo los cuales reporten las características eléctricas de los dispositivos elaborados. Las condiciones estándares de prueba son 1000 Wm<sup>2</sup>, masa de aire AM1.5 y 25 °C, uno de los principales laboratorios de certificación de parámetros eléctricos para celdas solares es el National Renewable Energy Laboratory y Sandia National Laboratory. FIRCO

Tabla 10 Características eléctricas a STC de los subsistemas Fotovoltaicos \*

Tecnología	CIGS		SI-POLY		CdTe	
Modelo	TS-150C2		DB-E250		CX3 75	
Potencia pico	3000 W		3000 W		3000 W	
Configuración	Serie	Paralelo	Serie	Paralelo	Serie	Paralelo
No. de módulos	5	4	12	1	8	5
Pp (W)	750	3000	3000	3000	600	3000
Voc (V)	433	433	451.2	451.2	496	496
Isc (A)	2.62	10.48	8.79	8.79	1.95	9.75
Vmp (V)	327.5	327.5	372	372	370.4	370.4
Imp (A)	2.29	9.16	8.22	8.22	1.65	8.25

Tabla 11 Características eléctricas del inversor

Marca	SMA
Modelo	SONNY BOY SB4000US
Manufactura	10/2011
Max. potencia en DC @ STC	4375 W
Max. Voltaje DC	600 V
Voltaje nominal DC	310 V
Voltaje de MPP DC	220-480 V
Max. Corriente DC	18 A
No. de MPP /fusibles por serie	1/4
Potencia nominal AC	3500 W
Max. Potencia aparente AC	3500 VA
Voltaje nominal AC	208 V
Rango de voltaje AC	183-229 V
Rango de Frecuencia	60 Hz, 59.3-60.5 Hz
Max. Corriente nominal AC	17 A
Factor de potencia Cos $\phi$	1
Fases	2
Max. Eficiencia	96.5 %
Garantía	10 años

SUNNYBOY3384-DUS122329W.pdf

### 3.2.4 Características eléctricas a PTC

Para poder determinar los parámetros eléctricos bajo PTC tenemos que aproximar empíricamente la temperatura máxima y mínima a la cual podrá llegar el módulo estando en operación ya que como hablamos anteriormente (2.8) un factor fundamental que afecta fuertemente el rendimiento eléctrico de un módulo FV es la temperatura entonces es necesario tener valores de temperatura ambiente registrados en el lugar de la instalación FV o cercana a la instalación para determinar la temperatura de la celda en operación, en la siguiente tabla se muestran promedios mensuales de temperatura ambiente registradas en el IER-UNAM.

Tabla 12 Promedio de temperatura ambiente en el IER-UNAM

#### Máxima

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media Anual
1990	-	-	33.4	33.1	33.2	30.7	29.2	30.5	29.1	29.0	28.9	28.4	30.6
1996	27.6	31.3	30.4	32.5	32.4	28.3	28.6	27.9	29.1	28.9	28.8	27.3	29.4
2000	29.2	31.4	33.8	34.8	-	-	-	-	-	-	-	-	32.3
2001	-	-	31.5	32.5	31.7	28.1	28.6	29.3	28.2	28.7	28.0	27.8	29.4
2002	28.1	29.3	33.2	33.7	33.0	29.8	-	-	-	28.5	26.2	26.3	29.8
2003	27.1	30.2	32.0	34.2	33.4	29.0	29.7	29.2	27.9	28.0	27.9	25.8	29.5
2004	26.6	29.1	30.6	31.9	31.2	29.1	28.5	29.2	28.0	28.0	28.1	26.5	28.9
2005	26.8	29.6	31.7	31.9	33.1	32.7	28.7	28.8	28.0	28.2	28.6	28.0	29.7
2006	28.1	29.7	31.7	33.6	30.7	30.1	30.1	28.9	28.7	28.8	26.7	27.6	29.6
2007	28.3	29.5	31.8	32.9	-	-	28.5	29.3	28.5	28.1	28.3	28.2	29.3
2008	29.3	31.1	32.2	34.3	31.0	30.0	26.7	27.3	26.9	27.1	26.8	26.2	29.1
2009	31.5	29.7	-	-	30.2	29.6	28.2	28.4	30.1	29.0	-	26.1	29.2
2010	29.9	29.2	33.2	34.7	36.5	36.5	31.6	30.2	29.4	30.7	29.9	28.2	31.6
2011	30.0	32.5	34.3	35.0	36.0	33.1	30.4	30.7	29.6	29.3	30.5	29.6	31.7
2012	30.4	31.6	32.9	34.5	35.0	33.4	30.5	29.8	30.3	30.4	30.2	30.7	31.6
Media mensual	28.7	30.3	32.3	33.5	32.9	30.8	29.2	29.2	28.7	28.8	28.4	27.6	30.1

#### Mínima

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Media Anual
1990	-	-	20.1	20.8	21.8	21.1	19.9	20.0	19.9	19.0	17.0	16.0	19.5
1996	11.8	15.8	15.5	18.5	19.8	18.4	17.9	17.7	17.5	16.8	14.0	14.5	16.5
2000	13.7	15.1	17.4	19.2	-	-	-	-	-	-	-	-	16.4
2001	-	-	16.5	18.6	16.8	15.2	14.5	17.6	17.8	15.7	13.9	14.3	16.1
2002	13.6	15.7	17.7	19.4	20.0	18.4	-	-	-	15.2	12.3	12.2	16.1
2003	13.2	14.5	15.3	18.3	18.2	16.1	14.8	17.4	18.0	17.3	16.2	11.8	15.9
2004	13.8	13.9	17.0	17.9	18.5	17.7	17.1	18.0	17.8	17.3	14.8	13.1	16.4
2005	13.0	16.2	17.2	17.9	19.8	20.8	17.1	17.9	17.8	17.7	15.1	14.5	17.1
2006	13.6	15.8	17.0	19.2	18.0	18.6	18.0	17.2	17.8	17.6	14.1	13.0	16.7
2007	15.1	15.5	17.1	19.1	-	-	16.7	17.9	16.7	16.3	14.2	14.7	16.3
2008	13.5	15.3	16.7	19.3	20.9	18.4	18.1	17.7	18.1	15.8	16.3	15.8	17.2
2009	15.3	16.5	-	-	18.8	19.0	17.1	19.5	18.1	18.8	-	13.7	17.4
2010	11.0	11.0	13.6	16.9	16.0	17.7	16.6	17.0	15.1	12.8	8.0	9.4	13.8
2011	11.5	13.3	13.8	16.8	17.5	-	16.8	16.9	13.4	11.4	10.9	10.7	13.9
2012	10.8	13.9	15.0	16.1	17.0	16.1	15.9	17.0	13.9	12.1	11.4	12.8	14.3
Media mensual	13.1	14.8	16.4	18.4	18.7	18.1	16.9	17.8	17.1	16.0	13.7	13.3	16.2

[http://xml.ier.unam.mx/xml/se/cs/datos\\_meteo.xml](http://xml.ier.unam.mx/xml/se/cs/datos_meteo.xml)

Para obtener la temperatura máxima que puede alcanzar el módulo Fotovoltaica en operación utilizamos el valor máximo de temperatura descrito en la tabla 12.

Para calcular la temperatura máxima de operación utilizamos la siguiente Expresión:

$$C_{cellmax} = T_{amb\ max} + CG \quad (6)$$

$$C_{cell} = 36.5\ ^\circ C + 0.03125\ \frac{^\circ C\ m^2}{W} * 1000\ \frac{W}{m^2} \quad (7)$$

$$C_{cellmax} = 67.75\ ^\circ C \quad (8)$$

Para determinar la temperatura mínima de la celda en operación no se utiliza la expresión utilizada anteriormente ya que a esa hora apenas está empezando a incidir la radiación sobre el SFV por lo cual la temperatura mínima de la celda es igual a la temperatura ambiente en la mañana y es necesario obtener este valor para ver cuál puede ser valor más alto en el voltaje de Circuito abierto de máxima potencia para que con estos valores podamos dimensionar las protecciones y no dañar el acondicionador de energía (inversor).

$$C_{cellmín} = T_{amb\ mín} \quad (9)$$

$$C_{cellmax} = 8\ ^\circ C \quad (10)$$

### 3.3 Rendimiento térmico

Se calcula el gradiente de la celda fotovoltaica para que posteriormente hacer correcciones a los valores de potencia y voltaje.

$$\Delta T = T_{cell} - T_{STC} \quad (11)$$

Donde:

$\Delta T$  = Gradiente de temperatura

$T_C$  = Temperatura de la celda

$T_{STC}$  = Temperatura de la celda a STC\*

Gradiente para la temperatura máxima:

$$\Delta T = T_{cellmax} - T_{STC} \quad (12)$$

$$\Delta T = 42.75 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (23)$$

Gradiente para la temperatura mínima:

$$\Delta T = T_{cellmin} - T_{STC} \quad (14)$$

$$\Delta T = 17 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

Se calcula el porcentaje de pérdida de potencia por efecto de la temperatura multiplicando el coeficiente de temperatura del módulo tomado de la ficha técnica por la diferencia de la temperatura.

$$\%p_{perdidas} = \frac{dP}{dT} \Delta T \quad (16)$$

Donde:

$\%P_{perdidas}$  = porcentaje de pérdida de potencia del módulo

$dP / dT$  = Coeficiente de pérdida de potencia por temperatura.(Dato de la ficha técnica)

$\Delta T$ = Diferencia de temperatura

Se calcula el rendimiento térmico para saber el porcentaje de pérdida de potencia cuando el módulo fotovoltaico está en operación con la siguiente expresión:

$$R_t = 100\% - \%p_{perdidas} \quad (17)$$

Donde:

$R_T$  = El rendimiento térmico del módulo.

$\%P_{perdidas}$  = pérdida de potencia del módulo

En el trabajo se utilizó un SFV el cual está formado por 3 tecnologías FV por lo cual el Rendimiento Térmico es diferente, en la siguiente Tabla se muestran los diferentes rendimientos de acuerdo a su tecnologías.

*Tabla 13 Parámetros eléctricos corregidos por temperatura.*

Tecnología Fotovoltaica	CIGS	Si-p	CdTe
Temperatura Max.	69.98 °C	65.86 °C	67.79 °C
Temperatura mín. promedio	8 °C	8 °C	8 °C
Rendimiento Térmico del módulo	86.506 %	84.473 %	89.303 %
Factor de corrección por temperatura Voc			
T. Max	75.304 V	32.684 V	55.368 V
T. Min	90.869 V	39.645 V	64.635 V
Factor de corrección por temperatura Isc			
T. Max	2.632 A	9.067 A	1.967 A
T. Min	2.616 A	8.905 A	1.943 A

Una vez hecho todos estos calculo presentados ya se puede obtener los parámetros eléctricos corregidos por PTC, los parámetros corregidos se pueden consultar en los diagramas bifilares que se entran en la sección de planos.

### 3.4 Diagrama unifilar del SFV

El diagrama unifilar del Sistema fotovoltaico consta de 3 subsistemas y por cada tecnología de SFV se ha instalado un inversor SMA SB4000, cada subsistema

cuenta con sus protección y los tres inversores están interconectados entre ellos por lo cual la salidas de los tres inversores están configurados en Delta (Delta 208:120WYE)\* y como resultado da un sistemas trifásico de 220 Vac y esta energía es directamente inyectada al tablero de distribución eléctrica del Horno Solar y la energía que no se utilice es inyecta a la red eléctrica del IER-UNAM.

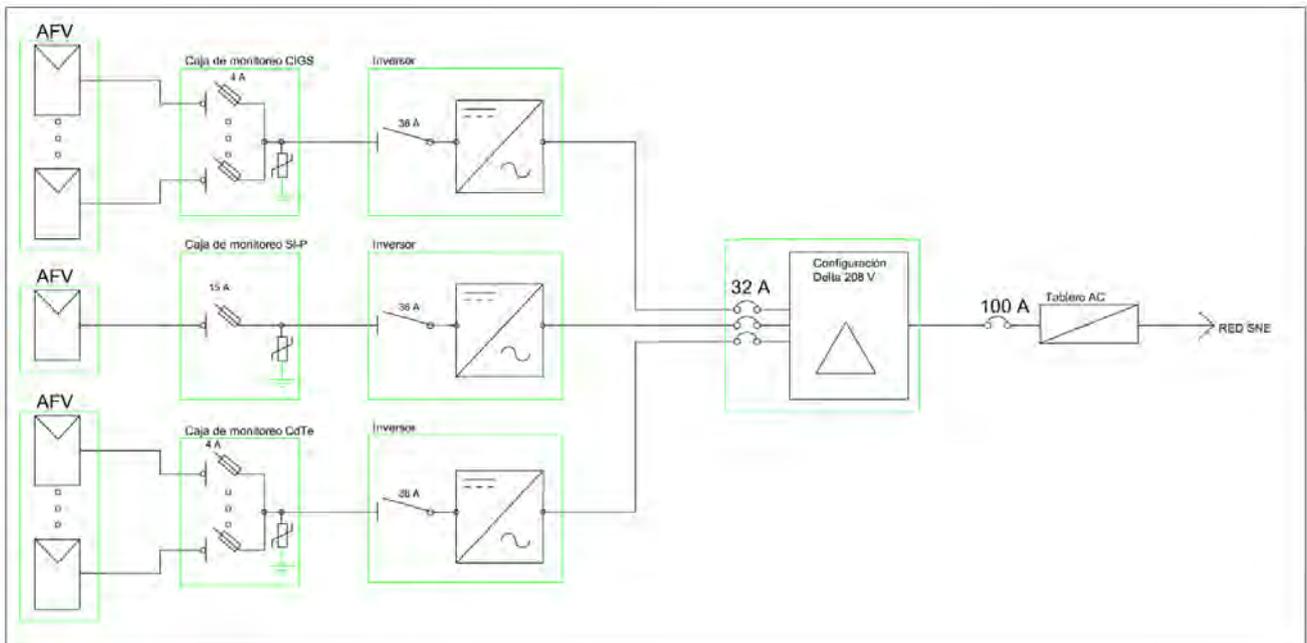
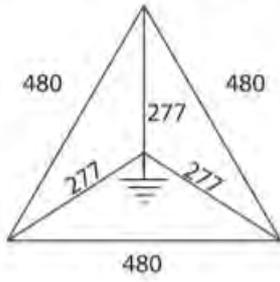


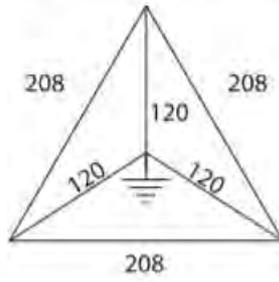
Figura 15 Diagrama unifilar de los tres sistemas fotovoltaicos.

Para llevar a cabo la configuración de los tres inversores se seleccionó la configuración 208 Delta: 120 WYE ya que es una configuración en la cual pueden trabajar los tres inversores y esto se hizo porque el tablero que se utilizó para la interconectar a la Red eléctrica es trifásico a 208V, en la siguiente figura se muestra la configuración física de los tres inversores.

480 Delta: 277 WYE

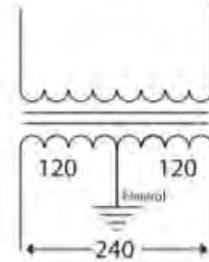


208 Delta: 120 WYE

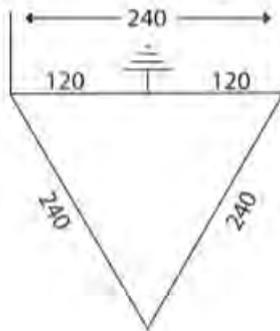


\*

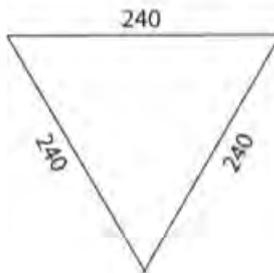
240: 120 Split Phase



240 Delta: 120 Stinger



240 Delta



208 Delta \*

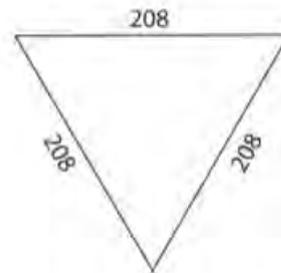


Figura 16 Configuraciones posibles entre tres inversores de la marca SMA SONNY BOY SB4000US.

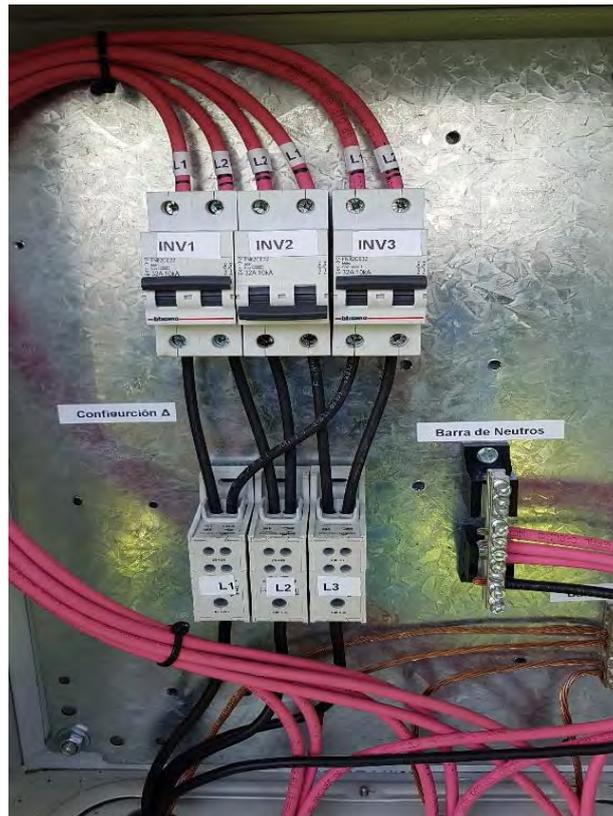


Figura 17 Conexión de los 3 inversores en Configuración 208 Delta: 120 WYE

### 3.4 Cálculos eléctricos del Sistema Fotovoltaico

A la hora de diseñar correctamente una instalación fotovoltaica interconectada a la red se ha de garantizar la seguridad de las personas, tanto usuarios como operadores de la red eléctrica y por otro lado que el normal funcionamiento del sistema fotovoltaico no afecte a la operación ni la integridad de otros equipos.

#### 3.4.1 Cálculo de protecciones

La instalación de DC dispone de elementos de protección contra sobre corriente, por los cual pudiesen presentar defectos en los conductores ya sea por calentamiento o por cortocircuitos y el poder de corte de los interruptores automáticos estará dimensionado de acuerdo con la intensidad de cortocircuito que puede presentarse en la instalación.

La corriente de diseño  $I_F$  que será transportará a través del conductor se calcula por medio de la Ecuación:

$$I_F = 1.56 X I_{SC} \quad (18)$$

Donde:

$I_F$ =Corriente máxima de la cadena

$I_{SC}$ =Corriente de cortocircuito

1.56= factor de seguridad en DC

### 3.4.2 Caída de tensión

Se debe cumplir que la caída de tensión no debe ser mayor al 1.5% del voltaje nominal del SFV por lo cual se calcula la caída de voltaje en DC con la siguiente expresión:

$$e\% = \frac{2LI_mR_w}{1000} \quad (19)$$

Donde:

$e\%$ = Caída de tensión en DC

$L$ = Longitud [m]

$I_m$ = Corriente máxima potencia [A]

$R_w$ = Resistencia de conductor [ $\Omega$ /Km]

### 3.4.3 Selección de los conductores

Para poder seleccionar los conductores que usaremos en todo el sistema fotovoltaico de la plataforma debemos calcular diferentes parámetros tales como

caídas de tensión ya que no todas las cadenas de los arreglos son de las mismas longitudes.

Tabla 14 Se muestra las distancias de cada cadena y si caída de tensión de acuerdo a su configuración y la selección del cable.

Tecnología y cadena		Longitud (m)	Porcentaje de Caída de tensión Voc* (%)	Corriente (A)	Marca** y Tipo de cable	Calibre y temp. Operación	Ampacidad y max voltaje
CIGS	1	5.9	0.078	2.362	ÖLFLEX ® SOLAR XLS-R	4 mm2 -40°C a +100°C	30 A 600-1000 Vac
	2	8.8	0.117	2.362			
	3	8.8	0.117	2.362			
	4	6.2	0.082	2.362			
Si-p	1	14.25	0.5	8.82	THHW- LS CE- RoHS	900-1500 Vdc	
CdTe	1	18.25	0.176	1.967			
	2	11.9	0.114	1.967			
	3	8.4	0.081	1.967			
	4	8.4	0.081	1.967			
	5	8.85	0.085	1.967			

\*El Voc de la tecnología de CIGS, Si-p y Cdte es 433 Voc, 451.20 Voc, 496 Voc respectivamente.

\*\*<https://products.lappgroup.com/online-catalogue/power-and-control-cables/special-applications/photovoltaic/oelflex-solar-xls-r.html>

En la norma NOM-001-SEDE-2012 en la tabla 310-15(b)(16) nos habla sobre la ampacidad de los conductores y el cable que seleccionamos cumple con los requisitos del SFV.

### 3.6 Diagramas unifilares de toda la Instalación FV.

En el siguiente anexo xxx se muestran los diagramas unifilares de manera más clara, en ellos se muestran las cajas de combinación, cableado, inversores, configuración y el acoplamiento de los tres SFV en un diagrama unifilar

### 3.7 Fotografías de la instalación mecánica y eléctrica del SFV



Figura 18 Instalación mecánica de la Plataforma SFV



Figura 19 Instalación completa de la Plataforma SFV



Figura 20 Ubicación de cajas de combinación, Sistema de monitoreo e inversores

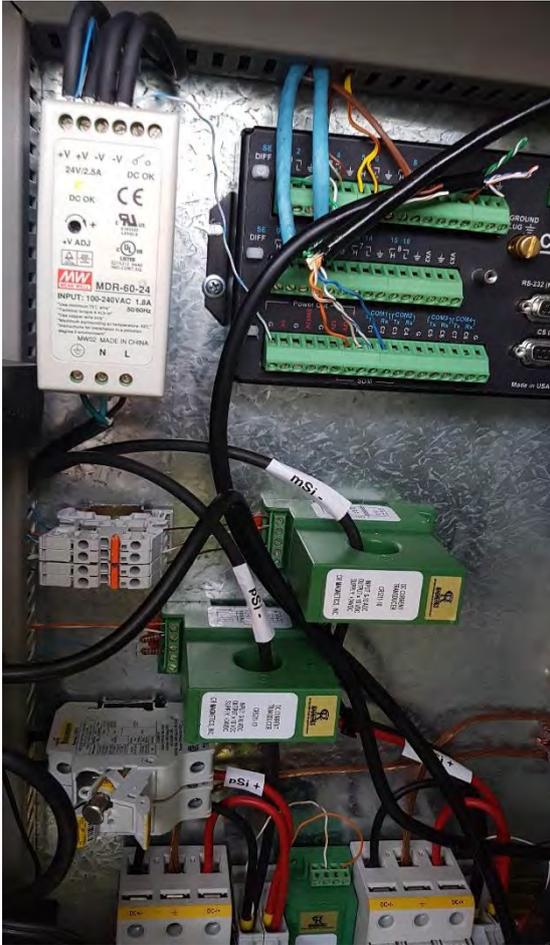


Figura 21 Sistema de monitoreo del SFV

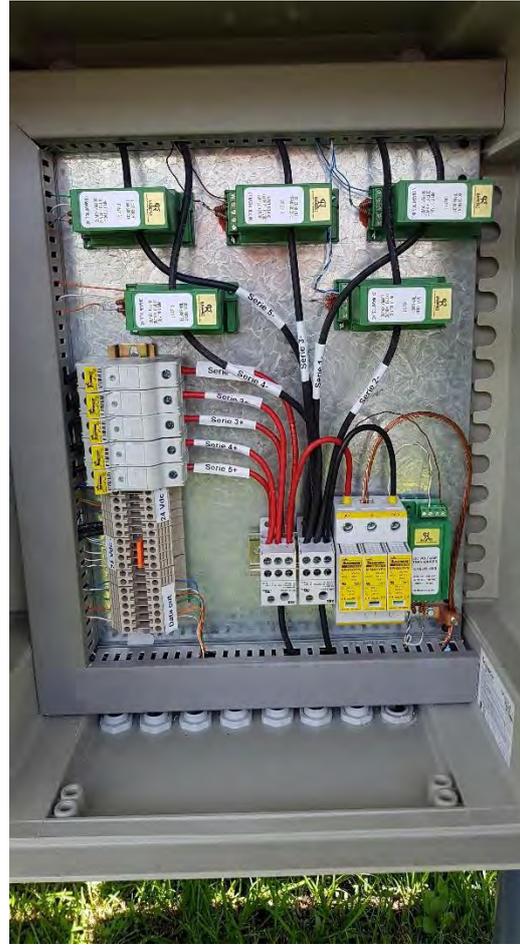


Figura 22 Monitoreo de la tecnología CdTe



Figura 23 Plataforma solar FV en operación

## CAPÍTULO 4: METODOLOGÍA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 4.1 Introducción

Para poder conocer el comportamiento del desempeño energético de los tres sistemas fotovoltaicos es imprescindible conocer parámetros específicos tales como los eléctricos y ambientales con el objetivo de reunir información durante cuatro meses para conocer su comportamiento energético y ver cómo afectan esas condiciones. Para esto se instrumentó un sistema de monitoreo, se utilizaron un sistema que transforma una variable física de interés en un formato que puede ser visto y guardado conocido como medición.

Para instrumentar un fenómeno es necesario realizar una serie de pasos:

- \* Identificar el fenómeno a medir
- \* Determinar la variable física que representa el fenómeno
- \* Identificar el sensor que puede medir esa variable física a una señal de salida adecuada para ser transmitida por medio de una señal eléctrica para ser almacenada.

Este es el esquema básico de medición y da como resultado un sistema que pueda ser observado por el usuario en tiempo real y con ello poder hacer una base de datos para trabajos futuros.

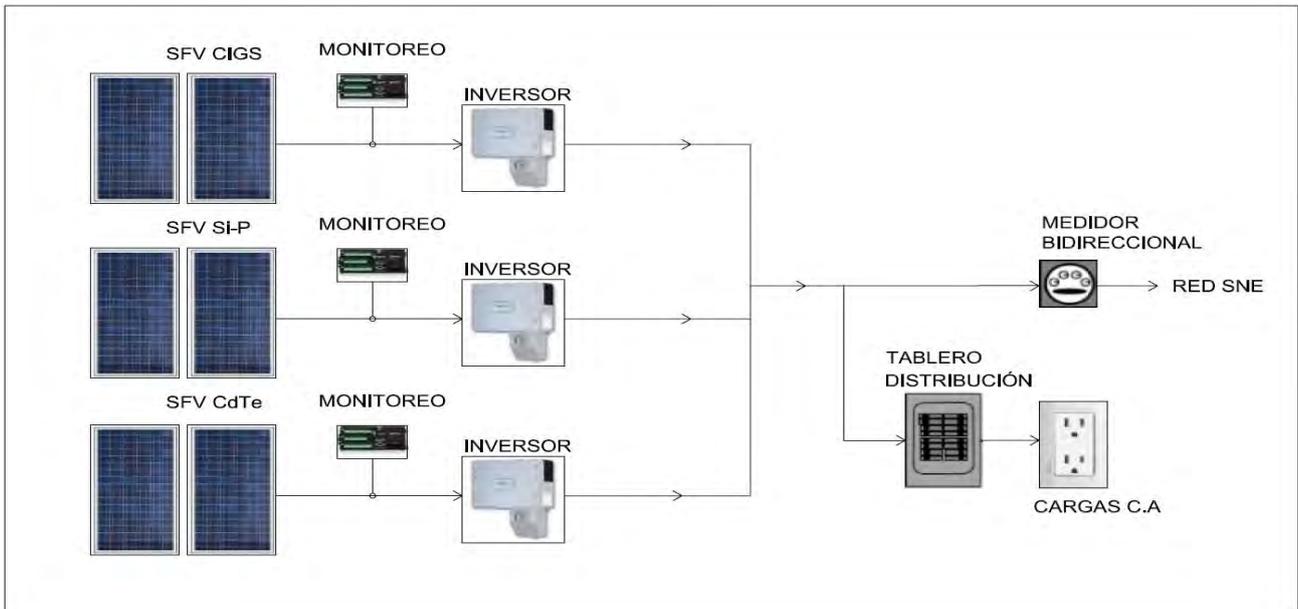


Figura 24. Diagrama esquemático del monitoreo del SFV.

## 4.2 Descripción de equipo a utilizar

Una caracterización experimental desde el punto de vista del rendimiento energético implica una gran selección de parámetros a medir, en esa metodología para caracterizar los tres sistemas fotovoltaicos con diferente tecnología se debe seleccionar cuales son los parámetros que nos ayudan a obtener su rendimiento así cuales son lo que afectan al mismo, entre los primeros parámetros a censar con el voltaje de circuito abierto así como el de máxima potencia, ( $V_{oc}$  e  $V_{mp}$ ), la corriente de corto circuito y la de máxima potencia, ( $I_{sc}$  y  $I_{mp}$ ), una vez conociendo estos valores podemos obtener la potencia instantánea con el producto de ( $V_{mp}$  e  $I_{mp}$ ), el factor de forma (FF) y la eficiencia del inversor. Entre los parámetros que influyen en la caracterización eléctrica de los sistemas FVs están la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), la temperatura que alcanza los sistemas FVs bajo condiciones de operación ( $T_{cel}$ ), velocidad de viento que incide sobre los sistemas FVs y la irradiancia en su plano horizontal ( $I_{rr}$ ).

Para el Sistema de Monitoreo (SM), se implantó un sistema adquirente de datos que se hizo desde cero, para el SM utilizamos un adquirente de datos Campbell Scientific modelo CR-1000 con un multiplexor de 32 entradas para la lectura de

las 19 variables físicas distribuidas en todo el SFV. Las 19 variables que se utilizaron están derivadas de la siguiente manera:

- 3 Sensores de temperatura tipo K para cada una de las 3 tecnologías
- 1 Sensor de temperatura tipo T para la temperatura ambiente
- 1 Sensor de Irradiancia tipo celda de referencia de silicio monocristalino
- 1 sensor de velocidad de viento marca Young 3002
- 3 Transductores de voltaje DC marca CR Magnetics CR5311
- 10 Transductores de corriente DC marca CR Magnetics CR521,
  - 5 Transductores para la tecnología FV de CdTe
  - 1 Transductores para la tecnología FV de Si-P
  - 4 Transductores para la tecnología FV de CIGS

Para la alimentación del CR-1000 se instaló una batería de 12 V con una capacidad de 24 Ah, para la alimentación de los sensores se usó una fuente de 24 Vcd y para la transmisión de datos ocupamos un router de 5 puertos con la IP estática con la IP 10.10.80.35.

Para poder establecer la comunicación entre el adquisidor de datos hacia la computadora donde se almacenan los datos obtenidos, se cableó una micro red LAN ya que el CR-1000 cuenta con el protocolo de comunicación con el puerto RJ45. Una vez que ya hubo comunicación entre el adquisidor de datos y la computadora, se creó una interfaz por medio del programa de LabView, dicha interfaz consiste en leer las 19 variables del adquisidor de datos y reproducir los valores de manera gráfica en tiempo real y después de reproducirlos los guarda en un archivo .csv cada segundo durante 4 meses.

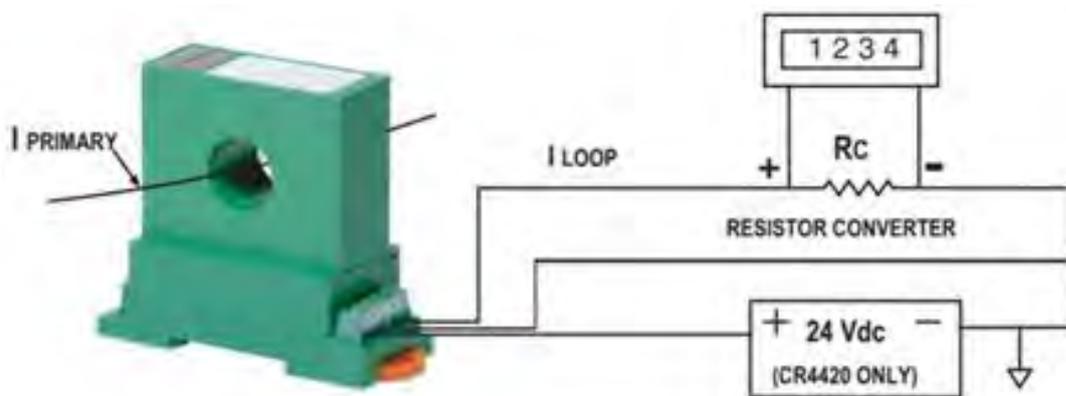
#### 4.2.1 Sensores utilizados

El sistema de monitores se implementó solamente para la parte de corriente directa ósea toda la parte de generación del sistema fotovoltaico y para el lado

de acondicionamiento eléctrico de DC a AC se utilizaron los datos que proporcionaron los tres inversores.

#### 4.2.1.1 Sensores de Voltaje y Corriente

La tensión en DC



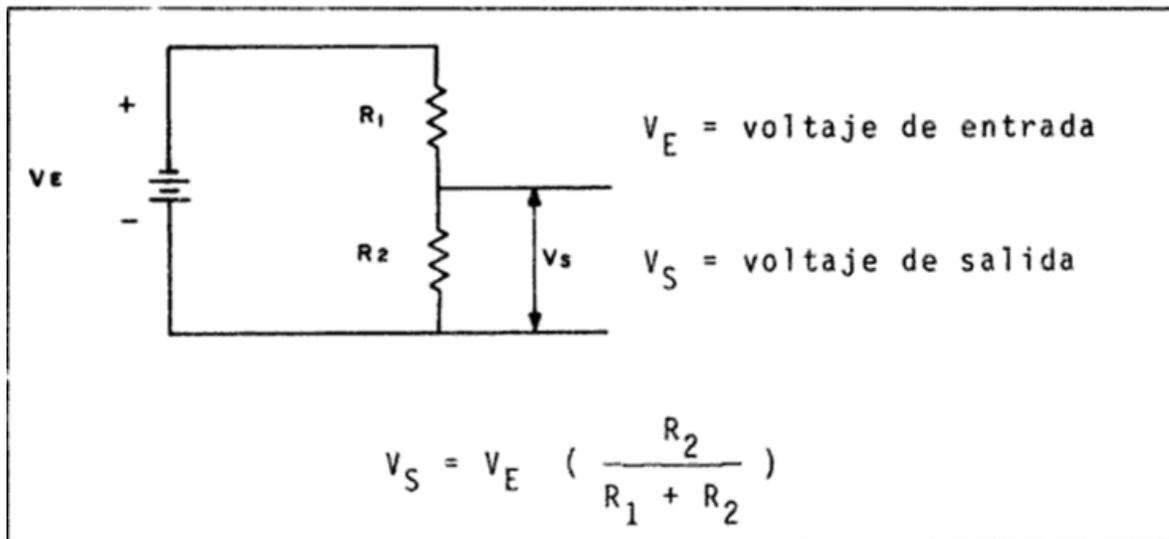
Invertidumbre 1%



No siempre las señales finales de los sensores son adecuadas para la entrada del adquisidor de datos (CR-1000), es éste el caso, los sensores que se utilizaron para la instrumentación de los valores de Corriente y Voltaje de las cadenas de las diferentes tecnologías no son aptos para el adquisidor pues estos sensores tiene una respuesta de 0 a 10 Vdc y el adquisidor solo puede leer una respuesta de 0 a 5000 mV.

Para este caso usamos un divisor de voltaje con consiste en dos o más resistencias conectadas en serie a través de la fuente primaria del voltaje, con esto se puede obtener un voltaje de salida equivalente a una fracción del de la salida, el voltaje en la fuente debe ser mayor que los voltajes que desea.

Figura 19. Divisor de voltaje elemental



El voltaje de

#### 4.2.1.2 Temperatura

El cambio de la temperatura de los módulos afecta directamente la potencia de salida, al aumento de temperatura de un módulo reduce el voltaje y aumenta ligeramente la corriente y esto afecta el factor de forma (FF). Actualmente existen diferentes tecnologías FV que no sufre su potencia por el aumento de temperatura tal es el caso de los módulos de película delgada. Cada fabricante de módulos FV tiene la obligación de proporcionarlos los coeficientes de temperatura de cada módulo y estos

coeficientes se obtienen a partir de condiciones STC y estos coeficientes nos muestran cómo afecta el aumento de temperatura por cada °C.

Los sensores de temperatura que se utilizaron para el monitoreo de la temperatura de las tecnologías FV fueron de tipo termopolar tipo K y se ubicaron en la parte inferior de un panel de cada uno de los SFVs, los tres termopares se ubicaron en la parte central de cada sistema, estas tres señales se llevarán por la canalización del cableado de su respectiva canalización hasta el punto del sistema adquisidor de datos.



Fig. xxx sensor de temperatura tipo K de la marca Omega que se utilizó en el estudio. Fuente. Omega.com

Margen de error  $\pm 1.1$  °C

Temperatura ambiente  $\pm 0.5$  °C

#### 4.2.1.3 Sensor de Irradiancia

Este sensor se utiliza para medir la energía radiada incidente, y por lo general se fija en el marco de los módulos solares. Comparando la potencia de irradiación con la del inversor, se logra obtener un vistazo general del funcionamiento de la instalación fotovoltaica y de su energía generada, La irradiancia se usa para el análisis del SFV, y se debe medir en el plano del arreglo FV con una precisión no mayor a 5%. Los dispositivos para medir la irradiancia deben de ser dispositivos calibrados o dar trazabilidad en dispositivo a usar con un dispositivo previamente calibrado y estos dispositivos pueden ser celdas de referencias, módulos, Licor.

Tabla xxx. Datos técnicos de nuestra celda de referencia

Datos Técnicos	
Sensor	Sensor de silicio monocristalino
Tensión de medición	aprox. 70 mV a 1,000 W/m <sup>2</sup> (valor de calibración exacto impreso en el sensor)
Presición	±5%
Temperatura ambiente admisible	-40°C a +85°C; -40 F a 185 F
Diseño	Resistente al clima, montado sobre perfil de aluminio en forma de Z
Dimensiones (largo x ancho x alto)	110 x 40 x 40 mm
Cable	Conductor de cobre de 3 m; extremos libres, casquillos, resiste a radiación UV
Longitud máxima del cable (distancia entre Sensor Card/Box y sensor)	30 m



#### 4.2.1.4 Velocidad de viento



Fig.

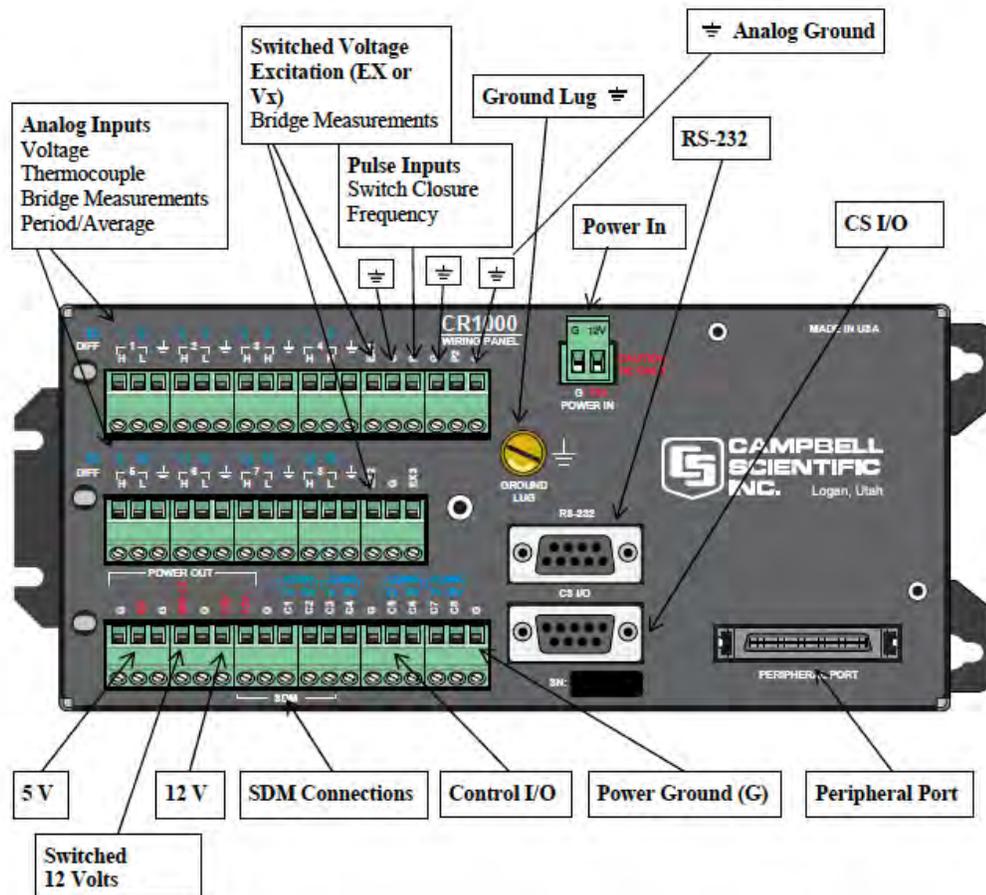
#### 4.2.2 Calibración de los sensores

Hacer en internet

#### 4.3 Adquisidor de datos Datalogger CR1000

El CR1000 se ha convertido casi en el estándar industrial de muchas aplicaciones de adquisición de datos y en redes de estaciones de medida. Su alta fiabilidad y bajo consumo hacen que sea muy usado en campo, a menudo en condiciones duras de trabajo y en aplicaciones como meteorología, hidrología, geotecnia, monitorización de estructuras. También es utilizado en red junto con sistemas de control industrial o como equipo de test y ensayos.

El datalogger ofrece una extensa funcionalidad en medida y control, es compatible con una amplia gama de sistemas de comunicaciones, periféricos de expansión y software.



#### 4.3.1 Sistema de adquisición de datos (DAS)

Para determinar la estabilidad de los sistemas FVs se debe realizar un seguimiento de los valores de los parámetros eléctricos en un corto tiempo durante un cierto tiempo (en nuestro caso será de 4 meses) y con esto tener una mayor resolución de la precisión de los datos. Lo anterior no puede hacerse manualmente, lo que implica, como se ha dicho, tener un sistema de adquisidor de datos (DAS por si siglas en inglés) cuya velocidad de adquisición sea tan grande como para evitar las fluctuaciones en los parámetros medidos debido a los cambios instantáneos en la irradiancia por ejemplo.

En consecuencia si se desea realizar un estudio del comportamiento de los parámetros eléctricos antes mencionados de los SFVs y de estabilidad se deberá contar con un sistema de adquisidor de datos, con este sistemas se deberá identificar plenamente los valores de los parámetros medidos y la variación de los mismos en un corto tiempo ya con ello se podrá discretizar a que se debe los posibles cambios en los parámetros eléctricos y por lo tanto la energía generada por cada tecnología fotovoltaica. En la fig. xxx se muestra el diagrama esquemático de un sistema de adquisición de datos.

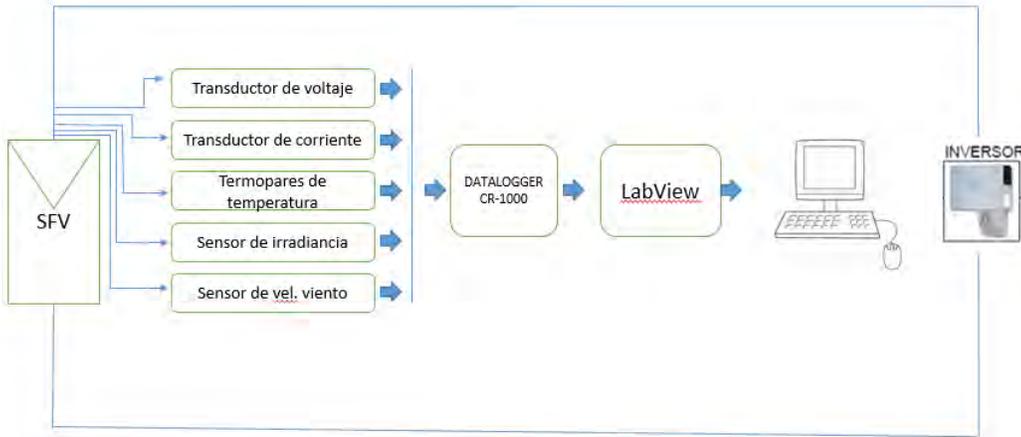


Ilustración 2Figxxx.

#### Diagrama esquemático del sistema de monitoreo (SM)

Para instalar los transductores de voltaje y corriente primero se tuvo que identificar el lugar de la instalación, la alimentación de los mismo así como entradas y salidas de las señales; La fuente de alimentación de los transductores y el adquisidor de datos se encuentra en otra caja y en el mismo lugar por lo que también se tuvo que diseñar las trayectorias de todo el cableado, en la imagen X se puede observar una de las cajas de combinación con todas las entradas y salidas de los sensores, en la caja se puede observar la configuración eléctrica del SFV de CdTe, tenemos un total de 6 transductores por lo cual nos dan 6 salidas para el adquisidor de datos, aparte tenemos que alimentar cada uno de los transductores con 24 Vdc y por último se diseñó la trayectoria de la caja de combinación al Inversor.

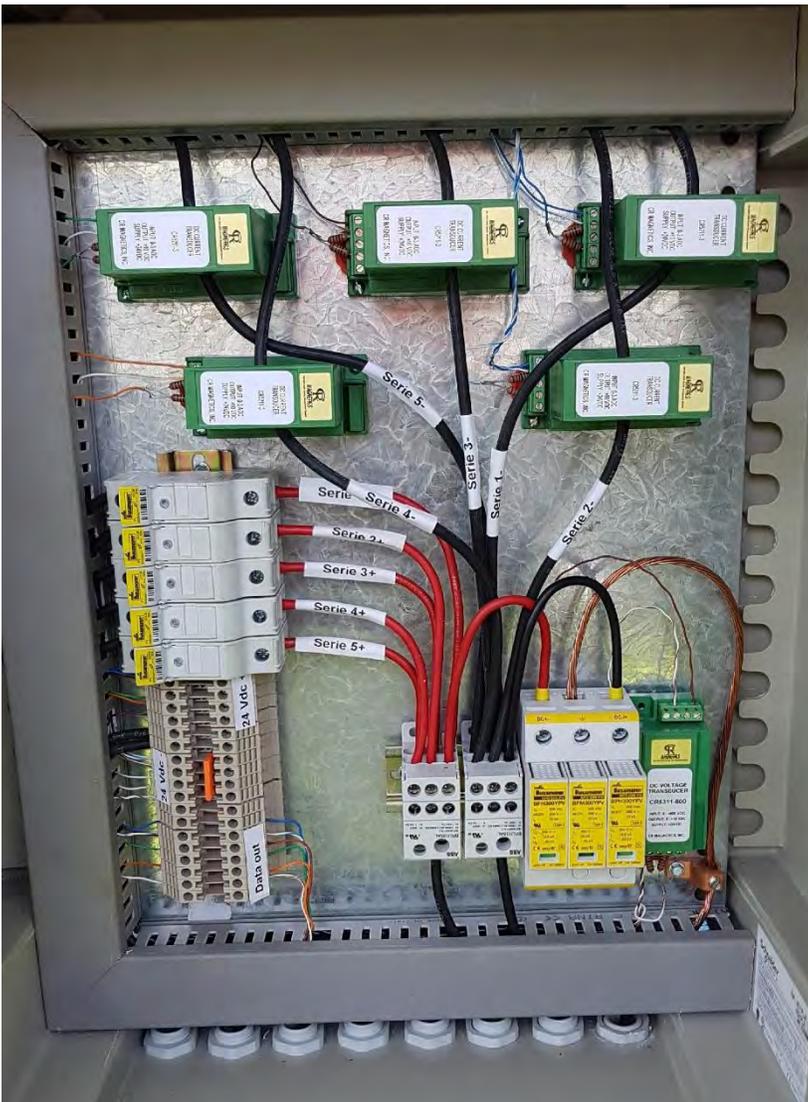


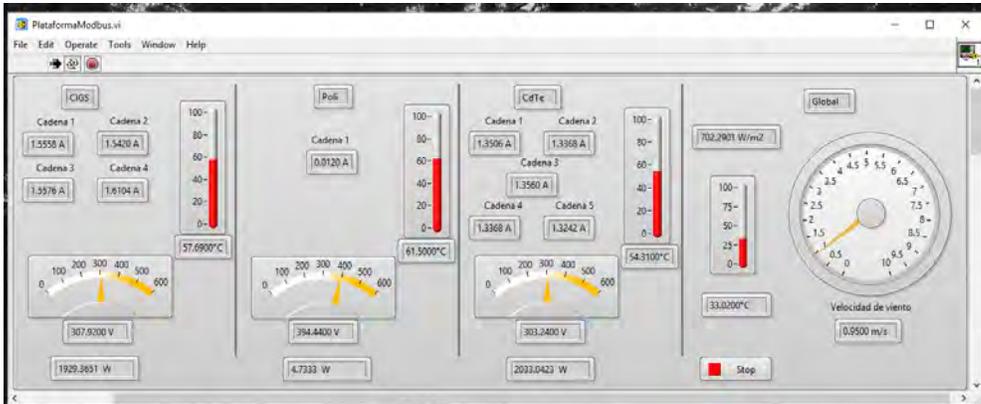
Imagen x. Caja de combinación y de sensores del SFV de tecnología CdTe

La programación que se usa en este DAS permite medir parámetros de interés ya mencionados en el apartado **4.2**, de esta manera y seleccionando los transductores en magnitud de las variables a medir, se diseñó y construyó el un DAS con el datalogger ya mencionado, este datalogger trae consigo un software para su programación y se llama Loggernet, con esta herramienta se puede configurar el CR-1000 dependiendo de la necesidad, desde solo termopares hasta variables escalables de 0-5 Vdc siendo este la magnitud a medir sea el sensor que sea.

Una vez terminado de implementar el DAS para el monitoreo de los 19 variables de los diferentes SFVs, se creó una interface gráfica por medio del programa LabView para poder observar los datos del sistema de monitoreo en tiempo real y así mismo es la misma interface quien guarda los datos

cada segundo de las 19 variables en un archivo “cvs”. En la Fig XX se muestra la interface gráfica del DAS en tiempo real. La imagen (a) se ve claramente que la tecnología de P-Si no está inyectando energía a la red y la imagen (b) se ve que los tres sistemas FVs están operando con normalidad.

(a)



(b)

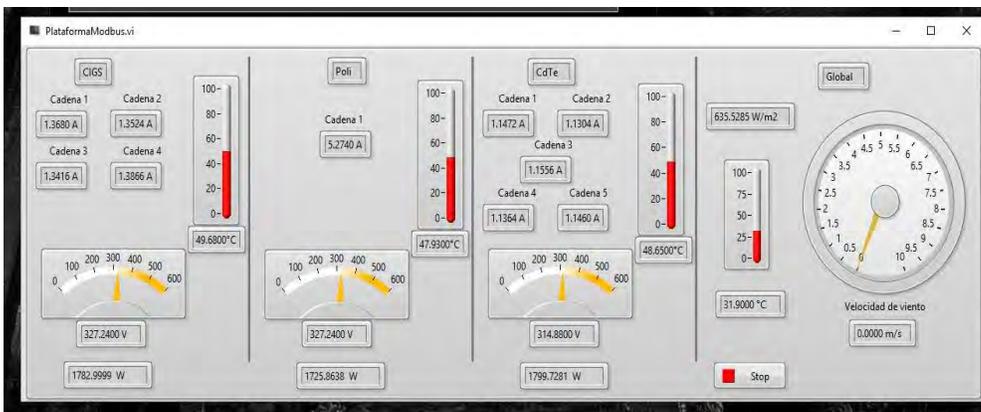


Fig. xx (a) Interface gráfica del DAS en tiempo real

#### 4.4 Procedimiento de medición y análisis de datos

En el DAS proporciona datos de las variables antes mencionadas anteriormente cada segundo, los datos obtenidos en la instalación FV se han clasificado por días, semanas y por los 4 meses teniendo en cuenta que en el sistema se producen errores de medición, adquisición y en la toma de datos se llevó a cabo un filtrado de datos incorrectos.

En la Imagen xx se muestra el archivo con extensión .csv donde se alcance la información del DAS, el sistema monitorea y guarda datos cada segundo con un total de 19 variables por segundo, en la misma imagen se muestra los errores de medición las cual se filtran.

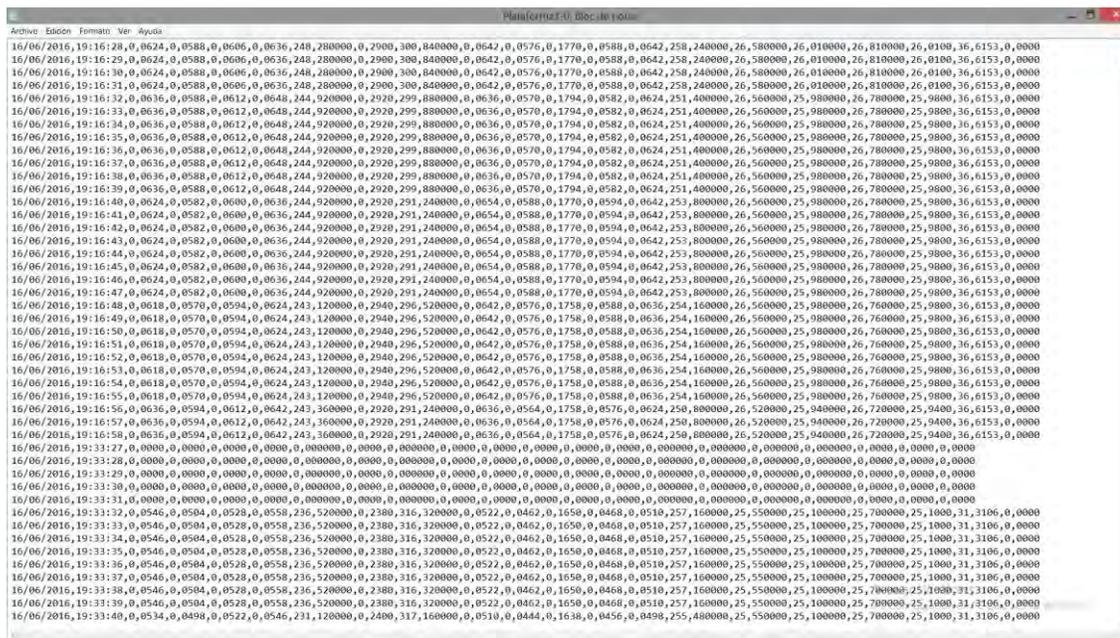


Ilustración 3 Archivo donde se almacena la información del DAS

Con este filtrado de datos se pretende obtener una base de datos lo más real y fiable posible de la instalación y sobre la que se trabajara para realizar el estudio. Una vez realizado el filtrado se procede a realizar el análisis y estudio de los datos de la instalación fotovoltaica de baja concentración.

Con un total de 109 días rescatados después del filtrado tenemos como resultado una pérdida de 10.65% días del total de días monitoreados que serían 122 días dando esto un total de datos recabados de 178,934,400.

Al hacer un previo análisis del primer mes se detectó que en estos datos teníamos una gran cantidad de datos “basura” por así decirlos ya que eran mediciones de lo que ocurría en toda la noche y todos estos datos no nos sirven, por lo que se propuso como primer paso excluir toda esa información, se excluyó la información de las 21:00 a 6:00, con este filtrado reducimos un 37.5% de datos quedando con un total de 111,834,000.

Una vez que ya que filtramos todos nuestros datos la siguiente acción fue ver que software usaremos para el análisis de los datos, en nuestro caso se seleccionó el programa OriginLab v.90, trabajando ya con OriginLab observamos que no podía analizar tantos datos a la vez, para solucionar este

problema se seleccionó la medición de la nubosidad por cada 5 minutos y con esa última acción fue con la que se analizaron los 109 días con un total de 596,448 datos.

En la siguiente imagen se puede ver el tratamiento de datos ya una vez filtrados, promediados.

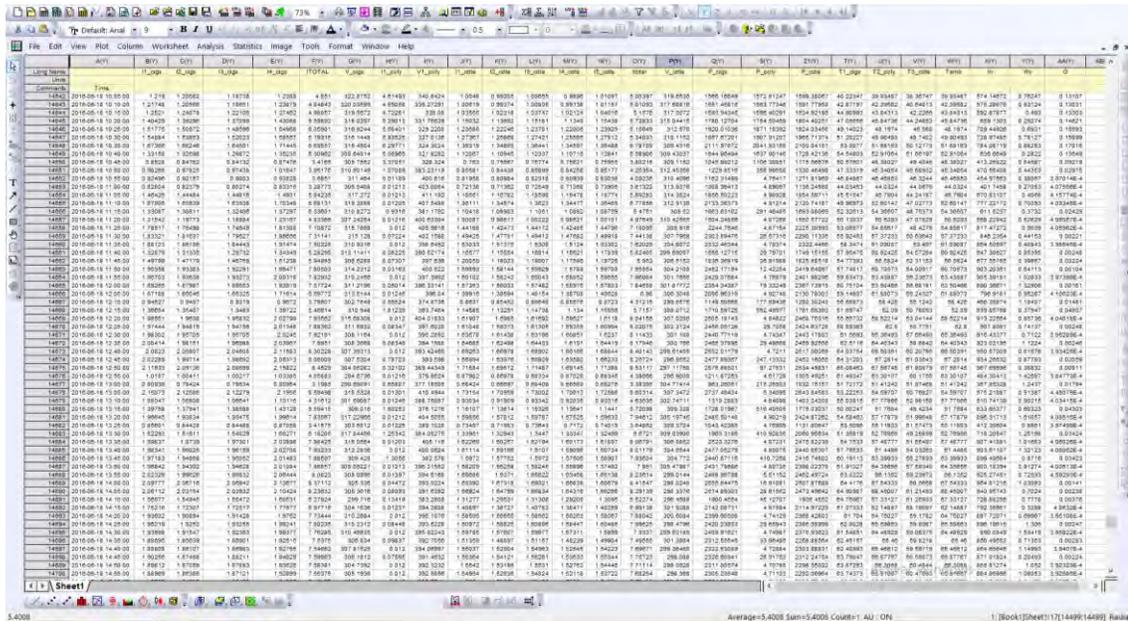
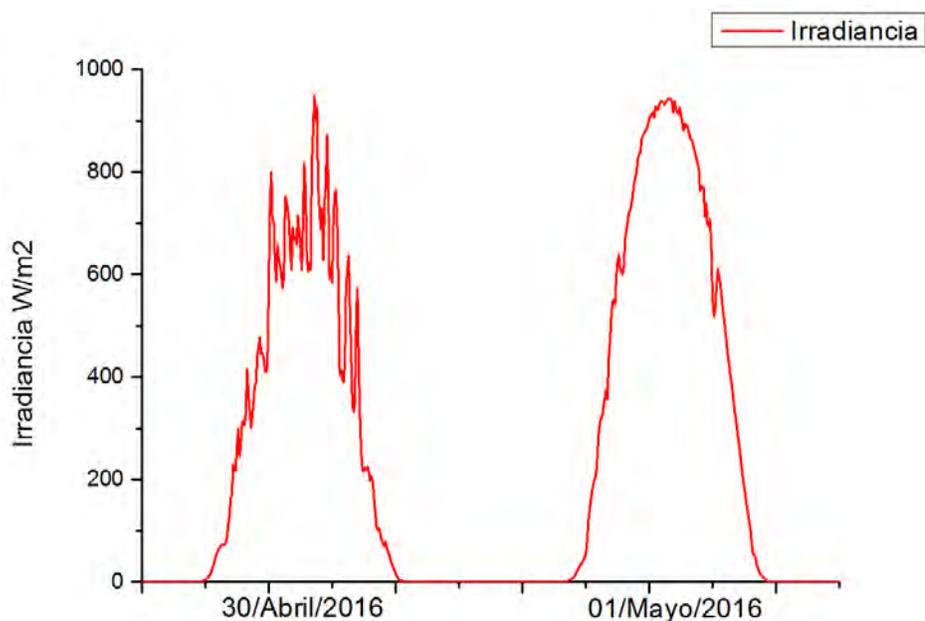


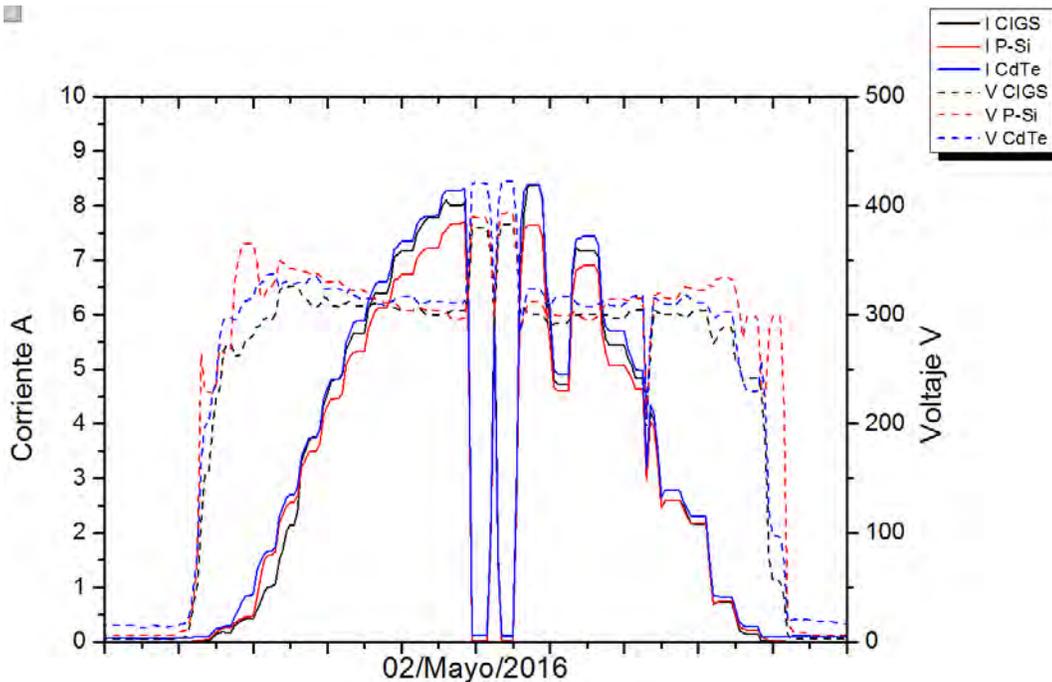
Ilustración 4 Tratamiento de datos en OriginLab

En el tratamiento de datos se llevó a cabo un análisis de los días que podían ser candidatos con los que posteriormente se realizaría el estudio, éstos días se escogieron de la siguiente manera, debían ser días completamente claros y repartidos a lo largo de todo el periodo del que se disponían datos, es decir desde Abril a Julio, en estos días se haría una distinción entre los días con mucho viento y los días sin viento, además sólo se eligieron días en los que el filtrado de datos no modificó demasiado los datos originales. Con la elección de los días más claro dependen únicamente obtener las mejores campanas de irradiancia. Las formas de las campanas en las curvas de irradiancia varían en función de la época del año y de la nubosidad que presente el día, en la siguiente imagen se muestra un día totalmente nublado y un día totalmente soleado.



*Ilustración 5 Comportamiento de la Irradiancia en un día nublado y un día soleado*

Otro de los factores que se tomó en cuenta fue la parte eléctrica, durante el monitoreo de los SFV se presentaron fallas eléctricas en la Red del Instituto de Energías Renovables y una de las características de los inversores que se instalaron con las diferentes tecnologías FV es que cuando un inversor nota la ausencia del voltaje de la Red es desconectarse de la misma para no provocar daños en la red eléctrica, en la siguiente imagen se muestra el comportamiento de la energía inyectada por el inversor a la red en un día con fallas. Todas estas mediciones también se excluyen.



*Ilustración 6 Comportamiento eléctrico del SFV en la ausencia de voltaje en la red eléctrica en el inversor*

Para realizar el estudio final partimos de un par de días representativos de cada mes, estos son días claros, no hayan interrupciones en la red eléctrica, que no haya discrepancia de datos por medio de DAS, etc.

Los días que se seleccionaron el estudio son los siguientes: 19, 21, 29 de Abril, 1, 3, 13 de Mayo, 7, 9, 19 de Junio y 7, 9, 10 de Julio.

#### 4.5 Rendimiento energético del cada SFV con tecnología CIGS, P-Si Y CdTe

La evaluación del rendimiento energético de los SFV conectados a la red, requiere 4 elementos, referidos a un año o mensuales, los cuales indican la eficiencia de la instalación en condiciones reales de trabajo, las cuales también sirven para estimar la energía producida por el SFV interconectado a la red y/o para evaluar el rendimiento del SFV.

Los parámetros para medir el rendimiento son:

Productividad de referencia o Reference Yield,  $Y_R$

$$Y_R = \frac{G_a(\beta)}{G_{STC}}$$

Definido como la irradiación solar incidente en el plano del generador fotovoltaico,  $G_a(\beta)$ , expresado en kWh/m<sup>2</sup>, respecto de la radiación nominal  $G_{STC}$  de 1 kW/m<sup>2</sup>.

Productividad del generador fotovoltaico o Array Yield,  $Y_A$

$$Y_A = \frac{E_{DC}}{P_{STC}}$$

Definida como la energía útil producida por el sistema fotovoltaico,  $E_{DC}$ , respecto de la potencia nominal instalada,  $P_{STC}$ , expresa en unidades de kWh/kWp.

Productividad final o final Yield,  $Y_F$

$$Y_F = \frac{E_{AC}}{P_{STC}}$$

Definida como la energía producida por el sistema fotovoltaico en un cierto lapso de tiempo ósea, la energía que es inyectada a la red,  $E_{AC}$ , por unidad de potencia Instalada, expresa en kWh/kWp.

La norma IEC 61724 es un estándar europeo donde se describen las recomendaciones generales para el análisis del comportamiento eléctrico de los sistemas fotovoltaicos, tanto conectados a la red como autónomos.

El Rendimiento Global del sistema,  $PR$ , se define como un factor de rendimiento anual que considera las pérdidas energéticas que tiene el sistema y compara la energía que el sistema fotovoltaico inyecta a la red,  $E_{AC}$ , con respecto a la energía máxima que esta podría entregar a la red, que es igual a la energía técnica máxima generada,  $E_{técmaxgen}$ . La energía técnica máxima que el sistema podría generar se calcula contemplando los factores de pérdida que de ninguna manera se podrían evitar tales como la temperatura, mala irradiación, por lo que el rendimiento global del sistema da posibilidad a la optimización de la instalación.

$$PR = \frac{E_{AC}}{E_{técmaxgen}}$$

## CAPITULO 5. RESULTADOS

### 5.1 Introducción

Para poder conocer el comportamiento del rendimiento de diferentes tecnologías FV es necesario compararlas y que mejor que en las mismas condiciones, es necesario cuantificar datos sobre los principales fenómenos que alteran su rendimiento tales como la temperatura, viento, irradiancia y parámetros eléctricos y para eso como ya se habló en el capítulo 4 y se utilizó un sistema de adquirente de datos que nosotros mismo elaboramos.

### 5.2 Calculo de pérdidas energéticas

#### 5.2.1 Perdidas por temperatura

Los módulos cuando operan en intemperie rara vez trabajan en condiciones estándares de prueba (STC: 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C y AM1.5). La temperatura promedio de los módulos medida en la parte posterior de los módulos es mayor a 35°C. A estas altas temperaturas, la banda de energía disminuye resultando en una disminución del voltaje de circuito abierto ( $V_{ca}$ ), y los fotones con mayor longitud de onda pueden ser absorbidos. El tiempo de vida de los portadores también puede incrementar, dando como resultado un incremento en la corriente fotogenerada y a su vez un aumento en la corriente de corto circuito ( $I_{CC}$ ). La disminución en el  $V_{ca}$  es mayor que el incremento en  $I_{cc}$  por lo cual la potencia máxima de salida ( $P_m$ ), el factor de forma ( $FF$ ) y la eficiencia ( $\eta$ ) del módulo se ven afectados (C. Radue, 2010).

### 5.3 Comparación del Rendimiento energético de las tres Tecnologías FV

Los resultados presentados son en forma de promedios diarios y promedios mensuales, lo que implica una dispersión con respecto del promedio del total de los datos. Estos fueron obtenidos a partir de datos medidos cada 5 minutos por dos sistemas de monitoreo, uno que mide variables ambientales y

uno propio del inversor que mide las variables eléctricas del sistema. Las incertidumbres de los resultados se presentan en forma de incertidumbre estándar combinada.

En la Tabla X, se presentan los resultados principales del análisis del rendimiento desde el 11 de enero de 2016 hasta el 14 de diciembre de 2016. La energía total inyectada a la red es de 39,452.03 kWh/año. La eficiencia del SFV bajo condiciones reales de operación es de 10.7 %. En la tabla podemos observar que la energía generada e inyectada a la red del mes de agosto es cero, esto debido a que durante ese tiempo, el sistema se desconectó de la red debido a problemas presentados en el punto de interconexión. Dicha cuestión, afecta los resultados presentados, aunque se considera de gran importancia considerarla en el cálculo del rendimiento, porque es finalmente el objetivo del trabajo, evaluar en tiempo real al sistema e identificar sus fallas.

Si en el análisis se excluye el periodo de tiempo en que el SFV se encontró desconectado la eficiencia del SFV se incrementa a 11.74 %.

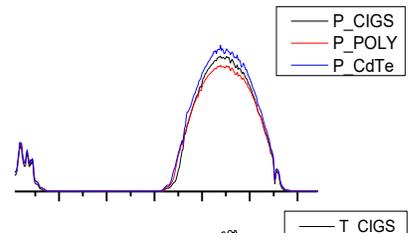
Durante los 120 días de monitoreo en las 3 diferentes tecnologías se pueden exponer los resultados en las siguientes tablas en la cuales se puede observar los diferentes comportamientos de acuerdo a la tecnología bajo estudio, en la graficas 1, se muestran las potencias máximas obtenidos en 3 días mayor soleados con una irradiancia de 1054 W/m<sup>2</sup>, sus temperaturas alcanzadas y velocidad del viento.

Tabla 3. Se muestran los principales resultados del rendimiento energético de 3 días escogidos al azar con mayor irradiancia, se puede ver la potencia instantánea, eficiencia del inversor y temperatura máxima de los módulos registrada [8].

	05/05/2016 Rs 5.135 h  Energía generada	05/05/2016 Rs=5.167 h  Energía generada	05/05/2016 Rs= 6.205  Energía generada	EFICIENCIA INVERSOR%	POTENCIA TOTAL AC  Energía generada	TEMPERATURA PROMEDIA MAX.MODULO
CIGS	13.93 kWh	13.97 kWh	17.38 kWh	92.56	41.90 kWh	69.98 °C
Si-p	13.65 kWh	13.81 kWh	17.04 kWh	91.22	40.59 kWh	65.86 °C

CdTe	15.14 kWh	15.59 kWh	19.08 kWh	91.27	45.45 kWh	67.79 °C
------	-----------	-----------	-----------	-------	-----------	----------

Grafica 1. Comportamiento de la potencia de las tres tecnologías



Grafica 2. Energía total generada durante los 4 meses de la planta bajo estudio.

Tabla 4. Producción de energía generada de la planta Fotovoltaica interconectada a la red durante los meses bajo estudio

2016	Tecnología_CIGS		Tecnología_POLY		Tecnología_CdTe	
	kWh DC	kWh AC	kWh DC	kWh AC	kWh DC	kWh AC
Abril	453.368	419.637	449.382	409.9261	471.250	430.11
Mayo	476.419	440.973	472.232	430.77	495.212	451.98
Junio	461.053	426.75	456.998	416.874	479.248	437.41
Julio	445.684	412.525	441.765	402.978	463.263	422.82
Total	1836.524	1699.885	1820.377	1660.548	1908.973	1742.32

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

Durante los 4 meses que se estudió la tres diferentes tecnologías instaladas en las mismas condiciones en las instalaciones del IER- UNAM, se puede concluir que las que mejor rendimiento energético tiene bajo diferentes circunstancias tales como la irradiancia, temperatura ambiente y temperatura del módulo, velocidad del viento y el mismo inversor da como resultado que la tecnología de película delgada de material Teluro de Cadmio (CdTe) la cual tiene un rendimiento mayor a las tecnologías de CIGS y Silicio policri

stalino del 5.48 % y 6.54 % respectivamente, con una producción total de 1836.524 kWh para el sistemas de tecnología CIGS, 1820.377 kWh para la de Silicio Policristalino y 1908.973 kWh para CdTe.

Como resultado del desarrollo de dicho trabajo, se puede argumentar diferentes situaciones que se observaron durante el análisis de las tecnologías. Durante los meses más calientes del año, abril y Mayo, se registraron temperaturas mayores a 70 °C y gracias a esas elevadas temperaturas en los módulos se vio muy claramente que el efecto de la temperatura golpea más fuertemente a la tecnología de silicio obteniendo rendimientos térmicos ( $R_t$ ) de 0.81, pero conforme transcurría el día y la irradiancia descendía, la que eficiencia de los módulos de película delgada eran fuertemente afectados mientras que el eficiencia de los módulos de silicio se mantenían constantes e incluso aumentan conforme disminuía su temperatura, entonces cuando en el día se tenía una irradiancia menor a 700 W/m<sup>2</sup> las tres tecnologías tenían un rendimiento similar.

Siempre es necesario tener un sistema de monitoreo en los sistemas fotovoltaicos interconectados a la red eléctrica de pequeños, medianos y grandes potencias, la presencia de un sistemas de monitores ayuda a tener datos del comportamiento de diferentes tecnologías de acuerdo al lugar donde sean instaladas ya que también ayuda a detectar el mal funcionamiento de algún

sistema y una vez obteniendo datos de su comportamiento del SFV podrán ser de interés para investigaciones futuras.

## Bibliografía

[1] Comparison of Photovoltaic Module Performance Measurements A. Hunter Fanney, Mark W. Davis, Brian P. Dougherty, David L. King, William E. Boyson and Jay A. Kratochvil

[2] Sánchez Juárez A., Ortega Cruz J., Martínez Escobar D., Sánchez Pérez M., Sistemas Fotovoltaicos Iluminación y Bombeo, ANES, (2009).

[3] Sánchez Juárez et al, sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, Temixco, Morelos, (2010).

[4] <http://xml.ier.unam.mx/xml/se/cs/meteo1.xml>

[5] TS\_CIGS\_series\_C2\_Datasheet\_EU-EN\_01-2015.pdf

[6] DesingBlack\_poly\_240-250-260\_01-2015\_En.pdf

[7] Calyxo\_datenblatt\_es\_86.pdf

[8] rendimiento global de sistemas fotovoltaicos conectados a la red eléctrica, Luis Vilariño García, Javier Vilariño García, Cristina Arenas Rayo, Germán Núñez Rodríguez e Higinio F. Menéndez Milanés