



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
CONECTADOS A RED PARA AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC**

Erick Rodolfo Castillo Villatoro

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, julio de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
CONECTADOS A RED PARA AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ERICK RODOLFO CASTILLO VILLATORO
ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZÁLEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, JULIO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Roberto Mayorga Rouge
EXAMINADOR	Ing. Francisco Javier González López
EXAMINADOR	Ing. Ervin Guzmán Ordoñez
EXAMINADOR	Ing. José Mauricio Velásquez González
SECRETARIO	Ing. Efraín Estuardo Boburg Castellanos

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

**DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA
CONECTADOS A RED PARA AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN
DISTRIBUIDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 13 de octubre de 2014.



Erick Rodolfo Castillo Villatoro

Guatemala, 16 de junio de 2015

Ingeniero,

Otto Fernando Andrino González

Coordinador Área Electrotecnia

Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Facultad de Ingeniería; USAC.

Estimado Ingeniero:

Tras haber asesorado al estudiante universitario **ERICK RODOLFO CASTILLO VILLATORO**, con carné 79-12342, en el desarrollo del trabajo de graduación titulado: "DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADOS A RED PARA AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC" y tras haber revisado y corregido su contenido, sin encontrar alguna objeción al respecto, doy mi aprobación al mencionado trabajo de graduación.

El autor de este trabajo de graduación y su asesor son responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Atentamente,


Ingeniero asesor de tesis
Otto F. Andrino G.
INGENIERO ELECTRICISTA
COLEGIADO # 4038



Ref. EIME 29. 2015
Guatemala, 16 de JUNIO 2015.

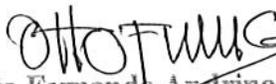
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA
SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADOS A RED PARA
AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN
DISTRIBUÍDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL
CAMPUS CENTRAL DE LA USAC, del estudiante Erick
Rodolfo Castillo Villatoro, que cumple con los requisitos establecidos
para tal fin.**

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador Área Electrotécnica



SFO



REF. EIME 29. 2015.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; ERICK RODOLFO CASTILLO VILLATORO titulado: DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADOS A RED PARA AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN DISTRIBUÍDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

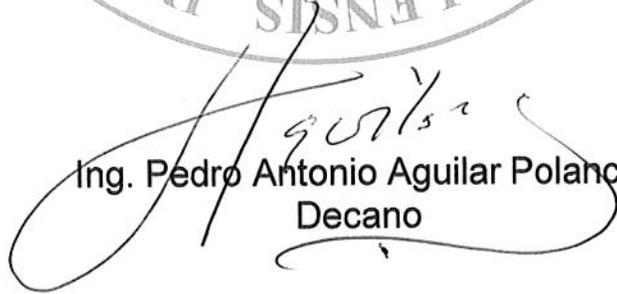


GUATEMALA, 16 DE JUNIO 2,015.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADOS A RED PARA AUTOCONSUMO, BAJO NORMATIVA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA NTGDR, DE LOS EDIFICIOS S1 Y M5, DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC,** presentado por el estudiante universitario: **Erick Rodolfo Castillo Villatoro,** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, julio de 2015



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser quien gobierna y bendice mi vida.
Mis padres	Rodolfo H. Castillo (q. e. p. d.) y Delia Vda. de Castillo, por su amor, guía y dedicación.
Mis hijas	Suyen María, María José, Karen Johanna y Angela Valentina Castillo, inspiraciones de mi vida.
Mi esposa	Claudia Cuyún, por su amor y apoyo.
Mis hermanos	Hiram, Josué (q. e. p. d.) y Delia Castillo, por su buen ejemplo.

AGRACECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por abriirme sus puertas a las mejores
oportunidades de mi vida.

Facultad de Ingeniería

Por ser la fuente de mis conocimientos
profesionales y desarrollo.

Ing. Otto Andrino

Por su excelente orientación, dedicación y
aporte para el desarrollo del presente trabajo.

**Mis compañeros
de estudios**

Por compartir unas de las mejores etapas de mi
vida.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	1
1.1. El Sol como fuente de energía	1
1.2. Efecto fotoeléctrico y fotovoltaico	4
1.3. Celdas solares.....	9
1.3.1. Origen, estructura y funcionamiento	10
1.3.2. Tipos de celdas solares	18
2. ESTRUCTURA Y COMPONENTES DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADO A RED (SGESFR)	23
2.1. Generador fotovoltaico (GF)	24
2.1.1. Paneles solares fotovoltaicos	26
2.1.2. Modelo matemático del panel solar	30
2.1.2.1. Parámetros eléctricos del panel solar..	32
2.2. El inversor.....	35
2.2.1.1. Parametros del inversor.....	39
2.3. Red.....	40
2.3.1.1. Cableados.....	41

2.4.	Protección eléctrica para SGESFR	45
2.4.1.	Protección de voltajes, protección de corrientes y protección contra descargas electroatmosféricas en etapas de AC/DC	47
2.4.1.1.	Puesta a tierra de un SGESFR	49
2.5.	Estructura de soporte	50
2.6.	Contadores bidireccionales	57
3.	ESCENARIO ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN GUATEMALA ...	61
3.1.	Protocolo de Kioto	62
3.2.	Desarrollo tecnológico e implementación de SGESF a nivel mundial.....	64
3.3.	Antecedentes en el desarrollo e implementación de energías renovables en Guatemala	66
3.4.	Marco legal para energías renovables en Guatemala y normativa “NTGDR”	69
3.5.	Servicios de energía prestados en Guatemala	77
4.	RADIACIÓN SOLAR	81
4.1.	Radiación solar en el planeta	81
4.2.	Irradiación	84
4.2.1.	Insolación	87
4.2.2.	Movimiento aparente del Sol.....	91
4.2.2.1.	Factor AM (masa de aire).....	93
4.3.	Radiación solar en ciudad de Guatemala y campus central de Usac.....	94
4.4.	Influencia y análisis para pérdidas por orientación, inclinación, sombras y otros obstáculos.....	99

5.	INFRAESTRUCTURA FÍSICA Y ELÉCTRICA EDIFICIOS S-1 Y M-5 DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC (CCUSAC).....	101
5.1.	Ubicación y descripción de edificios S-1 y M-5 del CCUSAC.....	101
5.2.	Estructura física actual de edificios S-1 y M-5 del CCUSAC.....	103
5.3.	Servicios eléctricos existentes, historial y análisis de consumo de energía eléctrica.....	104
5.4.	Áreas para paneles solares, equipos y cableados complementarios del SGESFR.....	108
6.	DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO DISTRIBUIDO CONECTADO A RED PARA AUTOCONSUMO DE CADA EDIFICIO.....	111
6.1.	Criterio general de diseño para los SGESFR	111
6.2.	Diseño para el SGESFR para el edificio S-1	114
6.2.1.	Capacidad de generación requerida.....	114
6.2.2.	Paneles solares	115
6.2.3.	Inversores DC/AC.....	118
6.2.4.	Adecuación y balanceo del diseño del SGESFR..	120
6.2.5.	Estructura de soporte (ES)	122
6.2.6.	Cableados, conexiones, diagramas y ductos	123
6.2.7.	Protección eléctrica para el SGESFR.....	126
6.2.7.1.	Protección de voltajes y corrientes (AC/DC).....	127
6.2.7.2.	Protección contra descargas electroatmosféricas.....	128
6.2.7.3.	Puesta a tierra	129

6.2.8.	Contador bidireccional.....	130
6.2.9.	Instalación y ubicación física de componentes del SGESFR.....	130
6.3.	Diseño para el SGESFR del edificio M-5	131
6.3.1.	Capacidad de generación requerida	131
6.3.2.	Paneles solares.....	132
6.3.3.	Inversores DC/AC	135
6.3.4.	Adecuación y balanceo del diseño del SGESFR...	137
6.3.5.	Estructura de soporte (ES).....	139
6.3.6.	Cableados, conexiones, diagramas y ductos	140
6.3.7.	Protección eléctrica para el SGESFR	144
6.3.7.1.	Protección de voltajes y corrientes (AC/DC).....	144
6.3.7.2.	Protección contra descargas electroatmosféricas	146
6.3.7.3.	Puesta a tierra	146
6.3.8.	Contador bidireccional.....	147
6.3.9.	Instalación y ubicación física de componentes del SGESFR.....	147
6.4.	Costo financiero SGESFR y estimación ahorro para edificios S-1 y M-5.....	148
6.5.	Reducción de emisiones CO ₂ por los SGESFR	153
CONCLUSIONES.....		155
RECOMENDACIONES		159
BIBLIOGRAFÍA.....		161
APÉNDICES.....		165
ANEXOS.....		169

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	El Sol y su energía	1
2.	Espectro solar	2
3.	Celdas solares	10
4.	Átomo de silicio	12
5.	Electrones de valencia	15
6.	Efecto fotovoltaico en una célula solar	16
7.	Celda solar típica	17
8.	Composición del espectro de radiación solar	19
9.	SGESFR	24
10.	Estructura de un generador fotovoltaico en un SGESFR	25
11.	Elementos de un panel fotovoltaico	27
12.	Módulo de celdas solares de silicio monocristalino y multicristalino	28
13.	Curvas I-V y de potencia	29
14.	Modelo circuital de la celda solar	31
15.	Curva característica I-V	33
16.	Curvas de corriente-voltaje para una celda y un panel fotovoltaicos ...	34
17.	Curva corriente-voltaje de una celda solar en función de temperatura.....	35
18.	Inversor para SGESFR	36
19.	Cable tipo PV (ZZ-F)	42
20.	Plano detallado de las propiedades básicas de un SGESFR.....	46
21.	Estructura de soporte	51
22.	Arena Corinthians, San Pablo, Brasil	52

23.	Panel solar fotovoltaico BIPV / integrado en edificio - MEGASLATE® 170 W	53
24.	Instalación de soporte de sistema fotovoltaico	54
25.	Estructura de soporte para radiación solar	55
26.	Orientación e inclinación de estructura de soporte	56
27.	Montaje de estructura de soporte con módulos	57
28.	Protocolo de Kioto sobre el cambio climático	63
29.	El desarrollo del mercado mundial de energía solar	66
30.	Evolución matriz energética 2007-2013.....	68
31.	Componentes de la radiación solar.....	83
32.	Espectro de radiación solar	84
33.	Radiación y absorción solar.....	86
34.	Cuando ilumina el Sol.....	88
35.	Curva de irradiación diaria y horas pico.....	88
36.	Ángulo del Sol.....	90
37.	Rotación y traslación.....	91
38.	Posición, cálculo de masa de aire.....	94
39.	Cinturon de fuego	95
40.	Inicio de amanecer y final de anochecer.....	97
41.	Diagrama de ruta del Sol	98
42.	Ubicación de los edificios S-1 y M-5 dentro del CCUSAC	102
43.	Edificio S-1.....	103
44.	Edificio M-5	104
45.	Banco de transformadores y contador edificio S-1	105
46.	Banco de transformadores y contador edificio M-5.....	106
47.	Esquema sintetizado edificios S-1 y M-5	108
48.	Panorámica edificios S-1 y M-5 con SGESFR.....	110
49.	Panoramica obstáculos edificio S-1	116
50.	Estudio de sombras para el edificio S-1.....	117

51.	Detalle gráfico de la estructura SGESFR edificio S-1	123
52.	Parte posterior panel solar 300 w mostrando caja de conexiones y cables de cc	124
53.	Diagrama conexiones inversores a tablero de conexiones S-1.....	126
54.	Instalación y ubicación física SGESFR edificio S-1	130
55.	Panoramica obstáculos edificio M-5.....	133
56.	Detalle gráfico de la estructura SGESFR edificio M-5.....	140
57.	Panel Solar PLM-250P-60 de 250 W	141
58.	Diagrama de conexiones inversores a tablero de conexiones M-5....	143
59.	Instalación y ubicación física SGESFR edificio M-5.....	148
60.	Análisis inversion y productividad energética SGESFR S-1.....	150
61.	Análisis inversion y productividad energética SGESFR M-5.....	152

TABLAS

I.	Eficiencia porcentual de celdas solares de acuerdo a su tecnología ...	21
II.	Salida y puesta del Sol, amanecer y anoecer	97
III.	La energía solar y la meteorología de superficie.....	98
IV.	Coordenadas emplazamientos.....	103
V.	Servicios eléctricos.....	105
VI.	Consumo de energía edificios S-1, M-5	107
VII.	Características panel solar Perlight Solar, PLM-300P-72	115
VIII.	Carácterísticas inversor Goodwe, GW-4600-DS	119
IX.	Topologia generador fotovoltaico con inversores S-1	121
X.	Características panel solar PERLIGHT SOLAR PLM250P60	132
XI.	Estudio de sombras para el edificio M-5	133
XII.	Carácterísticas inversor GOODWE, GW-4600-DS.....	136
XIII.	Topologia generadora fotovoltaico con inversores M-5.....	138
XIV.	Presupuesto SGESFR para edificio S-1.....	149

XV. Presupuesto SGESFR para edificio M-5..... 151

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AC	Corriente alterna
DC	Corriente directa
ES	Estructura de soporte
FV	Fotovoltaico
FACTOR AM	Factor de masa de aire
GF	Generador fotovoltaico
GD	Generador distribuido
HPS	Horas Pico Solares
M-5	Edificio M-5 de CCUSAC
MPPT	Traqueo y seguimiento para punto de máxima potencia.
η	Eficiencia
Np	Número de paneles
P	Potencia (W)
S-1	Edificio S-1 de CCUSAC
V	Volts, unidad de medida de caída de tensión
VDC	Volts de corriente directa
W	Watts, unidad de medida de potencia
Wh	Watts-hora
Wp	Watts pico

GLOSARIO

Albedo	Relación expresada en porcentaje, de la radiación que cualquier superficie refleja sobre la radiación que incide sobre la misma.
Celda solar	Dispositivo que convierte energía solar en electricidad.
Célula fotovoltaica	Una célula fotoeléctrica, también llamada célula o celda fotovoltaica, es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica (electrones) mediante el efecto fotoeléctrico.
CCUSAC	Campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.
CNEE	Comision Nacional de Energia Eléctrica.
CONAMA	Comision Nacional del Medio Ambiente.
Diodo	Dispositivo electrónico que permite el paso de corriente en una sola dirección.
Efecto fotoeléctrico	Consiste en la emisión de electrones por un material cuando se le ilumina con radiación

electromagnética (luz visible o ultravioleta, en general).

Efecto invernadero

Fenómeno por el que determinados gases componentes de una atmósfera planetaria retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar.

EEGSA

Empresa Eléctrica de Guatemala S. A.

INDE

Instituto Nacional de Electrificación.

NASA

Aeronáutica Nacional y Administración Espacial.

NTGDR

Norma técnica de generación distribuida para usuarios autoprodutores con exedentes de energía.

ONU

Organización de las Naciones Unidas.

Panel fotovoltaico

Módulo diseñado para convertir la radiación solar en electricidad mediante celdas fotovoltaicas.

Panel solar

Módulo diseñado para convertir la radiación solar en electricidad.

Radiación	Propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas por el espacio.
Silicio	Material semiconductor muy utilizado para elaborar componentes electrónicos.
SGESFR	Sistema de generación de energía solar fotovoltaico conectado a red.
SGESF	Sistema de generación de energía solar fotovoltaico.
Tipo N	Semiconductor con cargas mayoritariamente negativas.
Tipo P	Semiconductor con cargas mayoritariamente positivas.
USAC	Universidad de San Carlos de Guatemala.
Watt	Unidad de potencia del sistema internacional de medidas.

RESUMEN

En este trabajo de graduación se presentan los conceptos básicos de la energía solar y su aprovechamiento para generación de energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, así también sobre el dimensionamiento, diseño, instalación y mantenimiento de un SGESFR para autoabastecimiento de los edificios S-1 y M-5 del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Se describe detalladamente los componentes de los SGESFR y el escenario para el aprovechamiento de la energía solar en Guatemala, desde los puntos de vista geográfico, tecnológico, ambientalista y legal.

Se incluye descripción de la infraestructura física de cada edificio en función de su orientación y del área aprovechable para sus respectivos SGESFR, el tipo de servicios eléctricos con que cuentan y su respectivo historial de consumo, así como propiamente el diseño propuesto del SGESFR para cada uno de ellos, además de la expectativa de producción de energía eléctrica mediante el SGESFR que constituirá el ahorro de energía suministrada por la EEGSA, así como de la contribución a la mitigación de los daños en el medio ambiente.

Finalmente se concluye la total factibilidad y conveniencia de la instalación del SGESFR en cada edificio, recomendando a la vez la implementación de estos sistemas no solo en estos edificios sino que en todas las instalaciones de la Usac que lo permitan.

OBJETIVOS

General

Diseño de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica conectados a red para autoconsumo de los edificios S-1 y M-5 del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac).

Específicos

1. Disponer de un marco teórico base y de desarrollo tecnológico para el aprovechamiento de energía solar fotovoltaica en las instalaciones propias de la Usac.
2. Disponer de información actualizada y concentrada respecto al escenario mundial y nacional del desarrollo e implementación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar.
3. Conocer el historial del consumo y demanda de energía eléctrica de los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC, a través de la determinación de los servicios eléctricos con que cuentan.
4. Determinar las áreas de mejor aprovechamiento y seguras para el montaje de los paneles solares de los sistemas fotovoltaicos, que generen la energía suficiente para el autoabastecimiento en los edificios S-1 y M-5.

5. Determinar la reducción de la contaminación ambiental por medio de la producción de energía renovable, silenciosa y limpia, en los edificios S-1 y M-5.
6. Estimar el ahorro en Kw-Hr en cada servicio que se integre a su propio sistema (SGESFR), a fin de hacer una proyección para determinar el tiempo de recuperación de la inversión en cada edificio S-1 y M-5.
7. Diseñar un sistema de generación de energía solar fotovoltaica conectado a red para autoabastecimiento de energía de los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC, en forma independiente y a través de la elección del criterio adecuado.

INTRODUCCIÓN

La revolución "verde" está mundialmente en pleno desarrollo debido a que la eficiencia energética ha pasado de ser solo una ventaja, para convertirse en una necesidad absoluta, prácticamente obligando a la utilización de energía proveniente de fuentes renovables.

Dentro del ámbito de las energías renovables, es decir energía "limpia", se estima que el mayor desarrollo tecnológico y de implementación para el aprovechamiento mundial de la energía solar por medio fotovoltaico se está llevando a cabo ya en la presente década (2010 – 2020), además de que ha estado y se estima que estará como primera opción de energía renovable del 2001 al 2030; esto implica que a finales del 2030 un alto porcentaje de edificaciones e incluso viviendas tendrán ya implementada esta tecnología.

Esta implementación coadyuvará al aumento de la seguridad energética de todos los países a nivel mundial, y Guatemala no será la excepción, ya que el uso de una fuente de energía renovable de disponibilidad local, prácticamente inagotable y aun más importante, independiente de importaciones, aumentará la sostenibilidad y además reducirá la contaminación, coadyuvando en conjunto con otras energías renovables, a disminuir la dependencia de combustibles fósiles y especialmente en la mitigación del cambio climático mundial.

Considerando que la Usac como institución debe participar preponderantemente en el marcaje de las pautas energéticas a seguir en el país, especialmente en el área de generación de electricidad, y más aún por ser

la única Universidad que cuenta con la carrera de Ingeniería Eléctrica, y que además su campus central (CCUSAC) posee una infraestructura con disponibilidad de áreas aptas para el aprovechamiento de energía solar, esto debido no solo en si por su propia infraestructura sino que a su posición geográfica, a la legislación actual y a la prestación de los servicios de energía eléctrica existentes en el país, y que por lo tanto es totalmente conveniente la implementación de sistemas de generación de energía solar fotovoltaico distribuidos (SGESF) conectados a red, para la mayoría de sus edificios en búsqueda de su autoabastecimiento parcial o incluso total de energía eléctrica.

En el presente trabajo se presentan capitularmente los resultados de la investigación de los fundamentos científicos básicos de la energía solar, de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaicos conectados a red (SGESFR), del escenario mundial y nacional para la implementación de estos sistemas, de la identificación de los servicios eléctricos que actualmente se utilizan en los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC y su historial de consumo, de la infraestructura y de las áreas apropiadas disponibles para instalación de todos los componentes del SGESFR en cada uno de ellos, para finalmente llegar al diseño de un sistema de generación de energía solar fotovoltaico distribuido y conectado a red para cada edificio en búsqueda de generar la energía eléctrica suficiente para lograr su autoabastecimiento.

Este trabajo constituya una fuente informativa en general para efectos docentes, de investigación y consulta a nivel interno o externo de la Usac, y también en una poderosa herramienta para las autoridades de la Usac para cuando decidan llevar a cabo el proyecto cuyo diseño se propone.

Final y adicionalmente se considera la total factibilidad de la realización de estos proyectos, ya que en conjunto con otros similares, ayudará a generar más

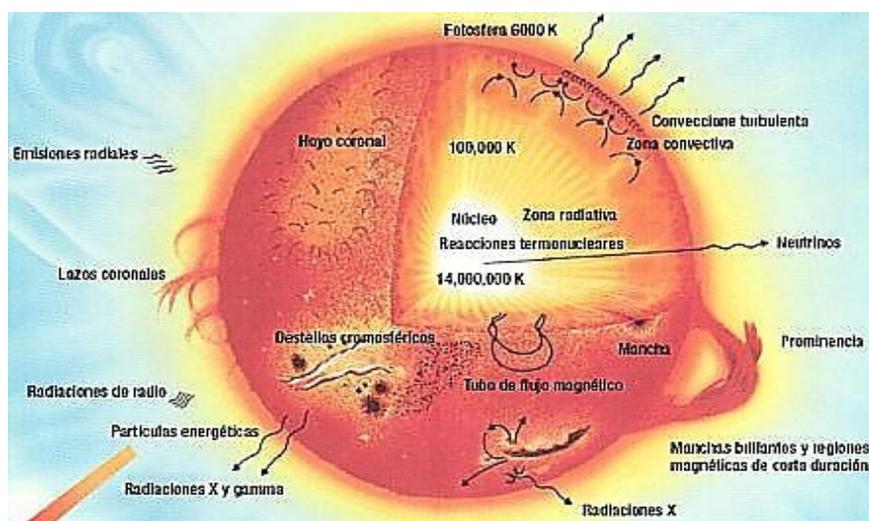
energía eléctrica limpia, reduciendo la contaminación ambiental en el país, fortaleciendo a la vez la economía local, generando trabajo y el movimiento económico, que permitirá a su vez mejorar la calidad de vida de la población en general.

1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

1.1. El Sol como fuente de energía

El Sol es una estrella de tipo espectral que se encuentra en el centro del sistema solar, con una masa de $1,9891 \times 10^{30}$ Kg y a una distancia media aproximada de 149 600 000 Km de la Tierra, conformada como una esfera de gases (mayoritariamente hidrógeno y helio), a una temperatura media de casi los 6 000 °K, en cuyo interior tienen lugar una serie de reacciones de fusión nuclear, que producen una pérdida de masa que se transforma en energía, la cual a su vez se transmite al exterior mediante la radiación solar.

Figura 1. El Sol y su energía



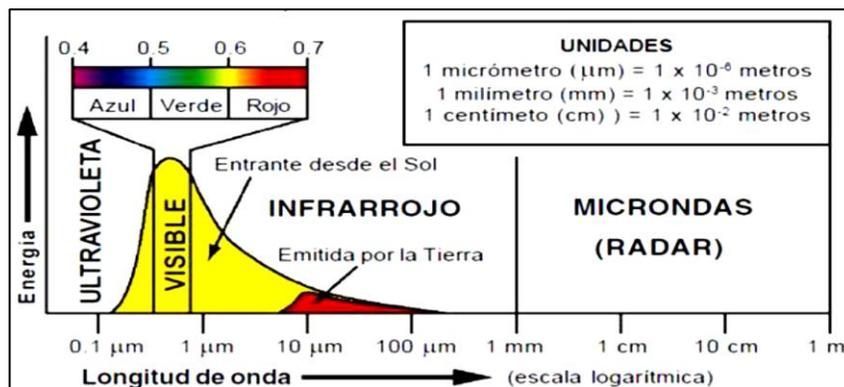
Fuente: *Astromía*. <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

Alrededor del Sol giran varios planetas, la Tierra uno de ellos, que constituyen el Sistema Solar y que son los primeros entes en ser bañados por esta radiación, que tarda en llegar a la Tierra alrededor de 8 minutos y 19 segundos.

El Sol se constituye como la mayor fuente de radiación electromagnética para este sistema planetario, representando a su vez la mayor fuente de energía existente para el planeta, radiándola por medio de ondas electromagnéticas presentes en los rayos solares, las cuales son generadas en forma continua y emitida permanentemente al espacio, perceptible en forma de luz y calor.

Esta energía, que llega a la parte exterior de la atmósfera, está integrada por un conjunto de radiaciones de diversas longitudes de onda (radiación ultravioleta, luz visible y radiación infrarroja), conformando lo que se llama el espectro solar terrestre y el cual se representa gráficamente en la figura 2.

Figura 2. **Espectro solar**



Fuente: *Astromía*. <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

Sabiendo que todas las ondas electromagnéticas, independientemente de su frecuencia y longitud de onda, se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz (c), se relaciona desde el punto de vista físico con la siguiente ecuación:

$$\lambda = c/f$$

Esta energía absorbida por el planeta realiza un rol fundamental para toda la vida existente, generando una serie de procesos naturales, como por ejemplo: mantener una temperatura promedio, la evaporación que permite la generación de precipitaciones, movimiento de masas de aire, fotosíntesis, generación de biomasa, entre otros. Así también, su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables en el desarrollo de los vegetales y de los animales que, con el paso de los siglos, han originado combustibles fósiles como el carbón y el petróleo.

Algunas de estas acciones y reacciones provocadas por la radiación solar tienen otra importancia capital ya que provocan a su vez otras formas de energía renovable, como lo son: el viento, las olas y la biomasa, que no son más que manifestaciones indirectas de esta; además atraviesa en forma directa el espacio vacío en todas direcciones y en su intercepción por la Tierra no sufre pérdidas apreciables por interacción con medios materiales, constituyéndose en la principal fuente de energía renovable al alcance.

La energía solar constituye una fuente de energía renovable para el planeta, prácticamente inagotable, limpia y sustentable en el tiempo, de la cual cerca del 70 % de la recibida por el planeta es absorbida por la atmósfera, por la Tierra y por los océanos, mientras que el 30 % restante es reflejado por la misma atmósfera de regreso al espacio.

Actualmente, las formas más comunes de aprovechar la energía solar son en forma térmica y en forma fotovoltaica, la primera con celdas térmicas la segunda con celdas construidas a base de materiales semiconductores.

1.2. Efecto fotoeléctrico y fotovoltaico

El Sol, como ya se afirmó, es la principal fuente de energía del planeta, la fuente de luz periódica por excelencia, transmitiéndola por medio de ondas electromagnéticas en los rayos solares.

Cuando la radiación de estas ondas electromagnéticas incide sobre un material y es capaz de provocar una emisión de electrones (luz visible o ultravioleta, en general) se presenta el fenómeno llamado Efecto Fotoeléctrico, descubierto y descrito por Heinrich Hertz en 1887, al observar que el arco que salta entre dos electrodos conectados a alta tensión alcanza distancias mayores si se ilumina con luz ultravioleta que cuando se deja en la oscuridad.

Los fotones del rayo de luz tienen una energía característica determinada por la frecuencia de la luz y en el proceso de fotoemisión, si un electrón absorbe la energía de un fotón con más energía que la función de trabajo, entonces es arrancado del material, pero si la energía del fotón es demasiado baja, el electrón no puede escapar de la superficie del material.

En física del estado sólido la función de trabajo, o trabajo de extracción, es la energía mínima (normalmente medida en electronvoltio) necesaria para arrancar un electrón de una sustancia determinada (sólido), a un punto inmediatamente fuera de la superficie del sólido o técnicamente se puede decir que es la energía necesaria para mover un electrón desde el nivel de energía de Fermi hasta el vacío; aquí inmediatamente significa que la posición final del

electrón está lejos de la superficie a escala atómica pero todavía cerca del sólido en una escala macroscópica.

La función de trabajo es una propiedad fundamental para cualquier sustancia sólida con una banda de conducción (tanto vacía como parcialmente llena). Para un metal, por ejemplo, el nivel de Fermi está dentro de la banda de conducción, indicando que la banda está parcialmente llena; para un aislante, el nivel de Fermi cae dentro del *gap*, indicando una banda de conducción vacía; en este caso, la energía mínima para arrancar un electrón es aproximadamente la suma de la mitad del *gap* y la función de trabajo.

La energía de un fotón se cuantifica mediante la ecuación:

$$E_f = h \cdot c / \lambda$$

Siendo h la constante de Planck, c la velocidad de la luz en el vacío y λ la longitud de onda del fotón.

Es importante resaltar que intensidad de la radiación incidente influye en la cantidad de electrones generados pero no determina la energía de estos electrones, energía que solo depende de la frecuencia fotónica.

Si la excitación electrónica es obtenida por absorción de un fotón, o sea cuando un electrón adquiere energía y salta de un nivel de energía a otro en saltos cuánticos (se ha dado la excitación de un electrón y ha pasado a niveles altos de energía que también se llaman estados excitados), se ha dado lo que se conoce como el efecto fotoeléctrico. Si la energía del fotón es mayor que la función de trabajo de la sustancia, se produce la emisión fotoeléctrica y el

electrón es liberado de la superficie. (El exceso de energía del fotón se traduce en la liberación del electrón con energía cinética distinta de cero).

La función de trabajo fotoeléctrica es $\phi = hf_0$

dónde h es la constante de Planck y f_0 es la frecuencia mínima (umbral) del fotón, requerida para producir la emisión fotoeléctrica.

Para analizar el efecto fotoeléctrico cuantitativamente utilizando el método derivado por Einstein es necesario plantear las siguientes ecuaciones:

Energía de un fotón absorbido = energía necesaria para liberar 1 electrón + energía cinética del electrón emitido. Algebraicamente se puede expresar así:

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

Que puede también escribirse como:

$$hf = \phi + E_k$$

Donde h es la constante de Planck, f es la frecuencia de corte o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico, ϕ es la función de trabajo, o mínima energía necesaria para llevar un electrón del nivel de Fermi al exterior del material y E_k es la máxima energía cinética de los electrones que se observa experimentalmente.

Si la energía del fotón (hf) no es mayor que la función de trabajo (ϕ), ningún electrón será emitido. Si los fotones de la radiación que inciden sobre el

metal tienen una menor energía que la de función de trabajo, los electrones del material no obtienen suficiente energía como para emitirse de la superficie metálica.

En algunos materiales esta ecuación describe el comportamiento del efecto fotoeléctrico de manera tan solo aproximada. Esto es así porque el estado de las superficies no es perfecto (contaminación no uniforme de la superficie externa).

La banda prohibida, brecha de bandas o brecha energética (en inglés *bandgap*), en la física del estado sólido y otros campos relacionados, es la diferencia de energía entre la parte superior de la banda de valencia y la parte inferior de la banda de conducción. Está presente en aislantes y semiconductores.

La conductividad eléctrica de un semiconductor intrínseco (puro) depende en gran medida de la anchura del *gap*. Los únicos portadores útiles para conducir son los electrones que tienen suficiente energía térmica para poder saltar la banda prohibida, la cual se define como la diferencia de energía entre la banda de conducción y la banda de valencia. La probabilidad de que un estado de energía E_0 esté ocupado por un electrón se calcula mediante las estadísticas de Fermi-Dirac. Una aproximación, la de Maxwell-Boltzmann, es válida también si se cumple $E_0 \gg E_F$, donde E_F es el nivel de Fermi. La aproximación de Maxwell-Boltzmann viene dada por:

$$e^{(-E_g/kT)}$$

Donde: e es la función exponencial, E_g es la energía de banda prohibida, k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura.

En estos casos la conductividad es un efecto no deseado, y los materiales con un ancho de banda prohibida mayor ofrecen un mejor comportamiento. En los fotodiodos de infrarrojos se usa un *gap* pequeño para permitir la detección de fotones de baja energía.

El efecto fotoeléctrico es la base de la producción de energía eléctrica por radiación solar y del aprovechamiento energético de la energía solar. El efecto fotoeléctrico se utiliza también para la fabricación de células utilizadas en los detectores de llama de las calderas de las grandes centrales termoeléctricas. Este efecto es también el principio de funcionamiento de los sensores utilizados en las cámaras digitales. También se utiliza en diodos fotosensibles tales como los que se utilizan en las células fotovoltaicas y en electroscopios o electrómetros. En la actualidad los materiales fotosensibles más utilizados son, aparte de los derivados del cobre (ahora en menor uso), el silicio, que produce corrientes eléctricas mayores.

El efecto fotoeléctrico también se manifiesta en cuerpos expuestos a la luz solar de forma prolongada. Por ejemplo, las partículas de polvo de la superficie lunar adquieren carga positiva debido al impacto de fotones. Las partículas cargadas se repelen mutuamente elevándose de la superficie y formando una tenue atmósfera. Los satélites espaciales también adquieren carga eléctrica positiva en sus superficies iluminadas y negativa en las regiones oscurecidas, por lo que se debe tener en cuenta estos efectos de acumulación de carga en su diseño.

La transformación de la energía solar en energía eléctrica, a través del efecto fotoeléctrico, se denomina efecto fotovoltaico y consecuentemente energía solar fotovoltaica. Este efecto fotovoltaico se produce en materiales conocidos como semiconductores, los cuales son materiales cuya conductividad

es modificada, y además genera una corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas.

Al incidir los rayos del Sol en un semiconductor, algunos de los electrones de la banda de valencia absorben energía de los fotones y pasan a la banda de conducción, donde pueden ser llevados fácilmente a un circuito externo generando por tanto una corriente electrónica. Al dejar su lugar los electrones, provocan en el material huecos, considerados como una partícula de signo positivo, los cuales también se mueven como una corriente en sentido opuesto a la electrónica y se asemeja al desplazamiento de una burbuja en el agua. Para que los electrones y huecos generados por la luz solar no se recombinen dentro del semiconductor se debe contar con un campo eléctrico interno, en cuyo sentido se moverán los electrones. Este campo eléctrico es producido en general por una juntura similar a la del diodo semiconductor.

En este punto se puede decir entonces que la energía solar fotovoltaica es la que aprovecha la energía de los rayos del Sol, para producir electricidad mediante un conjunto de celdas solares, construidas por placas de semiconductores que se alteran con la radiación solar y que conforman los llamados paneles solares fotovoltaicos.

1.3. Celdas solares

Las células o celdas solares son dispositivos que convierten energía solar en electricidad, sin necesidad de piezas móviles o de algún tipo de combustibles, ya sea directamente vía el efecto fotovoltaico, o indirectamente mediante la previa conversión de energía solar a calor o a energía química.

Las celdas que se mencionarán son en las que el efecto fotovoltaico se produce por sus materiales de construcción, conocidos como semiconductores, en los que su conductividad es modificada, y además genera una corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas, mediante una diferencia del voltaje o del potencial entre sus capas. Este voltaje es capaz de conducir una corriente a través de un circuito externo de modo de producir trabajo útil.

Figura 3. **Celdas solares**



Fuente: *Astromía*. <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

1.3.1. Origen, estructura y funcionamiento

Aunque las celdas solares, con niveles aceptables de eficiencia, están disponibles recién desde mediados de los años 50, la investigación científica del efecto fotovoltaico comenzó en 1839, cuando el científico francés Henri Becquerel lo descubrió mientras efectuaba experimentos con una pila electrolítica de 2 electrodos sumergidos en una sustancia electrolítica; esta pila

aumentó su generación de electricidad al ser expuesta a la luz. A fines del siglo XIX científicos como W. Smith, W. Adas y R. Day descubren la fotoconductividad en un material sólido (selenio) y construyen la primera celda experimental hecha de una oblea de selenio. Este material fue utilizado durante años para los fotómetros, que requerían de cantidades muy pequeñas de energía.

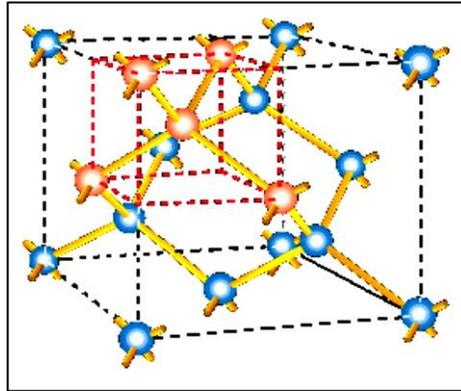
Una comprensión más profunda de los principios científicos, fue provista por Albert Einstein en 1905 y Schottky en 1930, la cual fue necesaria antes de que celdas solares eficientes pudieran ser confeccionadas.

Posteriormente en 1941 se construye el dispositivo llamado celda solar, fabricado de selenio y tenía una eficiencia del 1 %. La compañía Western Electric fue la primera en comercializar las celdas solares en 1955.

Antes de proseguir con esta línea del tiempo se observará el elemento más importante en la estructura de una celda, siendo este el semiconductor, por lo que se puede analizar en forma breve y un poco más detallada, que la estructura física, o arreglo atómico, de los semiconductores se puede dividir en tres grupos: monocristalino (cristal simple), policristalino y amorfo.

La estructura de cristal simple (monocristalino) presenta un ordenamiento periódico de átomos en forma geométrica tridimensional de paralelepípedo. En la figura se observa al silicio compartiendo cada uno de sus 4 electrones de valencia en unión covalente con cada átomo vecino de silicio, el sólido por lo tanto, consiste en una unidad básica de 5 átomos de silicio, el átomo original más los 4 átomos con los que comparte sus electrones de valencia.

Figura 4. **Átomo de silicio**



Fuente: *Astromía*. <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

Un material policristalino está compuesto de varias subsecciones, cada una de ellas con forma cristalina, estas subsecciones tienen una orientación independiente y regularmente, en sus interfaces se producen discontinuidades. Un material amorfo no tiene una regularidad en su arreglo atómico, hoy en día 25 % a un 30 % de las celdas solares son fabricadas con materiales policristalinos, son menos costosas de construir, por unidad de área, que las celdas solares de cristal simple; sin embargo, tienen una menor eficiencia y a menudo una mayor sensibilidad a los cambios en las condiciones ambientales, por lo que en general son utilizados con concentradores ópticos de luz solar.

En 1954, una celda solar de silicio que convertía el 6 % de la luz solar que incidía sobre ella en electricidad fue desarrollada por Chapin, Pearson y Fuller, y esta es la que fue utilizada en usos especializados tales como satélites orbitales a partir de 1958.

Las típicas celdas solares están construidas hoy en día de una hoja de silicio de alta pureza, tratada químicamente con boro y fósforo y con electrodos metálicos en ambas caras y las que están disponibles comercialmente en la actualidad, tienen una eficiencia de conversión en electricidad de la luz solar que cae sobre ellas de cerca del 18 %, a una fracción del precio de hace treinta años. En la actualidad existen una gran variedad de métodos para la producción práctica de celdas solares de silicio (amorphas, monocristalinas o policristalinas), del mismo modo que para las celdas solares hechas de otros materiales (seleniuro de cobre e indio, telurio de cadmio, arseniuro de galio, entre otros); de hecho las celdas solares de silicio se elaboran utilizando planchas (*wafers*) monocristalinas, planchas policristalinas o láminas delgadas.

Las planchas monocristalinas (de aproximadamente 1/3 a 1/2 de milímetro espesor) se cortan de un gran lingote monocristalino que se ha desarrollado a aproximadamente 1 400 °C, este es un proceso muy costoso; el silicio debe ser de una pureza muy elevada y tener una estructura cristalina casi perfecta.

Las planchas policristalinas son realizadas por un proceso de moldeo en el cual el silicio fundido es vertido en un molde y se lo deja asentar, entonces se rebana en planchas, por lo que son apreciablemente más baratas de producir, pero no tan eficiente como las celdas monocristalinas y esto debido a las imperfecciones en la estructura cristalina resultando precisamente de este proceso de moldeo.

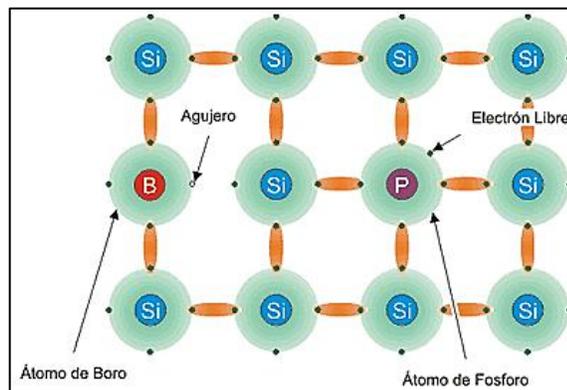
En los dos procesos anteriormente mencionados, casi la mitad del silicio se pierde como polvo durante el cortado. El silicio amorfo, una de las tecnologías de lámina delgada, es creado depositando silicio sobre un substrato de vidrio de un gas reactivo tal como silano (SiH_4) y se puede aplicar como película a substratos de bajo costo tales como cristal o plástico. Otras

tecnologías de lámina delgada incluyen lámina delgada de silicio multicristalino, las celdas de seleniuro de cobre e indio/sulfuro de cadmio, las celdas de telurio de cadmio/sulfuro del cadmio y las celdas del arseniuro de galio. Las celdas de lámina delgada tienen muchas ventajas incluyendo una deposición y un ensamblado más fácil, la capacidad de ser depositadas en sustratos o materiales de construcción baratos, la facilidad de la producción en masa, y la gran conveniencia para aplicaciones grandes.

Continuando con el análisis se ve que en la producción de celdas solares al silicio se le introducen átomos de impurezas (dopado), para crear una región tipo p y una región tipo n de modo de producir una unión p-n. El dopado se puede hacer por difusión a alta temperatura, donde las planchas se colocan en un horno con el dopante introducido en forma de vapor. Hay muchos otros métodos de dopar el silicio. En la fabricación de algunos dispositivos de lámina delgada la introducción de dopantes ocurre durante la deposición de las láminas o de las capas.

Un átomo del silicio tiene 4 electrones de valencia (aquellos más débilmente unidos), que enlazan a los átomos adyacentes. Substituyendo un átomo del silicio por un átomo que tenga 3 o 5 electrones de la valencia producirá un espacio sin un electrón (un agujero) o un electrón extra que pueda moverse más libremente que los otros, esta es la base del *doping*. En el *doping* tipo p, la creación de agujeros, es alcanzada mediante la incorporación en el silicio de átomos con 3 electrones de valencia, generalmente se utiliza boro. En el dopaje de tipo n, la creación de electrones adicionales es alcanzada incorporando un átomo con 5 electrones de valencia, generalmente fósforo.

Figura 5. **Electrones de valencia**



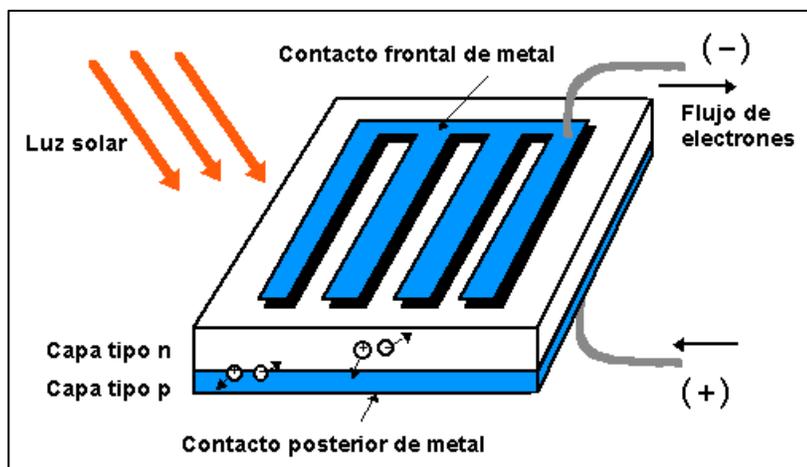
Fuente: *Astromía*. <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

Una vez que se crea una unión p-n, se hacen los contactos eléctricos al frente y en la parte posterior de la célula, evaporando o pintando con metal la plancha. La parte posterior de la plancha se cubre totalmente por el metal, pero el frente de la misma tiene solamente un patrón en forma de rejilla o de líneas finas de metal, de otra manera el metal bloquearía al sol del silicio y no habría ninguna respuesta a los fotones de la luz incidente.

Para entender mejor el funcionamiento de una celda fotovoltaica, se considera la naturaleza del material y la naturaleza de la luz del Sol, teniendo presente que las celdas solares están formadas por dos tipos de material, generalmente silicio tipo p y silicio tipo n y que la luz de ciertas longitudes de onda puede ionizar los átomos en el silicio y el campo interno, producido por la unión que separa algunas de las cargas positivas (agujeros) de las cargas negativas (electrones) dentro del dispositivo fotovoltaico. Los agujeros se mueven hacia la capa positiva o capa de tipo p y los electrones hacia la negativa o capa tipo n. Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente,

la mayoría solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito externo fuera del material debido a la barrera de energía potencial interno. Por lo tanto si se hace un circuito se produce una corriente a partir de las celdas iluminadas, ya que los electrones libres tienen que pasar a través del circuito para recombinarse con los agujeros positivos.

Figura 6. **Efecto fotovoltaico en una célula solar**



Fuente: *Solar*. http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html. Consulta 15 de octubre 2014.

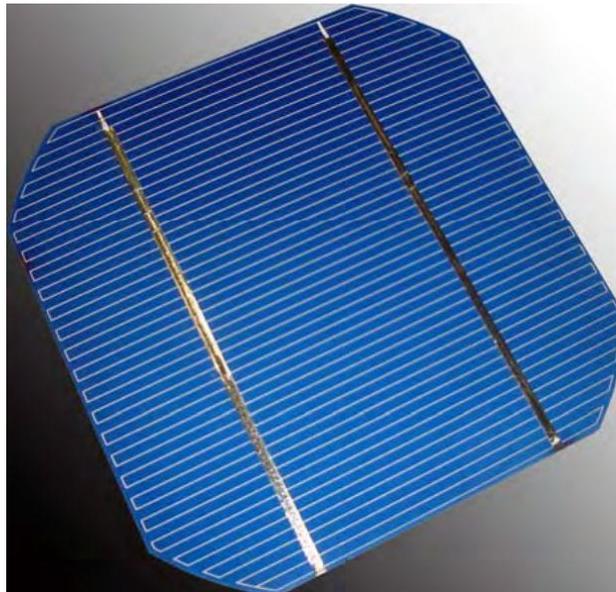
La cantidad de energía que entrega un dispositivo fotovoltaico está determinado por el tipo y el área del material, la intensidad de la luz del Sol y la longitud de onda de la luz del Sol.

Aunque el desarrollo de la eficiencia de las celdas fotovoltaicas continúa avanzando, actualmente las de silicio monocristalino no pueden convertir más del 25 % de la energía solar en electricidad, porque la radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético no tiene suficiente energía como para separar las cargas positivas y negativas en el material; las celdas solares de

silicio policristalino no llegan al 20 % y las de silicio amorfo tienen aun cerca del 10 %, esto debido a pérdidas mayores que las del silicio monocristalino.

Una típica célula fotovoltaica de silicio monocristalino de 100 cm² producirá cerca de 1,5 vatios de energía a 0,5 voltios de corriente continua y 3 amperios bajo la luz del Sol en pleno verano (radiación 1 000 W/m²). La energía de salida de la célula es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz del Sol. (por ejemplo, si la intensidad de la luz del Sol se divide por la mitad la energía de salida también será disminuida a la mitad).

Figura 7. **Celda solar típica**



Fuente: *Solares. energía como bienes comunes.org*. Consulta: 11 de octubre de 2014.

Una característica importante de las celdas fotovoltaicas es que el voltaje no depende de su tamaño y es bastante constante con el cambio de la intensidad de luz; la corriente sin embargo, es casi directamente proporcional a

la intensidad de la luz y al tamaño. Para la clasificación de celdas fotovoltaicas es importante determinar la densidad de corriente: I (amp)/Acelula (cm^2).

La potencia entregada por una célula solar se aumenta con bastante eficacia empleando un mecanismo de seguimiento, para mantener el dispositivo fotovoltaico directamente frente al Sol, o concentrando la luz del Sol usando lentes o espejos; sin embargo, hay límites a este proceso, debido a la complejidad de los mecanismos y de la necesidad de refrescar las celdas. La corriente producida en las células es relativamente estable a altas temperaturas, pero el voltaje se reduce, conduciendo a una caída de potencia a causa del aumento de la temperatura de la célula.

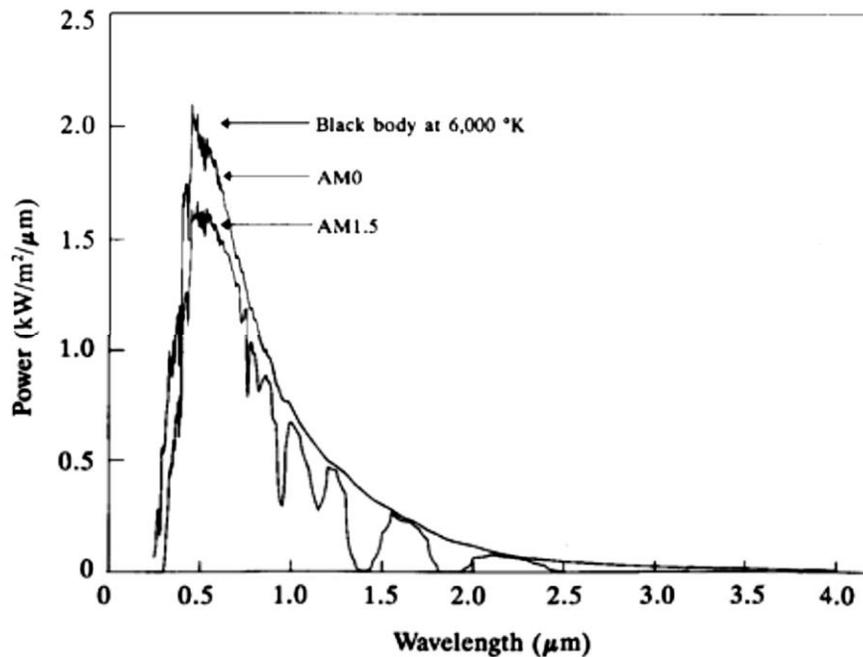
Otros materiales fotovoltaicos con potencial comercial son el diselenide de cobre e indio (CuInSe_2), telurio de cadmio (CdTe) y silicio amorfo.

1.3.2. Tipos de celdas solares

La evolución de la tecnología de las celdas solares ha experimentado importantes avances desde su invención y ha ido paralela a desarrollos y avances tecnológicos producidos en materiales y procesos. Los dispositivos fotovoltaicos de aplicación a la conversión de la energía solar deben construirse con materiales semiconductores sensibles a la radiación solar de forma que el efecto fotovoltaico se produzca de forma eficiente. Tal como lo muestra la figura 8, el 98 % de la energía solar extra-atmosférica se encuentra en la banda de $0,25 \mu\text{m} < \lambda < 3 \mu\text{m}$, que corresponde a una banda de energías de $4,96 \text{ eV} < E < 0,41 \text{ eV}$, y teniendo además en cuenta los factores de limitación el rendimiento, resulta que la banda de valores de E_g precisos para realizar celdas solares de rendimientos adecuados, se extiende desde 0,7 eV a 2,2 eV. Se hace mención a AM0 y AM 1,5 (*air mass*) que son el espectro de energía del espacio exterior y

dentro de la Tierra, en donde la radiación se reduce a 100 mW/cm^2 (1 kW/m^2), debido a que en la atmósfera se producen pérdidas por reflexión y refracción.

Figura 8. **Composición del espectro de radiación solar**



Fuente: PEREDA SOTO, Isidro Elvis. *Celdas fotovoltaicas en generación distribuida*. p. 98.

No solamente es preciso disponer de un semiconductor sensible a todas las longitudes de onda del espectro solar, sino que además debe ser posible fabricar en serie con él uniones o heterouniones fotovoltaicamente eficientes y a un costo moderado. Es claro que rendimiento y costo son los dos parámetros fundamentales del éxito de una tecnología. Dentro de este escenario, la tecnología fotovoltaica ha explorado diversas alternativas, decantando los esfuerzos hacia soluciones de bajo costo, normalmente asociadas a celdas solares de película delgada, o bien hacia soluciones de alto rendimiento,

normalmente asociadas a tecnologías próximas a la microelectrónica. Existen situaciones intermedias como es el caso de los sistemas de concentración, en donde el costo de la celda solar es elevado pero el del sistema completo puede resultar competitivo. Se describen a continuación los rasgos más destacados de algunos tipos de celdas solares:

- Silicio mono y multicristalino, donde se pone énfasis en los aspectos de mejora del rendimiento mediante el diseño de estructuras sofisticadas.
- Materiales de la familia de semiconductores III-V, enfatizando aleaciones ternarias para resolver el problema de recombinación superficial y como camino para el desarrollo de estructuras multiespectrales.
- Materiales de la familia de semiconductores II-VI como potencial alternativo de bajo costo y película delgada.
- Celdas solares de la familia del silicio amorfo con el énfasis en su integrabilidad en módulos.

Las celdas solares fotovoltaicas de silicio mono y multicristalino son actualmente las más producidas industrialmente, beneficiándose de la madurez alcanzada por la tecnología del silicio. El material semiconductor absorbe una parte importante del costo de la celda por lo que ha habido intensos esfuerzos por conseguir silicio multicristalino con el que se pudieran producir celdas solares de rendimientos suficientemente altos, prescindiendo de los procesos específicos a que es sometido para pasivar las zonas de alta recombinación y mejorar el tiempo de vida, el resto de las acciones emprendidas para mejorar el rendimiento son parecidas a las realizadas en el silicio monocristalino.

En la actualidad están en plena producción las celdas de silicio monocristalino, silicio policristalino moldeado en lingote, silicio en cinta, silicio amorfo (simple, doble y triple unión), película de silicio sobre sustrato de bajo

costo, silicio amorfo sobre una lámina de cristal y celdas monocristalinas para concentradores. Todos estos tipos de celdas están en líneas de producción que incluyen celdas de silicio en cinta sin fin, silicio EFG en cinta, telurio de cadmio, diselenuro de indio cobre y arseniuro de galio para concentradores.

En la siguiente tabla se representa el desarrollo comparativo de la eficiencia para diferentes tipos de materiales de células, desde finales de los 90 hasta el 2010.

Tabla I. Eficiencia porcentual de celdas solares de acuerdo a su tecnología

Tecnología de celda	1999	2000	2010
Silicio monocristalino	14-16	°	°
Silicio policristalino	13-15	°	°
Silicio en cinta	14	°	°
Silicio en concentrador	18	25	30
Silicio amorfo (incluyendo multicapas)	6-8	10	14
Diselenuro de indio y cobre	7-8	12	14
Teluro de cadmio	7-8	12	14
Peicula de silicio	8-10	12	15

Fuente: *Desarrollo mundial de la energía solar fotovoltaica*, <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Energia/Energia13/HTML/articulo06.htm>. Consulta: 11 de octubre de 2014.

2. ESTRUCTURA Y COMPONENTES DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA CONECTADO A RED (SGESFR)

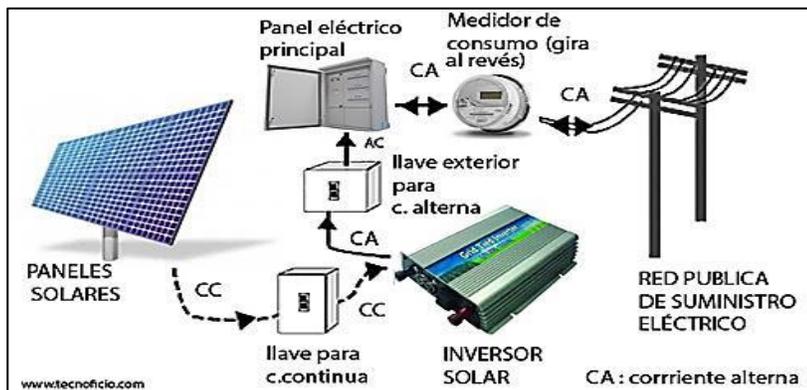
Un sistema de generación de energía solar fotovoltaica (SGESF) no es más que un conjunto de dispositivos fotovoltaicos, equipos y sistemas eléctricos y electrónicos para generar energía eléctrica controlada aprovechable.

Existen diferentes tipos de SGESF, a saber:

- Aislados
- Conectados a red
- Híbridos
- Panel directo

Para los efectos de este estudio se describirá a los sistemas de generación solar fotovoltaica conectados a red (SGESFR), en los que básicamente intervienen tres elementos: los paneles fotovoltaicos, el inversor y la línea eléctrica de la red.

Figura 9. **SGESFR**



Fuente: *Inversores de potencia para paneles solares*. http://www.tecnoficio.com/electricidad/inversores_de_potencia_1.php. Consulta: 11 de octubre de 2014.

En estos sistemas, el generador fotovoltaico se encuentra conectado a la red eléctrica convencional a través del inversor (con sus respectivas protecciones) inyectándole la energía producida.

Para el adecuado dimensionamiento de un sistema de generación de energía solar fotovoltaica es importante conocer a profundidad todos sus componentes, por lo que esta parte estará dedicada a describir cada uno de ellos, complementándolo con las protecciones del sistema, sus cableados de interconexión, su estructura de soporte y los contadores bidireccionales.

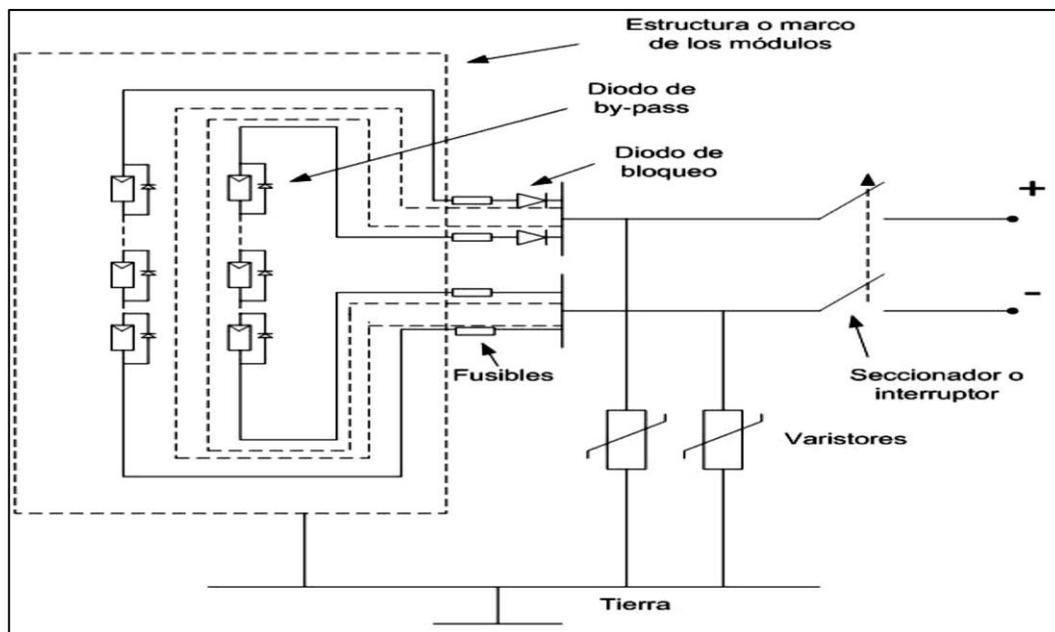
2.1. **Generador fotovoltaico (GF)**

El generador fotovoltaico (GF) está conformado por un conjunto de paneles solares fotovoltaicos, con arreglos en conexión en serie y en paralelo, acorde a los parámetros determinados por los componentes del SGESFR, especialmente el Inversor, y a la cantidad de energía que se quiere producir.

Las características del GF son similares a los de los paneles solares utilizados, la energía producida es en corriente continua (DC) y posteriormente es transformada a corriente alterna (AC) para inyectarla a la red.

Los paneles solares del GF deben de ir direccionados al Sol y pueden hacerlo en estructuras móviles (de seguidor solar total o parcial) o fijas (direccionadas al punto del Sol en los equinoccios); este último tiene la ventaja de ser muy sencillo. Debido a que el ángulo de elevación del Sol cambia durante el año, se debe tener un criterio de selección del ángulo óptimo del arreglo que garantice la máxima producción de energía eléctrica, lo cual será explicado y calculado más adelante.

Figura 10. **Estructura de un generador fotovoltaico en un SGEFR**



Fuente: *Principales elementos de la instalación*. http://opexenergy.com/fotovoltaica/componentes_fotovoltaicos.html#1. GENERADOR_FOTOVOLTAICO.

Consulta: 11 de octubre de 2014.

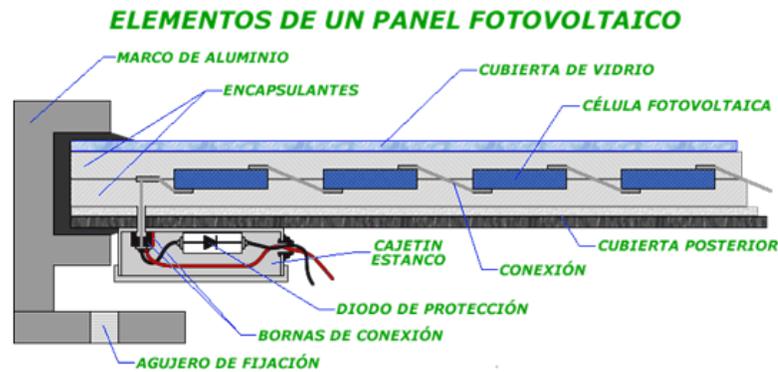
2.1.1. Paneles solares fotovoltaicos

Los paneles o módulos fotovoltaicos (llamados comúnmente paneles solares, aunque esta denominación abarca otros dispositivos), están formados por la interconexión de células solares encapsuladas entre materiales que las protegen de los efectos de la intemperie, son las encargadas de captar la energía procedente del Sol en forma de radiación solar y transformarla en energía eléctrica por el efecto fotovoltaico (energía solar fotovoltaica).

Para simplificar el manejo, los fabricantes de celdas solares las entregan eléctricamente conectadas y encapsuladas en lo que se conoce como módulo fotovoltaico, o paneles solares.

El módulo fotovoltaico debería proveer voltaje y corriente adecuada para la aplicación que se utilice y su encapsulamiento debe proteger a las celdas contra las hostilidades del medioambiente, aislándolas eléctricamente y de la humedad y además proporcionándoles resistencia térmica y mecánica; todo esto para que la vida útil de un módulo exceda los 20 años bajo condiciones normales.

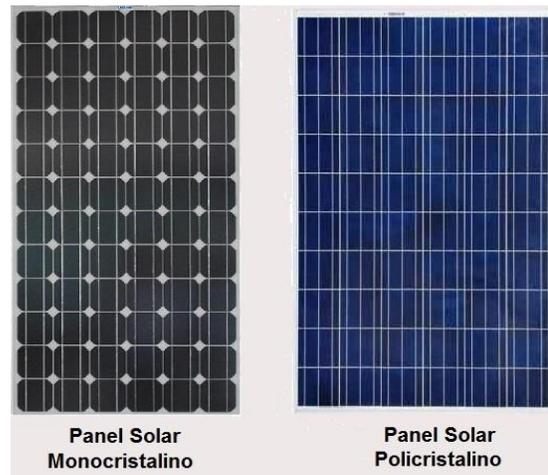
Figura 11. Elementos de un panel fotovoltaico



Fuente: *Panel fotovoltaico*. <http://inventhable.blogspot.com/2013/07/panel-solar-como-crear-uno.html>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

Debido al auge de las energías renovables en general, muchos tipos de módulos son comercializados, los más comunes tienen 30 o 36 celdas de silicio mono o policristalino y todas las celdas son del mismo tamaño, van conectadas en serie y encapsuladas entre hojas de vidrio (o posiblemente *tedlar* en la cara posterior, que es un polímero aislante de color blanco), normalmente disponen de dos terminales (uno positivo y otro negativo) y algunas veces un tercero, el terminal intermedio, que es para la conexión de diodos *bypass* (protección corriente inversa). Dependiendo del tamaño de las celdas y la potencia, el área de este tipo de módulos generalmente varía de 0,1, a 2,0 m² aproximadamente.

Figura 12. **Módulo de celdas solares de silicio monocristalino y multicristalino**



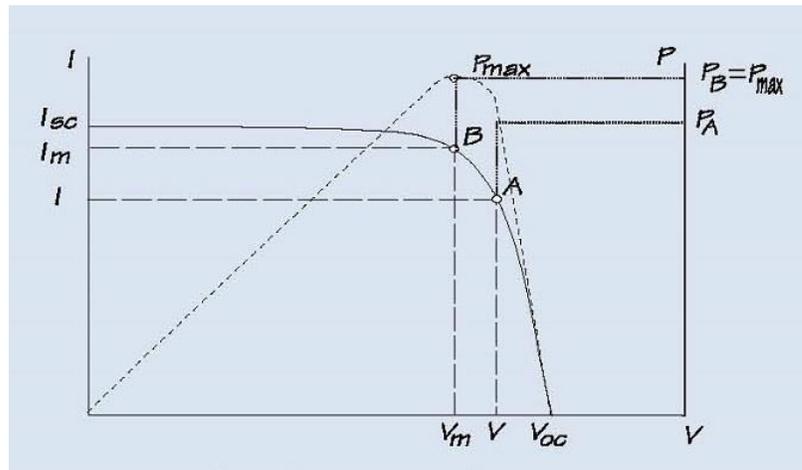
Fuente: *Instalación solar fotovoltaica para vivienda*. [http://ingemecanica.com/tutorial semanal /tutorialn192.html](http://ingemecanica.com/tutorial%20semanal/tutorialn192.html). Consulta: 7 de noviembre de 2014.

El comportamiento eléctrico (esto es, la curva I-V bajo ciertas condiciones de iluminación y temperatura), es extraída desde la información que el fabricante normalmente provee con el módulo y el parámetro estandarizado, para clasificar la potencia de los paneles solares fotovoltaicos se denomina potencia pico, y se corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

- Radiación de 1 000 W/m²
- Espectro: AM 1,5

Bajo estas condiciones, las siguientes cantidades son medibles: la potencia máxima P_{MAX} entregada por el módulo, la corriente de cortocircuito I_{SC} y el voltaje de circuito abierto V_{OC} .

Figura 13. **Curvas I-V y de potencia**



Fuente: *Instalación solar fotovoltaica para vivienda*. [http://ingemecanica.com/tutorial semanal /tutorialn192.html](http://ingemecanica.com/tutorial%20semanal/tutorialn192.html). Consulta: 7 de noviembre de 2014.

Por aparte, y con el cuidado de no provocar confusión, es importante agregar que la caracterización de las celdas es completada por la temperatura nominal de operación, NCOT, definida como la temperatura alcanzada por las celdas cuando el módulo está sometido a condiciones de operación diferentes a las indicados en el párrafo anterior, según lo siguiente:

- Irradianza: 80 mW/cm² (o 800 W/m²)
- Espectro: AM 1,5
- Temperatura normal de incidencia en la celda: 20 °C
- Velocidad del viento: 1 m/s

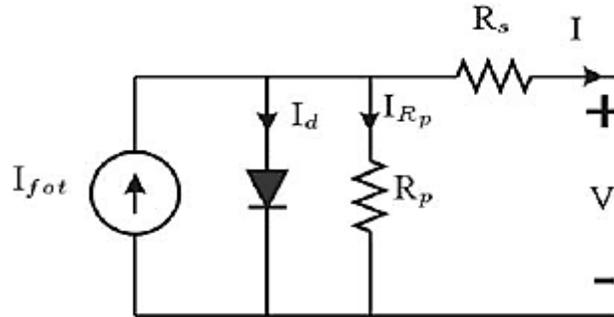
No es 100 % correcto suponer que todas las celdas y módulos que constituyen un GF trabajan bajo las mismas condiciones, ya que sus características están sujetas a diversas variaciones, a saber: i) (la variación natural de los parámetros esperados por los diversos procesos de fabricación y ii) las condiciones variantes de operación que ocurren dentro del GF (ejemplo: paneles más sucios que otros o ensombrecidos por nube u objetos).

Estas variaciones tienen los siguientes efectos: “a”, la máxima potencia que el generador puede entregar es más baja que la suma de las máximas potencias de salida de los módulos constituyentes, esta diferencia es llamada *mismatch losses* (pérdidas por mismatch) y se da cuando la impedancia de la carga es de valor incorrecto para máxima transferencia de potencia; y “b”, en ciertas circunstancias, algunas celdas pueden funcionar como cargas disipando la potencia producidas por otras. Esto conduce a una elevada temperatura que afecta a las celdas. Si la temperatura excede ciertos valores (entre 85 y 100 °C) los materiales del encapsulamiento son dañados irreparablemente haciendo que el módulo no sirva más. El término *hot spot* es usado para describir este fenómeno.

2.1.2. Modelo matemático del panel solar

La figura 14 se representa el circuito equivalente de una sola celda solar individual, donde I y V son respectivamente la corriente y el voltaje generados, R_p y R_s son las resistencias en paralelo y en serie de la celda e I_{fot} es la corriente producida por el efecto fotovoltaico.

Figura 14. **Modelo circuital de la celda solar**



Fuente: *Universidad Ciencia y Tecnología*. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S131648212011000300005&script=sci_arttext. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

Después de presentar el modelo circuital de la celda solar y para efectos de simplificación del modelo matemático del panel solar se sacrifica un poco la precisión del modelo, específicamente en los valores de las resistencias asociadas, considerando que R_p es muy grande y R_s es muy pequeña, para así poderlos despreciar del modelo eléctrico y simplificar la ecuación. La siguiente ecuación describe el panel solar:

$$I = n_p \cdot I_{fot} - n_p \cdot I_{rs} \cdot [e^{(q \cdot V / k \cdot T \cdot A \cdot n_s)} - 1] \quad (1)$$

$$I_{fot} = I_{fot}(T_1) + K_0 \cdot (T - T_1) \quad (2)$$

$$I_{fot}(T_1) = I_{CC}(T_{1,nom}) \cdot G / G_{(nom)} \quad (3)$$

$$K_0 = [I_{CC}(T_2) - I_{CC}(T_1)] / (T_2 - T_1) \quad (4)$$

Donde n_s y n_p son el número de celdas conectadas en serie y en paralelo respectivamente, $q = 1,602 \times 10^{-19}$ C es la carga eléctrica del electrón, $k = 1,3806 \times 10^{-23}$ JK⁻¹ es la constante de Boltzman, A es el factor de idealidad de la juntura p-n, usualmente entre 1 y 1,5, T es la temperatura del panel (°K), I_{fot} es la corriente fotovoltaica, I_{rs} es la corriente de saturación del diodo, T_1 es una temperatura de referencia, T_2 es una segunda temperatura de referencia y G es la irradiancia incidida sobre el panel e I_{CC} corresponde a la corriente de corto circuito del panel.

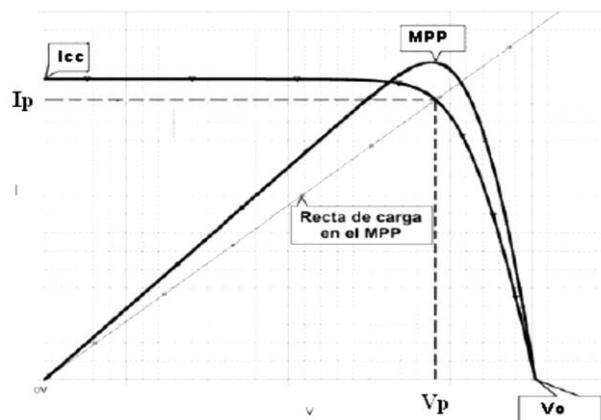
2.1.2.1. Parámetros eléctricos del panel solar

Los parámetros más importantes del panel solar fotovoltaico son:

- Intensidad de cortocircuito (ICC o ISC): se mide la corriente entre los bornes de un panel, cuando estos se cortocircuitan ($V=0$). La intensidad de cortocircuito de un módulo es igual a la de una de sus células multiplicada por el número de filas conectadas en paralelo. Es la máxima intensidad que se obtiene de un panel.
- Tensión nominal (VN): valor de la tensión a la cual trabaja el panel.
- Tensión a circuito abierto (VCA O VOC): máximo voltaje que se mediría entre los bornes del panel si se dejarán los terminales en circuito abierto ($I=0$), se mide conectando un voltímetro entre los bornes del módulo cuando no hay carga conectada entre sus extremos y corresponde a la de cada una de sus células por el número de células conectadas en serie.
- Intensidad de potencia máxima (IPmax): valor de la corriente que puede suministrar el panel cuando trabaja a máxima potencia.
- Tensión de potencia máxima (VPmax): valor de la tensión cuando la potencia es máxima y se suministra la máxima intensidad de corriente.

- Potencia máxima (PM): es el máximo valor obtenido al multiplicar la intensidad I_{Pmax} (intensidad cuando la potencia es máxima o corriente en el punto de máxima potencia) y V_{Pmax} (tensión cuando la potencia también es máxima o tensión en el punto de máxima potencia). También se le llama potencia de pico del módulo o panel (WP).
- Curva V-I: todo generador tiene una curva típica para la potencia de salida en función de la corriente de carga, y los paneles fotovoltaicos no son una excepción. La curva V- I de un panel FV proporciona, indirectamente, la relación mencionada, ya que asocia los valores de V e I para diferentes cargas. Solo se conecta una cierta carga eléctrica al panel, el punto de trabajo vendrá determinado por la corriente I y la tensión V existentes en el circuito. Estos habrán de ser menores que los ICC y VCA definidos anteriormente. La potencia (P) que el panel entrega la carga está determinada por $P = V \times I$. La potencia disponible en un panel fotovoltaico en un punto cualquiera de la curva se expresa en vatios.

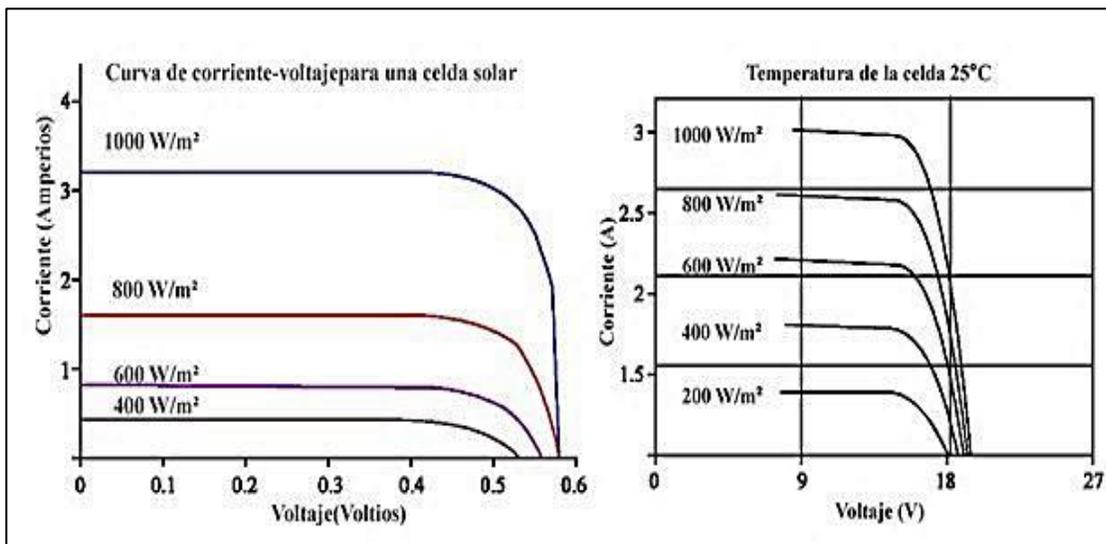
Figura 15. Curva característica I-V



Fuente: *Universidad Ciencia y Tecnología*. http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S131648212011000300005&script=sci_arttext. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

- Curva V-I en función de la irradiancia: el comportamiento eléctrico de un módulo varía además con la irradiancia solar, ya que la corriente proporcionada es directamente proporcional a la energía solar recibida. La intensidad aumenta con la radiación, permaneciendo el voltaje mas o menos constante, por lo tanto, habrá aumento de potencia.

Figura 16. **Curvas de corriente-voltaje para una celda y un panel fotovoltaicos**

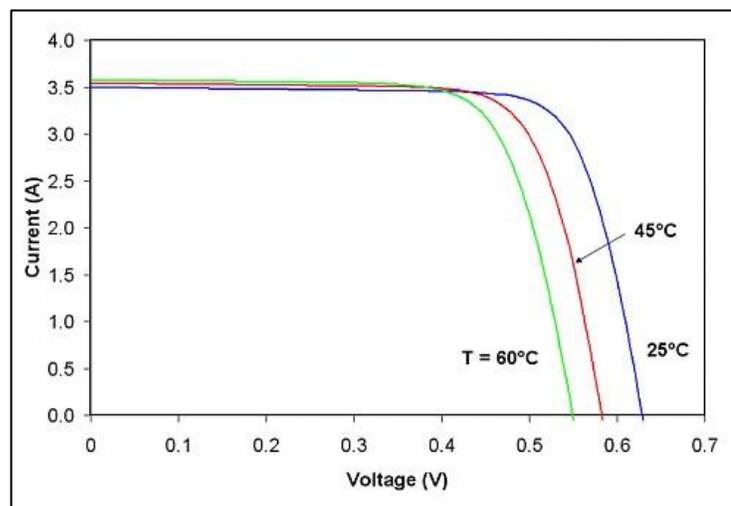


Fuente: *La energía solar fotovoltaica y sus aplicaciones*. <http://www.monografias.com/trabajos82/energia-solar-fotovoltaica-y-sus-aplicaciones/energia-solar-fotovoltaica-y-susaplicaciones2.shtml>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

- Curva V-I en función de la temperatura: la exposición al Sol de las células provoca su calentamiento a una temperatura mayor que la del ambiente, lo que conlleva cambios en la producción de electricidad; igual la tensión generada varía de forma inversamente proporcional a la temperatura de las células, sin que esto provoque cambios en la corriente

de salida ya que altas temperaturas en el módulo reducen de 0,04 a 0,1 voltios por cada grado centígrado que sube la temperatura. Por esta razón, los paneles no deberían ser instalados directamente sobre una superficie, sino que debe permitirse al aire circular por detrás de cada módulo para que su temperatura no suba y dejar un espacio de unos 10 cm para proporcionar ventilación adecuada.

Figura 17. **Curva corriente-voltaje de una celda solar en función de temperatura**



Fuente: *La temperatura degrada en un panel FV*. <http://eliseo-sebastian.com/efecto-negativo-de-la-temperatura-en-los-fotovoltaicos/>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

2.2. El inversor

El inversor fotovoltaico es el equipo electrónico que permite suministrar la potencia generada a la red comercial y su función principal es convertir la corriente continua (DC) producida por el generador fotovoltaico en corriente

alterna (AC), conforme a características de la red (ejemplo: 24 0V de valor eficaz de tensión y una frecuencia de 60 Hz).

El diseño de un inversor debe utilizar un rango muy amplio de tensión de entrada a partir del campo fotovoltaico, para proporcionar protección por los voltajes máximos generados, así como una gran flexibilidad de configuración e incluso facilitar posibles ampliaciones futuras.

El inversor debe entregar a la red eléctrica una corriente con una onda senoidal idéntica a la propia de la compañía eléctrica suministradora, y con un factor de potencia prácticamente igual a 1 en cualquier condición de funcionamiento del equipo.

Figura 18. **Inversor para SGESFR**



Fuente: *Inyección a red solar*. <http://www.broncosolarled.com/inyeccion-a-red-solar-2>.

Consulta: 7 de noviembre de 2014.

La tensión generada por el inversor es senoidal y se obtiene mediante la técnica de modulación de ancho de pulsos; un microcontrolador puede determinar el tipo de onda que se genera a partir de una tabla de valores disponibles en la memoria auxiliar del sistema. De esta forma se puede hacer trabajar a los transistores MOSFET de potencia a una frecuencia de conmutación de 20 kHz, con lo que se consigue una forma de onda senoidal de muy baja distorsión, menor del 1 % y con un contenido bajo de armónicos.

Puesto que la salida de los inversores está conectada a la red eléctrica, el sincronismo con esta es un aspecto fundamental en el funcionamiento del inversor. El control principal lo trata de forma prioritaria, realizando un seguimiento muy sensible a cualquier cambio en la red. Ello permite introducir las correcciones necesarias al menos cada 10 milisegundos. El control de la red se realiza mediante un circuito analógico, que permite ajustes del sistema, mediciones de tensión, corriente y factor de potencia.

Hoy en día, los sistemas de control de los inversores trabajan detectando continuamente el punto de máxima potencia (MPPT) de la característica tensión-corriente de los paneles fotovoltaicos, esto con la finalidad de conseguir el mejor rendimiento de la instalación.

Las partes fundamentales en un inversor son:

- Control principal: incluye todos los elementos de control general, los sistemas de generación de onda basados en sistemas de modulación de anchura de pulsos (PWM) y parte del sistema de protecciones.
- Etapa de potencia: esta etapa es única o modular en función de la potencia deseada. Se opta por la tecnología en baja frecuencia ya que

ofrece buenos resultados con una alta fiabilidad y bajo costo. Además, debe incorporar un filtro de salida (LC), para filtrar la onda y evitar el rizado en la tensión procedente de los módulos.

- Control de red: interfase entre la red y el control principal. Proporciona el correcto funcionamiento del sistema al sincronizar la formada onda generada a la de la red eléctrica, ajustando tensión, fase, sincronismo, entre otros.
- Seguidor del punto de máxima potencia (MPPT): es una de las funciones más importantes del inversor que adapta su entrada a los valores de potencia variables que produce el generador, para obtener en todo momento la mayor cantidad de energía disponible, la máxima potencia.
- Protecciones: de manera general, los inversores deben estar protegidos ante tensión de red fuera de márgenes, frecuencia de red fuera de márgenes, temperatura de trabajo elevada, tensión baja del generador, intensidad del generador fotovoltaico insuficiente, fallo de la red eléctrica y transformador de aislamiento, además de las protecciones pertinentes contra daños a personas y compatibilidad electromagnética.
- Monitorización de datos: el inversor dispone de microprocesadores que facilitan una gran cantidad de datos tanto de los parámetros habituales (tensión, corriente, frecuencia, entre otros) como de los externos (radiación, temperatura ambiente, entre otros) e internos (p. e. temperaturas de trabajo).

Debido al elevado costo de las instalaciones solares fotovoltaicas, durante la explotación los inversores deben ofrecer un alto rendimiento y fiabilidad y ya

que dicho rendimiento depende de la variación de la potencia de la instalación, se debe procurar trabajar con potencias cercanas o iguales a la nominal, puesto que si la potencia procedente de los paneles fotovoltaicos a la entrada del inversor varía, el rendimiento disminuye.

2.2.1.1. Parametros del inversor

Los principales parámetros habituales a tener en cuenta en un inversor son:

- Tensión nominal (V): tensión que debe aplicarse en bornes de entrada del inversor.
- Potencia nominal (VA): potencia que suministra el inversor de forma continuada.
- Potencia activa (W): potencia real que suministra el inversor teniendo en cuenta el desfase entre tensión y corriente.
- Capacidad de sobrecarga: capacidad del inversor para suministrar una potencia superior a la nominal y tiempo que puede mantenerla.
- Factor de potencia: cociente entre potencia activa y potencia aparente a la salida del inversor. En el caso ideal, donde no se producen pérdidas por corriente reactiva, su valor máximo es 1, es decir, estas condiciones son inmejorables para el suministro de corriente del inversor.
- Eficiencia o rendimiento: relación entre las potencias de salida y entrada del inversor.

- Autoconsumo: es la potencia, en tanto por ciento, consumida por el inversor comparada con la potencia nominal de salida.
- Armónicos: un armónico ideal es una frecuencia de onda múltiplo de la frecuencia fundamental. Tener en cuenta que, solo a frecuencia fundamental, se produce potencia activa.
- Distorsión armónica: la distorsión armónica total o THD (Total Harmonic Distortion) es el parámetro que indica el porcentaje de contenido armónico de la onda de tensión de salida del inversor.
- Rizado de corriente: pequeña variación que se produce sobre el valor de la onda de corriente alterna al rectificarse o invertir una señal de CC a CA.

2.3. Red

La llamada red o red eléctrica se refiere a la red interconectada en un SGESFR que tiene el propósito de suministrar energía eléctrica desde los proveedores hasta los consumidores. Consiste de tres componentes principales, a saber:

- Las plantas generadoras que producen electricidad.
- Las líneas de transmisión que llevan la electricidad de las plantas generadoras a los centros de demanda.
- Los transformadores que reducen el voltaje para que las líneas de distribución puedan entregarle energía al consumidor final.

La red eléctrica une todos los centros generadores de energía eléctrica con los puntos de consumo, consiguiendo un equilibrio entre la cantidad de energía consumida y la producida por las centrales eléctricas. La red de transporte de energía eléctrica está formada por los elementos que llevan la electricidad desde los centros de generación hasta los puntos de consumo.

Un SGESFR interactúa con la red eléctrica, suministrando energía para autoconsumo, inyectando energía a la red o simplemente no haciendo ninguna de ellas, dependiendo de la demanda de energía que se tenga en el lugar instalado y de la generación de energía con la radiación solar presente, en cada momento; pero en todo caso, y por aspectos de diseño, necesita que el voltaje de la red este presente para poder funcionar.

2.3.1.1. Cableados

Los cableados son los conductores eléctricos del SGESFR que deben transportar la energía en forma segura, interconectando los equipos y dispositivos desde el generador fotovoltaico (GF) hasta la red, por medio de corriente eléctrica tanto en CC como en CA y que requieren un correcto dimensionamiento para lograr la reducción máxima de las pérdidas de energía en el sistema.

Se recomienda sujetarse a las normas establecidas por el Código Eléctrico Nacional de Estados Unidos (NEC) y poner especial cuidado en la parte de CC.

Hasta hace relativamente poco y debido a la falta de normalización al respecto, se utilizaba para la parte de CC de los SGESF, es decir para el cableado y conexionado entre los paneles y de estos al inversor, los cables

eléctricos del tipo RV-K, muy comunes en cualquier otra instalación eléctrica, pero que para los usos en instalaciones fotovoltaicas ofrecen características limitadas. En efecto, el polietileno reticulado de la cubierta de los cables tipo RV-K es un material adecuado para aislamientos de cables eléctricos convencionales, pero para aplicaciones más especializadas, como el caso de las instalaciones fotovoltaicas, existen actualmente ya otros materiales también reticulados pero con características muy mejoradas, idóneos para estas aplicaciones. Razón por la que para el uso específico en SGESF, se recomienda emplear cables específicamente diseñados para aplicaciones fotovoltaicas del tipo *PV (ZZ-F* u otros).

Figura 19. **Cable tipo PV (ZZ-F)**



Fuente: *Tipos de Cableados*. http://www.ascable-recael.com/esp/productos/01_30.html. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

Los cables PV (ZZ-F) son unipolares con doble aislamiento, que tienen capacidad para transportar CC con hasta 1,800 V de manera eficiente y con gran durabilidad en el tiempo; ofrecen gran resistencia térmica, además de una gran resistencia climática (rayos UV, amplios márgenes de temperatura, humedad) y también un excelente comportamiento y resistencia al fuego, aspectos que se comprueban mediante ensayos específicos de resistencia a la intemperie y a incendios.

Para ello, los materiales empleados para el aislamiento y la cubierta de este tipo de cables son de alta calidad, reticulados, de alta resistencia mecánica, resistentes también a la abrasión, flexibles y libres de halógeno. Su presentación viene en varios colores para facilitar su identificación, posición y aplicación.

El dimensionamiento del cableado implica que hay que tener en cuenta tres criterios determinantes: a) la tensión no disruptiva, b) la intensidad de corriente máxima admisible y c) la limitación de las caídas de tensión a través de los cables de forma que las pérdidas se minimicen.

La mayoría de los cables tipo PV soportan tensiones de valores de hasta 1 000 V, incluso de voltaje mayor, valores que generalmente no superan los sistemas fotovoltaicos; adicionalmente, estos cables están preparados para ser instalados a la intemperie, de forma que esto no debe representar un problema, sin descuidar por su puesto las conexiones, empalmes y desviaciones. Por consiguiente, el dimensionamiento de los cables implica principalmente que hay que tener en cuenta los criterios b) y c) de forma que los más restrictivos marcan la sección transversal del cable que se va a seleccionar.

La corriente máxima que puede pasar a través de los cables depende principalmente de la sección transversal de los mismos y además, de la temperatura ambiente, su disposición, entre otros. Los valores de las corrientes máximas frente a sección transversal pueden consultarse en las normas correspondientes.

Como actualmente los paneles solares generalmente ya traen de fábrica un sector de cable tipo PV con su correspondiente conector (o terminal) para poderse interconectar entre ellos y formar así las cadenas fotovoltaicas (CF)

deseadas, entonces es recomendable maximizar su utilización para este fin y reducir en la medida de lo posible la necesidad de utilizar extensiones, las cuales deben de construirse con el mismo tipo y calidad de conectores (terminales) originales o equivalentes del panel; estos mismos sectores de cables se utilizan para su conexión a las cajas de conexiones o inversores, según aplique.

Los SGESEF, como toda instalación que queda permanente al aire libre, deben estar diseñados para resistir las duras inclemencias meteorológicas (temperaturas extremas, radiación solar ultravioleta, humedad, resistencia a los impactos) que condicionan la calidad de los materiales empleados.

A continuación, se presentan algunas recomendaciones básicas adicionales para la instalación del cableado:

- Los positivos y negativos de cada grupo de módulos se conducirán separados y protegidos de acuerdo a la normativa para conductores eléctricos de las Normas NEC.
- Los conductores deben ser de cobre y diámetro adecuado para evitar caídas de tensión y calentamientos; así también, para cualquier condición de trabajo, los conductores de la parte CC deberán tener una caída de tensión menor del 1,5 % y los de la parte CA una caída de tensión menor del 2 %, tomando como referencia en ambos casos las tensiones correspondientes a las cajas de conexiones.
- Los conductores deberán tener la longitud necesaria para evitar esfuerzos mecánicos en los diversos elementos, respetando el doblado permitido de acuerdo a los radios de curvatura, ni posibilidad de

alteraciones por viento o lluvia, ni enganche por el tránsito normal de personas.

- Todo el cableado de CC será de tipo PV, es decir de doble aislamiento y adecuado ya sea para su uso en intemperie, al aire o enterrado. Cuando sea en intemperie los cables que estén al exterior se instalarán bajo tubo o perfil metálico, sujetos con bridas adecuadas, y los interiores en canaleta.
- Se deberá prestar atención al sistema de paso de los cables por muros y techos, con objeto de anular filtraciones de agua al interior.
- Los empalmes se realizarán con accesorios especializados para tal efecto, siempre acordes al tipo de cable utilizado.

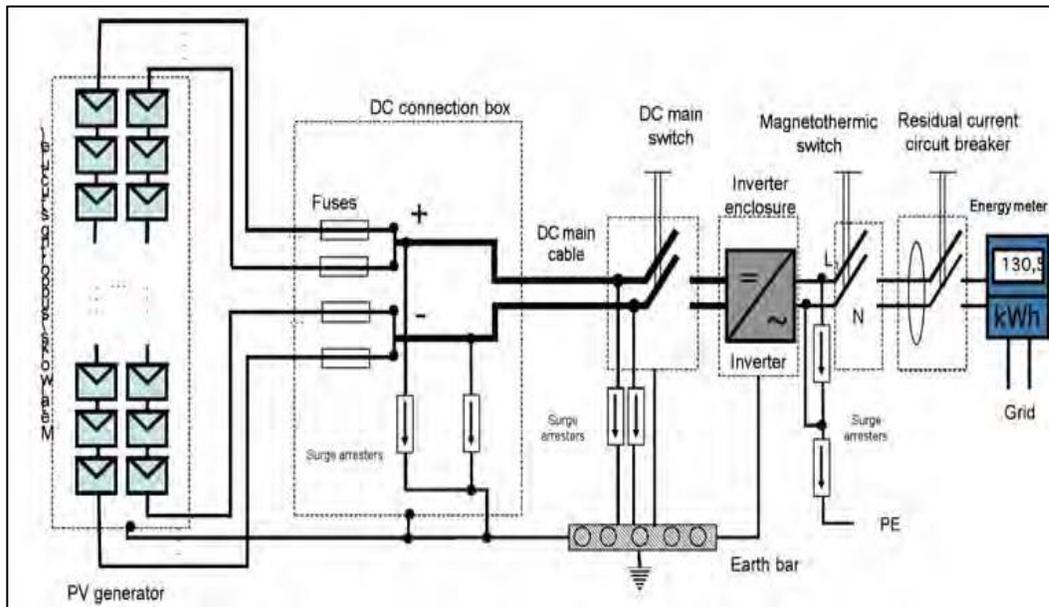
Para el cableado de AC se realizarán las instalaciones convencionales y se respetarán siempre las normas NEMA Y NEC.

2.4. Protección eléctrica para SGESFR

Los SGESFR, como cualquier instalación eléctrica, deben incorporar dispositivos y sistemas de protección acordes para que su funcionamiento se realice con un alto nivel de seguridad, tanto para las personas como para los bienes, previniendo que sus parámetros no excedan las condiciones previstas.

El objetivo de las protecciones es actuar sobre el sistema en caso de que se produzcan situaciones anormales de funcionamiento, ya sea reduciendo, deteniendo o eliminando dichas situaciones; su función es la de reaccionar de la forma más adecuada ante la ocurrencia de un defecto o fallo.

Figura 20. Plano detallado de las propiedades básicas de un SGESFR



Fuente: DEL VALLE, ENRIQUE. *Manual de diseño sistema fotovoltaico en España*. p. 85.

Ante los distintos tipos de defectos que se producen en cualquier elemento del sistema eléctrico y los diferentes niveles de tensión a los que puede encontrarse la instalación, se precisarán elementos y sistemas de protección diseñados específicamente para responder ante un tipo de falta.

Entre las protecciones a tomar en cuenta, incluyendo las etapas de DC y AC, se puede mencionar las protecciones contra sobrecargas y cortocircuito, la protección contra contactos directos e indirectos, la protección contra sobretensiones, protección contra fallas de frecuencia, protección contra fallas de aislamientos, entre otros.

Dado que en gran parte de las ocasiones un defecto supone un aumento brusco de corriente, los cortocircuitos son los defectos que más elementos de

protección tienen diseñados para detectarlos y eliminarlos en el tiempo más breve posible y con la mínima incidencia sobre las partes sanas del sistema, pero una situación anómala también puede producirse por variación de tensión o frecuencia, inversión del flujo de potencia, sobrecalentamiento, entre otros. El empleo de los elementos de protección queda justificado al intentar minimizar o evitar las pérdidas de servicio y los daños en personas y equipos que se producirían si ante una falta no se aísla el elemento o parte de la red en que se produce en un tiempo adecuado.

Para eliminar un cortocircuito se precisan elementos de corte de sobre intensidad como fusibles o interruptores automáticos (IA), aunque también es habitual incorporar sensores en los interruptores automáticos, dando lugar a lo que se conoce como pequeño interruptor automático (PIA) o magneto térmico que disparan por sobrecarga (elemento térmico) o por cortocircuito (elemento magnético).

Hoy en día una buena parte de las protecciones mencionadas vienen ya integradas en los inversores, razón por la que resumiremos en solo tres áreas el bloque siguiente.

2.4.1. Protección de voltajes, protección de corrientes y protección contra descargas electroatmosféricas en etapas de AC/DC

Los dispositivos de protección a instalar deberán realizar las siguientes labores de protección eléctrica:

- Protección contra sobrecargas: una sobrecarga se da cuando existe un valor excesivo de intensidad ocasionado por un defecto de aislamiento,

una avería o una demanda excesiva de carga, generando calentamiento excesivo de los cables, lo que puede provocar su daño prematuro, reduciendo su vida útil. Además, una sobrecarga que se prolongue en el tiempo y no sea solucionada, puede terminar ocasionando un cortocircuito en la instalación. Los dispositivos de protección contra sobrecargas puede ser un interruptor automático de corte omnipolar con curva térmica de corte o un fusible.

- Protección contra cortocircuitos: el origen para que se produzca un cortocircuito suele estar en una conexión incorrecta o en un defecto de aislamiento. En todo caso, para que la protección contra cortocircuitos sea eficaz, se debe cumplir que el tiempo de corte de toda corriente de cortocircuito que se produzca en un punto cualquiera de la instalación, no debe ser superior al tiempo que los conductores tardan en alcanzar su temperatura límite admisible.
- Protección contra sobretensiones: generalmente una sobretensión en una instalación fotovoltaica para autoconsumo, tiene su origen en descargas atmosféricas (rayos) que se realizan sobre las partes altas de la estructura metálica que soporta los paneles.

La protección contra estos fenómenos se realiza con unos dispositivos llamados autoválvulas o pararrayos. Realmente son varistores que funcionan como descargadores de corriente que ofrecen una resistencia de tipo inversa, fabricadas con óxido de zinc (ZnO) o carburo de silicio (SiC), cuyo valor disminuye al aumentar la tensión que se aplica sobre ella. Estos dispositivos deberán colocarse lo más cerca posible del equipo a proteger, para que pueda derivar a tierra el exceso de tensión originado por la descarga de un rayo, de

manera que absorba las sobretensiones que se puedan producir en la instalación y evitando así la perforación de los aislamientos.

Los fabricantes de inversores disponen de los certificados necesarios para que las compañías distribuidoras de energía que suministran la red, acepten que una buena parte de las protecciones eléctricas estén incorporadas de inversores, sin necesidad de añadir protecciones adicionales, incluyendo generalmente las siguientes:

- Aislamiento galvánico entre las partes DC y AC.
- Polarizaciones inversas.
- Cortocircuitos y sobrecargas a la salida AC.
- Fallos de aislamiento.
- Anti-isla con desconexión automática.
- Seccionador DC.
- Fusibles DC.
- Seccionador magnetotérmico AC.
- Descargadores de sobretensiones DC y AC tipo 2.
- Protección de máxima y mínima frecuencia (51 y 49 Hz respectivamente) y de máxima y mínima tensión (1,1 y 0,85 Vm).
- Protección contra sobretemperaturas.
- Controlador de aislamiento de la parte de DC.

2.4.1.1. Puesta a tierra de un SGESFR

Un aspecto fundamental en las protecciones de un SGESFR es la puesta a tierra, que se establece con el objetivo de limitar la tensión que con respecto a tierra representan en un momento las masas metálicas, así también, asegurar

la actuación de las protecciones y eliminar o disminuir el riesgo que supone una avería en el material utilizado.

La puesta a tierra de las instalaciones fotovoltaicas interconectadas, se hará siempre de forma que no se alteren las condiciones de puesta a tierra de la red de la empresa distribuidora, asegurando que no se produzcan transferencias de defectos a la red de distribución. Esto se logra conectando las masas de la instalación fotovoltaica a una tierra independiente de la del neutro de la empresa distribuidora, así como de las masas del resto del suministro.

Esto quiere decir que todas las masas de la instalación fotovoltaica, tanto de la sección continua como de la alterna, estarán conectados a una única tierra y esta tierra será independiente de la del neutro de la empresa distribuidora, de acuerdo con el Reglamento de baja tensión.

2.5. Estructura de soporte

Como su propio nombre lo indica, la función principal de la estructura de soporte (ES) es la de servir de soporte y fijación segura a los paneles fotovoltaicos del SGESF, proporcionándoles a la vez la inclinación y orientación óptimas, bajo las condiciones de instalación, con el objetivo de maximizar el aprovechamiento de la radiación solar, aumentando la eficiencia del sistema y consecuentemente la generación de energía eléctrica.

Figura 21. **Estructura de soporte**



Fuente: *Seguidor solar*. <http://www.solostocks.com/venta-productos/maquinaria-construccion/otra-maquinaria-construccion/seguidor-solar-toro-1902694>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

Para los SGESF en general existen básicamente dos tipos de estructura de soporte, las móviles y las fijas; las móviles pueden ser motorizadas (con seguimiento solar), mecánicas o manualmente móviles con posiciones prefijadas (por ángulos de radiación, itinerarios, condiciones atmosféricas, estaciones climatológicas, equinoccios, entre otros) y las fijas que quedan orientadas e inclinadas solamente con ángulos permanentes, donde se considera se logrará el mejor aprovechamiento de la radiación solar. Ambos tipos deben tener estructuras con un grado de inclinación tal, que provoque que la mayor parte de la radiación disponible y aprovechable en el emplazamiento llegue perpendicularmente a los paneles solares, y aunque para las fijas esta condición es prácticamente imposible, se logra un máximo de eficiencia

permisible si la inclinación es calculada con un ángulo promedio del sendero solar, es decir conforme a la posición que el Sol presenta en los equinoccios.

Figura 22. **Arena Corinthians, San Pablo, Brasil**



Fuente: *Información, opinión y cultura al servicio de la construcción*. <http://www.mandua.com.py/3-2-1-0-se-larga-la-fiesta-del-futbol-n29>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

Para las estructuras de soporte móviles y fijas existe una gran variedad de opciones, adecuadas tanto a las condiciones del lugar donde se instalarán los paneles como a los presupuestos disponibles. En algunos casos vale la pena considerar la opción de invertir un poco más en paneles solares, ya que podría ser más conveniente que adquirir un sistema motorizado con seguimiento de sendero solar debido a que resultan ser bastante onerosos.

Ahora bien, para los SGESFR generalmente se dispone de un área limitada, razón por la que la tendencia es a ser instalados sobre los techos (planos o inclinados), como parte de fachadas o incluso integrándolos como

techos para áreas aprovechables bajo los paneles solares; para estos casos, se construye y desarrolla estructuras de soporte especiales. La integración al edificio se ha convertido en un aspecto importante de los sistemas solares conectados a la red, lo cual es una herramienta útil para mejorar la arquitectura, demostrando que tienen otras funciones además de generación de energía e incluso para reducción de costos.

Figura 23. **Panel solar fotovoltaico BIPV / integrado en edificio - MEGASLATE® 170 W**



Fuente: *Panel solar fotovoltaico monocristalinas, integrados en edificios.* <http://www.archiexpo.es/prod/3s-swiss-solar-systems/panel-solar-fotovoltaico-bipv-integrado-edificio-62594172569.html>. Consulta: 7 de noviembre de 2014.

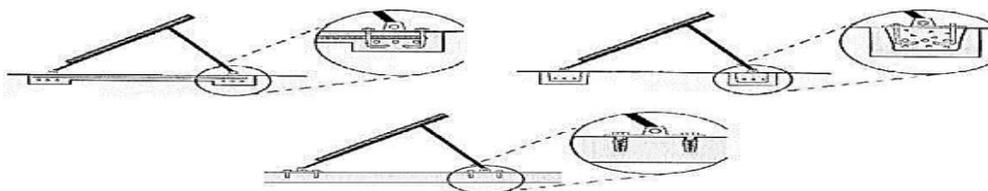
Existe una amplia variedad de estructuras de soporte disponibles, desde aquellas que se montan sin requerir personal especializado hasta estructuras hechas a la medida, para sistemas solares más grandes. Las estructuras móviles son más que todo utilizadas en las llamadas huertas solares donde los paneles se orientan en torno a la posición del Sol.

El diseño de la estructura de soporte debe asegurar el cumplimiento de su función, al menos durante el tiempo de vida estimado del SGESFR, asegurando resistencia y robustez para aspectos mecánicos, ambientales y climáticos, además de considerar la orientación e inclinación, evitar autosombras, facilitar su montaje, desmontaje, ventilación, actividades de mantenimiento y limpieza del GF. Este diseño también es determinado por las condiciones propiamente del área donde se montará, la latitud del emplazamiento, sombras, seguridad, entre otros.

Todos estos aspectos de diseño implican características o requisitos que se deben de cumplir para la construcción de la estructura de soporte, algunos de los cuales se listan a continuación:

- Robustez y anclaje para resistir cargas y esfuerzos extremos producidos por el viento, nevadas, arena volcánica y cualquier otro según datos meteorológicos del emplazamiento.
- La superficie que sirve de anclaje debe resistir el brazo de palanca que ejercerán los paneles o se debe preparar para ello.

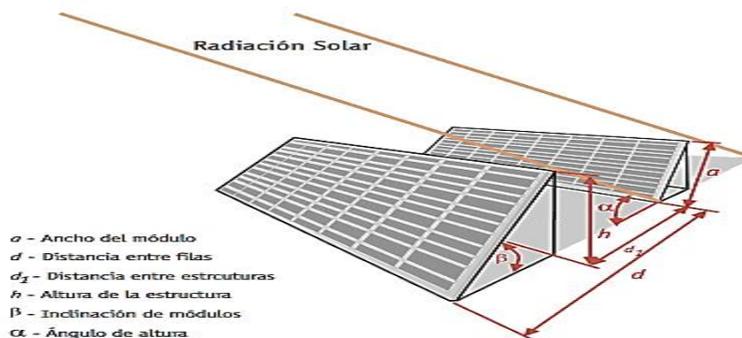
Figura 24. **Instalación de soporte de sistema fotovoltaico**



Fuente: *Energía solar*. <http://antusol.webcindario.com/instalacion.html>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

- Previsión de las inevitables dilataciones térmicas, conforme datos del fabricante, sin transmitir cargas que puedan afectar la integridad de los paneles.
- Cálculo adecuado de separación entre filas del conjunto de la ES con los paneles solares para evitar pérdidas por sombras.

Figura 25. **Estructura de soporte para radiación solar**



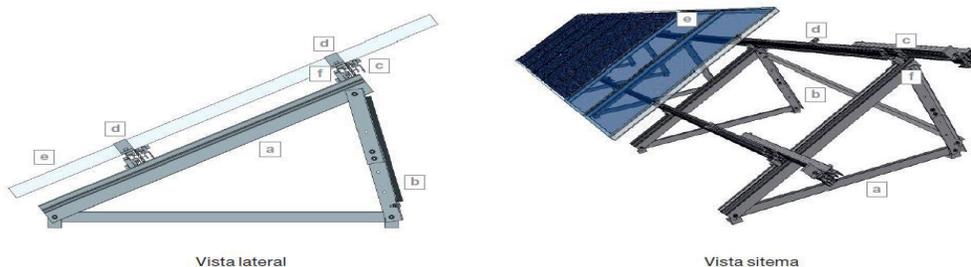
Fuente: *Repotenciación fotovoltaica*. <http://www.tentusol.es/repotenciacion/topografia.php>.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

- Componentes de instalación preensamblados (tipo Quickstone) para facilitar rápido montaje y desmontaje propio y del GF.
- Los puntos de sujeción para el módulo fotovoltaico serán suficientes en número, teniendo en cuenta el área de apoyo y posición relativa, de forma que no se produzcan flexiones en los módulos superiores a las permitidas por el fabricante.
- La estructura soporte es de aluminio, acero inoxidable y acero galvanizado en caliente, ofreciendo protección ante golpes y abrasión por agentes en el emplazamiento.

- La estructura se protegerá superficialmente contra la acción de los agentes ambientales.
- La realización de taladros en la ES se llevará a cabo antes de proceder, en su caso, al galvanizado o protección de la estructura.
- La tornillería utilizada deberá ser de acero inoxidable o bien al ser una estructura de acero galvanizado, los tornillos utilizados para la unión de elementos del soporte también podrán ser del mismo material, con excepción de los tornillos utilizados para la unión entre los paneles solares y la estructura que deberán ser obligatoriamente de acero inoxidable.
- El material debe ser resistente a la corrosión (eje: acero galvanizado y aluminio anodizado).
- La ES estarán formadas de carriles con perfiles garra macho donde se fijaran los paneles con perfiles garra hembra a la ES.

Figura 26. **Orientación e inclinación de estructura de soporte**



Fuente: *Repotenciación fotovoltaica*. <http://www.tentusol.es/repotenciacion/topografia.php>.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

- Todo el soporte deberá estar conectado a una tierra común que cumpla con la regulación de bajos voltajes.

- Por último es muy sencillo mandar a fabricar las estructuras para superficies planas y a un costo considerablemente adecuado.

Figura 27. **Montaje de estructura de soporte con módulos**



Fuente *Repotenciación fotovoltaica*. <http://www.tentusol.es/repotenciacion/topografia.php>.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

2.6. Contadores bidireccionales

En los SGESFR toda o parte de su producción de energía eléctrica se vierte a la red y, cuando son utilizados para autoconsumo, están diseñados para reducir la cantidad de la electricidad provista por la empresa eléctrica distribuidora por medio de la red, razón por la que es muy importante disponer de un contador que realice una medición completa de todo lo que está sucediendo en cuanto al origen de la energía consumida.

En este proceso se pueden presentar tres situaciones:

- Sin consumo de la red: para el contador, es como si no se consumiera electricidad en caso de ser igual la energía consumida instantánea que la generada por el SGESFR.

- Consumo (importación): por el contador se registrará la energía que se necesite y que el SGESFR no proporcione, ya sea por falta de potencia o porque estamos en horas sin Sol.
- Inyección a red (exportación de excedentes): no se está consumiendo toda o parte de la electricidad generada por el SGESFR y se inyecta esa energía a la red, pasando por el contador.

En todo este proceso el realizar la medición adecuada es una parte fundamental ya que uno de sus alcances, es determinar la energía que se está en capacidad de verter a la red (energía excedente) y esta operación sería virtualmente imposible sin un medidor de energía (contador) adecuado para este tipo de sistemas.

Básicamente hay dos formas de realizar la medición en el sistema propuesto, la primera es utilizando dos contadores convencionales, uno para la compra (entrada) y otro para la venta de energía (salida), esto quiere decir que la facturación de la energía vendida y la comprada se realizan separadamente; la otra forma es utilizando un medidor bidireccional que tiene la capacidad de medir en ambos sentidos, por lo que contabilizará la energía comprada (entrada) como la recibida (salida), esto quiere decir que la facturación de la energía será la diferencia entre la energía de compra y la de venta.

La forma de facturación se establecerá entre las partes interesadas mediante un contrato, en el cual, se establecerá claramente la forma de retribución, incluyendo cualquier subsidio o cargo por uso red.

Además, existe la opción de colocar otro medidor de energía a la salida del inversor con la función de contabilizar la producción total de energía y

determinar que porcentaje de la misma es vertida a la red y que porcentaje es utilizado en el inmueble, aunque esta medición hoy en día la mayoría de los inversores ya lo incluyen como parte del manejo de datos de su sistema de control.

La empresa eléctrica distribuidora de energía es la que norma la ubicación y manejo del contador, seguramente precintándolo por aspectos de seguridad, y estará obligada a explicar claramente las condiciones contractuales del servicio que presta.

También existen contadores bidireccionales digitales especialmente diseñados para SGESF que disponen de otras características funcionales muy útiles para la medición e incluso para la gestión del manejo de la inyección de la energía a la red.

3. ESCENARIO ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN GUATEMALA

En los años 70 se generalizaron los avisos sobre el peligro inminente del cambio climático, iniciándose la conciencia sobre la necesidad de una acción global, luego se iniciaron los acuerdos entre las naciones, se crearon comisiones sobre medio ambiente y conferencias mundiales, no solo para sensibilizar a los gobiernos sino para informarlos sobre la importancia de adoptar medidas conjuntas en pro de la sostenibilidad del planeta, mitigando los efectos del cambio climático; y entre estos acuerdos se pueda mencionar La Convención Climática de Estocolmo del 1972, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por la sigla en inglés de Intergovernmental Panel on Climate Change) creado en 1987, la Convención de Ginebra de 1990, la de Rio de Janeiro de 1992 y la de Toronto de 1998. Todos estos foros internacionales fueron los precursores del llamado Tratado Internacional de Kioto, adoptado en 1997.

Todo estos foros y tratados se han realizado con el objetivo de limitar el alza de la temperatura mundial a +2 °C respecto a la era preindustrial, ya que en caso contrario al actual ritmo, el mundo se acerca a un aumento de 4 a 5 grados a fines de siglo; esto si no se toman medidas drásticas para reducir las emisiones de gas de efecto invernadero, provocadas en gran parte por el uso masivo de energías fósiles, previéndose entonces un desarreglo climático de graves consecuencias en los ecosistemas, las sociedades y las economías, en particular en las regiones más pobres, incluyéndose por supuesto Guatemala.

Estos acuerdos y foros internacionales también han provocado que el desarrollo tecnológico y comercial de los sistemas de generación de energía, utilizando fuentes renovables haya llevado un curso progresista, estimulando una aceleración en su implementación, especialmente en lo referente a los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica en países como Alemania, China y posteriormente también en el resto de países, incluyendo a Guatemala

Guatemala ha venido transformando su matriz de producción energética, disminuyendo poco a poco su dependencia del petróleo y aumentando la implementación de energías renovables, con un auge especial de la energía solar fotovoltaica debido no solo a su desarrollo tecnológico sino que a la reducción de costos de sus componentes, aunado al apoyo que el gobierno ha proporcionado a la implementación de todo tipo de sistemas de generación de energía de fuentes renovables, a través del Ministerio de Energía y Minas y la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), incluyendo la adaptación de la prestación tipos de servicios por parte de las empresas distribuidoras de energía eléctrica en Guatemala.

3.1. Protocolo de Kioto

El Protocolo de Kioto sobre el cambio climático es parte del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), suscrita en 1992, dentro de lo que se conoció como la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, siendo un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), además de tres gases industriales fluorados: hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆), en un porcentaje aproximado de al menos un 5 %, dentro del período que va de 2008

En el anexo I del Protocolo de Kioto se señala una clasificación de países que incluye Guatemala, quien procedió a firmarlo en 1998 y lo ratificó en octubre de 1999, mediante el Decreto núm. 23-99 del Congreso de la República.

Guatemala, como país Parte de la Convención, además de haber firmado y ratificado el Convenio Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático (13 de junio de 1992 y 28 marzo de 1995 respectivamente) y el Protocolo de Kioto (10 julio 1998 y 7 de julio 1999 respectivamente), ha ejecutado una serie de acciones tendientes a aumentar el conocimiento nacional de la problemática, la identificación y puesta en práctica de medidas de adaptación y mitigación, así como también a apoyar la implementación de sistemas renovables de energía.

El Protocolo de Kioto posiblemente tendrá un relevo próximo ya que recientemente se iniciaron nuevas conversaciones sobre el clima en Ginebra, bajo auspicios de la ONU, en una primera reunión formal para preparar el texto del gran acuerdo que se espera sea firmado a finales del 2015, en París, Francia, por 195 Estados.

3.2. Desarrollo tecnológico e implementación de SGESF a nivel mundial

Los paneles solares deben su aparición a la industria aeroespacial, y se han convertido en el medio más fiable de suministrar energía eléctrica a un satélite o a una sonda en las órbitas interiores del Sistema Solar, gracias a la mayor irradiación solar sin el impedimento de la atmósfera y a su alta relación potencia a peso. En el ámbito terrestre, debido a la creciente demanda de energías renovables, la fabricación de células y paneles solares e instalaciones

fotovoltaicas ha avanzado considerablemente en los últimos años, logrando avances tanto tecnológicos como de reducción de precios.

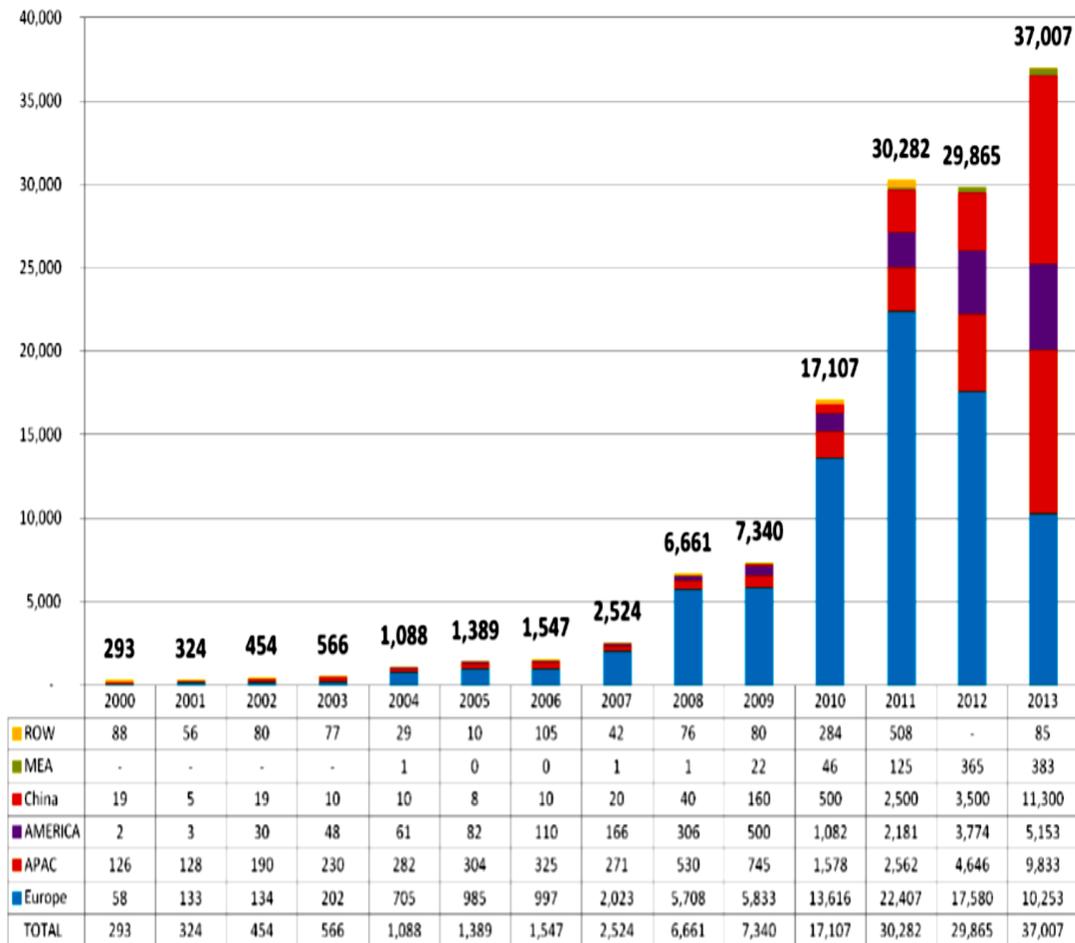
Experimentalmente también han sido usados para dar energía a vehículos solares, por ejemplo en el World Solar Challenge a través de Australia. Muchos yates y vehículos terrestres los usan para cargar sus baterías de forma autónoma, lejos de la red eléctrica, y últimamente se está desarrollando un avión totalmente autónomo.

Entre el 2001 y 2012 se ha producido un crecimiento exponencial de la producción de energía fotovoltaica, doblándose aproximadamente cada dos años. Si esta tendencia continúa, la energía fotovoltaica cubriría el 10 % del consumo energético mundial en 2018, alcanzando una producción aproximada de 2 200 TWh.

Programas de incentivos económicos, primero, y posteriormente sistemas de autoconsumo fotovoltaico y balance neto sin subsidios, han apoyado la instalación de SGESF en un gran número de países, contribuyendo a evitar la emisión de una mayor cantidad de gases de efecto invernadero.

El desarrollo tecnológico, reducción de costos, facilidades e incentivos de implementación en muchos países para los de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica, en el transcurso de los primeros catorce años del presente siglo ha sido impresionantemente alto, orientando una tendencia a que al final de los próximos quince años, alrededor del 2030, estará en su máximo apogeo a nivel mundial. A continuación se presenta una gráfica donde se muestra el desarrollo del mercado mundial de la energía solar y donde se observa el pujante comportamiento de países como China y los integrantes de la Comunidad Económica Europea.

Figura 29. El desarrollo del mercado mundial de energía solar



Fuente: presentación GIZ seminario mayo 2014 Guatemala.

3.3. Antecedentes en el desarrollo e implementación de energías renovables en Guatemala

Culturalmente en Guatemala el uso natural de la biomasa como fuente energética ha predominado históricamente pero en 1884, se inicia tecnológicamente la implementación del aprovechamiento de las energías renovables, entrando en operación la hidroeléctrica en la finca El Zapote, al

norte de la ciudad, y luego un año después entra en operación la hidroeléctrica de Palín, en el departamento de Escuintla.

Posteriormente se construyen otras hidroeléctricas, la Santa María (1927), para proveer energía al Ferrocarril de los Altos, luego las de Patzún en Chimaltenango y la de Patulul en Suchitepéquez (años 30), más adelante se inicia la construcción en Zacapa de la Hidroeléctrica Río Hondo (años 50).

Más recientemente, a principios de los 70 se instaló la Hidroeléctrica Jurún Marinalá, en 1982, inició operaciones la Hidroeléctrica Aguacapa y en 1983, se construye la Hidroeléctrica Chixoy, la más grande del país.

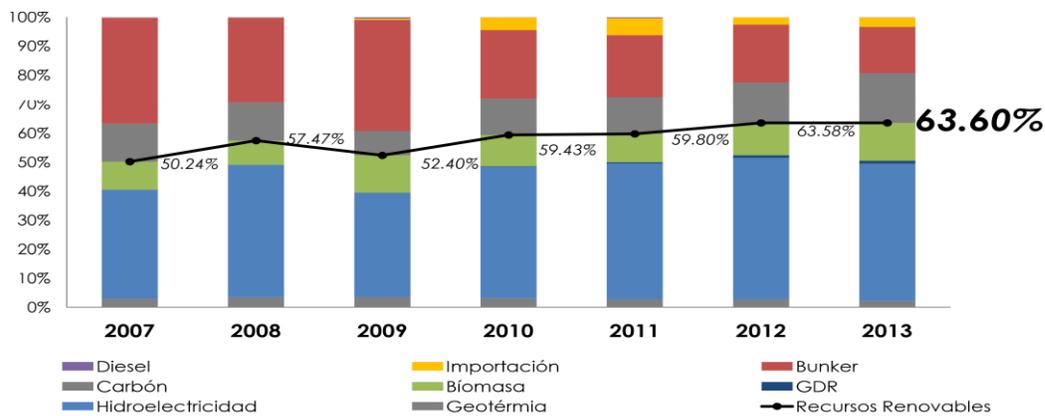
Ya en 1992, inician sus operaciones varias generadoras privadas, entre ellas: los ingenios azucareros, ENRON en Puerto Quetzal y posteriormente las plantas SIDEGUA, LAGOTEX, Secacao, Río Bobos, TAMPA, Guatemala Generating Group (GGG), Las Palmas, Generadora del Norte (GENOR), Calderas, Zunil, Poliwatt, Pasabién, Poza Verde, Tululá, Cerro Vivo, Las Vacas y Matanzas.

La capacidad instalada a nivel nacional en la actualidad es mayor de 1 705,6 MW, entre generadores privados e INDE.

Se han construido también plantas generadoras geotérmicas, de carbón, biomasa, gas, y se siguen construyendo especialmente minihidroeléctricas, campos eólicos y más recientemente la comercialización abierta de SGESF a todo nivel e incluso la entrada en operación de las primeras plantas generadoras de tipo fotovoltaico, de grandes productores en Guatemala, con una capacidad de 5 y 50 MW en Zacapa y Chiquimulilla Santa Rosa, respectivamente.

En cuanto a energías renovables la mayor parte de producción de energía en Guatemala, actualmente corresponde a las hidroeléctricas y constituye una de las mejores energías renovables aprovechables pero el deterioro climático que se ha dado y la oposición de la población, en algunos sectores, esta dificultando la implementación de más de ellas.

Figura 30. Evolución matriz energética 2007-2013



Fuente: Cámara de Industria y Comercio Alemana Guatemalteca, Presentado por Lic. Carmen Urizar, Presidente CNEE, 2013.

Cada vez se incrementa más la implementación de SGESFR a nivel particular para autoabastecimiento de energía eléctrica y se espera un fuerte crecimiento en los próximos quince años.

En Guatemala se han realizado diversos estudios e investigaciones relacionados con el uso de energía solar como fuente generadora, los que dan a conocer que desde hace algún tiempo hay inquietud de desarrollar proyectos relacionados con la energía fotovoltaica y entre los que, por mencionar algunos, se cita *Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de*

energía eléctrica a la comunidad rural Buena Vista, San Marcos y la Aplicación de la energía solar en las aldeas de Huite, Zacapa y Modelo de sistema energético descentralizado basado en tecnología fotovoltaica para electrificación de poblaciones rurales aisladas.

Así también, el Ministerio de Energía y Minas consciente de la problemática energética del país, lanzó un plan piloto de iluminación exterior en las instalaciones del mismo ministerio, con paneles solares reciclados, con la finalidad de demostrar y promover las energías renovables limpias, por su parte también la Universidad del Valle de Guatemala y algunas otras instituciones.

Actualmente existe un mercado abierto para la implementación de sistemas de energía renovable, incluyendo los SGESF, estimulado con incentivos de orden fiscal y legal.

3.4. Marco legal para energías renovables en Guatemala y normativa "NTGDR"

Para entender de mejor manera las leyes y normativas se presenta la descripción de lo que es generación distribuida y autoproducción.

Generación distribuida: el concepto de generación distribuida (GD) se ha retomado en los últimos años debido a la evolución que ha tenido el sistema eléctrico. Su definición se aproxima a la de generación de energía eléctrica a pequeña escala y próxima al consumidor.

Autoproducción: se le conoce así al propietario de instalaciones de producción de energía y que la utiliza para uso propio (autoconsumo) y tiene excedentes para la venta a terceros.

La Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE) desarrolla los normativos para aquellos autogeneradores que deseen verter energía captada por celdas fotovoltaicas, y en el contexto de que no necesariamente debe ser 5 MW como mínimo, y como debe realizarse la instalación y la medición de la energía.

Con lo anterior el propietario (autogenerador) gana dos veces: produce su propia energía y cobra por ella, además tiene un sistema casi libre de mantenimiento, porque no tiene baterías (las cuales serían artefactos contaminantes cuando culminan con su tiempo de vida) y estos sistemas fácilmente tienen una vida útil entre 20 y 30 años.

Con este tipo de idea de cogeneración de energía eléctrica, el estado y las empresas eléctricas ganan también, no tienen que invertir en nuevas centrales de generación, en el aumento de las líneas de distribución, en las pérdidas de distribución energética, entre otros.

El Ministerio de Energía y Minas según Ley del Organismo Ejecutivo, (Decreto 114-97), según el Artículo 34, es el ente que tiene la potestad de atender el régimen jurídico aplicable a la producción, distribución y comercialización de la energía, proveniente las fuentes que la generen, como de hidrocarburos y explotación de recursos mineros.

El Ministerio de Energía y Minas promulgó la Ley General de Electricidad, y la correspondiente reglamentación para energía renovable en Guatemala, contemplando en el Decreto No. 52-2003 la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, con el Reglamento de la Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable, en el Acuerdo

Gubernativo No. 211-2005. A continuación se transcribe un segmento de La ley General de electricidad:

“Es libre la instalación de centrales generadoras, las cuales no requerirán de autorización de ente gubernamental alguno, y sin más limitaciones que las que se den de la conservación del medio ambiente y de la protección a las personas, a sus derechos y a sus bienes. No obstante, para utilizar con estos fines los que sean bienes del Estado, se requerirá de la respectiva autorización del Ministerio, cuando la potencia de la central exceda de 5 MW”.

“Los proyectos de generación y de transporte de energía eléctrica deberán adjuntar evaluación de impacto ambiental, que se determinará a partir del estudio respectivo, el que deberá ser objeto de dictamen por parte de la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA)”.

Se presenta el Artículo 39 del Acuerdo Gubernativo 68-2007, el cual obliga a los distribuidores de energía que permita la conexión de energía eléctrica que genera el funcionamiento de nuevos generadores con energía renovable.

Se reforma el Artículo 39, el cual establece los siguientes límites para los agentes del mercado eléctrico: Generadores: potencia máxima de 5 MW (antes de esta reforma 10 MW); Comercializadores: comprar o vender bloques de energía de por lo menos 2 MW (antes 10 MW); Distribuidores: tener un mínimo de 15 mil usuarios (antes eran 20 mil clientes); Transportistas: capacidad mínima de 10 MW (anteriormente 10 MW). Sobre el peaje: los costos anuales por el peaje (transporte de energía a través de las líneas de transmisión) serán como mínimo el 3 % del costo total de la inversión.

El plan de expansión del sector eléctrico se realizará cada 2 años por medio del Órgano Técnico Especializado, con la participación de los agentes privados y de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), el cual cubrirá un horizonte de 10 años.

Según los artículos transcritos, se analiza que tanto de la Ley de Incentivos, como de la Ley General de Electricidad, establecen un respaldo y estímulo para proyectos de desarrollo de fuentes de energía renovable, incluyendo las fuentes de energía eléctrica por captación de radiación solar. Esto queda afirmado con el Acuerdo Gubernativo 68–2007, el cual manda a los distribuidores de energía eléctrica a aceptar conexiones particulares generadoras de electricidad, especialmente si son de fuentes de energías alternas renovables.

Con fecha 24 de octubre de 2008, entra en vigencia la norma *técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable (NTGDR) y Usuarios Autoprodutores con Excedentes de Energía*.

Con base en la consideración que en Guatemala existe suficiente potencial para obtener energía eléctrica por medio de fuentes renovables, en todo el territorio nacional, por medio de plantas de generación de pequeña escala y conexión al Sistema Eléctrico Nacional a través de sistemas o redes de distribución. Esta norma establece para los generadores distribuidos, su control y comercialización de energía eléctrica producida con fuentes renovables. Y es de aplicación obligatoria para distribuidores y generadores distribuidos renovables.

A continuación, se presenta un segmento de la Ley de Incentivos, con segmentos de los artículos núm. 1, 2, 5 y 6, que aplica a entidades interesadas en generar energía alternativa, renovable:

Artículo 1. Urgencia e interés nacional: se declara de urgencia e interés nacional el desarrollo racional de los recursos energéticos renovables. El órgano competente estimulará, promoverá, facilitará y creará las condiciones adecuadas para el fomento de inversiones que se hagan con ese fin.

Artículo 2. Objeto: la presente Ley tiene por objeto promover el desarrollo de proyectos de energía renovable y establecer los incentivos fiscales, económicos y administrativos para el efecto.

Artículo 5. Incentivos: las municipalidades, el Instituto Nacional de Electrificación (INDE), empresas mixtas, y las personas individuales y jurídicas que realicen proyectos de energía con recursos energéticos renovables gozarán de los siguientes incentivos:

- Exención de derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el impuesto al valor agregado (IVA), cargas y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva durante el período de preinversión y el período de construcción, el cual no excederá de 10 años.

Artículo 6. Certificado de reducción de emisiones: los certificados de reducción de emisiones pertenecerán a los propietarios de los

proyectos, quienes de esa forma se beneficiarán de la comercialización de los mismos.

Estos certificados serán emitidos por el órgano competente, de conformidad a la cuantificación de las emisiones reducidas o desplazadas por el proyecto.

Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable.

Decreto número 52-2003. El Congreso de la República de Guatemala Objeto: la presente Ley tiene por objeto promover el desarrollo de proyectos de energía renovable y establecer los incentivos fiscales, económicos y administrativos para el efecto.

Norma técnica GDR y autoprodutores:

- Regula la conexión de generadores distribuidos renovables menores a 5MW a la redes de distribución.
- Da el incentivo para que un usuario se convierta en auto-productor mediante la instalación de recursos de generación renovables no convencionales.
- Hasta la fecha existen alrededor de 400 usuarios que son auto-productores.
- Hasta la fecha se cuenta con un poco más de 30 GDR conectados.

Artículo 3. Desarrollo: para lograr el objetivo establecido en la presente Ley, el Ministerio de Energía y Minas deberá:

- Promover la localización e inventario de los recursos energéticos renovables, que sirvan para la generación de energía.
- Impulsar los estudios para estimar el potencial técnico utilizable.
- Fomentar y facilitar las inversiones para el desarrollo de generación de electricidad a través del uso racional de recursos energéticos renovables. Ley de Incentivos para el Desarrollo de Proyectos de Energía Renovable.
- Propiciar la oferta energética nacional a través de recursos renovables contribuyendo con esto a una mayor independencia nacional con relación a los combustibles importados.
- Contribuir y facilitar los procesos de certificación establecidos en el país, en materia energética, mediante el uso de recursos renovables.

Artículo 5. Incentivos: las municipalidades, el Instituto Nacional de Electrificación (INDE), empresas mixtas, y las personas individuales y jurídicas que realicen proyectos de energía con recursos energéticos renovables gozarán de los siguientes incentivos:

- Exención de derechos arancelarios para las importaciones, incluyendo el impuesto al valor agregado (IVA), cargas y derechos consulares sobre la importación de maquinaria y equipo, utilizados exclusivamente para la generación de energía en el área donde se ubiquen los proyectos de energía renovable.

Previamente a la importación de la maquinaria y equipo que sean necesarios para desarrollar los proyectos de energía renovable, en cada caso las personas individuales y jurídicas que los realicen deberán solicitar la aplicación de la exención a la Superintendencia de Administración Tributaria (SAT), quien se encargará de calificar y autorizar la importación. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva durante el período de preinversión y el período de construcción, el cual no excederá de diez (10) años.

- Exención del pago del impuesto sobre la renta. Este incentivo tendrá vigencia exclusiva a partir de la FIE, por un período de diez (10) años. Esta exención únicamente se otorga a las personas individuales y jurídicas que desarrollen directamente los proyectos y solamente por la parte que corresponda a dicho proyecto, ya que la exención no aplica a las demás actividades que realicen.
- Exención del impuesto a las empresas mercantiles y agropecuarias (IEMA).

Este incentivo tendrá vigencia exclusiva a partir de la FIE, por un período de diez (10) años.

En agosto del 2014, derivado del tiempo transcurrido desde la emisión de la anterior norma técnica para la conexión, operación, control y comercialización de la generación distribuida renovable (NTGDR) y usuarios autoprodutores con excedentes de energía, la CNEE considera que es necesario adaptar las disposiciones generales contenidas en ella a la actualidad, con la finalidad de

facilitar el acceso al Sistema Eléctrico Nacional a través de fuentes energéticas renovables, en atención a su tamaño, ubicación física, infraestructura eléctrica de las empresas de distribución, así como por el nivel de tensión al cual sea técnica y económicamente viable su conexión. Por lo que la CNEE resuelve emitir la nueva norma técnica de generación distribuida renovable y usuarios autoprodutores con excedentes de energía resolución CNEE-227-2014, donde resalta la nueva regularización del valor agregado de distribución (VAD).

Esta última constituye la normativa directa a la cual se acoge el diseño propuesto en el presente trabajo de investigación.

3.5. Servicios de energía prestados en Guatemala

Las empresas distribuidoras de energía eléctrica en Guatemala son básicamente la empresa eléctrica de Guatemala (EEGSA), para los departamentos de Guatemala y Escuintla, y la empresa energuate (deocsa y deorsa) para el resto del país.

La CNEE ha normado el tipo de servicios que pueden prestar estas empresas distribuidoras de energía eléctrica, y básicamente son los mismos servicios para ambas empresas, y para este efecto se orientará a describir los servicios de la EEGSA (según resolución de la CNEE-61-2004).

Servicios en baja tensión:

- Tensiones de suministro en baja tensión:

- 120/240 Voltios, 1 fase, 3 conductores.
 - 120/240 Voltios, 3 fases, 4 conductores.
 - 240/480 Voltios, 3 fases, 4 conductores.
 - 120/208 Voltios, 1 fase, 3 conductores (panel de medidores)
 - 120/208 Voltios, 3 fases, 4 conductores.
 - Para otro tipo de voltaje, será necesario consultar directamente a EEGSA.
- Rangos de cargas en KW:
 - Carga monofásica individual menor de 11 KW (12 KVA).
 - Carga monofásica individual entre 12 KW y 48 KW (53,3 KVA).
 - Carga trifásica individual mayor a 11KW y hasta 70KW (77,8 KVA).
 - Carga trifásica individual mayor a 70 KW (77,8 KVA) y hasta 202,5KW (225KVA).
 - Carga trifásica individual mayor a 202.5KW (225KVA) y menor a 450 KW (500 KVA).
 - Suministro a varios consumidores (edificios, centros comerciales, entre otros).
 - Suministro a lotificaciones.
 - Servicios en media tensión: cuando el usuario desea energía eléctrica obteniéndola directamente de la red de media tensión, debe ser propietario del centro de transformación y estar ubicado dentro de su propiedad, obteniendo una tensión de suministro en el punto de entrega de 13,2 KV.

- Demanda mínima de 12 KW (13,33 KVA) y rangos:
 - Mayores de 225 KVA y hasta 1 000 KVA
 - Mayores de 11 KW y hasta 70 KW
 - Mayores de 70 KW y hasta 225 KVA

- Servicios en alta tensión: el suministro en alta tensión se utilizará para cargas trifásicas puntuales mayores de 1 000 KVA, la tensión de suministro será de 69 KV y todo servicio deberá cumplir con el procedimiento descrito en la normativa vigente.

4. RADIACIÓN SOLAR

4.1. Radiación solar en el planeta

La radiación solar en el planeta, tal y como ya se mencionó constituye la principal fuente de energía renovable al alcance, esto debido a que la cantidad de energía solar captada por la tierra anualmente es aproximadamente de $5,4 \times 10^{24}$ J, una cifra que representa más de 4 000 veces la energía que se consume.

La Tierra recibe la radiación electromagnética del Sol y reirradia de nuevo al espacio una cantidad de calor igual a la radiación incidente; por tanto, la utilización de la radiación solar no es otra cosa que su conversión en energía útil para la humanidad. Sin embargo, el resultado neto de dicho aprovechamiento es el mismo que si no hubiera habido interferencia en el proceso de reirradiación al espacio, pues solamente se ha producido un desfase o retraso en este proceso, como resultado de la disposición humana o como parte de los procesos naturales.

La radiación solar que llega a la superficie de la tierra se puede clasificar en 3 tipos diferentes: radiación directa, radiación difusa y albedo (reflejada).

- La radiación directa: es aquella que llega directamente del Sol hasta algún objeto o superficie terrestre, sin reflexiones o refracciones en su recorrido, y que puede reflejarse y concentrarse para su utilización. Además, se caracteriza por producir sombras bien definidas de los objetos que se interponen en su trayecto. El instrumento utilizado para

medir la radiación directa es el pirheliómetros y debe enfocarse directamente al disco solar.

- La radiación difusa: corresponde a la radiación emitida por el Sol y que sufre alteraciones en su recorrido desde que ingresa a la atmósfera, siendo reflejada por partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, entre otros, o también absorbida por las nubes y que producto de las constantes reflexiones va perdiendo energía, además de no proyectar sombra de los objetos que se interponen en su recorrido. Las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, ya que pueden ver el cielo en todas las direcciones, mientras que las verticales reciben menos porque solo ven la mitad.
- La radiación reflejada: llamada albedo, que no es más que la radiación reflejada por la superficie terrestre o cualquier otra superficie, como resultado de la radiación directa o difusa y puede variar de un lugar a otro, por las propiedades de los cuerpos, y también de un instante al otro. Por ejemplo para un cuerpo negro su valor es prácticamente cero, para un suelo mojado es 0,18 y para la nieve esta cerca de la unidad.

Las proporciones de radiación directa, dispersa y albedo recibida por una superficie dependen:

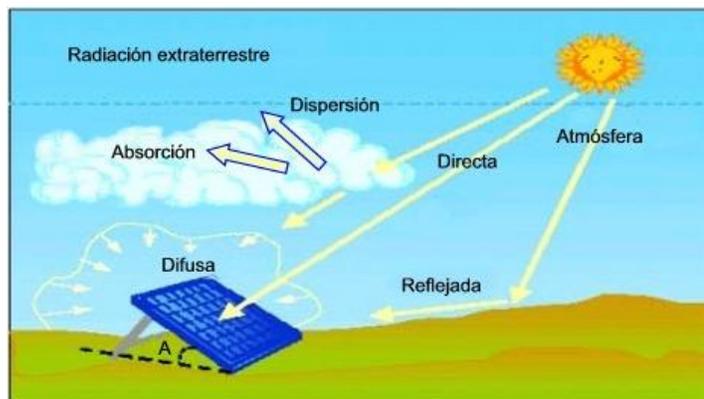
- De las condiciones meteorológicas: en un día nublado la radiación es prácticamente dispersa en su totalidad mientras que en un día despejado con clima seco predominada, en cambio, la componente directa, que pueda llegar hasta el 90 % de la radiación total.

- De la inclinación de la superficie respecto al plano horizontal: una superficie horizontal recibe la máxima radiación dispersa (si no hay alrededor objetos a una altura superior a la de la superficie) y la mínima reflejada. Al aumentar la inclinación de la superficie de captación disminuye la componente dispersa y aumenta la componente reflejada.
- De la presencia de superficies reflectantes (debido a que las superficies claras son las más reflectantes, la radiación reflejada aumenta en invierno por efecto de la nieve y disminuye en verano por efecto de la absorción de la hierba o del terreno).

Para concretar, decir que la radiación total que incide sobre una superficie inclinada corresponde a la suma de las tres componentes de la radiación:

$$I_{\text{Total}} = I_{\text{Directa}} + I_{\text{Difusa}} + I_{\text{Reflejada}}$$

Figura 31. **Componentes de la radiación solar**



Fuente: *Mografías*. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/dosimetro-de-radiacion-macsolar.htm>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

4.2. Irradiación

La irradiancia es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética.

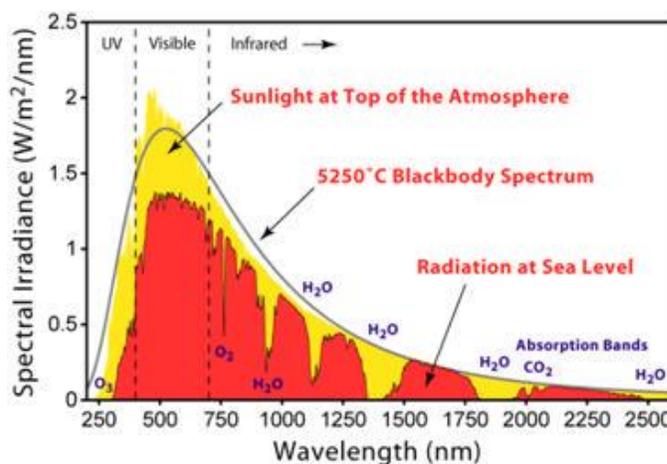
$$I = \frac{P_{inc}}{A_s}$$

P_{inc} es la potencia incidente en Watts.
 A_s es el área de la superficie en que incide la onda en m^2 .

Es importante tener presente que aunque la radiación proveniente del sol se puede percibir en forma de calor o luz (visible o no visible, lo cual dependerá de cada longitud de onda en particular), para los efectos de este estudio estará enfocada a su manifestación de luz.

En la figura 32 se puede apreciar el espectro de radiación solar para niveles sobre la atmósfera terrestre y a nivel del mar.

Figura 32. Espectro de radiación solar



Fuente: *Mografías*. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/dosimetro-de-radiacion-macsolar.htm>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

En electromagnetismo la irradiancia se define como el valor de la intensidad energética promedio de una onda electromagnética en un punto dado y se calcula como el valor promedio del vector de Poynting.

$$I = \langle S \rangle_T$$

Ahora bien la irradiancia solar, definida como la densidad de flujo radiante solar, es atenuada de acuerdo con el cuadrado de la distancia y de la parte que es interceptada por el planeta Tierra, dada la relación entre la distancia con el Sol y el tamaño del planeta, es razonable asumir que su valor es constante en toda la superficie exterior de la atmósfera, por lo que se utiliza para definir la constante solar B_0 .

Esta irradiancia que constituye la cantidad de energía solar que llega a la atmósfera superior de la tierra por unidad de superficie y tiempo, sirve para definir la constante solar B_0 como el valor de irradiancia solar incidente en un plano normal al vector sol-tierra en el límite superior de la atmósfera terrestre, y tiene un valor promedio de 1367 W/m^2 según la escala del World Radiation Reference Centre (WRRC), de 1373 W/m^2 según la Organización Mundial de Meteorología (WMO de sus siglas en inglés) o de 1353 W/m^2 según la NASA. Varias campañas de medida se han organizado para establecer este valor, estando todos muy cercanos a los indicados.

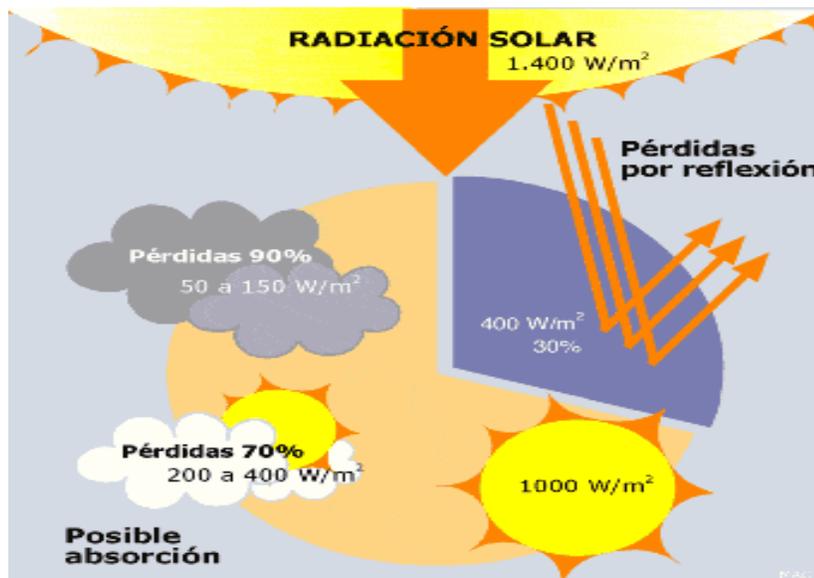
El valor máximo de la irradiancia solar se encuentra en el perihelio (lugar donde el planeta esta más cercano al Sol) y corresponde a 1395 W/m^2 , mientras que el valor mínimo se encuentra en el afelio (lugar donde el planeta esta más lejano al Sol) y es de 1308 W/m^2 ; pero se debe tomar en cuenta que las pérdidas en la atmósfera por reflexión, absorción y dispersión reducen este

valor alrededor de hasta un 30 %, con una intensidad de radiación ya en la superficie terrestre de alrededor de los 1 000 W/m².

En la superficie terrestre estos valores varían dependiendo de las condiciones climatológicas, pudiéndose reducir los valores de intensidad de radiación hasta valores extremos de 150 o 50 W/m². Cuando se da esta baja densidad de radiación, juntamente con el efecto negativo de determinadas condiciones climatológicas, y para efectos de valores significativos de aprovechamiento energético, obliga a utilizar mayor superficie de captación.

En la figura 32 se observa una representación gráfica de la radiación solar aproximada, las pérdidas por reflexión y los posibles niveles de absorción con las diferentes condiciones climatológicas.

Figura 33. Radiación y absorción solar



Fuente: *Mografías*. <http://www.pce-iberica.es/medidor-detalles-tecnicos/instrumento-de-radiacion/dosimetro-de-radiacion-macsolar.htm>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

Se ve entonces que a pesar de su abundancia, el aprovechamiento de la energía solar está directamente ligado a la situación geográfica del lugar y de las variaciones temporales, condicionado principalmente por tres aspectos: la intensidad de la radiación solar recibida por la Tierra, los ciclos diarios y anuales a los que está sometida y las condiciones climatológicas de cada lugar.

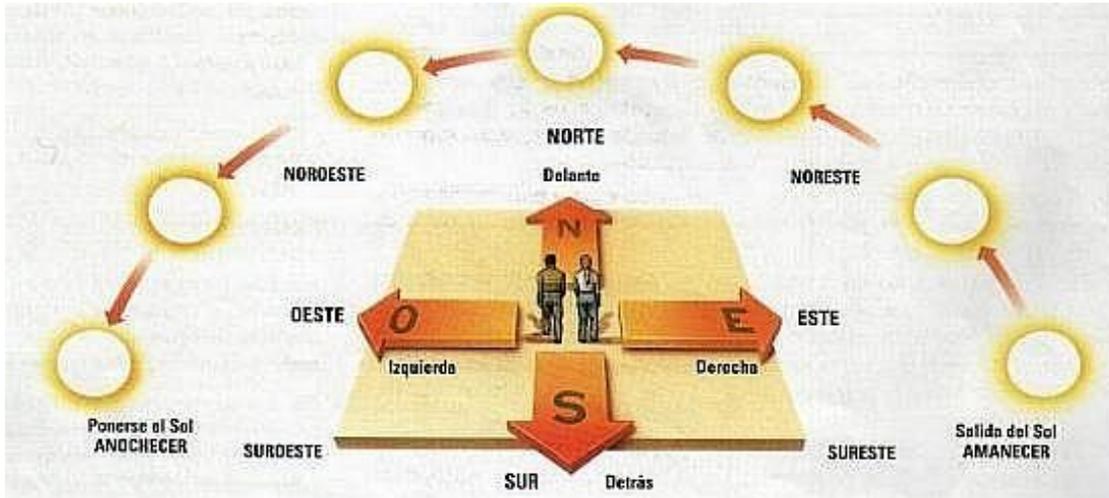
En general, el término de radiación solar se refiere a los valores de irradiación solar, es decir, la cantidad de energía recibida por unidad de superficie en un tiempo determinado.

Con la potencia de la radiación dependiendo del momento del día, las condiciones atmosféricas y la ubicación, bajo condiciones óptimas se puede asumir un valor aproximado estandarizado de irradiancia de 1 000 W/m² en la superficie terrestre.

4.2.1. Insolación

Corresponde a la cantidad de energía en forma de radiación solar que llega a un lugar de la Tierra en un día concreto (insolación diurna) o en un año (insolación anual). En otras palabras es la energía radiante que incide en una superficie de área conocida en un intervalo de tiempo dado. Su unidad de medida es el watts-hora por metro cuadrado (Wh/m²). La insolación también se expresa en términos de horas solares pico. Una hora pico de energía es equivalente a la energía recibida durante una hora, a una irradiancia promedio de 1 000 W/m².

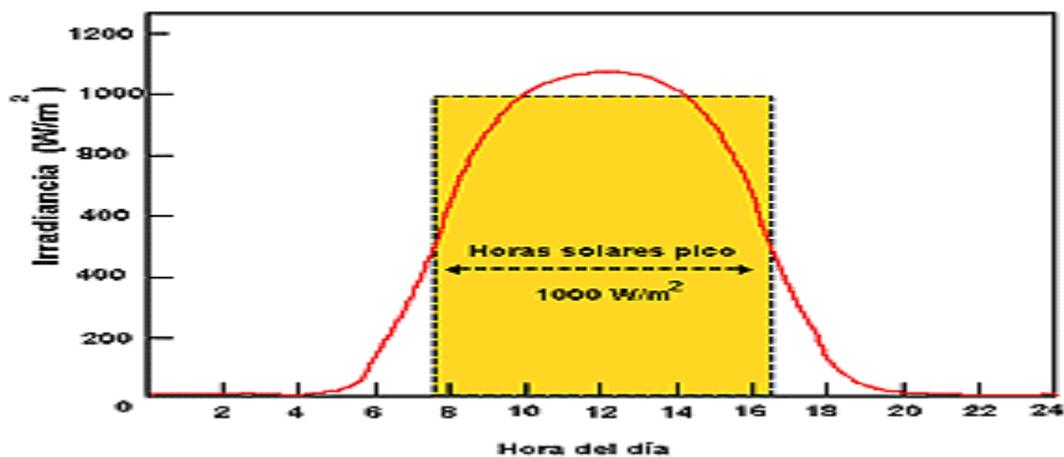
Figura 34. Cuando ilumina el Sol



Fuente: *Latikismikis*. <http://latikismikis.blogspot.com/2014/07/cuando-ilumina-el-sol.html>.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

Figura 35. Curva de irradiación diaria y horas pico



Fuente: *Solar*. http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html. Consulta: 25 de ebrero de 2015.

La energía útil que entrega el panel es fotovoltaico, es directamente proporcional a la insolación incidente y la radiación recibida en el punto de interés dependerá de la posición del Sol a cada hora. La figura 33 muestra comparativamente la posición del Sol variante con el tiempo y la curva que representa los niveles de irradiancia correspondientes.

Para calcular la insolación se puede asumir que no hay atmósfera o que se mide en la parte alta de ella y se denomina insolación diurna o anual no atenuada, otra forma es medir en la superficie de la Tierra teniendo en cuenta la presencia de la atmósfera, en este caso se denomina insolación atenuada siendo más complejo calcularla. En la figura 33 se muestra la insolación correspondiente a un día, la cual es representada por el área amarilla de la figura.

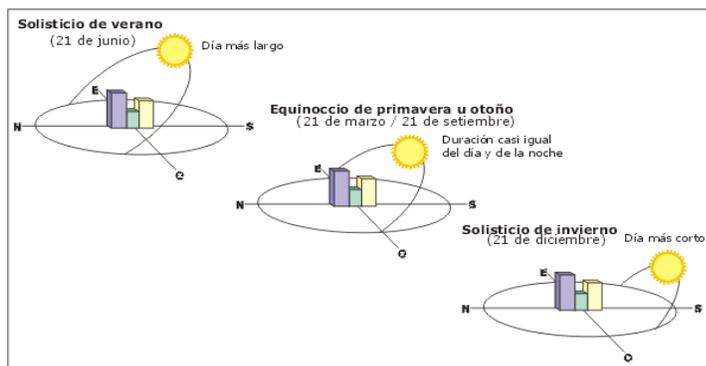
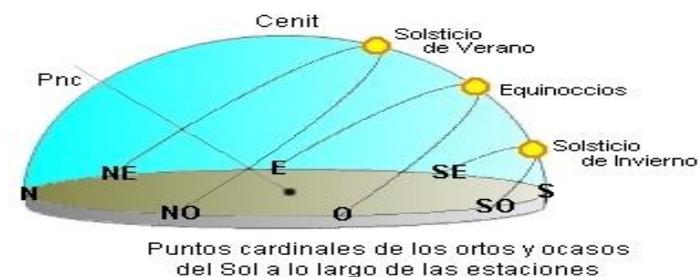
La insolación es un parámetro muy importante en el diseño de sistemas solares. Los factores climáticos y el ángulo de posicionamiento del panel con respecto al Sol afectan en demasía la insolación sobre la superficie de captación. En zonas de poco Sol, ya sea por nubes, neblina u otro factor, la insolación promedio en un periodo de tiempo es menor. En días de invierno los niveles de insolación promedio son considerablemente menores en comparación a los días de verano, esto se da para lugares cuya latitud sea mayor a los 15°.

Debido a que la insolación depende del ángulo de la superficie (panel solar) con respecto a la posición del Sol, se usa la insolación horizontal para referirse al potencial solar del lugar. A partir de la insolación horizontal se puede estimar la insolación a un azimut y elevación determinado. La insolación será máxima cuando la superficie (panel solar) se encuentre en posición horizontal frente al Sol. Para conseguir esto sería necesario ajustar el ángulo de azimut

para seguir el movimiento diario del Sol de este a oeste y el ángulo de elevación para seguir el movimiento anual de la trayectoria solar en la dirección norte-sur. La superficie se puede dejar fija, especialmente en algunos lugares del planeta, dirigiéndolo al ángulo central medio que tenga el Sol entre los solsticios de invierno y verano, ya que la pérdida de aprovechamiento de la energía solar puede ser despreciable.

Es importante entonces conocer la posición (ángulo) del Sol, para el emplazamiento donde se vaya a instalar el SGESF, para los solsticios de verano e invierno y los equinoccios.

Figura 36. **Ángulo del Sol**



Fuente: *Trayectoria solar*.http://www.astronum.net/astronum/temas/curso/parte_1/parte_1.htm.

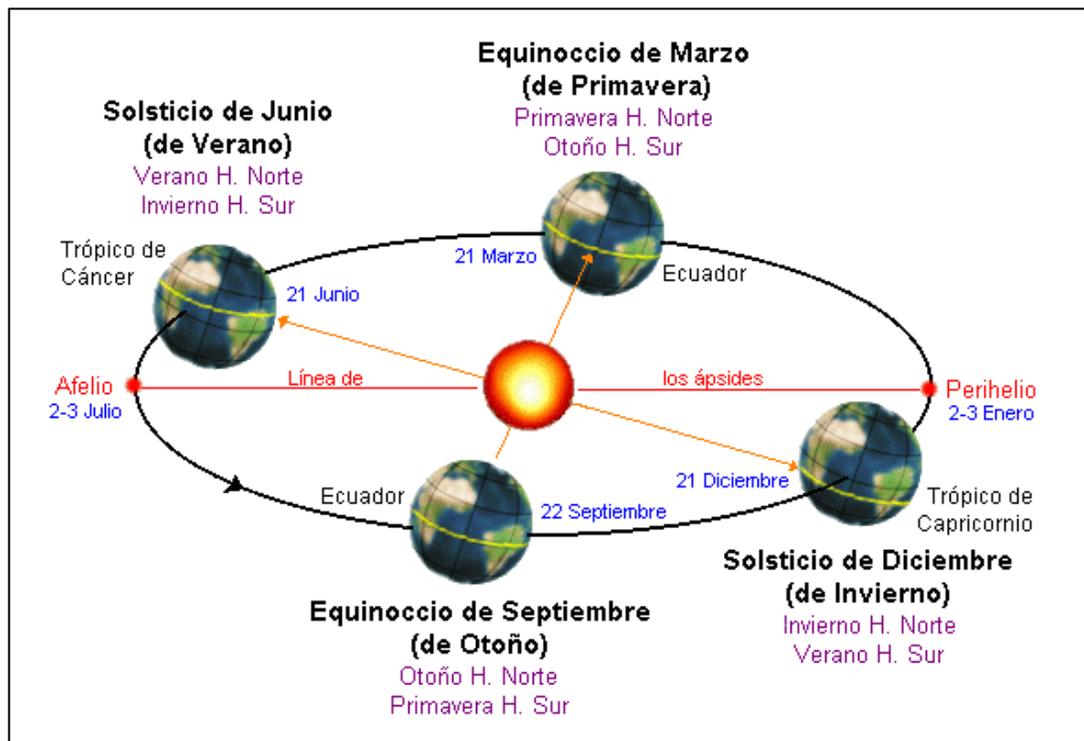
Consulta: 25 de febrero de 2015.

4.2.2. Movimiento aparente del Sol

El planeta Tierra gira sobre su propio eje y también alrededor del Sol pero al tomar la referencia desde cualquier punto en la superficie terrestre y observar el Sol da la apariencia que este fuese el que está en movimiento;

Estos movimientos son desde la porción del este hacia la porción del oeste (rotación) en forma diaria y entre norte y sur (traslación) por la posición del planeta en los solsticios de verano e invierno y los puntos intermedios del sol en los equinoccios.

Figura 37. Rotación y traslación



Fuente: *Trayectoria solar*. http://www.astronom.net/astronom/temas/curso/parte_1/parte_1.htm.

Consulta: 25 de febrero de 2015.

Para calcular el ángulo del Sol tanto para los solsticios de invierno y verano como para los equinoccios, se utiliza el método simple, conforme a lo siguiente:

- Solsticio de verano: el recorrido solar del 21 de junio se caracteriza porque al mediodía (12:00 hora solar), cuando el Sol se halla sobre el Sur, se forma con el Cenit un ángulo igual a la Latitud ϕ menos la declinación del planeta respecto de su eje ($\delta = + 23,5^\circ$), pudiéndose calcular la altura solar como: $A = 90 - \phi + 23,5^\circ$.
- Solsticio de invierno: el recorrido solar del 21 de diciembre se caracteriza porque al mediodía (12:00 hora solar), cuando el Sol se halla sobre el Sur, se forma con el Cenit un ángulo igual a la Latitud ϕ + la declinación ($\delta = + 23,5^\circ$), pudiéndose calcular la altura solar como: $A = 90 - \phi - 23,5^\circ$.

Equinoccios: en el recorrido solar, el 21 de marzo y septiembre, se observa que el Orto (Amanecer) coincide con el este, a las 6:00 horas, y el Ocaso (puesta de sol) con el oeste, a las 18:00 horas, con una duración total de 12 horas (equi-noccio = igual-noche) y al medio día (12:00 hora solar) el Sol se halla sobre el sur, con Azimut $Z = 0$, y forma con el Cenit un ángulo igual a la Latitud ϕ , de manera que se puede calcular la altura solar como:

$$A = 90 - \phi.$$

Los recorridos solares diurnos son arcos de círculo perfectos, cuyo eje es coincidente con el del planeta Tierra. El Sol recorre 360° en 24 horas, correspondiendo a cada hora un ángulo horario $w=15^\circ$. Los equinoccios son los únicos días que el recorrido diurno es de 12 horas exactas.

4.2.2.1. Factor AM (masa de aire)

La intensidad y frecuencia del espectro luminoso generado por el Sol sufre alteraciones cuando la luz atraviesa la atmósfera y se debe a la absorción, reflexión y dispersión que toma lugar dentro de esta.

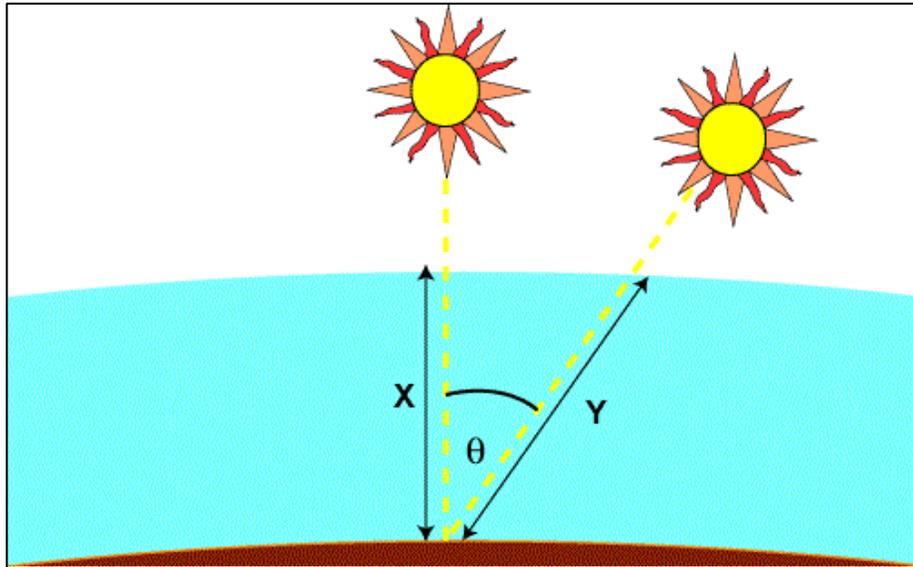
Estas modificaciones son dependientes de la espesura de la capa atmosférica y la posición relativa del Sol respecto a la horizontal del lugar determina el valor de la masa de aire. Cuando los rayos solares caen formando un ángulo de 90° respecto a la horizontal se dice que el Sol ha alcanzado su cenit y en esta posición la radiación directa del Sol atraviesa una distancia mínima a través de la atmósfera, por el contrario cuando el Sol está más cercano al horizonte, esta distancia se incrementa, es decir la masa de aire es mayor.

La masa de aire (AM) esta definida como:

$$AM=1/\cos(\theta)$$

Donde θ es el ángulo desde la vertical (ángulo del cenit). Cuando el Sol está directamente al centro en su cenit la masa de aire (AM) es 1.

Figura 38. **Posición, cálculo de masa de aire**



Fuente: *La masa de aire*. <http://www.pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/air-mass>.

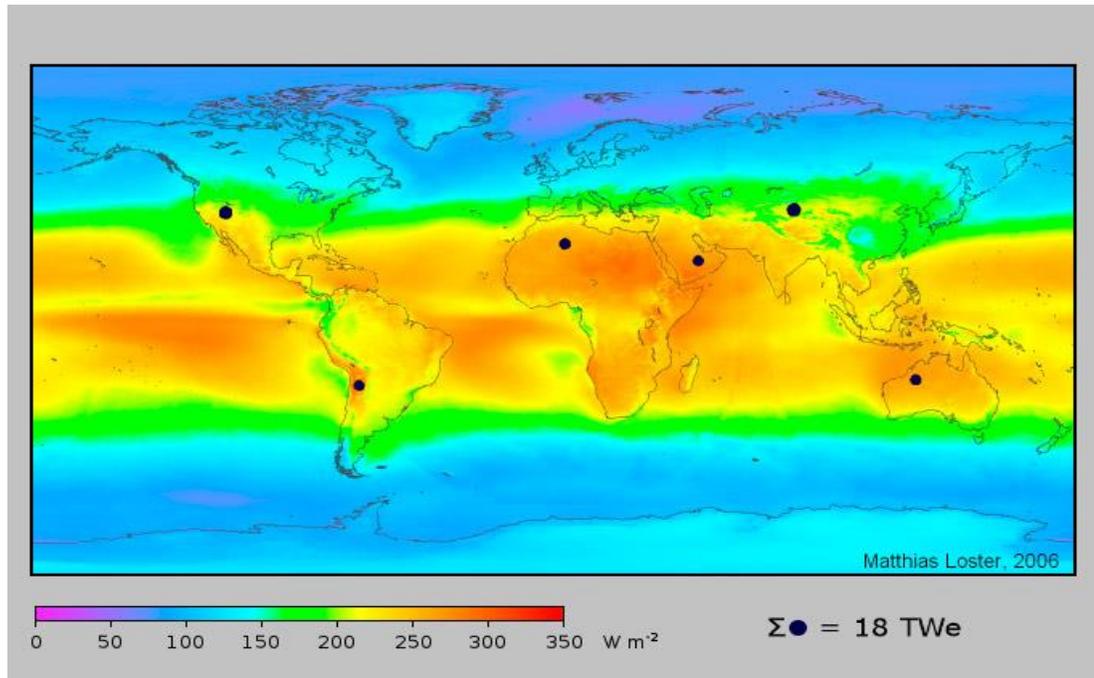
Consulta: 25 de febrero de 2015.

La masa de aire representa la proporción de la atmósfera que la luz debe atravesar antes de golpear la Tierra en relación con su longitud del camino de arriba, y es igual a Y / X .

4.3. Radiación solar en ciudad de Guatemala y campus central de Usac

Guatemala se encuentra en la franja del cinturón solar, donde la radiación solar presenta sus mejores niveles, por lo que es uno de los países beneficiados para que la instalación de SGESFR sea viable y rentable.

Figura 39. Cinturón de fuego



Fuente: SALAZAR, Diego. *Energías solares*. p. 125.

La ciudad de Guatemala está a una altura de 1 458 msnm, y con una variación de declinación solar en todo el país, a través del año entre 23 ° y -23 °, lo cual permite que siempre reciba radiación solar debido a su ubicación en el globo terraqueo; característica que desea aprovecharse para desarrollar la energía solar como fuente de energía alterna. Estos valores se asumen en promedio para la ciudad de Guatemala, donde se encuentra ubicado el campus central de la Usac (CCUSAC).

Con base en la información expresada en la sección anterior se determina el ángulo de la altura del Sol en los solsticios de verano e invierno, el ángulo promedio para superficies fotovoltaicas fijas, el ángulo de la altura solar en los

equinoccios y las respectivas masas de aire (AM), para los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC (con latitud de 14,59° N), así:

- Altura solar en solsticio de invierno, con una latitud de 14,59° N, el 21 de diciembre al mediodía la altura del Sol será $A = 90 - 14,59 - 23,5 = 51,91^\circ$, siempre más cerca del cenit que del horizonte, levemente pasado del ángulo intermedio.
- Altura solar en solsticio de verano, con una latitud de 14° N, el 21 de junio al mediodía la altura del Sol será $A = 90 - 14,59 + 23,5 = 98,91^\circ$, pasadito del cenit.

El ángulo central para superficie fotovoltaicas fijas sería 90° menos el promedio de ambos ángulos de 98,91° y de 51,91°: $90^\circ - (98,91^\circ - 51,91^\circ)/2 = 14.59$

Altura solar en los equinoccios, con una latitud de 14° N, el 21 de marzo y septiembre al mediodía la altura del Sol será $A = 90 - 14.59 = 75.41^\circ$.

La masa de aire (AM) al medio día oscilará entre:

$$AM_{\text{verano}}: 1/\cos 8.91 = 1.01$$

$$AM_{\text{invierno}}: 1/\cos 38.08 = 1.27$$

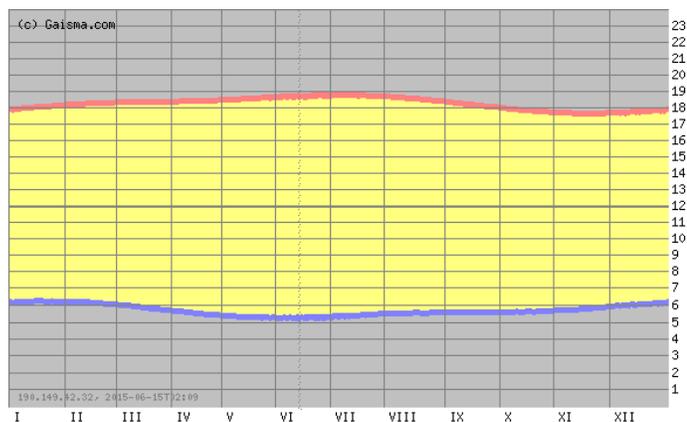
En las siguientes figuras, se observan las condiciones de radiación, ruta del Sol y meteorología desuperficie para la ciudad de Guatemala

Tabla II. **Salida y puesta del Sol, amanecer y anochecer**

Fecha	Salida del sol	Puesta del sol	Longitud	Cambio	Amanecer	Anochecer	Duración	Cambio
Hoy	05:33	18:32	12:59		05:09	18:56	13:47	
Un día	05:33	18:32	12:59	00:00 longitud igual	05:09	18:56	13:47	00:00 igual longitud
Una semana	05:34	18:34	13:00	00:01 mas corto	05:11	18:57	13:46	00:01 mas corto
2 semanass	05:36	18:35	12:59	00:00 igual longitud	05:12	18:59	13:47	00:00 mas corto
1 mes	05:40	18:36	12:56	00:03 mas corto	05:17	18:59	13:42	00:05 mas corto
2 meses	05:48	18:26	12:38	00:21 mas corto	05:26	18:48	13:22	00:25 mas corto
3 meses	05:51	18:06	12:15	00:44 mas corto	05:29	18:28	12:59	00:48 mas corto
6 meses	06:18	17:35	11:17	01:42 mas corto	05:55	17:58	12:03	01:44 mas corto

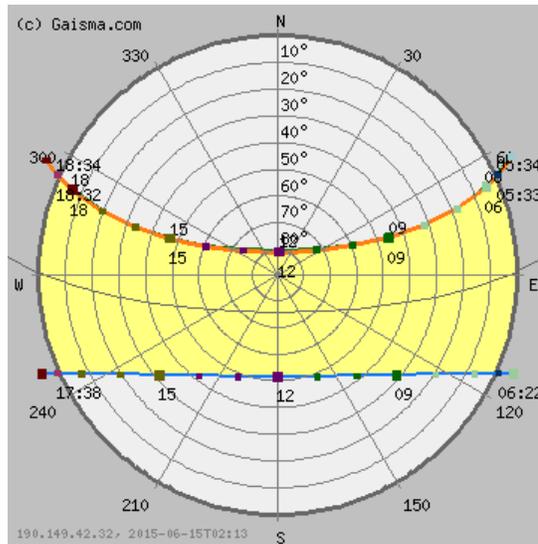
Fuente: GAISMA. <http://www.gaisma.com/en/location/guatemala.html>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

Figura 40. **Inicio de amanecer y final de anochecer**



Fuente: GAISMAR. <http://www.gaisma.com/en/info/help.html>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

Figura 41. Diagrama de ruta del Sol



Fuente: GAISMAR. <http://www.gaisma.com/en/info/help.html>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

Tabla III. La energía solar y la meteorología de superficie

Variable	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Insolación, en kWh/m ² /día	4.11	4.90	5.71	5.94	5.45	5.01	5.14	5.24	4.86	4.37	4.09	3.90
Claridad, el 0 - 1	0.51	0.54	0.57	0.57	0.51	0.47	0.48	0.50	0.48	0.47	0.49	0.50
Temperatura, °C	18.7 9	20.2 5	22.0 3	23.3 6	23.3 7	22.6 6	22.0 3	22.1 4	22.1 2	21.1 7	19.9 4	18.8 7
Velocidad del viento, m/s	4.42	4.08	3.92	3.41	3.00	3.08	3.46	3.21	2.88	3.43	3.86	4.41
Precipitación, mm	4	4	6	23	120	236	188	154	227	125	21	7
Día en Seco, d	8.3	6.8	6.8	9.4	18.7	25.8	25.3	24.1	25.7	22.0	12.0	9.1

Fuente: GAISMAR. <http://www.gaisma.com/en/info/help.html>. Consulta: 25 de febrero de 2015.

4.4. Influencia y análisis para pérdidas por orientación, inclinación, sombras y otros obstáculos

En el diseño de sistemas fotovoltaicos es importante asegurar la mayor recepción de la energía solar que incidente hacia los módulos, por lo que se debe tomar en cuenta las pérdidas que se presentarán por la orientación, inclinación y sombras tanto de las condiciones atmosféricas, paso de entes voladores y cualesquiera otros objetos que interrumpan la radiación directa hacia los paneles solares.

Se considerará la instalación de un SGESFR con paneles fijos dirigidos hacia el sur y con un ángulo de inclinación entre 14 y 15 grados, lo que no permitirá aprovechar al 100 % la radiación solar; además existirá la influencia de las sombras provocadas por los obstáculos fijos o transitorios que se presenten entre la radiación solar directa y la superficie del o de los paneles solares, afectando la producción de energía fotovoltaica que se podría generar.

Las pérdidas provocadas por los obstáculos transitorios que producen sombras son casi insignificantes, por lo que se tomará en cuenta el resto de aspectos.

El objetivo es determinar los límites en la orientación e inclinación de los módulos de acuerdo a las pérdidas máximas permisibles por este concepto.

Las pérdidas por orientación e inclinación se calculan en función de:

- Ángulo de inclinación β , definido como el ángulo que forma la superficie de los módulos con el plano horizontal (ver figura 4). Su valor es 0° para módulos horizontales y 90° para verticales.

- Ángulo de azimut α , definido como el ángulo entre la proyección sobre el plano horizontal de la normal a la superficie del módulo y el meridiano del lugar (figura 5). Valores típicos 0° para módulos orientados al sur, -90° para módulos orientados al este y 90° para módulos orientados al oeste.

En la actualidad existen varios programas disponibles para calcular rápidamente la influencia y pérdida de captación de radiación solar, por la sombra de los obstáculos que se interponen entre el Sol y los sistemas fotovoltaicos, conforme a los horarios y posiciones del Sol.

A continuación se presenta el resultado del análisis de sombras en la captación solar del edificio M-5 ubicado en el CCUSAC, utilizando el programa Solmetric que es uno de los mas conocidos.

5. INFRAESTRUCTURA FÍSICA Y ELÉCTRICA EDIFICIOS S-1 Y M-5 DEL CAMPUS CENTRAL DE LA USAC (CCUSAC)

La Universidad de San Carlos de Guatemala, conocida y llamada por sus siglas Usac, es la universidad más grande y antigua de Guatemala, además de ser la tercera fundada en el todo el Continente Americano, y hasta la fecha la única estatal.

Fue establecida en el Reino de Guatemala en 1676, durante la colonia española, fue la más prestigiosa institución de educación superior de Centro América (y la única de Guatemala) hasta 1954. Actualmente cuenta con un campus central (CCUSAC), un Centro Universitario Metropolitano (CUM) y centros universitarios en casi todas las regiones del país.

La sede principal de la Universidad de San Carlos de Guatemala funciona en su campus central (CCUSAC), también llamado Ciudad Universitaria, ubicado en la zona 12 de la ciudad de Guatemala y conformado por un conjunto de edificios que albergan la Rectoría, edificios administrativos, las diferentes Facultades y Escuelas para su respectivo funcionamiento, entre ellos los edificios S-1 y M-5 de los cuales se describirá su ubicación, descripción física y de los servicios eléctricos que los alimentan.

5.1. Ubicación y descripción de edificios S-1 y M-5 del CCUSAC

Estos edificios actualmente denominados S-1 y M-5 están ubicados en la parte norte-oeste del campus central (CCUSAC), albergan a las Escuelas de

Trabajo Social e Historia y el otro a la Escuela de Ciencias Políticas, respectivamente.

Figura 42. **Ubicación de los edificios S-1 y M-5 dentro del CCUSAC**



Fuente: Google Earth.

Las coordenadas centrales de ambos edificios se muestran a continuación:

Tabla IV. **Coordenadas emplazamientos**

Coordenadas de:	Edificio S1	Edificio M5
Latitud	14 35 14.94 N	14 35 15.61 N
Longitud	90 32 56.96 O	90 33 0.88 O

Fuente: elaboración propia.

5.2. Estructura física actual de edificios S-1 y M-5 del CCUSAC

El edificio S-1 es de tres plantas, ocupa un espacio (a nivel de techo) de 50,45 Mts x 41,34 Mts, construido con estructura de concreto armado y losas prefabricadas también de concreto armado.

Figura 43. **Edificio S-1**



Fuente: campus central.

El edificio M-5 es de dos plantas, ocupa un espacio (a nivel de techo) de 50,23 Mts X 41,20 Mts, construido con estructura de concreto armado y losas prefabricadas también de concreto armado.

Figura 44. **Edificio M-5**



Fuente: campus central.

5.3. Servicios eléctricos existentes, historial y análisis de consumo de energía eléctrica

Los servicios eléctricos actualmente instalados y funcionando en ambos edificios son de tipo monofásico 120/240 voltios para el S1 y de tipo trifásico 120/208 voltios para el M-5, ambos con tarifa BTDFp (baja tensión, demanda máxima, fuera punta) e instalados conforme a normativas de la Empresa Eléctrica de Guatemala, S. A. (EEGSA).

Tabla V. **Servicios eléctricos**

Información EEGSA/Edificio	S-1	M-5
Núm. Correlativo	658569	658530
Núm. Contador actual	H – 78130	L – 95845
Tipo Voltaje suministrado	120/240 voltios Monofásico	120/208 voltios Trifásico
Tipo Tarifa aplicada	BTDfp	BTDfp

Fuente: elaboración propia.

Figura 45. **Banco de transformadores y contador edificio S-1**



Fuente: campus central.

Figura 46. **Banco de transformadores y contador edificio M-5**



Fuente: campus central.

A continuación se presenta el historial de consumo de energía eléctrica, obtenido de las facturas de los respectivos servicios, desde agosto 2012 hasta enero 2015, y sus respectivos promedios de los 30 meses de servicio, se hace la salvedad que anteriormente el edificio S-1 tenía el contador núm. H-13379.

Tabla VI. Consumo de energía edificios S-1, M-5

EDIFICIO	S-1	M-5
CONTADOR	H-78130	L-95 845
CORRELATIVO	658 569	658 30
ago-12	11160	8 0766 156
sep-12	9 080	7 850
oct-12	12 840	6 542
nov-12	11 040	5 551
dic-12	9 520	2 958
ene-12	5 360	6 080
feb-12	10 560	7 460
mar-13	12 320	5 192
abr-13	9200	7 270
mayo-13	12 400	6 158
jun-13	10 560	5 517
jul-13	9 440	7 004
ago-13	10 720	7 282
sep-13	10 800	7 519
oct-13	13 360	6 843
nov-13	11 360	6 622
dic-13	13 200	541
ene-14	0	6 199
feb-14	7 120	7 733
mar-14	12 560	6 557
abr-14	7 840	5 631
mayo-14	11 360	6 006
jun-14	11 760	5 037
jul-14	7 600	6 922
ago-14	12 880	7 317
sep-14	11 200	7 939
oct-14	12 560	6 904
nov-14	11 280	6 681
dic-14	11 280	256
ene-14	0	
PROMEDIO	9998,66667	6126,76667

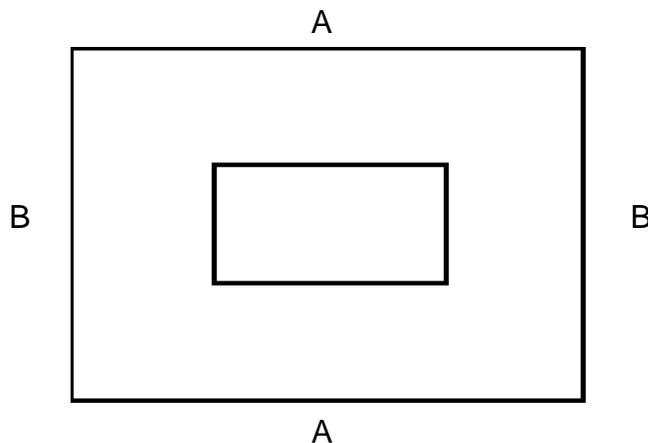
Fuente: elaboración propia.

Este historial determina con bastante exactitud la estimación de el diseño que más adelante se planteará para el SGESFR de cada edificio, se calculará con base en este promedio de 9 998,67 Kwh/mes para el edificio S-1 y de 6 126,77 Kwh/mes para el edificio M-5 y copia de las facturas que fundamentan toda esta información se encuentra en los anexos.

5.4. Áreas para paneles solares, equipos y cableados complementarios del SGESFR

El área para instalar los paneles del generador fotovoltaico del sistema de generación de energía solar fotovoltaico conectado a red de cada edificio será sobre su propio techo, cuyas áreas son bastante similares para ambos edificios S-1 y M-5, según se muestra en la gráfica siguiente:

Figura 47. Esquema sintetizado edificios S-1 y M-5



Fuente: elaboración propia.

Para calcular el área de techo disponible para instalación de paneles solares, equipos y cableados complementarios, se asume rectángulos aproximados para cada edificio y se calcula de la siguiente manera:

$$(A \times B) - (C \times D) = \text{Área (Mts}^2\text{)}$$

Para edificio S-1 (5,45 Mts x 41,34 Mts) – (21,81 Mts x 12,88 Mts) = 1 804,69 Mts².

Para edificio M-5 (50,23 Mts x 41,20 Mts) – (21,82 Mts x 12,82 Mts) = 1 789,75 Mts².

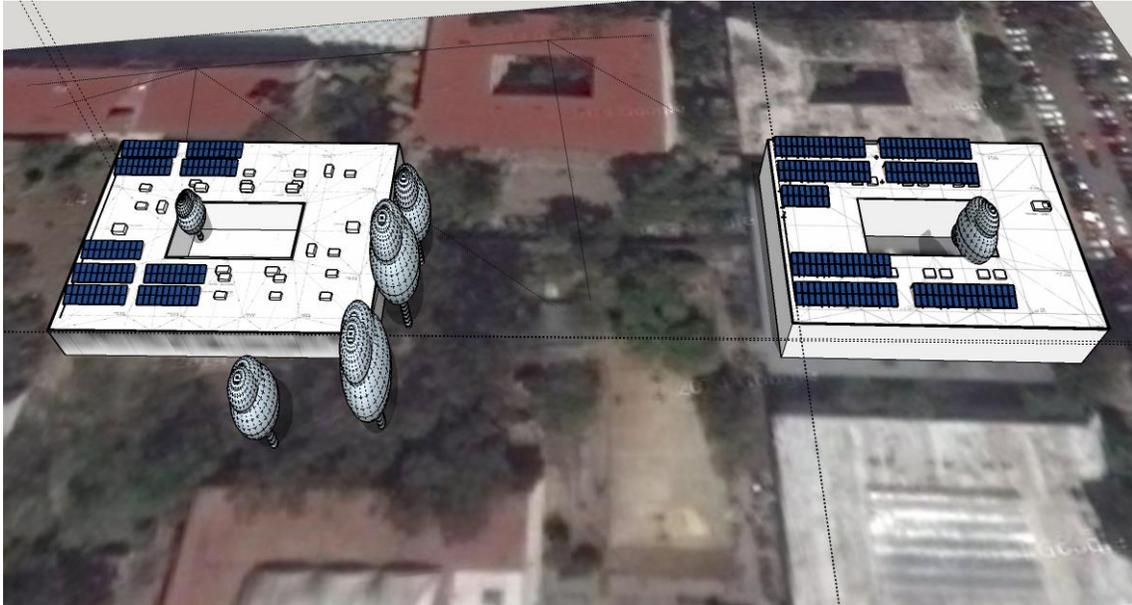
Con estas áreas disponibles, solo se tendrían que hacer algunos pequeños ajustes por aspectos de orientación de los paneles solares, dependiendo del tipo de panel y sus respectivas medidas, ya que la dirección de los muros de los edificios está levemente desviada de los ejes norte-sur, este-oeste y además, existen algunos tragaluces de tipo cenital.

En todo caso esta pérdida de espacio aprovechable por aspectos de orientación se considera que casi no afectará, debido a que se estima que se tendrá libre de paneles casi la mitad del área disponible.

En cuanto a la instalación de inversores se tiene disponible la misma terraza ya que existirá seguramente un área sobrante, igualmente los cableados irán instalados sobre la estructura soporte y debajo de los paneles para su respectiva protección de la intemperie.

Las protecciones en AC y DC no requieren mayor espacio e irán instaladas conforme a especificaciones del fabricante.

Figura 48. **Panorámica edificios S-1 y M-5 con SGESFR**



Fuente: campus central.

6. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICO DISTRIBUIDO CONECTADO A RED PARA AUTOCONSUMO DE CADA EDIFICIO

Con toda la información presentada previamente será muy práctico desarrollar paso a paso el diseño de SGESFR de cada edificio, iniciando por establecer previamente los criterios bajo los cuales se regirá, a sabiendas que siempre existirán variables no determinables como cambios climáticos fuera de estadísticas, catástrofes naturales, flujo de objetos voladores, entre otros.

6.1. Criterio general de diseño para los SGESFR

Para el diseño de estos SGESFR como para otros sistemas de energía solar fotovoltaico, se basa en determinados parámetros del emplazamiento, según lo descrito a continuación:

- Ubicación terráquea y condiciones meteorológicas del emplazamiento.
- Estimaciones de radiación solar esperadas y específicas para cada emplazamiento.
- Estimación de consumo de energía eléctrica mensual basado en un análisis histórico, de las mediciones tomadas y reportadas por la empresa distribuidora de energía según facturación.
- Orientación del SGESFR hacia el sur con 14,59 grados de elevación sobre el horizonte.

- Condiciones actuales de consumo sin considerar mayores variaciones de carga, solamente mediante eficiencia energética.
- Suposición o espera de no crecimiento de edificios u obstáculos aledaños que provoquen pérdida de generación fotovoltaica por sombra.
- Utilización como referencia criterio de 8 a 10 Mt² por 1 KW pico fotovoltaico.
- Disponibilidad de equipos en el mercado local.

Además de estos aspectos que determinan variabilidad de condiciones de diseño de un emplazamiento a otro, además de la necesidad de aproximación de algunos de los parámetros involucrados, implicando consecuentemente diversas posibilidades de diseño, se considera importante tomar en cuenta algunos otros aspectos que también servirán de base para el diseño del SGSFR de cada uno de estos edificios, conforme a lo siguiente:

- Para el análisis de consumo promedio de energía se tomarán en cuenta los datos históricos de potencia real por un período de 30 meses (agosto 2012 – enero 2015).
- Radiación estimada conforme a los datos publicados por la NASA para la ubicación de los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC. 4,89 Hrs/día.
- Proyección de carga estable para el tiempo de vida del SGSFR (25 años), reducible mediante eficiencia energética por lo menos en un 20 %.
- Tiempo de vida estimado del SGSFR por 25 años con una degradación máxima del 20 %, compensable mediante eficiencia energética.
- Conformación balanceada del generador fotovoltaico dentro de un rango de producción de energía que cubra el consumo propio de cada edificio (autoconsumo), con un pequeño rango de opción de crecimiento.
- Selección de paneles solares, equipos, cableados y dispositivos en general que tengan calidad reconocida, que estén disponibles fácilmente

en el mercado local y que tengan el soporte suficiente para su mantenimiento por el tiempo de vida del SGESFR.

- Selección de paneles solares con base en optimización de espacio en función de su eficiencia, equipos, cableados y dispositivos en general de precios accesibles y que cumplan al menos con las normas eléctricas americanas.
- Utilización de paneles policristalinos debido a razón precio vs eficiencia, disponibles en mercado, tomando en cuenta área disponible.
- Diferentes capacidades de paneles solares y de inversores para cada edificio a efecto de evidenciar opcionalidad en el diseño de cada SGESFR.
- Distribución de cadenas fotovoltaicas (*strings*) y capacidad de inversores que permitan incluir una cantidad de paneles e inversores, tal que no sacrifique la vulnerabilidad del sistema versus logística de pérdida de generación en caso de disminución o falla total en la entrega de energía un inversor.
- Reorientación de paneles solares conforme mejora del aprovechamiento de captación de la radiación solar, en función de pérdidas por obstáculos fijos, siempre con 14,59 grados de inclinación (elevación sobre el horizonte), así también para mejorar orden, estética y facilidad de mantenimiento.
- Opción de variabilidad de +/- 5 % en todos los parámetros involucrados en el diseño de los SGESFR.
- Con tarifa eléctrica BTDFp es conveniente diseñar cubriendo el 100 % del requerimiento de consumo eléctrico de potencia real, ya que el crédito a aplicar por la EEGSA no aplica a tarifa social, a consumo potencia reactiva ni a cargos fijos de servicio.
- En todo caso las cadenas fotovoltaicas (CF) deben presentar como mínimo estas condiciones:

- Suma de potencia máxima de todas las CF conectados a cada inversor debe estar por debajo de la potencia máxima DC de entrada de los inversores.
- Equilibrio de producción energía fotovoltaica con resto de CF.
- Suma de voltajes Voc de los paneles solares esta debe estar sobre el voltaje de arranque del inversor y debajo del voltaje máximo en DC permitido por el inversor.
- Corriente resultante de las cadenas fotovoltaicas no debe superar la admisible por el inversor.

6.2. Diseño para el SGESFR para el edificio S-1

El edificio S-1 se sabe que es de tres niveles, que está construido con estructura de concreto armado y losas de concreto, un área disponible de terraza de 1 804,69 Mts², con un servicio eléctrico tipo monofásico 120/240 V y con un promedio de consumo de potencia real mensual de 9 998,67 KWh.

6.2.1. Capacidad de generación requerida

La generación mensual requerida para este SGESFR corresponde al promedio mensual de consumo de energía eléctrica, en potencia real, que es de 9 998,67 KWh, ya que el SGSFR básicamente solo producirá energía en potencia real para su autoconsumo.

Si se tiene que producir 9 998,67 KWh al mes, se estima la producción diaria así:

$$9\ 998,67\ \text{KWh}/30\ \text{días} = 333,289\ \text{KWh/día}$$

Luego, bajo el criterio de 4,893 horas de radiación solar productiva, se tendrá que instalar un generador fotovoltaico (GF) con la siguiente capacidad:

$$(333,289 \text{ KWh/día})/4,893 \text{ hrs/día} = 68,115 \text{ KWh}$$

6.2.2. Paneles solares

Con base en criterio establecido se propone el panel solar con celdas policristalinas, marca Perlight Solar, modelo PLM-300P-72, con las siguientes características eléctricas:

Tabla VII. **Características panel solar Perlight Solar, PLM-300P-72**

CARÁCTERÍSTICAS PANEL SOLAR PERLIGHT SOLAR, PLM-300P-72	
Potencia máxima (Pm)	300 W
Voltaje máxima potencia (Vmp)	38,08 V
Corriente máxima potencia (Imp)	7,88 A
Voltaje circuito abierto (Voc)	45,10 V
Corriente corto circuito (Isc)	8,49 A
Maximo voltaje de sistema	1 000 VDC

Fuente: elaboración propia.

Bajo el criterio de instalar este panel solar con capacidad de 300 W, se necesitaría:

$$68,115 \text{ W}/300 \text{ W/panel} = 227,05 \text{ paneles}$$

El paso siguiente consiste en hacer un estudio de sombras y otros obstáculos que afecten la recepción de la radiación solar a los paneles, a efecto de estimar el porcentaje de pérdidas de radiación solar permanente.

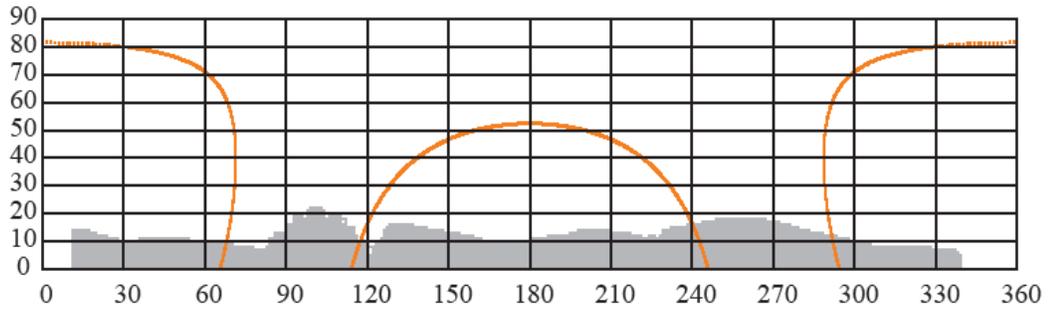
Se tomó una foto panorámica 360 grados para presentación de sombras del edificio S-1 y se realizó estudio de sombras mediante programa Solmetric, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 49. **Panoramica obstáculos edificio S-1**



Fuente: campus central.

Figura 50. Estudio de sombras para el edificio S-1



	Solar Energy Actual Tilt: 14 Actual Az:180 No Shade kWh/m sq/day	Solar Energy Actual Tilt: 14 Actual Az:180 Shade kWh/m sq/day	Shade Derating % Captured
January	5.2	5.1	98 %
February	6.1	6.0	97 %
March	6.8	6.7	98 %
April	7.1	7.1	99 %
May	6.9	6.9	100 %
June	6.8	6.7	100 %
July	6.8	6.8	100 %
August	7.1	7.0	99 %
September	7.0	6.9	99 %
October	6.4	6.2	97 %
November	5.6	5.5	98 %
December	5.1	5.0	98 %
Total Annual	6.4	6.3	99 %

Fuente: elaboración propia, con programa Solmetric.

En esta última tabla se observa que el promedio del aprovechamiento de la radiación solar por reducción de sombras (*shade derating*) real es de 98,6 % y se presentó con un aproximado del 99 %.

Si se toma en cuenta el porcentaje de pérdida por sombras calculado que es del 1,4 %, se tendría que compensar la producción de energía aplicando la fórmula:

$$227,05/0,986 = 230,24 \text{ paneles solares}$$

Como parte del diseño más adelante será necesario hacer una adecuación y balanceo del sistema paneles-inversores, dependiendo de la capacidad y cantidad de inversores que se determine utilizar para el diseño.

Esta parte de las estructuras de soporte se trasladó más adelante ahora como 6,2,5 y se corren las demás.

Sin embargo, si se observa bien la gráfica de la sombra proyectada al SGESFR de este edificio en los primeros 10° de elevación del Sol (lado este), casi siempre existe bloqueo de la radiación solar, por lo que se considera, en este caso, oportuno reorientar levemente ($7,5^{\circ}$) hacia el oeste, donde el bloqueo es mucho menor al final del día solar, a efecto de:

- Alinear ejes físicos de la estructura soporte y cadenas fotovoltaicas con la estructura del edificio mejorando estética, aprovechamiento de área de terraza y facilidad de mantenimiento.
- Mejoría en la captación de radiación solar y compensar parcialmente las pérdidas provocadas por sombra, en la primera etapa.

6.2.3. Inversores DC/AC

Conforme a la cantidad de paneles solares requeridos para la capacidad de generación establecida de 68,115 KWh, se puede configurar el sistema SGESFR proponiendo el inversor marca Goodwe, modelo GW-4600-DS monofasico, cuyas características básicas son:

Tabla VIII. **Características inversor Goodwe, GW-4600-DS**

CARACTERÍSTICAS INVERSOR GOODWE, GW-4600-DS	
PARÁMETROS ENTRADA	
Potencia máxima DC	5 400 W
Máximo voltaje DC	580 V
Rango voltaje MPPT	125-500 V
Voltaje de arranque	125 V
Corriente máxima DC	15/15 A
PARÁMETROS SALIDA	
Potencia nominal AC	4 600 W
Potencia máxima AC	5 100 W
Corriente máxima AC	25 A
Salida nominal AC	50/60 Hz; 230 VAC
Rango de salida AC	45-55 Hz 55-65 Hz; 180-270 V
EFICIENCIA	
Máxima eficiencia	97,8 %
Adaptación eficiencia MPPT	99,5 %

Fuente: elaboración propia.

Entonces, se divide el requerimiento original del SGESFR entre la capacidad del inversor y da:

$$68,115 / 4\,600 = 14,81 \text{ inversores}$$

Por lo que se requieren:

15 inversores de 4 600 W con una eficiencia máxima limitada al 97,8 %.

Es importante notar que este inversor tiene la opción de realizar la conexión del GF a sus entradas MPPT, lo cual posibilita el aumento de su

eficiencia. Para efectos del estudio se dejará la utilización del MPPT como una opción para mejorar la eficiencia del SGESFR.

6.2.4. Adecuación y balanceo del diseño del SGESFR

Este valor de eficiencia del inversor reduce la capacidad de generación del sistema, obligando a aumentar la cantidad de paneles solares en proporción similar, por lo que se hace el siguiente cálculo:

$$230,24 \text{ paneles} / 0,978 \text{ de eficiencia: } 235,45 \text{ paneles}$$

Se divide esta cantidad de paneles solares entre la cantidad de inversores y se obtiene:

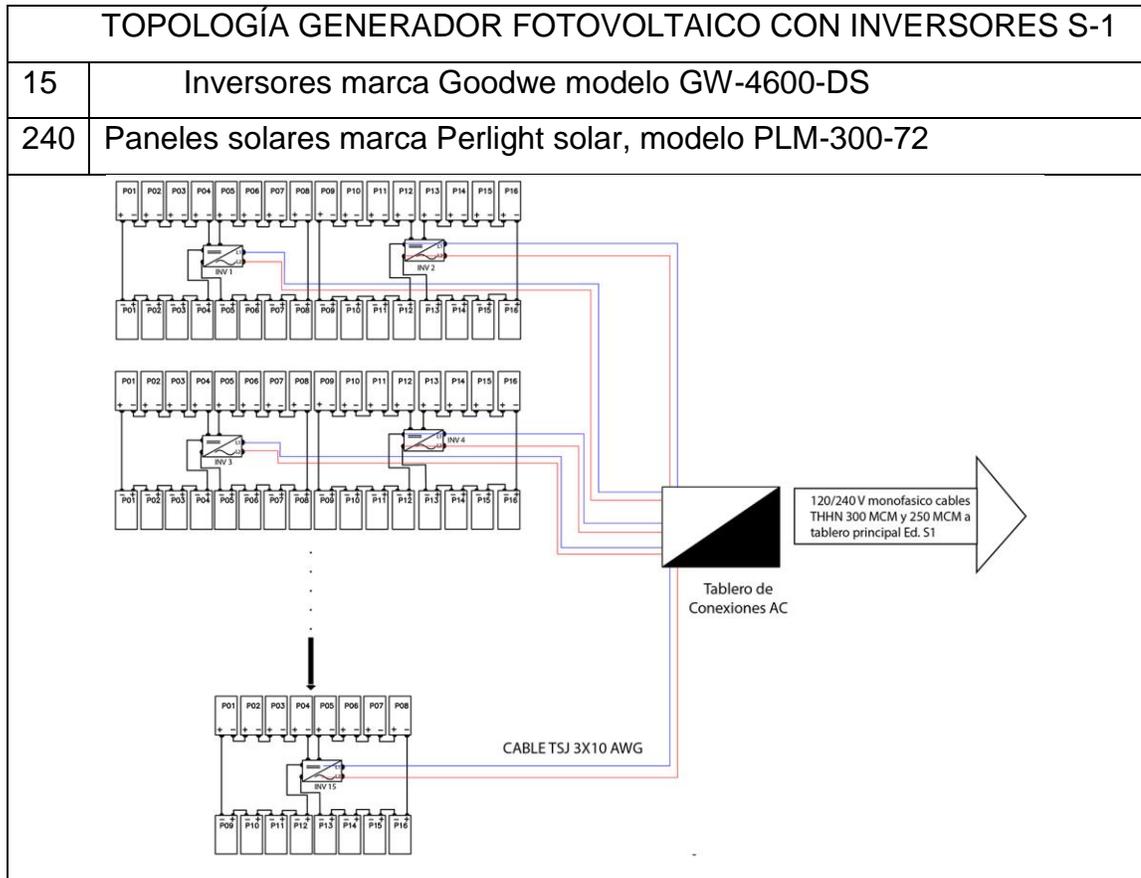
$$235,45 / 15 \text{ inversores} = 15,70 \text{ paneles/inversor}$$

Este inversor da la opción de 2 cadenas fotovoltaicas CF (*strings*), lo que nos daría:

$$15,70 \text{ paneles} / 2 \text{ CF} = 7,85 \text{ paneles por CF}$$

Si se aplica criterio de variabilidad de +/- 5 %, se podrían instalar entre 7,46 y 8,24 paneles por CF, razón por la que se opta por 8 paneles por CF, es decir 16 paneles por inversor, y como son 15 inversores quedaría finalmente el diseño con el siguiente equipo:

Tabla IX. **Topología generador fotovoltaico con inversores S-1**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio.

Con 240 paneles, el 1,4 % de pérdidas por sombra, 97,8 % de eficiencia máxima en el inversor, el SGESFR del edificio S-1 estaría en capacidad de producir hasta un máximo de 69,43 Kw, por 4,893 hrs de radiación solar efectivas, se tendrían 339,72 Kwh por día y multiplicando por 30 días se tendría un máximo de 10 191,63 Kwh mensuales.

De esta manera se observa que queda cubierto y superado el requerimiento promedio de 9 998,67 Kwh al mes por un 1,93 %, lo cual queda

muy bien dentro del criterio del 5 % máximo de variabilidad establecido y por el tipo de tarifa de cobro de EEGSA.

6.2.5. Estructura de soporte (ES)

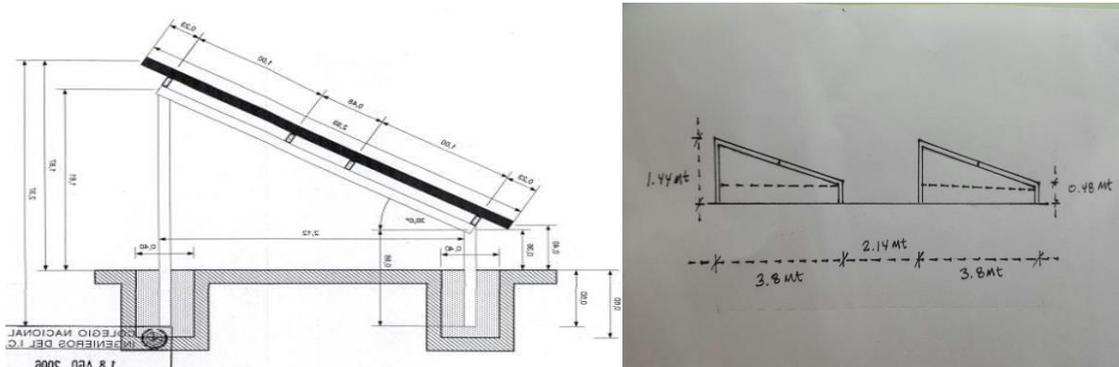
Tomando como referencia el criterio de que se utiliza un promedio de 8-10 Mt^2 por KWp a instalar, para la instalación de los 240 paneles con 15 inversores de 4 600 W se tendría un requerimiento de area de 720 Mt^2 , lo cual queda bastante sobrado respecto al área disponible que es de 1 804,69 Mt^2 , quedando mas de 1 000 Mt^2 libres, incluyendo pasillos de mantenimiento.

La estructura de soporte será con perfiles de aluminio elevando la plataforma base horizontal una altura de 0,48 Mts para que los tragaluces cenitales no provoquen obstáculo, se construirá para soportar el conjunto de paneles de dos inversores con estructura incluida para montaje de inversores. La separación mínima por estructura de soporte será 2,14 Mts para evitar autosombras muy por encima del cálculo de 0,90 Mts y para efectos de mantenimiento.

La estructura de soporte a instalar está en capacidad de soportar las condiciones atmosféricas a que está expuesto el emplazamiento, con niveles de humedad superiores al 90 %, rangos de temperatura entre -10 y 50 grados centígrados, resistencia a los vientos superiores a 60 Km/h, anclaje con zapatas, pernos e impermeabilización.

A continuación se presenta el modelo de la ES acompañada de las medidas con que quedarán instaladas, además de la distancia libre ente las estructuras para efectos de mantenimiento.

Figura 51. **Detalle gráfico de la estructura SGESFR edificio S-1**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

6.2.6. **Cableados, conexiones, diagramas y ductos**

El cableado en DC de cualquier SGESFR que se consiste en la conexión eléctrica de los paneles con el inversor correspondiente y debe ser realizado con materiales de alta calidad para que se asegure la durabilidad y la fiabilidad del sistema a la intemperie, con grado de protección NEMA 3.

En este caso en particular y debido al diseño solamente se utilizarán los cables que ya traen de fábrica los paneles solares (4 mm), intercalándolos en sus conexiones para formar un anillo cerrado entre las conexiones de los paneles. Esto no solo evita agregar cableados, terminales y conexiones, sino que aumenta la seguridad de la instalación y economiza materiales. Además, deberán ir instalados diodos en derivación para protección contra corrientes inversas.

Figura 52. Parte posterior panel solar 300 w mostrando caja de conexiones y cables de cc



Fuente: Bodegas Sistemas Solares S. A.

En cualquier caso los cables en DC irán por debajo de los paneles solares para mayor protección a la intemperie, su sujeción a la estructura serán bridas especiales y en intervalos que permitan que el cable no sufra esfuerzos físicos innecesarios ni corrimientos de escorrentías de agua que infiltran humedad en los equipos.

Para el cableado AC se instalará acorde a su capacidad de corriente sin mayores complicaciones, ya que su longitud máxima será siempre menor a los 70 Mts y se protegerá con ductería adecuada conforme a normas NEMA.

Para el cable AC de cada inversor al tablero de conexiones, se debe calcular la corriente, con el siguiente procedimiento:

16 paneles fotovoltaicos de 300 w dan un total de:

$$P = 16 \times 300 \text{ W} = 4\,800 \text{ W}$$

Menos las pérdidas por sombra y por eficiencia del inversor da una potencia final

$$P_f = 4\,800(98)(978) = 4\,600,51$$

Esta potencia dividida entre el voltaje 240 VAC da una corriente de:

$$4\,600,51 \text{ W} / 240\text{V} = 19,17 \text{ amperios AC}$$

Esto quiere decir que con un cable AWG 12 THHN, se estaría sobrados en capacidad, pero por para compensar posibles pérdidas en la distancia de aproximadamente 40 Mts al tablero de conexiones se le estaría instalando un cable AWG 10 THHN en versión TSJ 3x10.

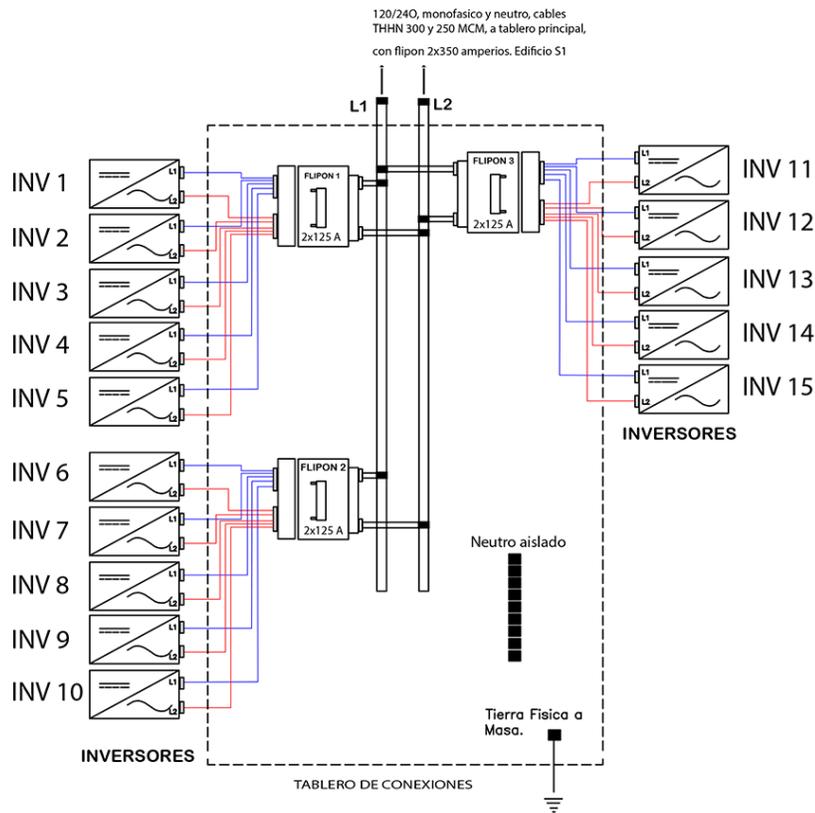
En el tablero de conexiones se acumularán las potencias y corrientes de los 15 inversores, razón por la que se estaría manejando una corriente de 15 veces la que maneja cada inversor:

$$15 \times 19,17 \text{ Amps} = 287,53 \text{ Amps}$$

Este cable estaría instalado en ducteria tipo canaleta metalica desde el tablero de conexiones hasta el dispositivo de ingreso y protección para el tablero principal del edificio S-1, en una longitud menor a 20 Mts, razón por la que se estaría instalando un cable de 300 MCM, para fases y AWG 250 MCM para neutro.

El ducto a utilizar es el propio ducto de servicio del edificio, ya que dentro de el se encuentra el tablero de distribución del servicio eléctrico correspondiente.

Figura 53. **Diagrama conexiones inversores a tablero de conexiones S-1**



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

6.2.7. Protección eléctrica para el SGESFR

La protección eléctrica de un SGESFR ocupa dos sectores de manejo de corrientes muy importantes, desde los paneles solares a los inversores en DC y desde los inversores hasta los tableros de distribución en AC.

6.2.7.1. Protección de voltajes y corrientes (AC/DC)

Las protecciones de estos dos sectores AC y DC se diferencian en que en la corriente alterna existe un paso natural de la corriente por el cero en cada semiperíodo, al cual corresponde un apagado espontáneo del arco que se forma cuando se abre el circuito; sin embargo, en la corriente continua esto no se presenta, requiriéndose que para extinguir el arco, es necesario que la corriente se reduzca hasta desaparecer por completo, siendo necesario que la interrupción se realice gradualmente, sin cambios bruscos de la corriente, ya que de lo contrario se darían lugar a elevadas sobretensiones.

En la parte de DC se instalará protección contra las sobre intensidades a cada una de las cadenas fotovoltaicas, abriendo el circuito en caso de producirse una corriente que supere la admisible por los paneles e inversores. Ambos cableados, tanto el de polaridad positiva como el de polaridad negativa llevarán un fusible de idénticas características.

La mayoría de fabricantes de paneles solares incluyen ya dentro de la caja su conexiones estos fusibles de protección.

Además de esta protección se debe instalar un interruptor de corriente DC para independizar en cualquier momento, al inversor de las cadenas fotovoltaicas correspondientes, los cuales ya están incluidos en el inversor propuesto.

Para la protección de voltajes y corrientes en el sector de AC, que corresponden desde la salida del inversor hasta el tablero de distribución del servicio eléctrico del edificio, es importante cumplir con los requisitos de

conexión de la EEGSA, sin dejar de incluir la protección para frecuencia, dentro de los rangos de tolerancia (59- 61Hz) así como de tensión (1,1 y 0,85 Vm, respectivamente), ambas ya previstas en el inversor a través de un interruptor accionado por el sistema de monitoreo.

Se instalará un interruptor general de tipo magnetotérmico, con intensidad de cortocircuito superior a la indicada por la EEGSA y de corte de 6 KA, para el punto de conexión, ubicado en conjunto con el tablero de distribución general del edificio y su capacidad será acorde a la capacidad máxima del SGEFR.

En el tablero de conexiones se instalarán protecciones para cada uno de los 3 grupos de 5 inversores que se conformarán, cada grupo estará sumando una corriente de:

$$5 \times 20 \text{ Amps} = 100 \text{ Amps}$$

La protección será con *breakers* de 2x125 Amperios

Ahora bien, para el ingreso de la energía generada al tablero principal del edificio se instalará un *breaker* de 2x350 amperios.

Finalmente se instalarán un interruptor automático diferencial y un fusible en función de la velocidad de actuación de este último con respecto al interruptor magnetotérmico.

6.2.7.2. Protección contra descargas electroatmosféricas

Para la protección contra descargas electroatmosféricas se instalará un sistema de tierra física y para las sobretensiones provocadas por estas descargas normalmente se instalan dispositivos de varistores como protectores

de transientes y picos de voltaje en el tablero de distribución, los cuales ya están instalados en los tableros de distribución actuales del edificio.

Como complemento para la protección contra descargas electroatmosféricas, se deberá instalar un sistema de tierra independiente para el sector de DC y por supuesto el sector de la energía en AC deberá ir puesto a tierra conforme a las normas de la EEGSA.

6.2.7.3. Puesta a tierra

Como se menciona en el párrafo anterior se instalará un sistema de tierra independiente para el sector de DC, a efecto que no transmita ninguna alteración a la red de distribución, de esta forma quedará puesta a tierra propiamente el generador fotovoltaico.

Para la parte de AC la puesta a tierra será por medio de un transformador de aislamiento galvánico cualquier otro medio que cumpla las mismas funciones.

Ahora bien, según la normativa, el equipo inversor utilizado en la instalación puede incorporar alguna de estas protecciones, por lo que solo se precisará disponer adicionalmente de las protecciones general manual e interruptor automático diferencial. El inversor seleccionado para esta instalación, incorpora las funciones de protección de máxima y mínima tensión y de máxima y mínima frecuencia; además este inversor posee separación galvánica entre la red de distribución de baja tensión y las instalaciones fotovoltaicas exigida por la normativa.

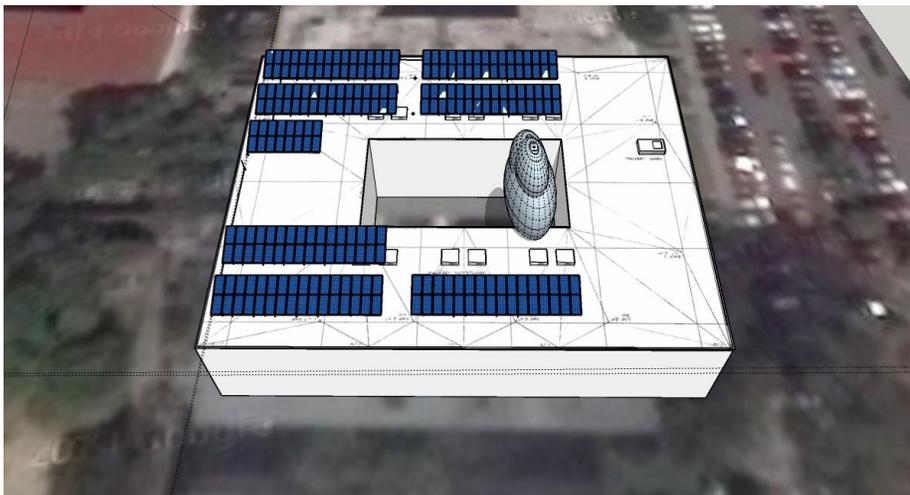
6.2.8. Contador bidireccional

Este será suministrado por la EEGSA y estará en capacidad de medir tanto el flujo de corriente tomado como inyectado a la red.

6.2.9. Instalación y ubicación física de componentes del SGESFR

El conjunto de paneles solares fotovoltaicos, cableados e inversores irán montados en la estructura de soporte, según se observa en la siguiente figura:

Figura 54. **Instalación y ubicación física SGESFR edificio S-1**



Fuente: elaboración propia, con programa Skecth Up.

El cableado en AC desde la salida de los inversores hasta tablero protecciones irán, la parte sobre la terraza en tubería metálica y a través del ducto de servicio del edificio, en donde también irán instalados los tableros con las protecciones de AC.

6.3. Diseño para el SGESFR del edificio M-5

El edificio M-5 se sabe que es de dos niveles, que está construido con estructura de concreto armado y losas de concreto, un área disponible de terraza de 1 789,75 Mts² Aprox, con un servicio eléctrico tipo trifásico 120/208 voltios y con un promedio de consumo de potencia real mensual de 6 126,77 KWh.

6.3.1. Capacidad de generación requerida

La generación mensual requerida para este SGESFR corresponde al promedio mensual de consumo de energía eléctrica, en potencia real, que es de 6 126,77 KWh, ya que el SGSFR básicamente solo producirá energía en potencia real para su autoconsumo.

Si se tiene que producir 6 126,77 KWh al mes, se estima la producción diaria así:

$$6\ 126,77\ \text{KWh}/30\ \text{días} = 204,226\ \text{KWh/día}$$

Luego, bajo el criterio de 4,893 horas de radiación solar productiva, se tendría que instalar un generador fotovoltaico (GF) con la siguiente capacidad:

$$(204,226\ \text{KWh/día})/4,893\ \text{hrs/día} = 41,738\ \text{KWh}$$

6.3.2. Paneles solares

Con base en el criterio establecido se propone el panel solar con celdas policristalinas, marca Perlight Solar, modelo PLM-250P-60, con las siguientes características eléctricas:

Tabla X. **Características panel solar PERLIGHT SOLAR PLM250P60**

CARACTERÍSTICAS PANEL SOLAR PERLIGHT SOLAR PLM-250P-60	
Potencia máxima (Pm)	250 W
Voltaje máxima potencia (Vmp)	31,73 V
Corriente máxima potencia (Imp)	7,88 A
Voltaje circuito abierto (Voc)	37,58 V
Corriente corto circuito (Isc)	8,49 A
Maximo voltaje de sistema	1000 VDC

Fuente: elaboración propia.

Bajo el criterio de instalar este panel solar con capacidad de 250 W, se necesitaría:

$$41\,738\text{ W}/250\text{ W/panel} = 166,953\text{ paneles}$$

El paso siguiente consiste en hacer un estudio de sombras y otros obstáculos que afecten la recepción de la radiación solar a los paneles, a efecto de estimar el porcentaje de pérdidas de radiación solar permanente.

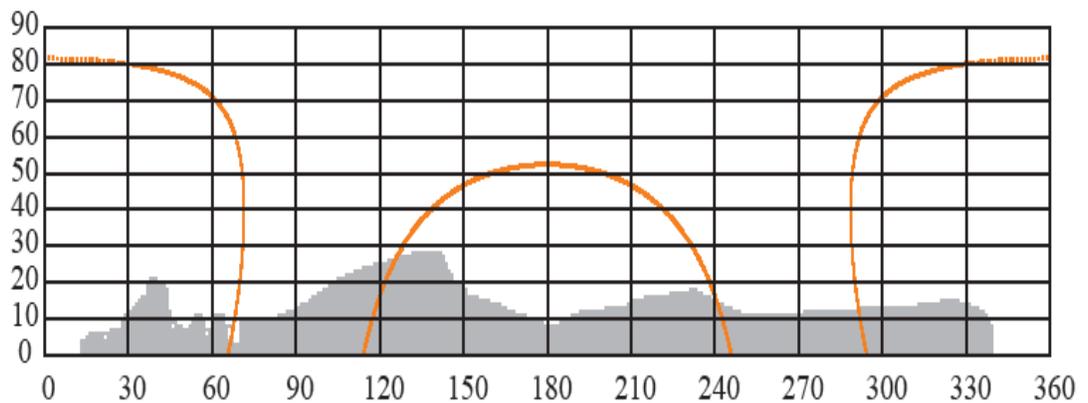
Se tomó una foto panorámica 360 grados para presentación de sombras del edificio M-5 y se realizó estudio de sombras mediante programa Solmetric, obteniendo los siguientes resultados:

Figura 55. **Panoramica obstáculos edificio M-5**



Fuente: elaboración propia, con programa Solmetric.

Tabla XI. **Estudio de sombras para el edificio M-5**



Continuación de la tabla XI.

	Solar Energy Actual Tilt: 14 Actual Az: 180 No Shade kWh/m sq/day	Solar Energy Actual Tilt: 14 Actual Az: 180 Shade kWh/m sq/day	Shade Derating % Captured
January	5,2	4,9	95 %
February	6,1	5,9	97 %
March	6,8	6,8	99 %
April	7,1	7,1	100 %
May	6,9	6,9	100 %
June	6,8	6,7	100 %
July	6,8	6,8	99 %
August	7,1	7,0	99 %
September	7,0	7,0	98 %
October	6,4	6,3	96 %
November	5,6	5,3	94 %
Total Annual	5,1	4,8	94 %
	6,4	6,3	98 %

Fuente: elaboración propia, con programa Solmetric.

En esta última tabla se observa que el promedio del aprovechamiento de la radiación solar por reducción de sombras (*shade derating*) real es de 98 %.

Si se toma en cuenta el porcentaje de pérdida por sombras calculado que es del 2 %, se tendría que compensar la producción de energía aplicando la fórmula:

$$166,953/0,98 = 170,36 \text{ paneles solares}$$

Como parte del diseño más adelante será necesario hacer una adecuación y balanceo del sistema paneles-inversores, dependiendo de la capacidad y cantidad de inversores que se determine utilizar para el diseño.

Esta parte de las estructuras de soporte se trasladó más adelante ahora como 6.2.5 y se corren las demás).

Sin embargo, si se observa bien la gráfica de la sombra proyectada al SGESFR de este edificio en los primeros 10° de elevación del Sol (lado este), casi siempre existe bloqueo de la radiación solar, por lo que se considera, en este caso, oportuno reorientar levemente ($7,5^{\circ}$) hacia el oeste, donde el bloqueo es mucho menor al final del día solar, a efecto de:

- Alinear ejes físicos de la estructura soporte y cadenas fotovoltaicas con la estructura del edificio mejorando estética, aprovechamiento de área de terraza y facilidad de mantenimiento.
- Mejoría en la captación de radiación solar y compensar parcialmente las pérdidas provocadas por sombra, en la primera etapa.

6.3.3. Inversores DC/AC

Conforme a la cantidad de paneles solares requeridos para la capacidad de generación establecida de 41,738 KWh, se configura el sistema SGESFR proponiendo el mismo inversor marca Goodwe, modelo GW-4600-DS monofasico, cuyas características son:

Tabla XII. **Características inversor GOODWE, GW-4600-DS**

CARÁCTERÍSTICAS INVERSOR MARCA GOODWE MODELO GW-4600-DS	
PARÁMETROS ENTRADA	
Potencia máxima DC	5 400 W
Máximo voltaje DC	580 V
Rango voltaje MPPT	125-500 V
Voltaje de arranque	125 V
Corriente máxima DC	15/15 A
PARÁMETROS SALIDA	
Potencia nominal AC	4 600 W
Potencia máxima AC	5 100 W
Corriente máxima AC	25 A
Salida nominal AC	50/60 Hz; 230 VAC
Rango de salida AC	45-55 Hz; 55-65 Hz; 180-270 V
EFICIENCIA	
Máxima eficiencia	9,8 %
Adaptacion eficiencia MPPT	99,5 %

Fuente: elaboración propia.

Entonces, se divide el requerimiento original del SGESFR entre la capacidad del inversor y da:

$$41\,738 / 4\,600 = 9,07 \text{ inversores}$$

Por lo que se requieren:

9 inversores de 4 600 W con una eficiencia máxima limitada al 97,8 %.

Es importante notar que este inversor es monofásico pero se conforman grupos de 3 inversores para generar energía trifásica y también tiene la opción

de realizar la conexión del GF a sus entradas MPPT, lo cual posibilita el aumento de su eficiencia. Para efectos de presente estudio se dejará la utilización del MPPT como una opción para mejorar la eficiencia del SGESFR.

6.3.4. Adecuación y balanceo del diseño del SGESFR

Este valor de eficiencia del inversor reduce la capacidad de generación del sistema, obligando a aumentar la cantidad de paneles solares en proporción similar, por lo que se hace el siguiente cálculo:

$$170,36 \text{ paneles} / 0,978 \text{ de eficiencia: } 174,19 \text{ paneles}$$

Se divide esta cantidad de paneles solares entre la cantidad de inversores y se obtiene:

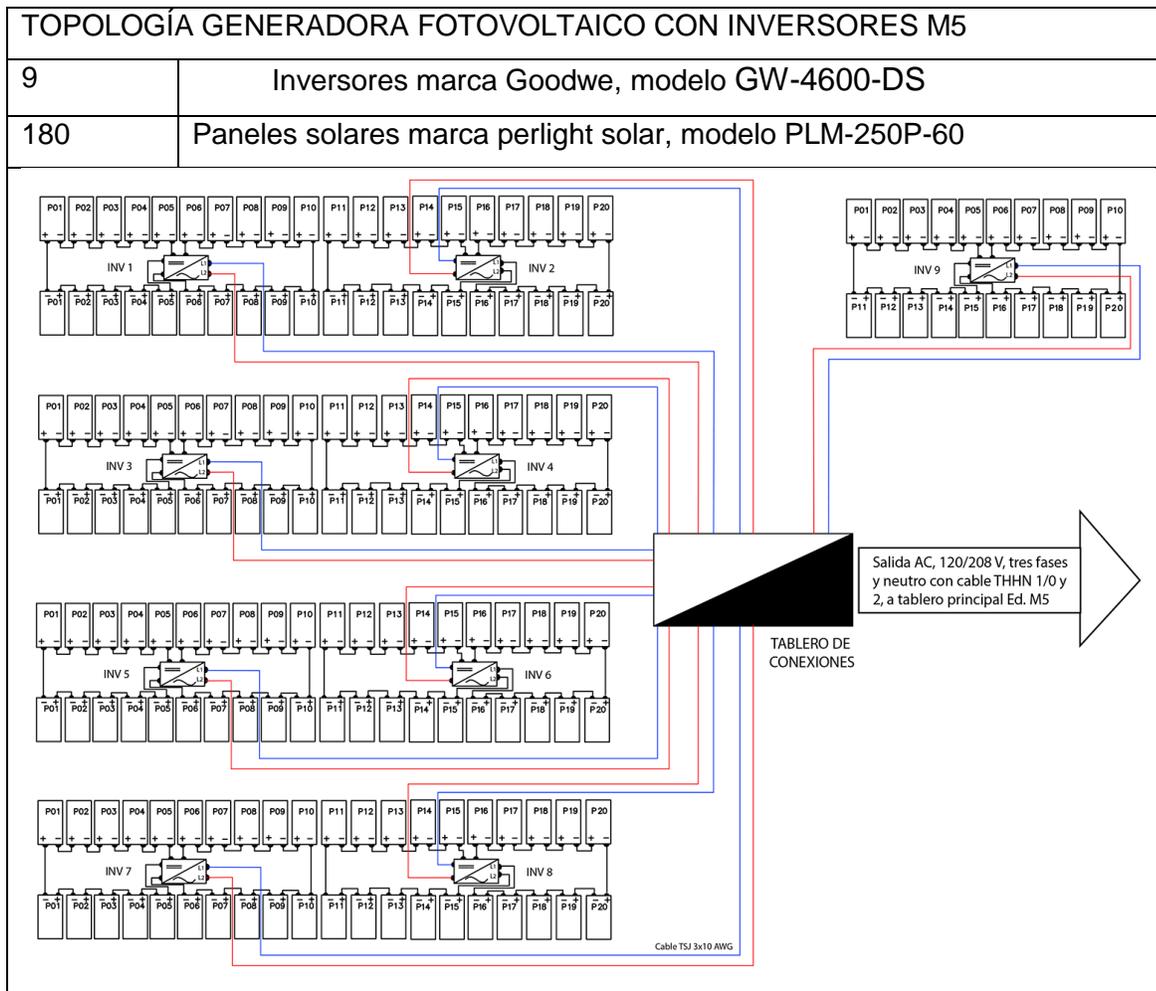
$$174,19 \text{ paneles} / 9 \text{ inversores} = 19,35 \text{ paneles/inversor}$$

Este inversor da la opción de 2 cadenas fotovoltaicas (*strings*), lo que daría:

$$19,35 \text{ paneles} / 2 \text{ CF} = 9,68 \text{ paneles por CF}$$

Si se aplica la variabilidad de +/- 5 %, se podría variar de 9,20 paneles a 10,16 paneles por CF, razón por la que se opta por 10 paneles por CF, es decir 20 paneles por inversor, y como son 9 inversores, quedando finalmente el diseño con el siguiente equipo:

Tabla XIII. **Topología generadora fotovoltaico con inversores M-5**



Fuente: elaboracion propia, con programa de AutoCAD.

Con 180 paneles, el 2 % de pérdidas por sombra, 97,8 % de eficiencia máxima en el inductor, el SGESFR del edificio S-1 estaría en capacidad de producir hasta un máximo de 43,129 KW, por 4,893 hrs de radiación solar efectivas, se tendría 211,03 KWh por día y multiplicando por 30 días se tendría un máximo de 6 331,02 Kwh mensuales.

De esta manera se observa que queda cubierto y superado el requerimiento promedio de 6 126,77 Kwh al mes por un 3,3 %, lo cual queda muy bien dentro del criterio del 5 % máximo de variabilidad establecido y por el tipo de tarifa de cobro de EEGSA.

6.3.5. Estructura de soporte (ES)

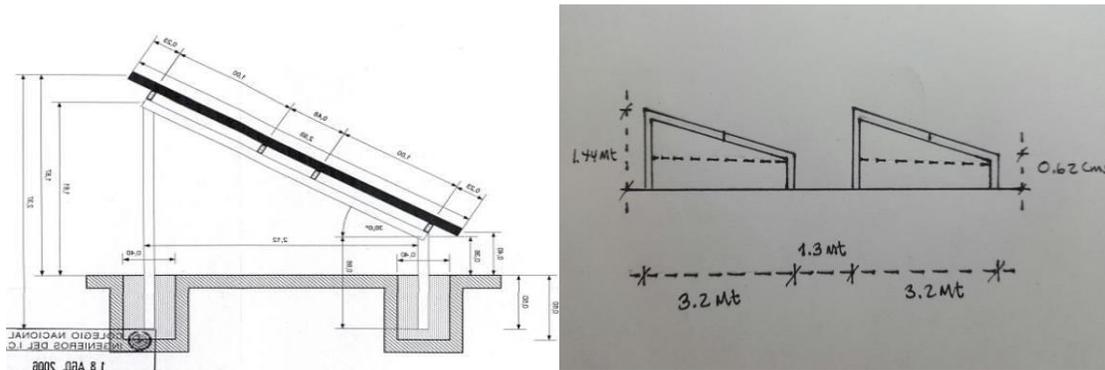
Tomando como referencia el criterio de que se utiliza un promedio de 8-10 Mt² por KWp a instalar, para la instalación de los 176 paneles con 4 inversores de 12 600 W se tendría un requerimiento de área de 720 Mt², lo cual queda bastante sobrado respecto al área disponible que es de 1 789,75 Mt², quedando más de 1 000 Mt² libres, incluyendo pasillos de mantenimiento.

La estructura de soporte será con perfiles de aluminio elevando la plataforma base horizontal una altura de 0,62 Mts para que los tragaluces cenitales no provoquen obstáculo, se construirá para soportar el conjunto de paneles de dos inversores con estructura incluida para montaje de inversores. La separación mínima por estructura de soporte será 1,30 Mts para evitar autosombras muy por encima del cálculo de 0,90 Mts y para efectos de mantenimiento.

La estructura de soporte a instalar está en capacidad de soportar las condiciones atmosféricas a que está expuesto el emplazamiento, con niveles de humedad superiores al 90 %, rangos de temperatura entre -10 y 50 grados centígrados, resistencia a los vientos superiores a 60 Km/h, anclaje con zapatas, pernos e impermeabilización.

A continuación se presenta el modelo de la ES acompañada de las medidas con que quedarán instaladas, además de la distancia libre ente las estructuras para efectos de mantenimiento.

Figura 56. **Detalle gráfico de la estructura SGESFR edificio M-5**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

6.3.6. **Cableados, conexiones, diagramas y ductos**

El cableado en DC de cualquier SGESFR que se consiste en la conexión eléctrica de los paneles con el inversor correspondiente y debe ser realizado con materiales de alta calidad para que se asegure la durabilidad y la fiabilidad del sistema a la intemperie, con grado de protección NEMA 3.

En este caso en particular y debido al diseño solamente se utilizarán los cables que ya traen de fabrica los paneles solares (4 mm), intercalándolos en sus conexiones para formar un anillo cerrado entre las conexiones de los paneles. Esto no solo evita agregar cableados, terminales y conexiones, sino que aumenta la seguridad de la instalación y economiza materiales. Además

deberán ir instalados diodos en derivación para protección contra corrientes inversas.

Figura 57. Panel Solar PLM-250P-60 de 250 W



Fuente: Sistemas Solares, S.A.

En cualquier caso los cables en DC irán por debajo de los paneles solares para mayor protección a la intemperie, su sujeción a la estructura será bridas especiales y en intervalos que permitan que el cable no sufra esfuerzos físicos innecesarios ni corrimientos de escorrentías de agua que puedan infiltrar humedad en los equipos.

Para el cableado AC se instalará acorde a su capacidad de corriente sin mayores complicaciones, ya que su longitud máxima será siempre menor a los 70 Mts y se protegerá con ductería adecuada conforme a normas NEMA.

Para el cable AC de cada inversor al tablero de conexiones, se debe calcular la corriente, con el siguiente procedimiento:

20 paneles fotovoltaicos de 250 w dan un total de:

$$P = 20 \times 250 \text{ W} = 5\,000 \text{ W}$$

Menos las pérdidas por sombra y por eficiencia del inversor da una potencia final

$$P_f = 5\,000(98)(978) = 4\,792,20$$

Se calcula la corriente para un sistema trifásico 120/208 VAC con la siguiente expresión:

$$P = \sqrt{3}VI \cos \Theta, \text{ de donde se deduce que } I = P / (\sqrt{3} V \cos \Theta), \text{ donde } \Theta \text{ es } 0$$

Se obtiene:

$$I = 4\,792,20 / \{(1,73)(208)\} = 13,32 \text{ A}$$

Esto quiere decir que con un cable AWG 12 THHN, se estaría sobrados en capacidad pero por para compensar posibles pérdidas en la distancia máxima de aproximadamente 30 Mts al tablero de conexiones se le estaría instalando un cable AWG 10 THHN en versión TSJ 3x10.

En el tablero de conexiones se acumularán las potencias y corrientes de los 9 inversores, razón por la que a la salida del inversor se estaría manejando una corriente de 9 veces la que maneja cada inversor:

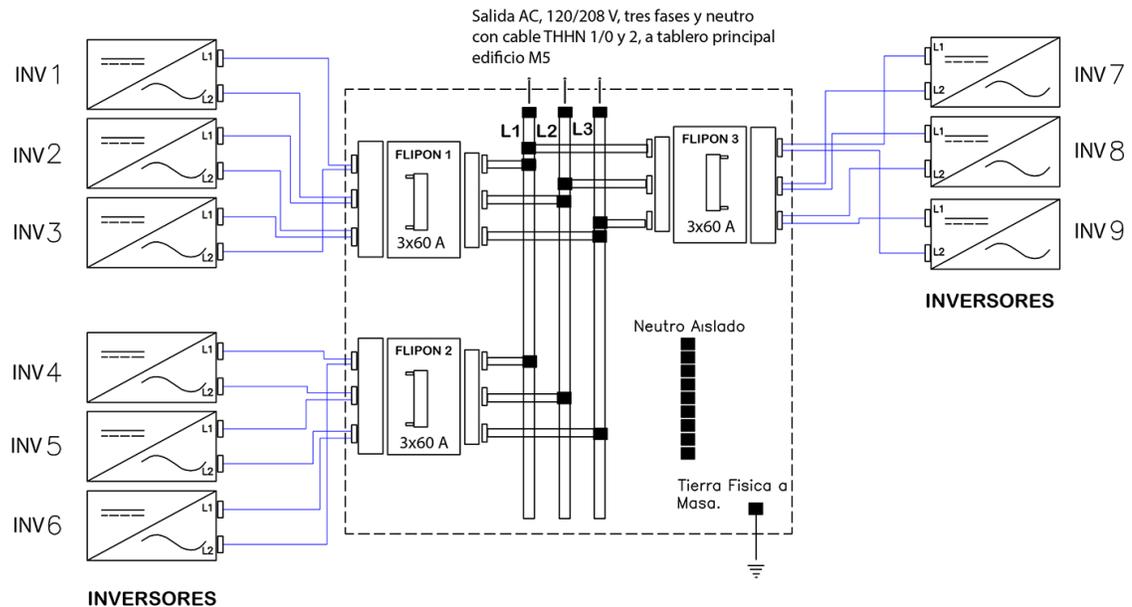
$$9 \times 13,32 \text{ A} = 119,88 \text{ A}$$

Este cable estaría instalado en ductería tipo canaleta metálica desde el tablero de conexiones hasta el dispositivo de ingreso y protección para el tablero principal del edificio M-5, en una longitud menor a 20 Mts, razón por la que se estaría instalando un cable de AWG 1/0 versión THHN, para fases y AWG para neutro.

El ducto a utilizar es el propio ducto de servicio del edificio ya que dentro de él se encuentra el tablero de distribución del servicio eléctrico correspondiente.

Figura 58. **Diagrama de conexiones inversores a tablero de conexiones**

M-5



Fuente: elaboración propia, con programa de AutoCAD.

6.3.7. Protección eléctrica para el SGESFR

La protección eléctrica de un SGESFR ocupa dos sectores de manejo de corrientes muy importantes, desde los paneles solares a los inversores en DC y desde los inversores hasta los tableros de distribución en AC.

6.3.7.1. Protección de voltajes y corrientes (AC/DC)

Las protecciones de estos dos sectores AC y DC se diferencian en que en la corriente alterna existe un paso natural de la corriente por el cero en cada semiperíodo, al cual corresponde un apagado espontáneo del arco que se forma cuando se abre el circuito; sin embargo, en la corriente continua esto no se presenta, requiriéndose que para extinguir el arco, es necesario que la corriente se reduzca hasta desaparecer por completo, siendo necesario que la interrupción se realice gradualmente, sin cambios bruscos de la corriente ya que de lo contrario se darían lugar a elevadas sobretensiones.

En la parte de DC se instalará protección contra las sobre intensidades a cada una de las cadenas fotovoltaicas, abriendo el circuito en caso de producirse una corriente que supere la admisible por los paneles e inversores. Ambos cableados, tanto el de polaridad positiva como el de polaridad negativa llevarán un fusible de idénticas características.

La mayoría de fabricantes de paneles solares incluyen ya dentro de la caja su conexiones estos fusibles de protección.

Además de esta protección se debe instalar un interruptor de corriente DC para independizar en cualquier momento al inversor de las cadenas

fotovoltaicas correspondientes, los cuales ya están incluidos en el inversor propuesto.

Para la protección de voltajes y corrientes en el sector de AC, que corresponden desde la salida del inversor hasta el tablero de distribución del servicio eléctrico del edificio, es importante cumplir con los requisitos de conexión de la EEGSA, sin dejar de incluir la protección para frecuencia, dentro de los rangos de tolerancia (59 – 61 Hz) así como de tensión (1,1 y 0,85 Vm, respectivamente), ambas ya previstas en el inversor a través de un interruptor accionado por el sistema de monitoreo.

Se instalará un interruptor general de tipo magnetotérmico, con intensidad de cortocircuito superior a la indicada por la EEGSA y de corte de 6 KA, para el punto de conexión, ubicado en conjunto con el tablero de distribución general del edificio y su capacidad será acorde a la capacidad máxima del SGEFR.

En el tablero de conexiones se instalarán protecciones para cada uno de los 3 grupos de 3 inversores que se conformarán, cada grupo estará sumando una corriente de:

$$3 \times 13,32 \text{ A} = 39,96 \text{ A}$$

La protección será con *breakers* de 3x60 A

Ahora bien, para el ingreso de la energía generada al tablero principal del edificio se instalará un *breaker* de 3x150 amperios.

Finalmente se instalarán un interruptor automático diferencial y un fusible en función de la velocidad de actuación de este último con respecto al interruptor magnetotérmico.

6.3.7.2. Protección contra descargas electroatmosféricas

Para la protección contra descargas electroatmosféricas se instalará un sistema de tierra física y para las sobretensiones provocadas por estas descargas, normalmente se instalan dispositivos de varistores como protectores de transientes y picos de voltaje en el tablero de distribución, los cuales ya están instalados en los tableros de distribución actuales del edificio.

Como complemento para la protección contra descargas electroatmosféricas se deberá instalar un sistema de tierra independiente para el sector de DC y por supuesto el sector de la energía en AC deberá ir puesto a tierra conforme a las normas de la EEGSA.

6.3.7.3. Puesta a tierra

Como se menciona en el párrafo anterior se instalará un sistema de tierra independiente para el sector de DC, a efecto que no transmita ninguna alteración a la red de distribución, de esta forma quedará puesta a tierra propiamente el generador fotovoltaico.

Para la parte de AC la puesta a tierra será por medio de un transformador de aislamiento galvánico, o cualquier otro medio que cumpla las mismas funciones.

Ahora bien, según la normativa, el equipo inversor utilizado en la instalación puede incorporar alguna de estas protecciones, por lo que si es así, según el R.D.1663/2000, solo se precisará disponer adicionalmente de las protecciones general manual e interruptor automático diferencial. El inversor seleccionado para esta instalación, incorpora las funciones de protección de máxima y mínima tensión y de máxima y mínima frecuencia; además este inversor posee separación galvánica entre la red de distribución de baja tensión y las instalaciones fotovoltaicas exigida por la normativa.

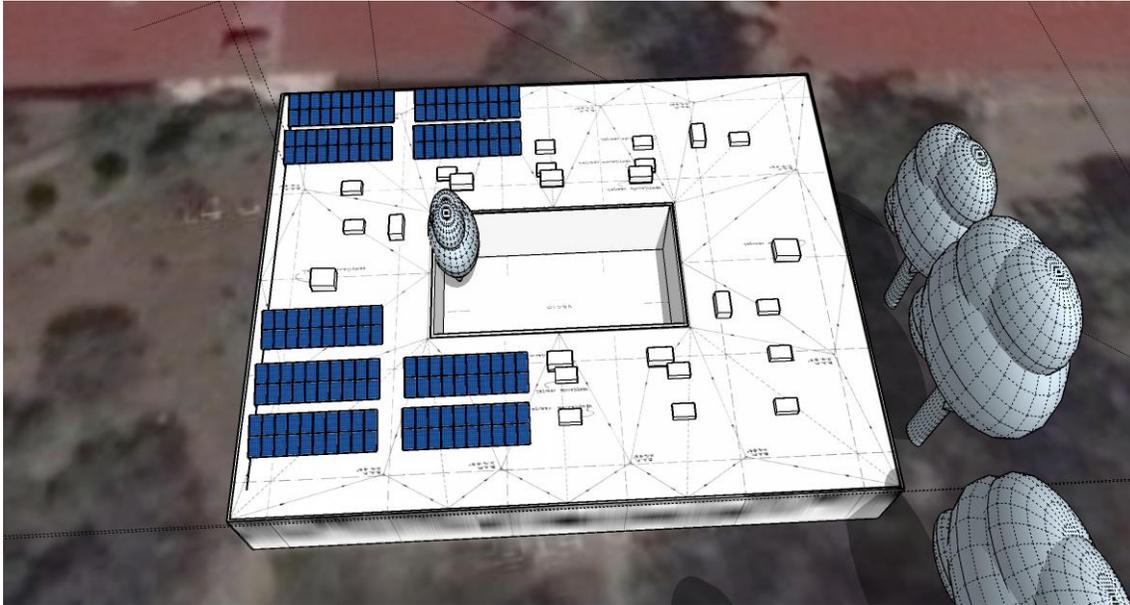
6.3.8. Contador bidireccional

Este será suministrado por la EEGSA y estará en capacidad de medir tanto el flujo de corriente tomado como inyectado a la red.

6.3.9. Instalación y ubicación física de componentes del SGESFR

El conjunto de paneles solares fotovoltaicos, cableados e inversores irán montados en la estructura de soporte según se observa en la siguiente figura:

Figura 59. **Instalación y ubicación física SGESFR edificio M-5**



Fuente: elaboración propia, con programa SkecthUp.

El cableado en AC desde la salida de los inversores hasta tablero protecciones irán, la parte sobre la terraza en tubería metálica y a través del ducto de servicio del edificio, en donde también irán instalados los tableros con las protecciones de AC.

6.4. Costo financiero SGESFR y estimación ahorro para edificios S-1 y M-5

A continuación se presenta los presupuestos por renglones generales de cada SGESFR para ambos edificios:

Tabla XIV. **Presupuesto SGESFR para edificio S-1**

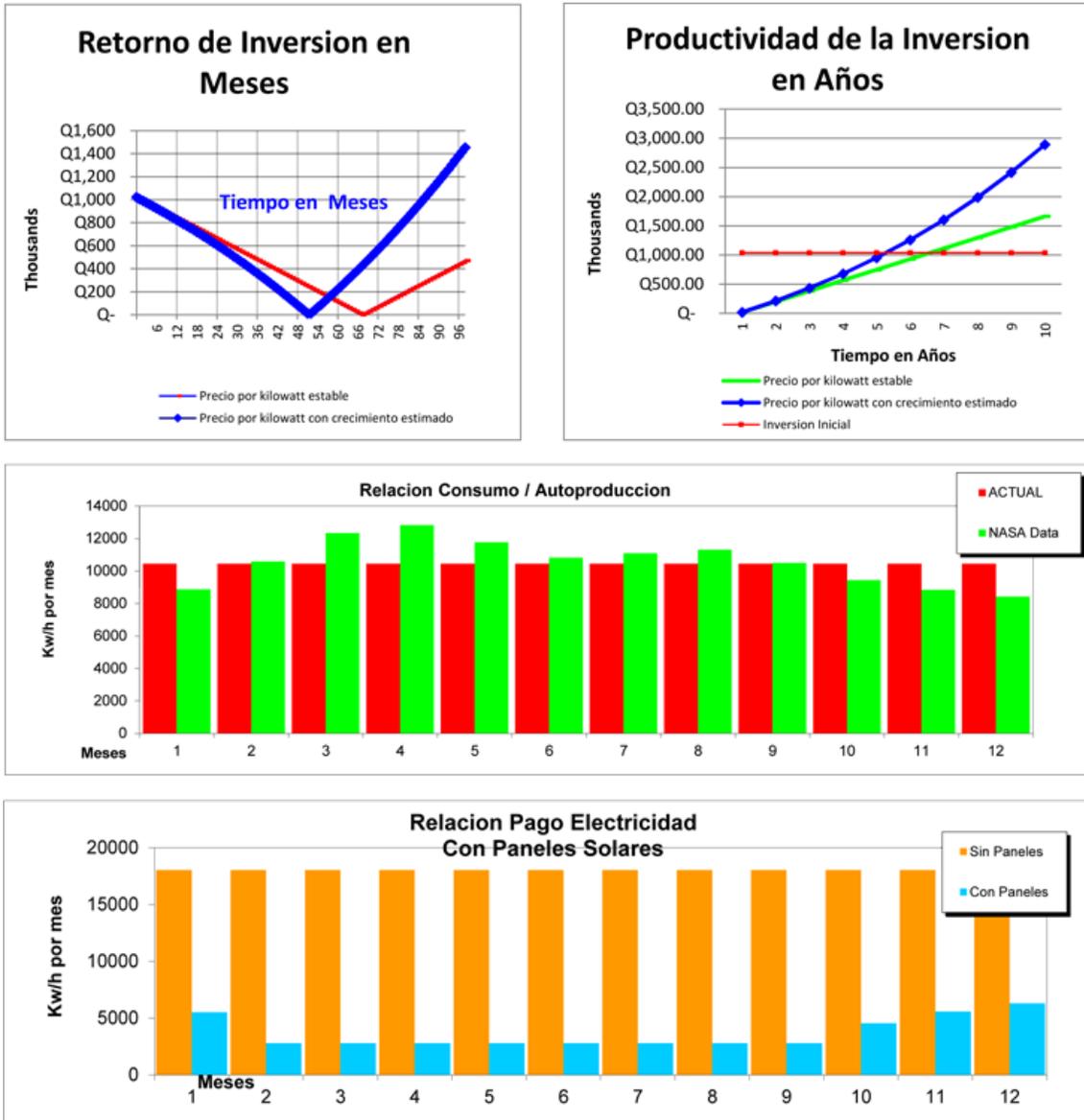
EQUIPO/MARERIAL	CANT	COSTO	M/O	TOTAL RENGLON
INVERSOR GW-46-DS	15	Q 330 000,00	Q 16 500,00	Q 346 500,00
PANEL SOLAR PLM300P72	240	Q 515 400,00	Q 17 600,00	Q 533 000,00
ESTRUCTURA SOPORTE/SUJECIÓN	8	Q 52 800,00	Q 27 500,00	Q 80 300,00
CANALIZACIÓN	280MT	Q 6 600,00	Q 4 400,00	Q 11 000,00
CABLE AC	280MT	Q 17 160,00	Q 14 740,00	Q 31 900,00
FLIPÓN/TABLEROS	1	Q 3 850,00	Q 1 650,00	Q 5 500,00
SISTEMAS TIERRA	1	Q 4 400,00	Q 2 200,00	Q 6 600,00
SUPRESOR Y FUSIBLES	1	Q 10 120,00	Q 880,00	Q 11 000,00
OTROS VARIOS		Q 7 700,00	Q 3 300,00	Q 11 000,00
TOTAL GENERAL				Q 1 036 800,000

Fuente: elaboracion propia.

El costo del SGESFR para el edificio S-1 es de novecientos sesenta y cuatro mil quetzales (Q 964 000).

A continuación se presentan las curvas de recuperación de la inversión, productividad de la inversión y las relaciones comparativas de consumo, pago y autoproducción del edificio S-1.

Figura 60. Análisis inversion y productividad energética SGESFR S-1



Fuente: elaboracion propia, con programa Solmetric.

Tabla XV. **Presupuesto SGESFR para edificio M-5**

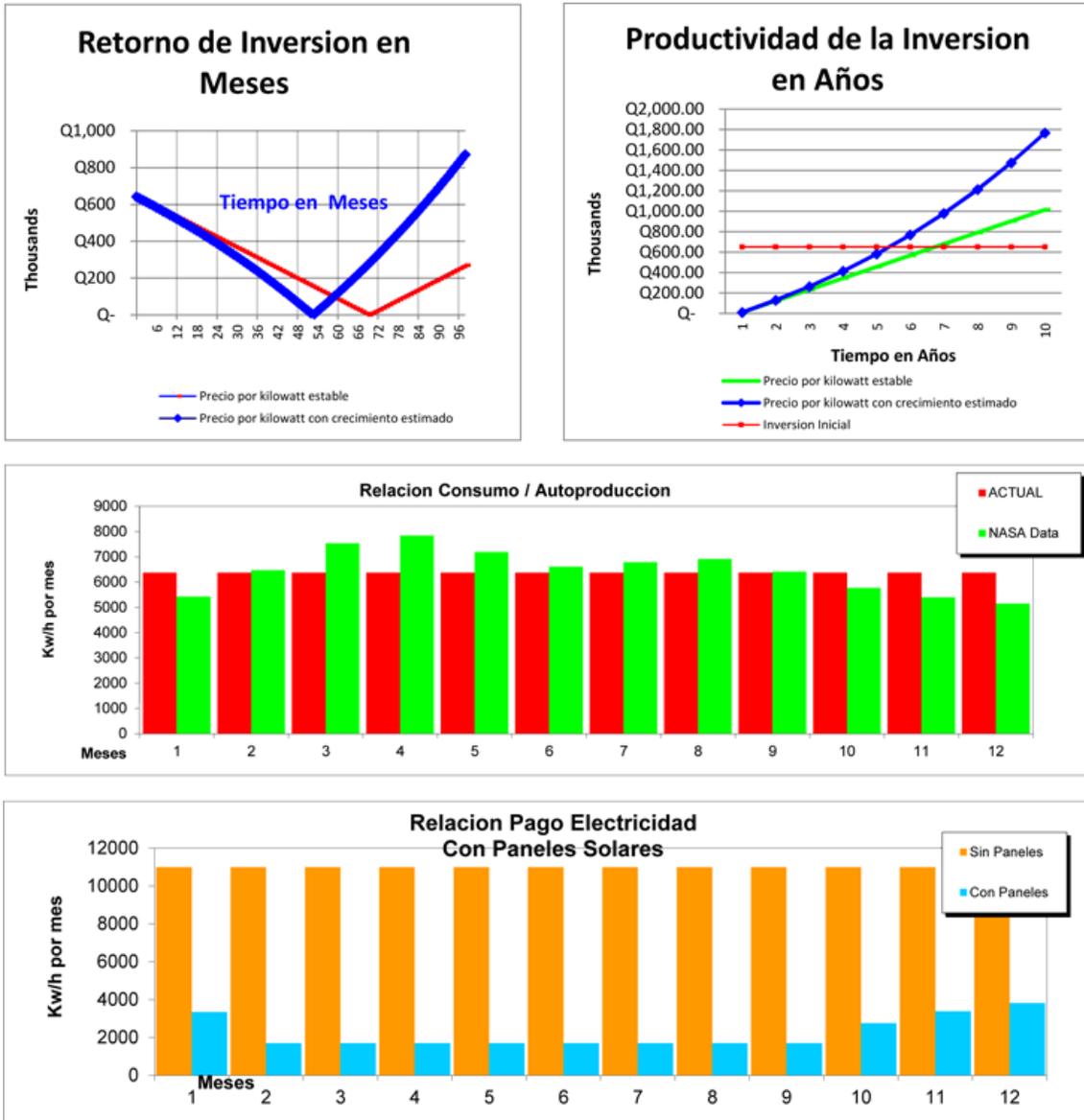
EQUIPO/MARERIAL	CANT	COSTO	M/O	TOTAL RENGLON
INVERSOR GW-46-DS	15	Q 330 000,00	Q 16 500,00	Q 204 600,00
PANEL SOLAR PLM300P72	240	Q 515 400,00	Q 17 600,00	Q 312 400,00
ESTRUCTURA SOPORTE/SUJECIÓN	8	Q 52 800,00	Q 27 500,00	Q 74 300,00
CANALIZACIÓN	280MT	Q 6 600,00	Q 4 400,00	Q 11 000,00
CABLE AC	280MT	Q 17 160,00	Q 14 740,00	Q 31 900,00
FLIPÓN/TABLEROS	1	Q 3 850,00	Q 1 650,00	Q 5 500,00
SISTEMAS TIERRA	1	Q 4 400,00	Q 2 200,00	Q 6 600,00
SUPRESOR Y FUSIBLES	1	Q 10 120,00	Q 880,00	Q 11 000,00
OTROS VARIOS		Q 7 700,00	Q 3 300,00	Q 5 500,00
TOTAL GENERAL				Q 651 200,000

Fuente: elaboración propia.

El costo del SGESFR para el edificio M-5 es de quinientos noventa y un mil quetzales (Q 591 000).

A continuación se presentan las curvas de recuperación de la inversión, productividad de la inversión y las relaciones comparativas de consumo, pago y autoproducción del edificio M-5.

Figura 61. Análisis inversión y productividad energética SGESFR M-5



Fuente: elaboracion propia, con programa Solmetric.

Estimando el tiempo de recuperación en un máximo de 67 meses para el edificio S-1 y previendo un tiempo de vida mínimo de 25 años se puede calcular a *grosso modo* el ahorro en Kw-h, a razón de 233 meses, con un consumo

promedio mensual de 9 998,67 Kwh, siendo de 2 329 690,10 Kw-h. Para el edificio M-5 con un consumo promedio mensual de 6 126,77 Kw-h, con un tiempo de recuperación de 70 meses y acumulando en 230 meses un ahorro de 1 409 157,1 Kw-h.

El monto del ahorro en moneda dependerá de la tarifa que la empresa distribuidora EEGSA aplique, ya que su tendencia es a la baja por el momento, sin olvidar que por el tipo de tarifa BTDFp aplicado a ambos servicios de los edificios pues existen costos monetarios fijos que no pueden ser cubiertos por la energía generada por el SGESFR respectivo.

6.5. Reducción de emisiones CO₂ por los SGESFR

El cálculo de la reducción o ahorro de emisiones de CO₂ por los SGESFR es muy relativo ya que depende contra que tipo de generación se compare, en Guatemala se tendría que guiar por la matriz energética y hacer posiblemente un promedio, más sin embargo, algunos autores expresan dos maneras de calcularlo, y dicen que se evitan:

- 10 386,3 kg de CO₂ por cada kWp fotovoltaico instalado
- 311,1 g de CO₂ por cada kWh generado con fotovoltaica

Otros autores expresan que se calcula que la disminución de las emisiones de CO₂ por cada 20 kWh de electricidad producidos, a partir de energía solar se dejan de emitir unos 10 Kg de CO₂ al año y consecuentemente la reducción de la contaminación atmosférica, del efecto invernadero producido por las emisiones de CO₂ y del cambio climático provocado por el efecto invernadero.

Finalmente se encuentra más práctica la información de que el factor de emisión de consumo eléctrico, que para este caso es $F=0,385$ kg de CO_2 equivalente por kWh.

La reducción en la emisión de CO_2 es un aspecto muy importante en la implementación de los SGESFR, por lo que se calcula que el SGESFR de cada edificio estaría ahorrando:

Para el edificio S-1 un promedio mensual de 9 998,67 Kwh x 12 meses daría una producción de: 119 984,04 Kwh al año, y multiplicando este valor por el factor $F=0,385$ se obtendría un ahorro anual en emisiones de 46 193,85 Kg de CO_2 .

Para el edificio M-5 un promedio mensual de 6 126,77 Kwh x 12 meses daría una producción de: 73 521,24 Kwh al año, y multiplicando este valor por el factor $F=0,285$ se obtendría un ahorro anual en emisiones de 28 305,68 Kg de CO_2 .

Sumando ambos edificios se obtendría un ahorro de:

$$46\ 193,85\ \text{Kg de } CO_2 + 28\ 305,68\ \text{Kg de } CO_2 = 74\ 499,53\ \text{Kg de } CO_2$$

CONCLUSIONES

1. Es totalmente factible, viable y conveniente, el diseño y la implementación de sistemas de generación de energía solar fotovoltaica conectados a red para autoconsumo de los edificios S-1 y M-5, del campus central de la Universidad de San Carlos de Guatemala (Usac), a efecto de lograr (-) su abastecimiento total de energía eléctrica.
2. La realización de este trabajo de graduación, en conjunto con otras similares, coadyuva a disponer de un marco teórico base y de desarrollo tecnológico, para la implementación y el aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica en las instalaciones propias de la USAC.
3. La elaboración de este trabajo de graduación también permitió disponer de información actualizada y concentrada respecto al escenario mundial y nacional, del desarrollo e implementación de sistemas de aprovechamiento de la energía solar.
4. Se conoció el historial del consumo y demanda de energía eléctrica de los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC a través de la identificación de los servicios eléctricos con que cuentan y su respectiva facturación, permitiendo analizar el historial de consumo de 30 meses, determinar el promedio mensual y proyectar el consumo a futuro.
5. Se calcularon las áreas disponibles sobre la terraza de cada edificio S-1 y M-5, determinando que existen suficientes áreas para el mejor aprovechamiento de la energía solar fotovoltaicas, en condiciones

seguras para el montaje de los paneles solares de los sistemas fotovoltaicos, que permiten generar la energía suficiente para el autoabastecimiento en ambos edificios S-1 y M-5.

6. Se determinó la reducción de la contaminación ambiental por medio de la producción de energía renovable, silenciosa y limpia, en los edificios S-1 y M-5, por medio fotovoltaico, alcanzando un ahorro total estimado de 74 499,53 Kg de CO₂.
7. Se logró estimar el ahorro en Kw-Hr en cada SGESFR, para el edificio S-1 un acumulado de 2 399 680,80 Kw-h y para el edificio M-5 un acumulado de 1 470 424,80 Kw-h en un período de 240 meses (20 años), para un período de recuperación de la inversión aproximado entre 60 y 70 meses.
8. Como resultado del crecimiento de la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovable, según la evolución de la matriz energética en Guatemala, existe una tendencia a la baja de las tarifas de las empresas generadoras y distribuidoras, que provoca una ampliación del tiempo de recuperación de la inversión.
9. El diseño de estos sistemas de generación de energía solar fotovoltaica conectado a red, para autoabastecimiento de energía de los edificios S-1 y M-5 del CCUSAC, se logra en forma independiente para cada edificio a través de la elección del criterio adecuado.
10. Con la implementación de estos SGESF la Usac actualizaría y ubicaría a la vanguardia energética y tecnológicamente esta parte de su infraestructura, con respecto a la tendencia mundial actual de la

utilización de energías renovables, para contrarrestar el calentamiento global y la contaminación ambiental.

11. La tendencia a utilizar en el futuro próximo energías renovables es un proceso ya irreversible ya que no solo cada día son más viables, sino que conforman la estrategia más importante para mitigar la contaminación ambiental y por ende la destrucción del planeta.

RECOMENDACIONES

1. Siendo el tema de la energía renovable de interés nacional, sería muy conveniente que a través de la Usac, se obtengan datos de radiación solar de todo el territorio de Guatemala, para conformar una base de datos que incluya información por regiones o departamentos.
2. Previo a la implementación de este tipo de proyectos sería importante que se realizaran estudios de eficiencia energética, en los edificios e instalaciones involucradas, para reevaluar los proyectos a fin de reducir sus costes y el tiempo de recuperación de la inversión.
3. Ayudaría mucho al país que la Usac implemente en todas sus instalaciones proyectos de energía renovable, a efecto de impulsar el ahorro energético y la reducción de las emisiones de carbono, iniciando por los propuestos en este trabajo de graduación.
4. Como beneficio y labor social la Usac podría impulsar de forma prioritaria los estudios sobre implementación de proyectos de energía fotovoltaica, sobre todo los que beneficien a las comunidades de escasos recursos en el país.
5. Como parte de la actualización tecnológica podría incluirse en el pénsum de las diversas facultades de la Usac, cursos obligatorios y optativos sobre todas las energías renovables, especialmente la fotovoltaica, incluyendo laboratorios de vanguardia.

6. Ayudaría mucho también que la Usac, buscara la manera de preparar a sus profesionales con becas en otros países de primer orden en el empleo de energías renovables, como por ejemplo Alemania, España, China, entre otros.

7. La Usac podría impulsar mayor modernización legal y fiscal con la finalidad de que este tipo de proyectos de energías renovables sean mas atractivos y viables en el país.

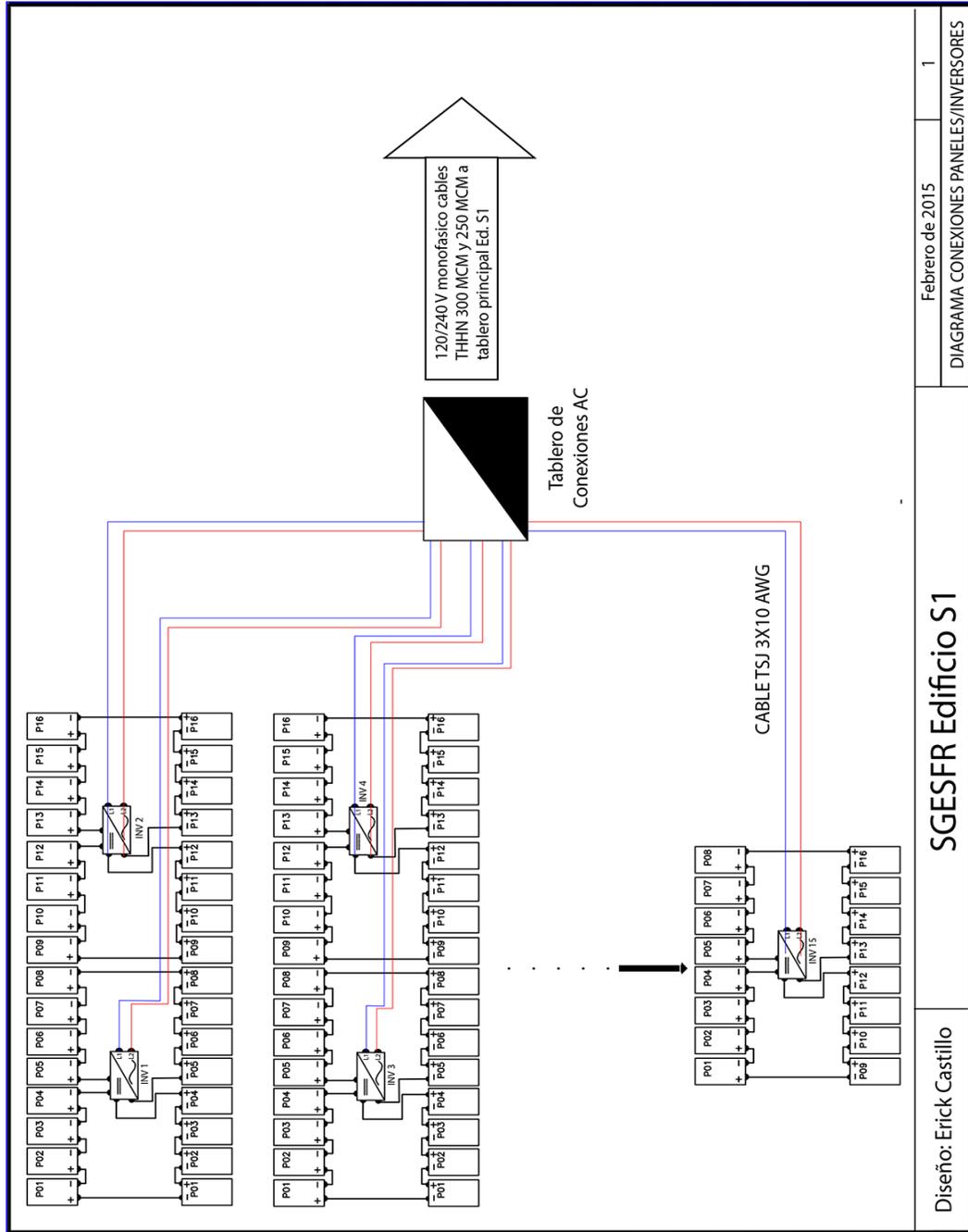
BIBLIOGRAFÍA

1. ALMAGRO, C. *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2002. 178 p.
2. CORNEJO, Hector. *Sistema solar fotovoltaico de conexión a red en el Centro Materno Infantil de Universidad de Piura*. Piura: CMI, 2013. 89 p.
3. DÍAZ, Cristina. *Estandarización de los sistemas de protección en instalaciones fotovoltaicas aisladas*. Madrid: Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, 2006. 90 p.
4. DÍAZ, Oscar. *diseño de un sistema fotovoltaico residencial con capacidad para venta de energía a la red de distribución*. Guatemala: CNEE, 2005. 78 p.
5. DOMINGUEZ, Hector. *Diseño de un sistema fotovoltaico para la generación de energía eléctrica en el Cobaev 35 Xalapa*. México: Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2012. 189 p.
6. EREC RODOLFO. *Renewable energy scenario to 2040*. Europa: EWEA, 2012. 678 p.

7. FERNÁNDEZ FERICHOLA, Julio. *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo potatil*. España: Universidad Carlos III de Madrid, 2009. 187 p.
8. HARPER, Enriquez. *Tecnología de generación de energía eléctrica*. México: Limusa, 2009. 167 p.
9. SÁNCHEZ, Martin. *Proyecto de sistema fotovoltaico conectado a red interior ara autoconsumo en nuevo hipermercado*. España: Universidad Internacional de Andalucía, 2013. 89 p.
10. JOACHÍN BARRIOS, Daniel. *diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la comunidad rural Buena Vista, San Marcos, Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 124 p.
11. JOACHÍN, Carmencita. *Diseño de un sistema solar fotovoltaico aislado, para el suministro de energía eléctrica a la cumunidad rural buena vista, San Marcos*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 235 p.
12. LORENZO, E. *La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a red: el mito y el cascabel del gato*. España: Instituto de Energía Solar, Universidad politécnica de Madrid, 2011. 99 p.
13. PEREDA SOTO, Isidro. *Celdas fotovoltaicas en generación distribuida, Santiago de Chile*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería Electrica, 2005. 78 p.

14. PERPIÑAN, Oscar. *Energía solar fotovoltaica*. España: Limusa, 2012. 95 p.
15. SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. *Energía solar fotovoltaica*. México: Limusa, 2010. 95 p.
16. SANTAMARÍA, Daniel. *Instalación eléctrica mediante energías renovables en una quesería de Do idiazábal aislada en red en Salvatierra*. España: Universidad Pública de Navarra, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos, 2011. 105 p.
17. SÁNCHEZ, Martín. *Proyecto de sistema fotovoltaico conectado a red interior para autoconsumo en nuevo hipermercado*. Andalucía: Universidad Internacional, 2013. 189 p.
18. Universidad del Valle de Guatemala. *Informe técnico seguimiento proyecto piloto de eficiencia energética, generación fotovoltaica*. Guatemala: UVG, 2013. 91 p.
19. URIZAR, Carmen. *Política energética en Guatemala y situación actual de las energías renovables*. Guatemala: CNEE, 2014. 78 p.
20. VENTURA, Victor. *Situación de las energías renovables, marco legal e incentivos en Centroamérica*. México: Cepal, 2014. 78 p.
21. VALVERTH, Lilian. *Implementación y uso de una planta de captación de energía solar en contexto de climas tropicales en las instalaciones del CEMA*. Guatemala:CNEE, 2008. 78. p.

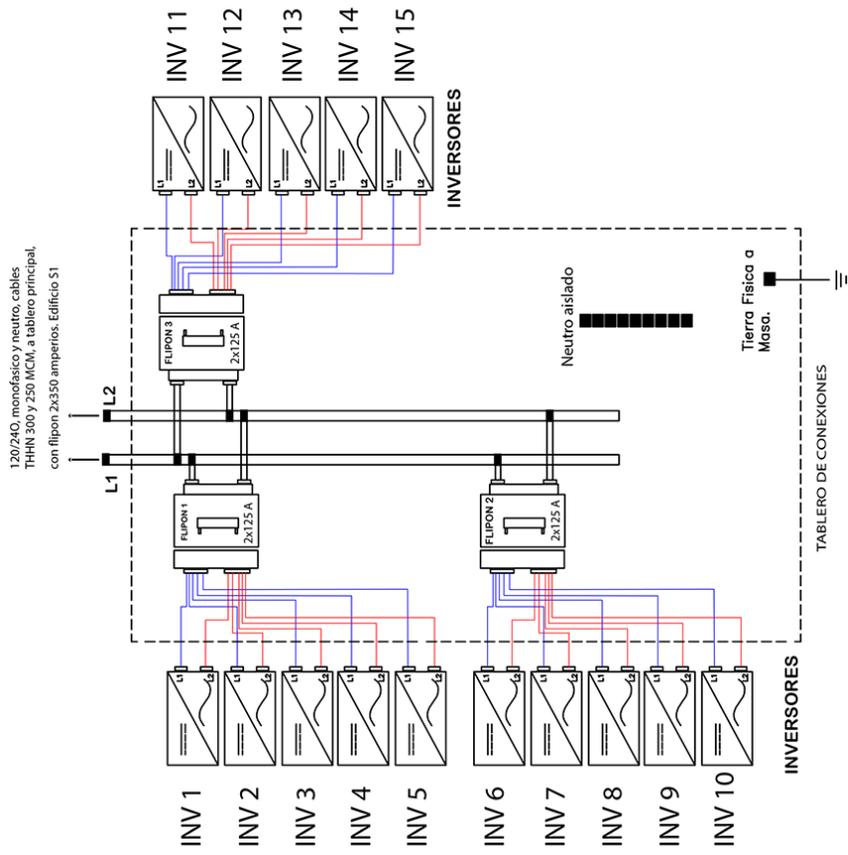
APÉNDICES



Diseño: Erick Castillo	SGESFR Edificio S1	Febrero de 2015	1
		DIAGRAMA CONEXIONES PANELES/INVERSORES	

Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

DIAGRAMA CONEXIONES ENTRE INVERSORES Y TABLERO



Diseño: Erick Castillo

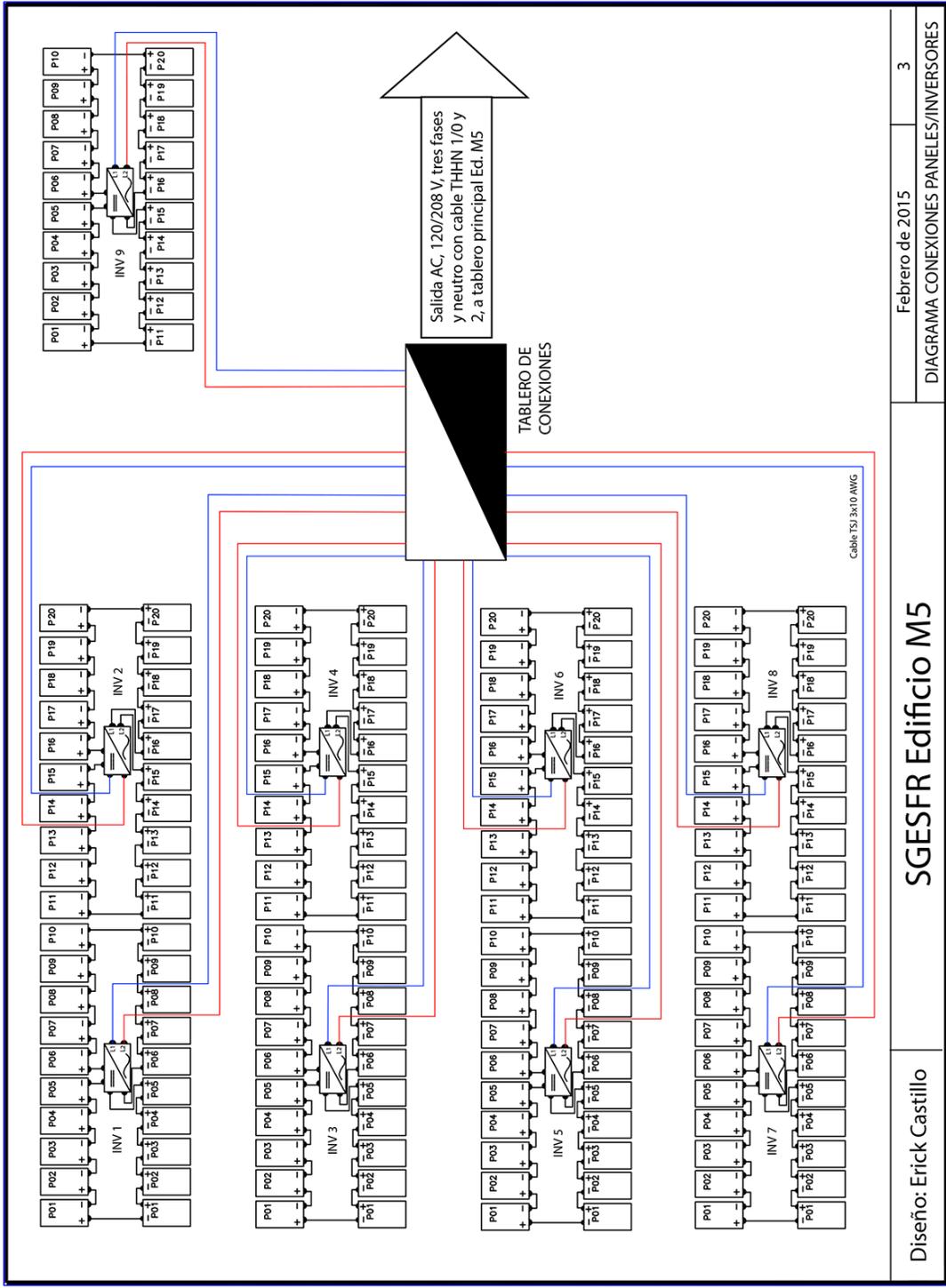
SGESFR Edificio S1

Febrero de 2015

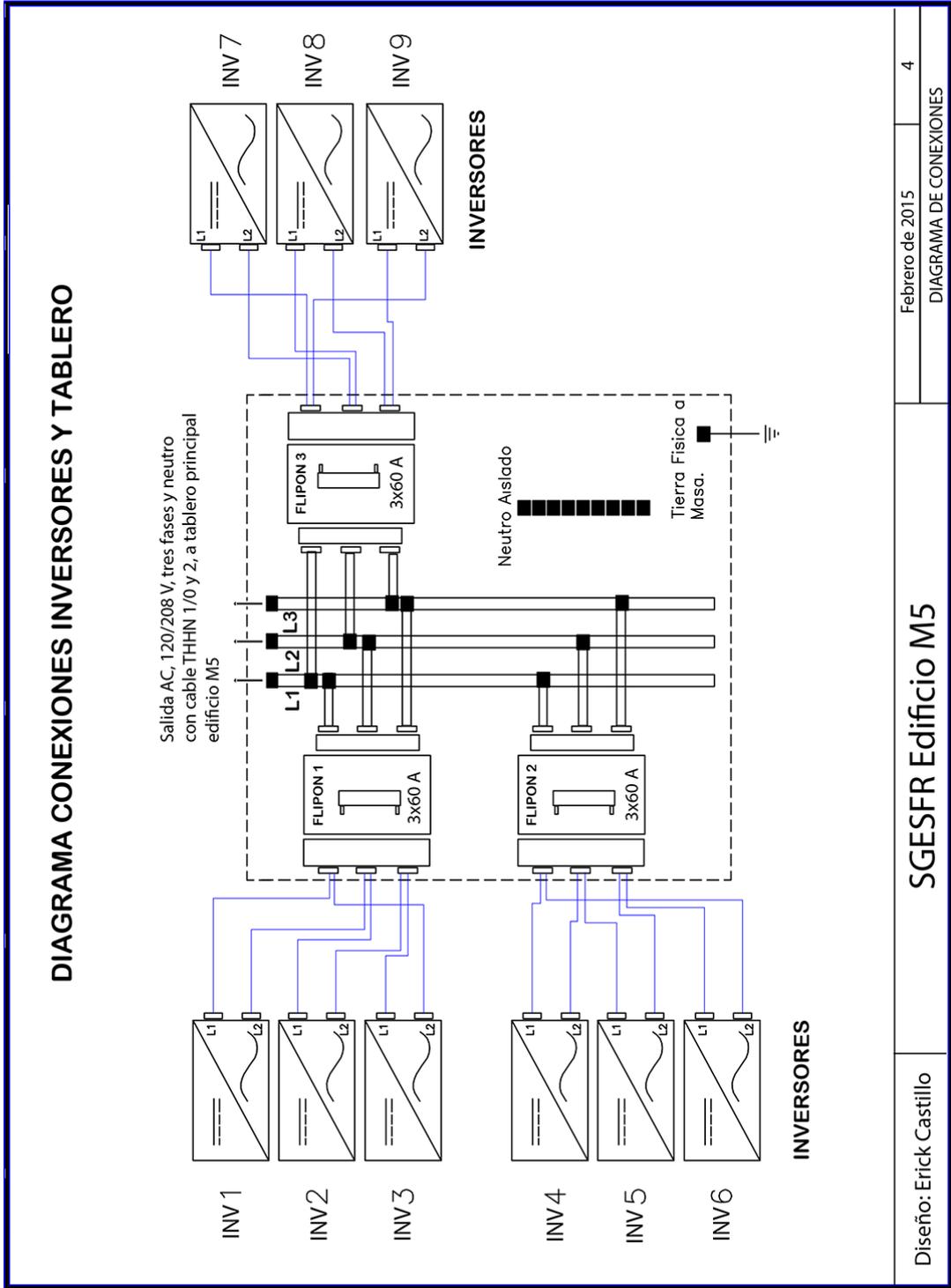
2

DIAGRAMA DE CONEXIONES, INVERSORES/TABLERO

Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

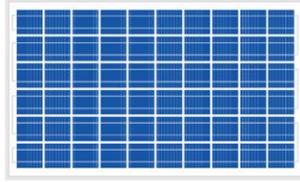


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD.

PERLIGHTSOLAR

PLM-240P-60 SERIES
Polycrystalline Silicon Solar Modules

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride coated polycrystalline silicon cells.



Fuente: PerlightSolar.



Specification:

- Solar cell: High efficiency crystalline solar cell. Even if under the weak light the solar module can produce maximum power output.
- Tempered glass: Anti-reflecting coating and high transmission rate glass increase the power output and mechanical strength of solar module.
- EVA and TPT: Using high quality EVA and TPT to prevent destroying and water.
- All frame: Without screw/connector connection, 8 holes on the frame can be installed easily.
- Junction box: Multi function junction box with water proof.
- Long lifetime: 25 years; Less power decrease.
- Good performance of preventing from atrocious weather such as wind and hail.
- Resisting moisture and etching effectively, not effect by geology.
- The certificate issued by international authority: ISO Quality Management system, CE, TUV, VDE, UL (IEC 61215 and IEC61730)

Mechanical Characteristics

Cells Size(mm)	156×156
No. of cells	60(6×10)
Modules Size(mm)	1650×992
Frame Thickness(mm)	35/40/46
Weight(KG)	18.2/18.5/19.6
No. of Mounting Holes	8
No. of Waterspout	16

Temperature Coefficient

Noct	-45°C±2°C
Temperature coefficient of Isc	0.06%/°C
Temperature coefficient of Voc	-0.34%/°C
Temperature coefficient of Pmax	-0.45%/°C
Power Tolerance	0/ + 3%
Working temperature	-40°C to 85°C

Note: This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject without notice. Additional information can be found on our website

www.perlight.com



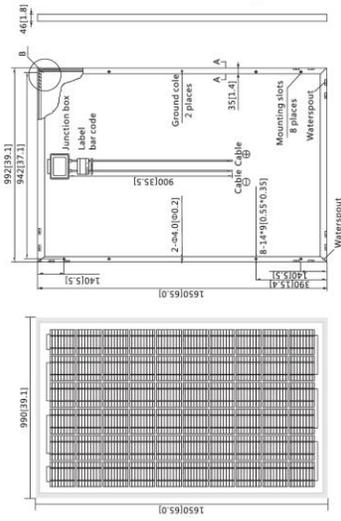
Rev.201301

PLM-240P-60 SERIES

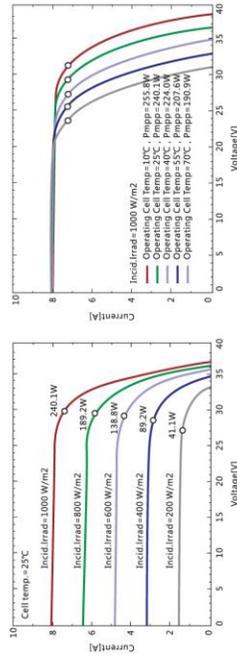
Polycrystalline Silicon Solar Modules



Module Diagram:



Electrical Curves:



Electrical Characteristics:

Power range: 195w-260w

Module	PLM-225P-60	PLM-230P-60	PLM-235P-60	PLM-240P-60	PLM-245P-60	PLM-250P-60	PLM-255P-60	PLM-260P-60
Pm	225	230	235	240	245	250	255	260
Vmp	29.85	30.15	30.64	30.89	31.29	31.73	31.92	32.10
Imp	7.54	7.63	7.67	7.77	7.83	7.88	7.96	8.10
Voc	36.78	37.00	37.18	37.35	37.42	37.58	37.73	37.92
Isc	8.29	8.30	8.34	8.38	8.45	8.49	8.52	8.64
Maximum system voltage	1000VDC							
STC Irradiance 1000W/m ² , Temperature 25°C, AM=1.5								

MANUFACTURING BASE

Outfeng Rd, Muyu, Zeguo Town, Wenling, Zhejiang, 317521, China
 Tel: +86-576-8647 7290 Fax: +86-576-8647 9190
 E-mail: enquiry@perlight.com

GLOBAL MARKETING CENTER

E# 14th Floor, No.58 Xinjingqiao Rd, PuDong District, Shanghai, 200129, China
 Tel: +86-21-6105 2372 Fax: +86-21-6105 2187
 E-mail: enquiry@perlight.com



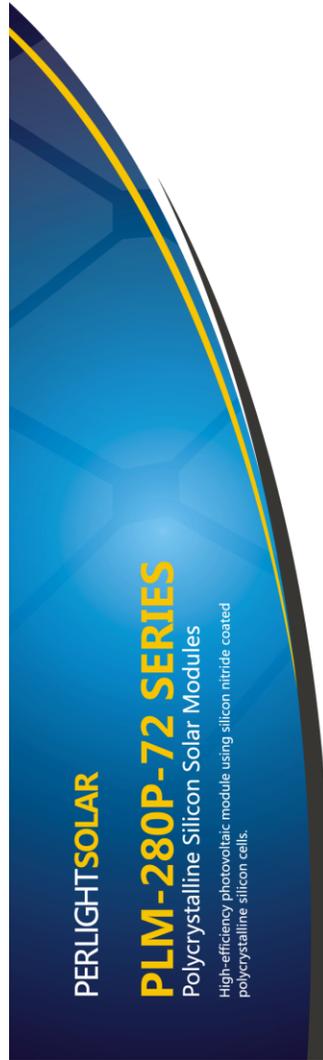
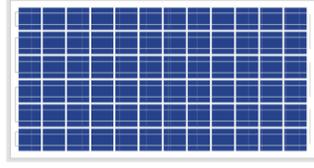
PERLIGHT™
Powering Possibilities



PERLIGHTSOLAR

PLM-280P-72 SERIES
Polycrystalline Silicon Solar Modules

High-efficiency photovoltaic module using silicon nitride coated polycrystalline silicon cells.

Specification:

- Solar cell: High efficiency crystalline solar cell. Even if under the weak light, the solar module can produce maximum power output.
- Tempered glass: Anti-reflecting coating and high transmission rate glass increase the power output and mechanical strength of solar module.
- EVA and TPT: Using high quality EVA and TPT to prevent destroying and water.
- All frame: Without screw/corner connection. 8 holes on the frame can be installed easily.
- Junction box: Multi function junction box with water proof.
- Long lifetime: 25 years; Less power decrease.
- Good performance of preventing from atrocious weather such as wind and hail.
- Resisting moisture and etching effectively, not effect by geology.
- The certificate issued by international authority: ISO Quality Management system, CE,TUVVDE,UL (IEC 61215 and IEC61730)

Mechanical Characteristics

Cells Size(mm)	156×156
Modules Size(mm)	1966×992×50
No.of cells	72(6×12)
Weight(KG)	23.1
No.of Mounting Holes	8
No.of Waterspout	16

Temperature Coefficient

Noct	45°C±2°C
Temperature coefficient of Isc	0.06%/°C
Temperature coefficient of Voc	-0.34%/°C
Temperature coefficient of Pmax	-0.45%/°C
Power Tolerance	0/ + 3%
Working temperature	-40°C to 85°C

Package Information

Type	Frame	Pcs/Carton	Cartons/Container	Pcs/Pallet	Pallets/Container	Pcs/Container
40HQ	1966×992	156P	72cells	50	2	22
				21	22	506

Note: This publication summarizes product warranty and specifications, which are subject without notice. Additional information can be found on our website www.perlightsolar.com

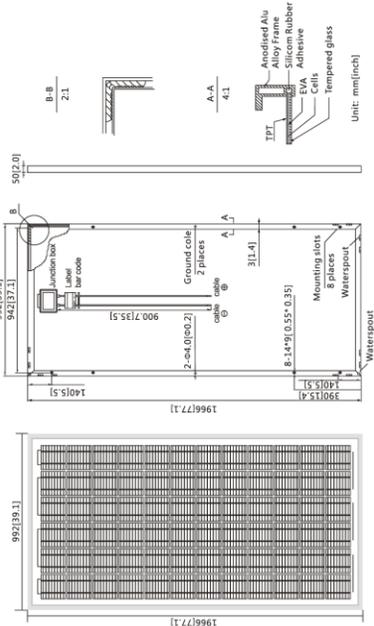


PLM-280P-72 SERIES

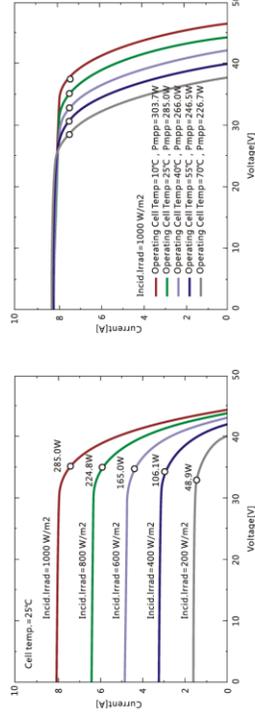
Polycrystalline Silicon Solar Modules



Module Diagram:



Electrical Curves:



Electrical Characteristics: Power range:240w~310w

Module	PLM-270P-72	PLM-275P-72	PLM-280P-72	PLM-285P-72	PLM-290P-72	PLM-295P-72	PLM-300P-72	PLM-305P-72	PLM-310P-72
Pm	270	275	280	285	290	295	300	305	310
Vmp	35.81	36.14	36.56	36.97	37.14	37.58	38.08	38.32	38.47
Imp	7.54	7.61	7.66	7.71	7.81	7.85	7.88	7.96	8.06
Voc	44.14	44.37	44.57	44.65	44.84	44.92	45.10	45.30	45.47
Isc	8.29	8.30	8.33	8.36	8.38	8.47	8.49	8.52	8.60
Maximum system voltage	1000VDC								

STC Irradiance 1000W/m², Temperature 25°C, AM=L5

MANUFACTURING BASE

Oufeng Rd, Muyu, Zeguo Town, Wenling, Zhejiang, 3117521, China
 Tel:+86-576-8647 7290 Fax:+86-576-8647 9190
 E-mail:enquiry@perlight.com

GLOBAL MARKETING CENTER

E# 14th Floor, No.58 Xinjinjiao Rd, Pu Dong District, Shanghai, 200129, China
 Tel:+86-21-6105 2372 Fax:+86-21-6105 2187
 E-mail:enquiry@perlight.com



PERLIGHT®
Powering Possibilities



Technical Data

	GW3600-DS	GW4200-DS	GW4600-DS
DC Input Data			
Max. DC power [W]	3800	4600	5400
Max. DC voltage [V]	580	580	580
MPPT voltage range [V]	125-550	125-550	125-550
Starting voltage [V]	125	125	125
Max. DC current [A]	10/10	15/15	15/15
No. of DC connectors	2	2	2
No. of MPPTs	2 (can parallel)	2 (can parallel)	2 (can parallel)
DC connector	SUNCLIX / MC4 (optional)	SUNCLIX / MC4 (optional)	SUNCLIX / MC4 (optional)
AC Output Data			
Normal AC power [W]	3600	4200	4600
Max. AC power [W]	3600	4400	5100
Max. AC current [A]	18	21	25
Normal AC output	50/60Hz; 230Vac	50/60Hz; 230Vac	50/60Hz; 230Vac
AC output range	45-55Hz/55-65Hz; 180-270Vac	45-55Hz/55-65Hz; 180-270Vac	45-55Hz/55-65Hz; 180-270Vac
THDi	<1.5%	<1.5%	<1.5%
Power factor	0.9 leading-0.9 lagging	0.9 leading-0.9 lagging	0.9 leading-0.9 lagging
Grid connection	Single phase	Single phase	Single phase
Efficiency			
Max. efficiency	97.6%	97.8%	97.8%
Euro efficiency	>97%	>97.4%	>97.4%
MPPT adaptation efficiency	>99.5%	>99.5%	>99.5%
Protection			
Residual current monitoring unit	Integrated	Integrated	Integrated
Anti-islanding protection	Integrated	Integrated	Integrated
DC switch	Integrated (optional)	Integrated (optional)	Integrated (optional)
AC over current protection	Integrated	Integrated	Integrated
Insulation monitoring	Integrated	Integrated	Integrated
Certifications&Standards			
Grid regulation	VDE-AR-N 4105, AS4777.2&3, G59/2, VDE0126-1-1, EN50438, ERDF-NOI-RES_13E	VDE-AR-N 4105, AS4777.2&3, VDE0126-1-1, EN50438, ERDF-NOI-RES_13E	VDE-AR-N 4105, AS4777.2&3, G59/2, VDE0126-1-1, EN50438, ERDF-NOI-RES_13E, MEA, PEA
Safety	IEC62109-1&-2, AS3100	IEC62109-1&-2, AS3100	IEC62109-1&-2, AS3100
EMC	EN 61000-6-1, EN 61000-6-2, EN 61000-6-3, EN 61000-6-4, EN 61000-3-11, EN 61000-3-12		
General Data			
Dimensions (WxHxD)	390*417*165mm	390*417*165mm	390*417*165mm
Weight [kg]	20	20	20
Mounting	Wall bracket	Wall bracket	Wall bracket
Ambient temperature range	-25-60°C (>45°C derating)	-25-60°C (>45°C derating)	-25-60°C (>45°C derating)
Relative humidity	0-95%	0-95%	0-95%
Max. operating altitude	2000m	2000m	2000m
Protection degree	IP65	IP65	IP65
Topology	Transformerless	Transformerless	Transformerless
Night power consumption [W]	<1	<1	<1
Cooling	Nature convection	Nature convection	Nature convection
Noise emission [dB]	<25	<25	<25
Display	4.0" LCD	4.0" LCD	4.0" LCD
Communication	USB2.0; RS485 or WiFi	USB2.0; RS485 or WiFi	USB2.0; RS485 or WiFi
Standard warranty [years]	5/10/15/20/25 (optional)	5/10/15/20/25 (optional)	5/10/15/20/25 (optional)



color options

Fuente: PerlightSolar.

