



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

DISEÑO Y OPERACIÓN DE MANDO ELECTRÓNICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR DOMICILIAR

Edgar Orlando Zuñiga Garrido

Asesorado por el Ing. Mario Alejandro de la Cruz Quim

Guatemala, agosto de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y OPERACIÓN DE MANDO ELECTRÓNICO PARA
SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR DOMICILIAR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

EDGAR ORLANDO ZUÑIGA GARRIDO

ASESORADO POR EL ING. MARIO ALEJANDRO DE LA CRUZ QUIM

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO EN ELECTRÓNICA

GUATEMALA, AGOSTO 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. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Romeo Neftalí López Orozco
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. José Aníbal Silva de los Ángeles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

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 Y OPERACIÓN DE MANDO ELECTRÓNICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR DOMICILIAR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 7 de junio de 2012.


Edgar Orlando Zuñiga Garrido

Guatemala, 12 de Junio 2013

Ingeniero Carlos Guzman

Coordinador del área de Electrónica

Facultad de Ingeniería

Universidad de San Carlos de Guatemala


Señor Coordinador:

Atentamente me dirijo a usted para presentarle el trabajo de graduación titulado **DISEÑO Y OPERACIÓN DE MANDO ELCTRÓNICO PARA SUMINISTRO DE ENERGIA SOLAR DOMICILIAR**, realizado por el estudiante Edgar Orlando Zuñiga Garrido quien se identifica con número de carne 2004-12525.

Me es grato informarle, luego de realizar mi asesoría en la realización de este trabajo, que es completamente satisfactorio por lo que me permite someterlo a su consideración y aprobación.

Sin otro particular.

Atentamente,



Ing. Mario Alejandro de la Cruz Quim



Asesor.



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 Y OPERACIÓN DE MANDO ELECTRÓNICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR DOMICILIAR, del estudiante Edgar Orlando Zuñiga Garrido, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



SRO



REF. EIME 32. 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; EDGAR ORLANDO ZUÑIGA GARRIDO titulado: DISEÑO Y OPERACIÓN DE MANDO ELECTRÓNICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR DOMICILIAR, 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 Y OPERACIÓN DE MANDO ELECTRÓNICO PARA SUMINISTRO DE ENERGÍA SOLAR DOMICILIAR**, presentado por el estudiante universitario: **Edgar Orlando Zuñiga Garrido**, 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, agosto de 2015

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser una importante influencia en mi vida.
Mis padres	Edgar Zuñiga y Glenda Garrido de Zuñiga, por su amor y por llenarme de fortaleza.
Mis hermanas	Sofia y Carolina Zuñiga, por su apoyo incondicional.
Mis abuelas	Esperanza Consuelo (q. e. p. d.) y María Nieves, por ser un ejemplo en mi vida.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser una importante influencia en mi carrera.
Facultad de Ingeniería	Por dotarme de conocimientos, experiencia, disciplina, responsabilidad y ética.
Ing. Mario de la Cruz	Por apoyo en la realización del trabajo de graduación.
Los catedráticos	Que me brindaron su conocimiento.
Mis amigos	Por la oportunidad de compartir con ellos y siempre darme ánimo en los momentos difíciles.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
INTRODUCCIÓN.....	XVII
1. SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA.....	1
1.1. Tipos de energía renovable	1
1.2. La energía solar.....	2
1.3. ¿Qué se puede hacer con la energía solar?.....	3
1.4. Radiación que llega a la tierra	5
1.5. Radiación en algunas regiones de Guatemala	6
1.6. Usos posibles de la energía solar.....	7
1.7. Sistemas conectados a la red eléctrica	9
1.8. Sistemas aislados a la red eléctrica	9
2. FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS SOLARES.....	11
2.1. Celdas solares (celdas fotovoltaicas)	11
2.1.1. Tipos de celdas fotovoltaicas por sus materiales....	14
2.1.1.1. Silicio puro monocristalino	14
2.1.1.2. Silicio puro policristalino	14
2.1.1.3. Silicio amorfo	15
2.1.1.4. Arseniuro de Galio	15

2.1.1.5.	Teluro de cadmio.....	15
2.1.1.6.	Diseleniuro de cobre en indio	15
2.1.1.7.	Tándem	15
2.1.2.	Tipos de celdas fotovoltaicas en función de la forma	16
2.1.2.1.	Paneles de formato baldosa o teja	16
2.1.2.2.	Paneles con sistemas de concentración	16
2.1.2.3.	Paneles solares bifaciales	16
2.2.	Estructura de una celda solar.....	16
2.3.	Radiación solar	18
2.4.	Orientación.....	19
2.5.	Ángulo de inclinación	21
2.6.	Potencia pico.....	23
2.7.	Sistemas de energía	24
3.	PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO	25
3.1.	Arreglo de celdas solares y carga de las baterías para obtener la fuente de alimentación de v_{cd} del convertidor.....	25
3.2.	Módulo fotovoltaico	25
3.3.	Arreglos fotovoltaicos	28
3.4.	Baterías.....	31
3.4.1.	Tipos de baterías.....	32
3.4.1.1.	Baterías de plomo	33
3.4.1.1.1.	Baterías líquidas	33
3.4.1.1.2.	Baterías tipo VRLA.....	34
3.4.1.1.3.	Peligros de baterías de plomo	35
3.5.	Vida de baterías solares.....	35

3.6.	Eficiencia de baterías solares.....	37
3.7.	Interacción entre módulos fotovoltaicos y baterías.....	39
3.8.	Subsistema de regulación	39
3.9.	Subsistema de acondicionamiento de potencia.....	42
3.10.	Subsistema de control, medida y protección	45
4.	DISEÑO DEL SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA	47
4.1.	Definición del sistema.....	47
4.2.	Consumo eléctrico real de las cargas.....	48
4.2.1.	Promedio de la radiación diaria disponible	49
4.2.2.	Irradiación mínima mensual.....	51
4.3.	Subsistema de captación de energía	53
4.4.	Elección del tipo y número de módulos fotovoltaicos	54
4.4.1.1.	Características técnicas de la superficie de captación	58
4.5.	Ubicación de los módulos fotovoltaicos	60
4.6.	Subsistema de acumulación de energía.....	62
4.7.	Subsistema de regulación	68
4.8.	Subsistema de acondicionamiento de potencia.....	71
4.9.	Conexión y transporte de la energía eléctrica	74
5.	SEGURIDAD INDUSTRIAL EN EL MONTAJE Y CONEXIÓN DEL SISTEMA.....	85
5.1.	Seguridad durante el montaje.....	85
5.2.	Puesta a tierra	87
6.	INSTRUCCIONES PARA EL USO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO	89
6.1.	Inspección general del estado del campo fotovoltaico	90

6.2.	Inspección general del estado de los acumuladores.....	90
6.3.	Inspección general del estado de los aparatos	92
7.	PRESUPUESTO.....	93
	CONCLUSIONES.....	97
	RECOMENDACIONES	99
	BIBLIOGRAFÍA.....	101

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Potencial en kilowatt hora/día de irradiación solar que se recibe en Guatemala.....	7
2.	Diagrama de un sistema aislado a la red eléctrica.....	10
3.	Funcionamiento y elementos de una celda solar	12
4.	Arreglo de celdas	14
5.	Partes de una celda solar.....	17
6.	Radiación solar media recibida en superficie, expresada watt / metros cuadrados.....	19
7.	Incidencia de rayos solares.....	20
8.	Ángulo de inclinación óptimo en verano e invierno	22
9.	Curva IV y PV para un módulo fotovoltaico típico a 1 000 W/m ² y 25 °C.....	27
10.	Conexión en serie de un sistema fotovoltaico	29
11.	Conexión en paralelo de celdas solares.....	30
12.	Conexión de módulos fotovoltaicos.....	31
13.	Trayectoria del sol (hora solar) en Guatemala	61

TABLAS

I.	Distribución de energía recibida en tres intervalos de longitud de onda.....	6
II.	Eficiencia de celdas solares comerciales	18

III.	Porcentaje de rendimiento anual de un sistema fotovoltaico en Holanda	21
IV.	Placa del fabricante de un módulo Solarex VLX-53.....	28
V.	Consumo teórico de energía eléctrica	47
VI.	Irradiación media de la radiación global de una superficie a distintos ángulos de inclinación	50
VII.	Datos calculados del cociente Y para todos los meses del año, determinación del peor mes del año	53
VIII.	Especificaciones del módulo.....	59
IX.	Horas de salida, puesta del sol y horas de sol durante el día, en 2006.....	60
X.	Requerimientos del subsistema de acondicionamiento de potencia.....	72
XI.	Potencia de servicio continuo P_{inv} del subsistema de acondicionamiento de la red (inversor) y corriente entre la batería $I_{Acu\ inv}$ y el inversor para los dos sistemas diseñados, según el consumo	74
XII.	Colores habitual en instalaciones fotovoltaicas.	79
XIII.	Presupuesto para el equipo del sistema fotovoltaico	93
XIV.	Presupuesto obra eléctrica	94
XV.	Presupuesto mano de obra civil.....	94
XVI.	Presupuesto mano de obra electrónica	95

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Amperio
Ah	Amperio-hora
CA	Corriente alterna
DC	Corriente directa
E_{elec,máx}	Energía eléctrica máxima
FV	Fotovoltaico
°C	Grados centígrados
g	Gramo
Hz	Hertz
H.S.P.	Hora sol pico
kg	Kilogramo
kJ	Kilojoules
kW	Kilowatt
kWh	Kilowatt hora
l	Litro
MW	Mega-watt
MJ	Mega-joule
m²	Metros cuadrados
msnm	Metros sobre el nivel del mar
mm²	Milímetros cuadrados
N_{p,mod}	Número de módulos conectados en paralelo
N_{s,mod}	Número de módulos conectados en serie
N_{mod}	Número final total de módulos.

P_{mod}	Potencia modulo
%	Por ciento
rpm	Revoluciones por minuto
V	Voltios
Wp	Watt pico
W	Watt o vatio
Wh	Watt-hora

GLOSARIO

Alternador	Máquina destinada a transformar la energía mecánica en eléctrica generando, mediante fenómenos de inducción, una corriente alterna.
Célula fotovoltaica	También es llamada célula o celda fotovoltaica. Es un dispositivo electrónico que permite transformar la energía luminosa (fotones) en energía eléctrica electrones, mediante el efecto fotoeléctrico.
Corriente alterna	Por sus siglas en ingles AC. Es la corriente eléctrica en la que la magnitud y dirección varían cíclicamente.
Corriente directa	Es el flujo continuo de electrones a través de un conductor entre dos puntos de distinto potencial. A diferencia de la CA, en la corriente continua las cargas eléctricas circulan siempre en la misma dirección.
Corriente eléctrica	Es el flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material. Se debe al movimiento de los electrones en el interior del material.
Efecto fotoeléctrico	Consiste en la emisión de electrones, por un material, cuando se le ilumina con radiación electromagnética (luz visible o ultravioleta).

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.
Fuerza electromotriz	Es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Es una característica de cada generador eléctrico.
Módulo fotovoltaico	Están formados por un conjunto de celdas (células fotovoltaicas) que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos.
Potencia pico	De un elemento fotovoltaico, no es más que la máxima potencia eléctrica que este genera bajo las siguientes condiciones estándares de medida: XIV irradiación: 1 000 W/m ² ; temperatura: 25 °C; AM o Masa de Aire: 1,5.
Radiación difusa	Es recibida por la radiación del sol de la atmósfera como consecuencia de la dispersión. Esta energía puede suponer aproximadamente un 15 % de la radiación global en los días soleados. Pero en los días nublados, debido a que la radiación directa es muy baja, esta supone un porcentaje mucho mayor.

Radiación directa	Es la que llega directamente del foco solar, sin reflexiones o refracciones intermedias.
Radiación solar	Conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol.
Resistencia eléctrica	Oposición que presenta un material al ser atravesado por una corriente eléctrica.
Temperatura	Es una magnitud referida a las nociones comunes de calor o frío. Por lo general, un objeto más caliente tendrá una temperatura mayor.

RESUMEN

En el presente trabajo de graduación se presenta el diseño y control de un sistema de energía fotovoltaico partiendo por una introducción de los conceptos generales sobre energía solar hasta comprender sus usos.

Teniendo los conocimientos básicos de energía solar se procede a conocer las celdas fotovoltaicas, que se utilizan como elemento captador de la radiación solar sobre la tierra. Se explican los tipos celdas por sus materiales y formas, hasta la manera que los paneles solares orientan a la mejor captación.

Se procede a presentar los parámetros que se deben de tomar en cuenta para el diseño del sistema fotovoltaico propuesto. Se explicará por medio de etapas siendo: etapa arreglos fotovoltaicos que son los captadores de radiación solar, la etapa de almacenamiento que se logra por medio de baterías, etapa de regulación de voltaje DC, terminando por la etapa de conversión de corriente directa a corriente alterna.

Luego se diseñará el sistema fotovoltaico partiendo de la especificación del consumo eléctrico, tomando en cuenta los servicios básicos del hogar. Y se calculará cada elemento a utilizar en las etapas anteriormente descritas. El tamaño se relaciona con el consumo, pues según el consumo así será la dimensión del sistema y la generación de energía.

Posterior al diseño se explicarán los cuidados de traslado y montaje de los elementos del sistema fotovoltaico. Culminando con instrucciones básicas del uso del sistema fotovoltaico.

OBJETIVOS

General

Realizar el diseño y operación del sistema de mando electrónico para suministro de energía solar domiciliar e implementarlo como sustitución de la convencional, utilizando la tecnología actual y disponible en Guatemala y Centroamérica.

Específicos

1. Presentar los fundamentos de los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica.
2. Explicar el funcionamiento de las celdas solares.
3. Detallar los parámetros de diseño de un sistema solar fotovoltaico.
4. Exponer la propuestas de diseño del sistema de mando electrónico para suministro de energía solar domiciliar.
5. Exteriorizar los fundamentos de seguridad industrial en el montaje del sistema fotovoltaico.
6. Exhibir las instrucciones para el uso del sistema fotovoltaico diseñado.
7. Mostrar el presupuesto del sistema.

INTRODUCCIÓN

En esta época, la energía eléctrica es indispensable para la vida, ya que es el elemento principal que permite realizar la transformación y la maquinación de la materia prima. También permite tener iluminación durante las noches, siendo uno de los factores que mueve la industria, el transporte y el confort en los hogares.

Se tienen alternativas para obtener energía eléctrica en esta época, y este tema busca soluciones factibles. El aprovechamiento de la energía solar en la actualidad es muy importante, puesto que es una fuente de energía alternativa proveniente del sol, que no causa contaminación ambiental y que es usada en forma autónoma o añadirla a la red eléctrica pública.

Cuando se usa en forma autónoma, es posible dar solución a los problemas de energía para los equipos electrónicos aplicados a la comunicación. También aplicados telefonía y electrodomésticos en las grandes ciudades y en las comunidades rurales o alejadas de los grandes centros de distribución, pero esto solo es posible si se tiene un buen sistema de generación solar y desde luego un sistema eficiente de conversión CD-CD o CD-CA.

La evolución continua de la electrónica de potencia en los últimos años, y el desarrollo de los elementos semiconductores de potencia ha propiciado que se realicen conversiones de energía de forma eficiente. Esto con altos niveles de potencia para satisfacer la demanda de energía en el sector comercial, industrial y doméstico.

A nivel mundial los países que más invierten en energías renovables son: Japón, Alemania, España y Estados Unidos. Estos, por ser potencias mundiales, tienen una gran responsabilidad en todos los problemas que se han desarrollado, por la excesiva explotación de las fuentes de energía no renovable. Además, sus empresas generadoras de energía eléctrica están obligadas a utilizar energía renovable en sus instalaciones, especialmente en edificios e industrias.

Guatemala, actualmente utiliza fuentes de energía renovable para la producción de energía eléctrica. Para 1990 el suministro de energía eléctrica con energías renovables era del 92 % por hidroeléctricas y el resto por combustibles fósiles; pero en 2005 las hidroeléctricas tuvieron una participación del 40 % y los combustibles fósiles el 60 %.

El Gobierno de Guatemala está obligado a buscar soluciones sobre la problemática de la energía. Actualmente, se están realizando algunos estudios y con la ayuda técnica y financiera del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) a través del Proyecto Solar and Wind Energy Resource Assessment (SWERA) se cuentan con mapas del potencial eólico y solar en el país. Estos estudios, con la tecnología adecuada, implantan fuentes de energía renovable, como: la energía eólica, energía solar fotovoltaica, energía solar térmica y otras.

Además, se está promoviendo el uso de energías renovables. Esto a través de incentivos, como exoneración de impuestos en empresas generadoras de energía eléctrica y a industrias que la difunden para su consumo.

Sin embargo, las instalaciones de energía renovable se han desarrollado específicamente en el área rural, como instalaciones aisladas a la red de distribución.

Tanto el Gobierno de Guatemala como la industria guatemalteca deben fomentar el uso de energías renovables, ya que los otros tipos tienen diversas aplicaciones como: repetidores de radio o televisión, alumbrado público, bombeo de agua, suministro de energía a viviendas rurales y urbanas, entre otras.

El presente trabajo tiene la finalidad de implementar el uso de fuentes de energía renovable en Guatemala. Se toma como base los recursos disponibles y la tecnología al alcance; propiciando el uso de la energía solar fotovoltaica en sistemas individuales.

1. SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON ENERGÍA FOTOVOLTAICA

1.1. Tipos de energía renovable

El término energía renovable engloba una serie de fuentes de energía que en teoría se consideran inagotables a escala humana, ya que se producen de forma continua con el paso del tiempo. Estas fuentes son una alternativa a las otras llamadas convencionales (no renovables) y producen un impacto ambiental mínimo con la excepción de la geotermia, la totalidad de las energías renovables derivan directa o indirectamente de la energía solar. Directamente en el caso de la luz y el calor producidos por la radiación solar, e indirectamente en el caso de las energías eólica, hidráulica, mareas, olas y biomasa, entre otras; porque su calor provoca en la tierra las diferencias de presión que dan origen a los vientos, fuente de la energía eólica. También de este procede la energía hidráulica, pues ordena el ciclo del agua y causa la evaporación que predispone la formación de nubes, y, por tanto, de las lluvias. Las plantas se alimentan del sol para realizar la fotosíntesis, vivir y crecer; toda esta materia vegetal es la biomasa. Por último, el sol se aprovecha directamente, pues conforma energía solar y la energía solar fotovoltaica. Sin embargo, la mayoría de veces se configura de forma distinta y separando cada una de ellas.

Las energías renovables, a lo largo de la historia y hasta bien entrado el siglo XIX, han cubierto la totalidad de las necesidades energéticas del hombre. Solo en los últimos cien años han sido superadas, primero por el empleo del carbón, y a partir de 1950 por el petróleo y en menor medida por el gas natural.

Se considera que el sol abastecerá estas fuentes de energía (radiación solar, viento y lluvia) durante los próximos cuatro mil millones de años. La primera ventaja de una cierta cantidad de fuentes de energía renovables es que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones, contrariamente a lo que ocurre con los combustibles, sean fósiles o renovables.

Algunas fuentes renovables no emiten dióxido de carbono adicional, salvo los necesarios para su construcción y funcionamiento. Tampoco presentan ningún riesgo suplementario, tales como el riesgo nuclear.

En la actualidad hay sistemas de energía renovable que utilizan más de una de ellas en su configuración. Esto depende de los recursos naturales al alcance, la tecnología disponible y las necesidades que se cubrirán.

1.2. La energía solar

El sol, fuente de vida y origen de las demás formas de energía que el hombre ha utilizado desde los albores de la historia, puede satisfacer todas las necesidades, si se aprende cómo aprovechar la luz que continuamente derrama sobre el planeta. Ha brillado en el firmamento desde hace unos cinco mil millones de años, y se calcula que todavía no ha llegado ni a la mitad de su existencia.

Durante el año, el sol arrojará sobre la tierra cuatro mil veces más energía que la que se consume.

Algunos estados de la República de Guatemala, por su privilegiada situación y climatología, en cada metro cuadrado de su suelo inciden al año unos 1 500 kilovatios-hora de energía aproximadamente (6 Kwh/M² por día).

Esta energía puede aprovecharse directamente, o bien ser convertida en otras formas útiles como, por ejemplo, en electricidad.

No sería racional desaprovechar, por los medios técnicamente posibles, esta fuente energética gratuita, limpia e inagotable. Ella puede liberar al hombre de la dependencia del petróleo o de otras alternativas poco seguras, contaminantes o, simplemente no renovables.

Es preciso, no obstante, señalar que existen algunos problemas que se deben afrontar y superar. Aparte de las dificultades que una política energética solar avanzada conllevaría por sí misma, hay que tener en cuenta que esta sometida a continuas fluctuaciones y a variaciones más o menos bruscas. Así, por ejemplo, la radiación solar es menor en invierno, pero en verano es muy intensa.

Es de vital importancia proseguir con el desarrollo de la incipiente tecnología de captación, acumulación y distribución de la energía solar, logrando las condiciones que la hagan definitivamente competitiva, a escala planetaria.

1.3. ¿Qué se puede hacer con la energía solar?

Básicamente, recogiendo de forma adecuada la radiación solar, se obtiene calor y electricidad.

El calor se logra mediante los colectores térmicos, y la electricidad, a través de los llamados módulos fotovoltaicos. Ambos procesos nada tienen que ver entre sí, ni en cuanto a su tecnología ni en su aplicación.

Las celdas solares, dispuestas en paneles solares, ya producían electricidad en los primeros satélites espaciales. Actualmente se perfilan como la solución definitiva al problema de la electrificación rural, con clara ventaja sobre otras alternativas. Al carecer de los paneles de partes móviles, resultan totalmente inalterables al paso del tiempo, no contaminan ni producen ruido en absoluto, no consumen combustible y no necesitan mantenimiento. Además, y aunque con menos rendimiento, funcionan también en días nublados, puesto que captan la luz que se filtra a través de las nubes.

La electricidad que así se obtiene puede usarse de manera directa (por ejemplo para sacar agua de un pozo o para regar, mediante un motor eléctrico). También puede ser almacenada en acumuladores para usarse en las horas nocturnas, incluso es posible inyectar la electricidad sobrante a la red general, obteniendo un importante beneficio.

Si se consigue que el precio de las celdas solares siga disminuyendo, iniciándose su fabricación a gran escala, es muy probable que, a mediados de siglo XXI, una buena parte de la electricidad consumida en los países ricos en sol tenga su origen en la conversión fotovoltaica.

La energía solar puede ser perfectamente complementada con otras energías convencionales, para evitar la necesidad de grandes y costosos sistemas de acumulación. Así, una casa bien aislada puede disponer de agua caliente y calefacción solares, con el apoyo de un sistema convencional a gas o eléctrico que únicamente funcionaría en los periodos sin sol. El costo del pago de la luz sería solo una fracción del que alcanzaría sin la existencia de la instalación solar.

1.4. Radiación que llega a la tierra

La intensidad de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra se reduce por varios factores variables. Estos son la absorción de la radiación en intervalos de longitud de onda específicas por los gases de la atmósfera, dióxido de carbono, ozono, entre otros. Esto debido al vapor de agua, por la difusión atmosférica, por las partículas de polvo, moléculas y gotitas de agua, por reflexión de las nubes y por la inclinación del plano que recibe la radiación respecto de la posición normal de la radiación.

La distribución temporal de la energía solar que alcanza la superficie es muy irregular. No solamente varía la insolación máxima diaria (horas en las que el sol está encima del horizonte del lugar) sino que la radiación solar es más o menos atenuada, según la composición instantánea de la atmósfera que atraviesa. Por ello, la radiación solar puede ser directa, difusa y albedo; pero la energía solar fotovoltaica utiliza la radiación directa y la radiación difusa, para la generación eléctrica.

En término medio solo el 47 % de la radiación incidente sobre la atmósfera terrestre alcanza la superficie del planeta. El 31 % lo hace directamente y el otro 16% después de ser dispersada por polvo en suspensión, vapor de agua y moléculas del aire. La energía restante, un 53 %, es reflejada hacia el espacio exterior o absorbida en la atmósfera.

La potencia de la radiación solar que se recibe en un instante determinado sobre un metro cuadrado de superficie se conoce como irradiación (Is) y se expresa en W/m^2 . Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es superior a los $1\ 000\ W/m^2$ en la superficie terrestre. Este es un valor de referencia en la ingeniería relacionada con la energía solar.

La intensidad de la radiación medida en la superficie de la tierra varía de 1,6 a 0.

La tabla I indica la distribución de energía transmitida en tres intervalos de longitud de onda, para diversas masas de aire, m, y se basa en la constante solar de 1,896 cal/min. Cm, donde la masa de aire (m) se define como la radiación y el espesor cuando el sol está en el cenit y el observador al nivel del mar.

Tabla I. **Distribución de energía recibida en tres intervalos de longitud de onda**

Energía transmitida, cal./(min.)(cm ²)					
m =0	1	2	3	4	5
0,1361	0,057	0,029	0,014	0,008	0,004
0,774	0,601	0,47	0,371	0,295	0,235
0,9861	0,672	0,561	0,486	0,427	0,377
1,896	1,33	1,06	0,871	0,73	0,616

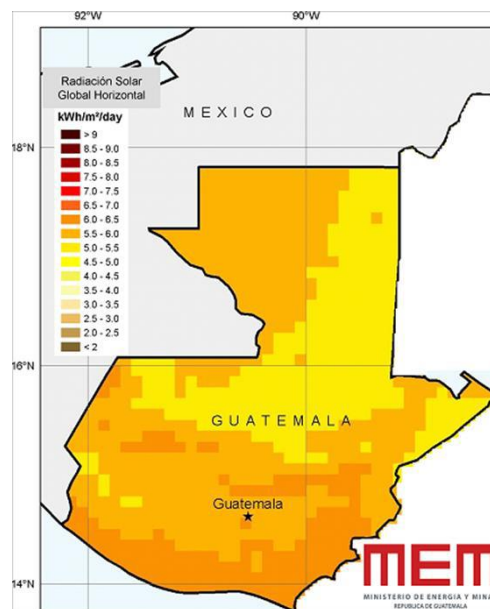
Fuente: elaboración propia.

1.5. Radiación en algunas regiones de Guatemala

Según se aprecia en el mapa en la figura 1 hay un buen promedio de radiación aprovechable para fines térmicos en prácticamente toda la República de Guatemala.

Durante aproximadamente 350 días del año hay suficiente radiación solar para satisfacer el 95 % de sus necesidades de agua caliente o calor, con una inversión que se amortiza en uno a dos años.

Figura 1. **Potencial en kilowatt hora/día de irradiación solar que se recibe en Guatemala**



Fuente: *Irradiación solar*. <http://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Mapa-solar.pdf>.

Consulta: 3 de junio de 2013.

1.6. Usos posibles de la energía solar

En una lista parcial de posibles usos de la energía solar, figuran:

- Calefacción doméstica
- Refrigeración
- Calentamiento de agua

- Destilación
- Generación de energía
- Fotosíntesis
- Hornos solares
- Cocinas
- Evaporación
- Acondicionamiento de aire
- Control de heladas
- Secado

Se han ensayado todos los usos citados de la energía solar en escala de laboratorio, pero no se han llevado a la escala industrial. En muchos casos, el costo de la realización de estas operaciones con energía solar, no compiten con el costo cuando se usan otras fuentes de energía por la gran inversión inicial necesaria para que funcionen con energía solar. Por ello la mayor parte de los estudios de los problemas de utilización de esta energía está relacionado con problemas económicos.

Las instalaciones solares pueden considerarse clasificadas por tres tipos de aplicación. Primero, hornos solares, usados como medio de laboratorio para obtener altas temperaturas en diversos estudios y propuestos para usos semiindustriales. En segundo lugar, los usos potenciales de disposiciones solares sencillas como cocinas: refrigerantes y bombas de irrigación en regiones no industrializadas, con radiación segura y en donde los actuales recursos de energía no son satisfactorios o resulten caros. Un tercer grupo de aplicación de energía solar podrá competir en el futuro, económicamente, con otras fuentes de energía en algunas zonas de países industrializados, como los EE.UU., si los adelantos técnicos en este campo o los cambios en el costo de la energía de otras fuentes llegan a alterar su costo relativo.

1.7. Sistemas conectados a la red eléctrica

Proveen de energía eléctrica al sistema o la inyectan directamente a la red en momentos de sobreproducción. Estos sistemas se mantienen de la red cuando sea necesario. Por lo tanto, no es necesario vincular el dimensionamiento de la instalación de energía renovable (fotovoltaica, eólica), al consumo estimado de la instalación eléctrica que debe suministrar; pues esta suministra directamente de la red eléctrica como una instalación eléctrica convencional.

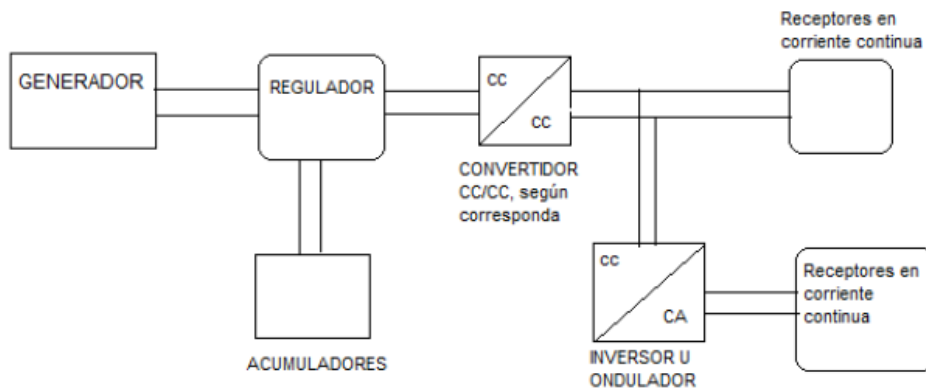
Una instalación conectada a la red eléctrica tiene menos componentes que una instalación autónoma, debido, a que no se precisa almacenamiento de energía (baterías), ni de un regulador. Estos sistemas suelen necesitar inversores y sistemas específicos que permiten el flujo y control de la energía.

1.8. Sistemas aislados a la red eléctrica

Los sistemas aislados o autónomos son específicos de aplicaciones donde la red de distribución eléctrica no es disponible. Estos sistemas, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente deben estar equipados con sistemas de acumulación de la energía generada, baterías electroquímicas o acumuladores. Esto a fin de disponer de electricidad durante períodos de poca generación de energía o de elevada demanda, con su correspondiente controlador de carga o regulador. También llevan asociado un sistema electrónico, inversor, que permita la transformación de la corriente continua suministrada por el captador de energía (paneles fotovoltaicos, aerogeneradores, minihidroeléctrica u otro), en corriente alterna.

En cualquier aplicación de un sistema aislado se recomienda el uso de receptores eléctricos (electrodomésticos, lámparas, electrobombas, y otras.) de bajo consumo y alto rendimiento, a fin de reducir, el dimensionado de los componentes del sistema.

Figura 2. **Diagrama de un sistema aislado a la red eléctrica**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

2. FUNCIONAMIENTO DE LAS CELDAS SOLARES

2.1. Celdas solares (celdas fotovoltaicas)

Fotovoltaica es la conversión directa de luz en electricidad a nivel atómico. Algunos materiales presentan una propiedad conocida como efecto fotoeléctrico que hace que absorban fotones de luz y emitan electrones. Cuando estos electrones libres son capturados; el resultado es una corriente eléctrica que puede ser utilizada como electricidad.

El primero en notar el efecto fotoeléctrico fue el físico francés Edmund Becquerel, en 1839. Él encontró que ciertos materiales producían pequeñas cantidades de corriente eléctrica cuando eran expuestos a la luz. En 1905, Albert Einstein describió la naturaleza de la luz y el efecto fotoeléctrico, el cual está basada la tecnología fotovoltaica. Por este trabajo, se le otorgó más tarde el premio Nobel de física. El primer módulo fotovoltaico fue construido en los Laboratorios Bell en 1954. Fue descrito como una batería solar y era más que nada una curiosidad, ya que resultaba demasiado costoso como para justificar su utilización a gran escala. En la década de 1960, la industria espacial comenzó, por primera vez, a hacer uso de esta tecnología para proveer la energía eléctrica a bordo de las naves espaciales. A través de los programas espaciales, la tecnología avanzó, alcanzó un alto grado de confiabilidad y se redujo su costo. Durante la crisis de energía en la década de 1970, la tecnología fotovoltaica empezó a ganar reconocimiento como una fuente de energía para aplicaciones no relacionadas con el espacio.

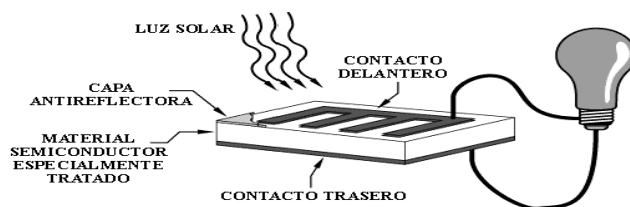
Las células fotoeléctricas son dispositivos basados en la acción de radiaciones luminosas sobre ciertas superficies metálicas. El efecto de esas radiaciones son de tres tipos: el efecto fotoemisor o fotoexterno, provoca en el metal un arranque de electrones con liberación de los mismos. El efecto fotoconductor o fotointerno modifica la conductividad eléctrica del metal y el efecto fotovoltaico, crea una fuerza electromotriz en el metal.

En este último, se encuentra integradas las células fotovoltaicas, que generan un paso de corriente proporcional al flujo luminoso que reciben. Estas células no requieren ni tensión auxiliar ni vacío, razón por la cual son utilizadas para la conversión de energía solar en energía eléctrica. Chapin, Fuller y Pearson desarrollaron en 1954 la primera célula solar capaz de convertir, la luz del sol en energía eléctrica.

Los materiales usados para las células fotovoltaicas son los semiconductores, ya que la energía que liga a los electrones de valencia con su núcleo, es similar a la energía de los fotones que constituyen la luz solar.

La figura 3 ilustra la operación de una celda fotovoltaica llamada también celda solar.

Figura 3. **Funcionamiento y elementos de una celda solar**



Fuente: *Celda solar*.

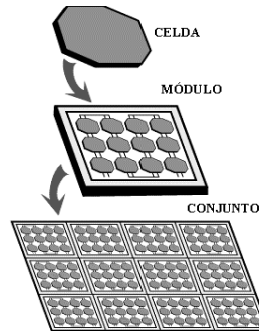
http://www.anes.org/anes/formularios/EnergiaRenovable/images/cell_cell_sp.gif. Consulta: 5 de junio de 2013.

La célula o celda fotovoltaica es un dispositivo capaz de convertir la luz en energía eléctrica de una forma directa e inmediata. Las células fotovoltaicas más utilizadas son las construidas con base en silicio monocristalino. Sin embargo, hay diversos procedimientos y tipos de materiales que se usan para la construcción de las células.

Las celdas solares están hechas de la misma clase de materiales semiconductores, tales como el silicio, usados en la industria microelectrónica. Para las celdas solares, una delgada rejilla semiconductor es especialmente tratada para formar un campo eléctrico, positivo en un lado y negativo en el otro. Cuando la energía luminosa llega hasta la celda solar, los electrones son golpeados y sacados de los átomos del material semiconductor. Si se colocan conductores eléctricos tanto del lado positivo como del negativo de la rejilla, formando un circuito eléctrico, los electrones pueden ser capturados en forma de una corriente eléctrica, es decir, en electricidad. La electricidad puede entonces ser usada para suministrar potencia a una carga, por ejemplo para encender una luz o energizar un equipo eléctrico.

Varios módulos son conectados unos con otros para formar un arreglo. En general, cuánto más grande es el área de un módulo o arreglo, más electricidad será producida. Los módulos y arreglos fotovoltaicos producen corriente directa (CD). Estos arreglos pueden ser conectados tanto en serie como en paralelo para producir cualquier cantidad de voltaje o corriente que se requiera.

Figura 4. **Arreglo de celdas**



Fuente: *Celdas*. www.cec.uchile.com. Consulta: 3 de febrero de 2013.

2.1.1. Tipos de celdas fotovoltaicas por sus materiales

Existen diferentes tipos de celdas en función de sus materiales. Los tipos de celdas solares que se encuentran en el mercado son los siguientes:

2.1.1.1. Silicio puro monocristalino

Están basados en secciones de una barra de silicio cristalizado en una sola pieza.

2.1.1.2. Silicio puro policristalino

Los materiales tienden a ser semejantes a los paneles solares de silicio puro monocristalino, aunque el proceso de cristalización es diferente.

2.1.1.3. Silicio amorfo

También son paneles basados en silicio, pero este material no sigue una estructura cristalina. Este tipo de paneles son empleados habitualmente para pequeños dispositivos electrónicos y portátiles.

2.1.1.4. Arseniuro de Galio

Se trata de uno de los materiales más eficientes en cuanto a la potencia de generación de electricidad. Su gran desventaja radica en el elevado costo de este nuevo material empleado.

2.1.1.5. Teluro de cadmio

Su mayor ventaja es su bajo coste de producción. Estos paneles son producidos en serie en un proceso totalmente automático. Y su mayor defecto es que el teluro es uno de los elementos más escasos que existen.

2.1.1.6. Diseleniuro de cobre en indio

Esta tiene capacidad de absorción extremadamente alta, lo que significa que el 99 % de la luz que brilla será absorbida.

2.1.1.7. Tándem

Estos combinan dos tipos de materiales semiconductores distintos. Debido a que cada tipo de material aprovecha solo una parte del espectro electromagnético de la radiación solar, mediante la combinación de dos o tres tipos de materiales, es posible aprovechar una mayor parte del mismo.

2.1.2. Tipos de celdas fotovoltaicas en función de la forma

Existen diferentes tipos de celdas en función de su forma. Los tipos de paneles solares que se encuentran en el mercado son los siguientes:

2.1.2.1. Paneles de formato baldosa o teja

Son paneles de pequeño tamaño, y están especialmente pensados para ser combinados en gran número, cubriendo grandes superficies.

2.1.2.2. Paneles con sistemas de concentración

A través de unas superficies reflectantes se concentra la luz sobre los diferentes paneles fotovoltaicos. Aunque el porcentaje de conversión tiende a no variar, una misma superficie de panel producirá más electricidad, ya que recibe una cantidad concentrada de fotones.

2.1.2.3. Paneles solares bifaciales

Son paneles especiales basados en un tipo de panel capaz de transformar, en electricidad, la radiación solar que le recibe por absolutamente cualquiera de sus dos caras.

2.2. Estructura de una celda solar

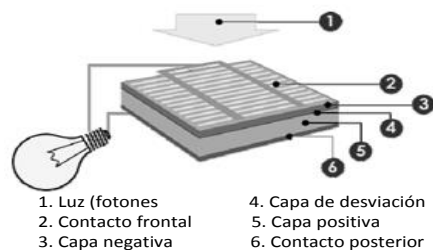
Las celdas solares de silicio pueden ser de tipo monocristalinas, policristalinas o amorfas. La diferencia entre ellas radica en la forma como los átomos de silicio están dispuestos, es decir, en la estructura cristalina.

Existe, además, una diferencia en la eficiencia. Por eficiencia se entiende el porcentaje de luz solar que es transformado en electricidad. Las celdas solares de silicio monocristalino y policristalino tabla II tienen casi el mismo y más alto nivel de eficiencia con respecto a las de silicio amorfo.

Una celda solar típica está compuesta de capas. Primero hay una capa de contacto posterior y, luego, dos capas de silicio. En la parte superior se encuentran los contactos de metal frontales con una capa de antireflexión, que da a la celda solar su típico color azul.

La figura 5 muestra un panel solar recibiendo energía solar. Además de las partes que la componen, y una lámpara incandescente que es energizada con corriente eléctrica obtenida por efecto fotovoltaico.

Figura 5. **Partes de una celda solar**



Fuente: *Celda solar*. <http://podersolarmx.tripod.com/id11.html>. Consulta: 4 de febrero de 2013.

Durante la última década se han estado desarrollando nuevos tipos de celdas solares de materiales diversos. Entre ellas las celdas de película delgada y a las celdas de CIS (diseleniuro de indio de cobre) y CdTe (telururo de cadmio). Las mismas están comenzando a ser comercializadas.

Tabla II. **Eficiencia de celdas solares comerciales**

Eficiencias de celdas:	
Monocristalina:	12-15 %
Policristalina:	11-14 %
Amorfa:	6-7 %
Telurio de Cadmio:	7-8 %

Fuente: elaboración propia.

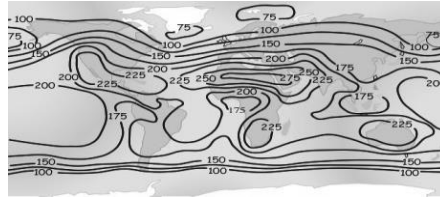
2.3. Radiación solar

La intensidad de la luz solar que alcanza el planeta varía según el momento del día y del año, el lugar y las condiciones climáticas. La energía total registrada sobre una base diaria o anual se denomina radiación e indica la intensidad de dicha luz. La radiación se expresa en watts hora / metros cuadrados por día o, también, en kilowatts hora/metros cuadrados por día.

Con el fin de simplificar los cálculos realizados con base en la información sobre radiación, la energía solar se expresa en equivalentes a horas de luz solar plena. La luz solar plena registra una potencia de unos 1 000 W/m²; por lo tanto, una hora de luz solar plena equivale a 1 kWh/m² de energía. Esta es, aproximadamente la cantidad de energía solar registrada durante un día soleado de verano, con cielo despejado, en una superficie de un metro cuadrado de celda solar, colocada perpendicular al sol.

Puede apreciarse en la figura 6 que la radiación solar media, recibida en superficie terrestre, oscila entre un máximo de unos 275 W/m² en las regiones despejadas de nubosidad del Sahara y Arabia. Pero hasta un mínimo de 75 W/m² en las islas brumosas del Ártico. La media global es de 170 W/m².

Figura 6. **Radiación solar media recibida en superficie, expresada watt/metros cuadrados**



Fuente: *Radiación solar*. <http://e-ciencia.com/opinion/foros/index.php?topic=1884.0>.

Consulta: 4 de febrero de 2013.

La radiación varía según el momento del día. Sin embargo, también puede variar considerablemente de un lugar a otro, especialmente en regiones montañosas. La radiación fluctúa entre un promedio de 1 000 kWh/m² al año en los países del norte de Europa (tales como Alemania), y 2 000 a 2 500 kWh/m² al año, en las zonas desérticas. Estas variaciones se deben a las condiciones climáticas y a la diferencia con respecto a la posición relativa del sol en el cielo (elevación solar), la cual depende de la latitud de cada lugar.

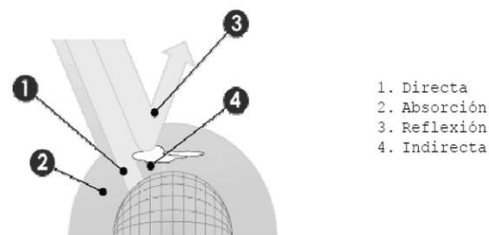
Por ejemplo, la luz solar plena registra una potencia de unos 1 000 W/m². Esta luz, cayendo en perpendicular sobre una superficie de 1 m² durante una hora, equivale a una energía de 1 000 Wh o 1 kWh (energía = potencia multiplicada por tiempo ($E = P \times t$)). Del mismo modo, una radiación diaria promedio de 5 kWh/m²/día corresponderá a 5 horas de luz solar plena al día.

2.4. Orientación

La luz solar viaja en línea recta desde el sol hasta la tierra. Al penetrar la atmósfera terrestre, una parte se dispersa y otra cae sobre la superficie en línea recta. Finalmente, una última parte es absorbida por la atmósfera. La luz solar dispersa se denomina radiación difusa o luz difusa. La luz del sol, que cae

sobre la superficie sin dispersarse ni ser absorbida, es radiación directa. Como todos habrán constatado gracias a los baños de sol y al trabajo al aire libre, la radiación directa es la más intensa.

Figura 7. **Incidencia de rayos solares**



Fuente: *Rayos solares*. <http://www.cientec.or.cr/articulos/protegerse-del-sol-radiacion-ultravioleta>. Consulta: 3 de febrero de 2013.

Únicamente una pequeña fracción del total de luz solar alcanza, en efecto, la superficie de la tierra.

Un panel solar genera electricidad incluso en ausencia de luz solar directa. Por ende, un sistema solar generará energía aun cuando el día esté nublado. Sin embargo, las condiciones óptimas de operación implican: la presencia de luz solar plena y un panel orientado lo mejor posible hacia el sol, con el fin de aprovechar al máximo la luz solar directa. En el hemisferio norte, el panel deberá orientarse hacia el sur y en el hemisferio sur, hacia el norte.

Por lo tanto, en la práctica, los paneles solares deberán ser colocados en ángulo con el plano horizontal (inclinados). Cerca del ecuador, el panel solar deberá colocarse ligeramente inclinado (casi horizontal) para permitir que la lluvia limpie el polvo.

Una pequeña desviación en la orientación no influye significativamente en la generación de electricidad, ya que durante el día el sol se traslada de este a oeste.

Por ejemplo, los porcentajes de rendimiento anual de un sistema FV con una inclinación de panel de 45°, para diversas orientaciones en Holanda tabla III.

Tabla III. **Porcentaje de rendimiento anual de un sistema fotovoltaico en Holanda**

O	SO	S	SE	E
78,00 %	94,00 %	97,00 %	94,00 %	78,00 %

Fuente: elaboración propia.

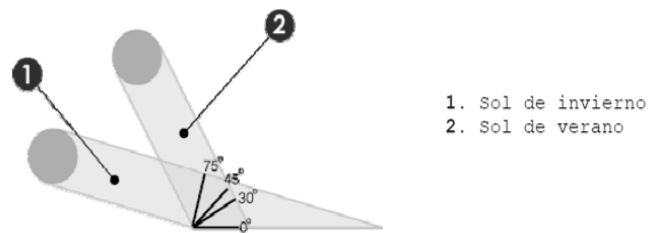
El rendimiento es máximo (100 %) cuando los paneles tienen una inclinación de 36° y están orientados hacia el sur.

2.5. **Ángulo de inclinación**

El sol se desplaza de este a oeste. Los paneles solares alcanzan su máxima efectividad cuando están orientados hacia el sol, en un ángulo perpendicular con él a mediodía. Por lo general, los paneles solares son colocados sobre un techo o una estructura y tienen una posición fija; no pueden seguir la trayectoria del sol. Por lo tanto, no estarán orientados hacia el astro con un ángulo óptimo (90°) durante toda la jornada. El ángulo entre el plano horizontal y el panel solar se denomina ángulo de inclinación.

Debido al movimiento terrestre alrededor del sol existen también variaciones estacionales. En invierno, el sol no alcanzará el mismo ángulo que en verano. Idealmente, en verano los paneles solares deberían ser colocados en posición ligeramente más horizontal para aprovechar al máximo la luz solar. Sin embargo, los mismos paneles no estarán, entonces, en posición óptima para el sol del invierno. Con el propósito de alcanzar un mejor rendimiento anual promedio, los paneles solares deberán ser instalados en un ángulo fijo determinado, y en algún punto tener los ángulos óptimos para el verano y para el invierno. Cada latitud presenta un ángulo de inclinación óptimo. Los paneles deben colocarse en posición horizontal únicamente en zonas cercanas al ecuador.

Figura 8. **Ángulo de inclinación óptimo en verano e invierno**



Fuente: *Ángulos.*

http://www.fondear.org/infonautic/equipo_y_usos/electricidad_energia/paneles_solares/paneles_solares.htm. Consulta: 4 de febrero de 2013.

Ligeras desviaciones de unos 5° con respecto del ángulo de inclinación óptimo tienen solo un efecto menor en la producción de energía. Las diferencias a causa de las condiciones climáticas son más importantes en la producción de energía. En el caso de los sistemas autónomos, el ángulo de inclinación óptimo depende del patrón de demanda mensual.

Por ejemplo en Holanda (52° latitud norte), el ángulo de inclinación óptimo para un sistema conectado a la red es de 36°. Sin embargo, en este mismo país, para un sistema autónomo con igual demanda de energía anual promedio, el ángulo de inclinación óptimo es de aproximadamente 65°-70°.

2.6. Potencia pico

Al ser expuesta a la luz, una celda solar produce electricidad. Dependiendo de la intensidad de la luz (la radiación en W/m^2), una celda solar produce mayor o menor cantidad de electricidad, la luz solar plena es preferible a la sombra y, a su vez, la sombra es mejor que la luz eléctrica. Para hacer una comparación entre diferentes celdas y paneles solares es necesario conocer la llamada 'potencia nominal' de los mismos. La potencia nominal, expresada en Watts pico o W_p , es una medida que indica cuánta energía puede producir dicho panel solar bajo condiciones óptimas de operación.

Para determinar y comparar la potencia nominal de los paneles solares se mide su salida bajo condiciones estándar de prueba (SCT).

Estas son:

- Una radiación de 1 000 W/m^2 .
- Un espectro solar de referencia de AM 1,5 (que define el tipo y color de la luz).
- Una temperatura de celda de 25 °C (la eficiencia de un panel solar disminuye significativamente cuando la temperatura de la celda aumenta).

Por ejemplo, una celda solar de silicio cristalino, con dimensiones típicas de 10 x 10 cm, registra una potencia pico de 1,5 watt pico aproximadamente.

La mayoría de paneles de 1 m² registran una potencia nominal de unos 100 Wp (si están compuestos por celdas solares de silicio cristalino).

2.7. Sistemas de energía

Para utilizar paneles solares, como fuente de energía segura y confiable, es necesario contar con los siguientes componentes adicionales: cables, una estructura de soporte y, dependiendo del tipo de sistema (conectado a la red, autónomo o de emergencia), un convertidor (CD-CA) o un controlador de carga y baterías. El sistema completo se denomina sistema de generación de electricidad solar.

Existen tres tipos de sistemas de generación solar.

- Sistemas solares autónomos o fotovoltaicos domiciliarios (SFD).
- Sistemas solares conectados a la red pública.
- Sistemas solares de emergencia. Sistemas de generación de electricidad solar utilizados para generar electricidad cuando no hay (temporalmente) una red de distribución pública.

3. PARÁMETROS DE DISEÑO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1. Arreglo de celdas solares y carga de las baterías para obtener la fuente de alimentación de v_{cd} del convertidor

En este capítulo se define la corriente de corto circuito I_{cc} , voltaje a circuito abierto V_{oc} de una celda solar. Se presentan las características de una celda solar comercial con sus gráficas y su tabla de voltajes corrientes y potencia a temperatura de 25 °C. Se dimensiona un arreglo de celdas comercial en serie paralelo para energizar el convertidor multinivel. Se presentan los métodos de carga de baterías para energizar el convertidor y por último se trata los reguladores de cargas en las baterías para garantizar un buen funcionamiento en su conexión con el convertidor.

3.2. Módulo fotovoltaico

Una celda solar expuesta a la luz genera electricidad; es decir, en las terminales eléctricas externas del dispositivo aparece un voltaje que es medido con un voltímetro.

- Corriente a corto circuito I_{cc} : es la máxima corriente generada por la módulo solar y se mide cuando se conecta un circuito exterior a la celda con resistencia nula. Su valor depende del área superficial y de la radiación luminosa.

- Voltaje a circuito abierto V_{oc} : es el voltaje máximo que genera un módulo solar. Este voltaje se mide cuando no existe un circuito externo conectado a la celda.

Las celdas se agrupan en el módulo solar o fotovoltaico. Este conjunto de celdas deben estar convenientemente conectadas, de tal forma que reúnan las condiciones óptimas para su integración en sistemas de generación de energía, siendo compatibles con las necesidades y los equipos estándares existentes en el mercado. Las celdas se pueden conectar en serie o en paralelo.

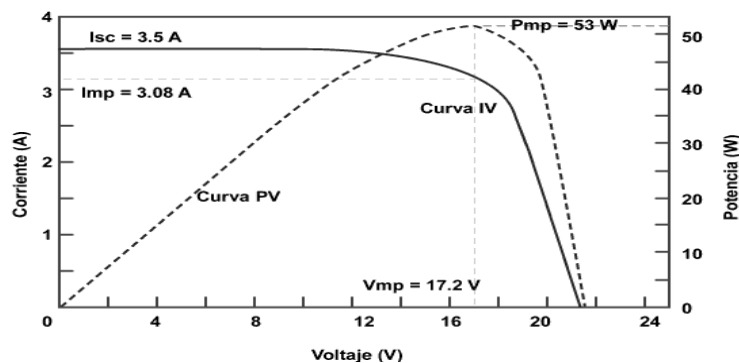
Comercialmente las celdas solares se conectan en serie, se agrupan, se enlaminan y se empaquetan entre hojas de plástico y vidrio, formando la unidad del módulo solar. El módulo tiene un marco (usualmente de aluminio) que le da rigidez y facilidad en el manejo y transportación. Además, en este se encuentran las cajas de conexiones eléctricas para conectar el cableado exterior. El número de celdas que contienen los módulos depende de la aplicación para la que se necesita. Es costumbre configurar el número de celdas conectadas en serie para tener módulos que sirvan para cargar acumuladores (o baterías) de 12 volts. Se pueden encontrar generalmente módulos de 36 celdas conectadas en serie. Estos módulos proporcionan un voltaje de salida que sirve para cargar baterías a 12 volts, incluyendo las pérdidas de voltaje en los circuitos eléctricos así como en los sistemas de control y manejo de energía.

El comportamiento eléctrico de los módulos está dado por las curvas de corriente contra voltaje (curva IV) o potencia contra voltaje (curva PV) que los caracteriza. La curva de potencia se genera multiplicando la corriente y el voltaje en cada punto de la curva IV. La figura 9 muestra curvas IV y PV para un módulo fotovoltaico típico. Bajo condiciones estándares de prueba (irradiancia

de 1 kW/m² y temperatura de celda de 25 °C), cada modelo de módulo tiene una curva IV (o PV) característica. En la curva de potencia contra voltaje, la potencia máxima (Pp) es la capacidad nominal o tamaño del módulo. La corriente y el voltaje en el punto de máxima potencia (Ip y Vp) corresponden a la corriente nominal y voltaje nominal del módulo, respectivamente. Otros parámetros de importancia son la corriente de corto circuito (Icc) y el voltaje de circuito abierto (Vca). Es importante notar que cuando el módulo opera lejos del punto de máxima potencia, la potencia entregada se reduce significativamente.

La potencia máxima o tamaño de los módulos comerciales varía entre 25 y 300 watts. El voltaje nominal de la mayoría de los módulos fluctúa entre los 16 y 17.5 voltios. Cada módulo tiene en su parte posterior una placa del fabricante con el modelo y las especificaciones eléctricas. Por ejemplo, la placa en la parte posterior del módulo de la figura 9.

Figura 9. **Curva IV y PV para un módulo fotovoltaico típico a 1 000 W/m² y 25 °C**



Fuente: *Curvas*. http://solar.nmsu.edu/wp_guide/energia.html. Consulta: 5 de febrero de 2013.

Tabla IV. **Placa del fabricante de un módulo Solarex VLX-53**

Modelo VLX-53	
Pp	53 W
Vp	17,2 V
Ip	3,8 A
Vca	21,5 V
Icc	3,5 A
Condiciones	1 000 W/m ² 25 °C

Fuente: elaboración propia.

El funcionamiento del módulo fotovoltaico se ve afectado por la intensidad de la radiación y de la temperatura. Se presenta un aumento proporcional de la corriente producida con el aumento de la intensidad. También se observa que el voltaje a circuito abierto V_{co} , no cambió, lo cual demuestra su estabilidad frente a los cambios de iluminación.

El módulo fotovoltaico es el componente más confiable del sistema. Es la calidad de la instalación, especialmente de las interconexiones entre los módulos, la que determina la confiabilidad del arreglo FV en su conjunto. Finalmente, la potencia nominal del arreglo es la suma de la potencia nominal de cada módulo.

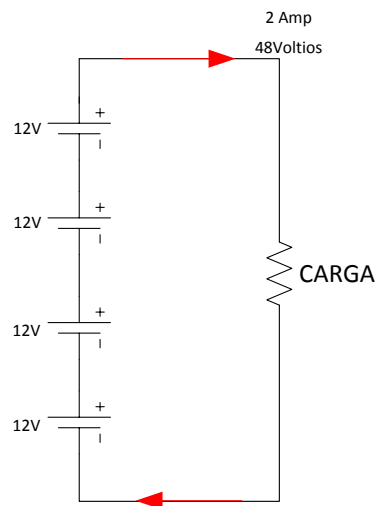
3.3. Arreglos fotovoltaicos

Un arreglo FV es un conjunto de módulos conectados eléctricamente en serie o paralelo. Las características eléctricas del arreglo son análogas a la de módulos individuales, con la potencia, corriente y voltaje modificados de acuerdo al número de módulos conectados en serie y en paralelo.

Para incrementar el voltaje, los módulos solares se conectan en serie para obtener voltajes de salida más grandes (ver figura 10). El voltaje de salida, V_s , de módulos conectados en serie, está dado por la suma de los voltajes generados por cada módulo.

Figura 10. **Conexión en serie de un sistema fotovoltaico**

$$V = V1 + V2 + V3 + ..$$

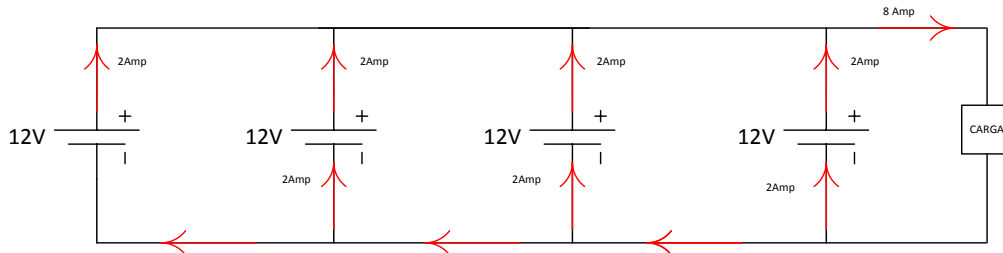


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Para incrementar la corriente, los módulos solares o paneles se conectan en paralelo para obtener corrientes generadas mas grandes (ver figura 11). El voltaje del conjunto es el mismo que el de un módulo (o un panel), pero la corriente de salida, I_T , es la suma de cada unidad conectada en paralelo.

Figura 11. **Conexión en paralelo de celdas solares**

$$IT = I1 + I2 + I3 + I4.$$

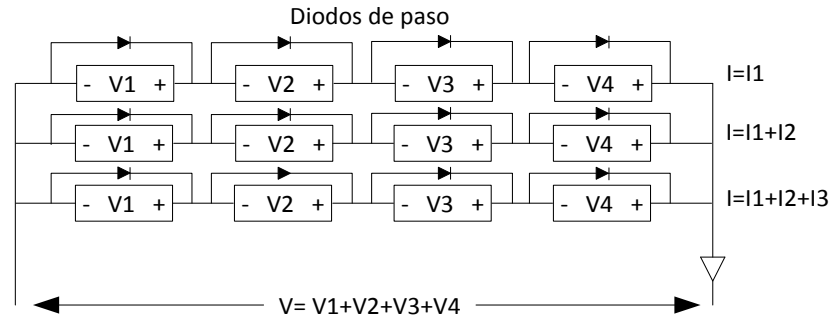


Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

Para evitar el flujo de corriente en la dirección opuesta se utilizan diodos de bloqueo. Los diodos de paso proporcionan un camino de alivio para evitar que circule corriente por un panel o un módulo sombreado (sombra de nubes o de objetos). Un módulo sombreado no genera energía, por lo cual, los demás módulos lo verán como un punto de resistencia. En consecuencia, fluirá corriente hacia él convirtiéndose en un punto caliente del arreglo. Aumentará su temperatura y se degradará aceleradamente.

En la figura 12 se muestra un ejemplo de módulos conectados en serie y en paralelo. En ella también se muestra la posición de los diodos de paso y el diodo de bloqueo. Este último debe ser calculado tomando en consideración la máxima corriente que generará el arreglo fotovoltaico en condiciones de corto circuito. La norma internacional dice que el valor de la corriente que soporta el diodo debe ser por lo menos 1,56 veces el valor de la corriente de corto circuito del arreglo.

Figura 12. **Conexión de módulos fotovoltaicos**



Fuente: elaboración propia, con programa Microsoft Visio 2010.

3.4. Baterías

En los llamados sistemas solares autónomos o sistemas fotovoltaicos domiciliarios (SFD), las baterías almacenan energía que será utilizada durante la noche para iluminación o para ver televisión. Asimismo, suministran electricidad durante periodos de escasez o ausencia de luz solar necesaria, para que el panel solar produzca energía. La duración del periodo cubierto está determinada por la demanda de electricidad y la capacidad de almacenamiento de la batería.

En los sistemas solares de emergencia, las baterías son utilizadas para cubrir periodos de corte fluido eléctrico de la red. Los sistemas conectados a la red más común (en los lugares donde la red de distribución pública es confiable) no usan baterías.

La disponibilidad de luz o viento para producir la electricidad raras veces coincide con el tiempo cuando se necesita. Balancear la energía entre la producción y el uso es imprescindible. Aunque hay muchas formas de almacenar la energía, las más usadas son baterías (acumuladores).

Baterías pueden ser consideradas el talón de Aquiles de los sistemas tipo isla, sistemas que no son conectadas a la red. Baterías representan gran parte de la inversión, pero tienen frecuentemente la vida más corta de toda la instalación.

Todas las baterías funcionan bien al inicio, las diferencias se muestran en su expectativa de vida. Hay baterías que pueden durar más de diez años y otros, bajo las mismas condiciones, duran menos de dos.

3.4.1. Tipos de baterías

Hay diferentes tipos de baterías con muy buenas características, pero para las aplicaciones en sistemas fotovoltaicos y eólicos se usan, en su gran mayoría, baterías de plomo por su buena relación del precio por energía disponible. Este tipo fue inventado en 1859 por el francés Gastón Planté.

La gráfica a la derecha muestra las diferentes tecnologías de baterías comparando sus capacidades en relación a su peso (eje vertical) y su volumen (eje horizontal). Las baterías de litio, como las usadas en celulares y computadoras, son las superiores. Estos tipos existen también para aplicaciones fotovoltaicas y eólicas, pero lamentablemente a precios muy altos.

Actualmente se investiga fuertemente en mejorarlas y en el desarrollo de alternativas, principalmente motivado para solucionar los requerimientos de energía de vehículos eléctricos. Aunque hay investigaciones muy prometedoras, hasta el momento no hay alternativas económicamente viables a los acumuladores de plomo.

3.4.1.1. Baterías de plomo

La mayoría de las baterías de plomo, usadas en sistemas solares y eólicos, parecen a los que se usan en autos y camiones, pero son optimizadas para una aplicación diferente. Importante en los carros es la disponibilidad de mucha energía durante un tiempo muy corto, principalmente para arrancar el motor.

Este alto flujo de amperes necesario se logra con capas de plomo delgadas.

En sistemas solares y eólicas, las baterías tienen que dar la energía sobre un tiempo considerablemente más largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Estas baterías de tipo ciclo profundo tienen capas de plomo más gruesas que además brindan la ventaja de significativamente prolongar su vida.

Estas baterías son relativamente grandes y pesadas por el plomo. Son compuestas de celdas de 2 voltios nominales que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios.

Se usan en la mayoría dos diferentes tipos de baterías de plomo:

3.4.1.1.1. Baterías líquidas

Son las más antiguas y su simple producción permite precios favorables. Existen en versión abierta con tapas que dejan sustituir el agua o en versión libre de mantenimiento que son cerradas, pero con válvulas para que posibles gases puedan escapar durante cargas excesivas (en realidad no son libre de

mantenimiento, son de bajo mantenimiento). Su ventaja aparte de los precios es: menos problemáticos si se sobrecargan. Las desventajas son el peligro de perder el muy agresivo ácido, un control del nivel del agua es necesario (en las de libre mantenimiento no se puede sustituir el agua), y su corta vida típica de aproximadamente 400 ciclos de carga y descarga. Una ventilación es muy importante para estos tipos de batería y temperaturas bajo cero pueden destruirlas rápidamente.

3.4.1.1.2. Baterías tipo VRLA

Por sus siglas en inglés: Valve Regulated Lead Acid battery. Estas baterías modernas tampoco son completamente selladas, pero contienen una tecnología que recombinan el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua, si no son sobrecargadas. Estas baterías funcionan en cualquiera posición. Hay dos tipos principales: los de consistencia de Gel y los AGM, donde el ácido es fijado en fibra de vidrio (AGM - Absorbed Glass Mat).

- **Baterías de gel**

En estas baterías selladas, el ácido tiene la forma de gel. Su gran ventaja es que ya no hay un líquido que se puede perder, son cerradas y funcionan en cualquier posición. La corrosión es reducida y son más resistentes a bajas temperaturas. Su vida es mucho mayor que la vida de las baterías líquidas y comparado con otras, son las menos afectadas en casos de descargas profundas. Las desventajas son una resistencia interna poco más alta que reduce el flujo máximo de la corriente, son algo más delicadas para cargar y llevan un precio mayor. Estas baterías se usan frecuentemente en la industria y la telecomunicación.

- **Baterías tipo AGM**

En estas baterías, desarrolladas inicialmente para la aviación, el ácido está fijado en fibras de vidrio. Cada vez más se usan en sistemas solares y eólicos. Sus ventajas adicionalmente a las de las baterías de gel son una mayor resistencia en climas fríos, su auto descarga sobre el tiempo es mínimo y tiene la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo (hasta 95 %). Tienen una baja resistencia interna que permiten corrientes altas. Desventaja, aparte del precio más elevado, es su vulnerabilidad algo más alta a descargas profundas.

3.4.1.1.3. Peligros de baterías de plomo

No hay que olvidar que la parte del agresivo ácido sulfúrico y los gases explosivos que pueden producirse en ciertas condiciones, el plomo es venenoso. Se acumula en los huesos y con el tiempo causa graves daños de salud. Sobre todo niños están en peligro. Por esto se prohibió el uso de plomo en los combustibles y pinturas. Es importante tenerlas en lugares ventilados y asegurados para evitar accidentes. Este problema es reducido, pero no eliminado con los modelos VRLA sellados de gel o tipo AGM. Por su contenido tóxico y agresivo, las baterías necesitan ser recicladas para no dañar la salud y el medio ambiente.

3.5. Vida de baterías solares

La vida de estas baterías depende de la calidad y tipo de la fabricación, pero sobre todo de su uso correcto. Con el uso difícil a controlar, los fabricantes prefieren no ofrecer garantías largas. Aunque todos desean saber cuántos años dura una batería, lo que se puede medir son ciclos de carga/descarga a una profundidad de descarga (y a una temperatura) determinada.

La mayoría de baterías de carros viven menos de 200 ciclos si se descarga regularmente a 50 % de su capacidad. Baterías líquidas de ciclo profundo (incluso las selladas) son capaces de 400 ciclos, baterías de AGM y de gel superan fácilmente 800 ciclos. Hay baterías de gel para el uso industrial (tipo OPzV) que pueden manejar más de 10 000 ciclos. Los años de vida depende entonces de su uso, si se conoce la profundidad de descarga, se puede estimar su vida en años. Pero exponerlas a temperaturas elevadas o descargarlas solamente pocas veces arruina la calculación.

Todas las baterías con base en plomo necesitan una buena alimentación (carga). Baterías de calidad, siempre llenas, sin sobrecargarlas, pueden vivir 10 años o más. Si se descargan frecuentemente en forma profunda (aunque el término ciclo profundo sugiere diferente), mueren más rápidas.

En la práctica esto significa instalar suficiente capacidad para descargar las baterías a no menos de 50 % de su valor nominal. (También se necesita suficiente capacidad de los paneles solares o del aerogenerador para cargarlas completamente). Además tiene el importante beneficio de aumentar las reservas, por ejemplo para los días con poco sol o viento y para situaciones de emergencias cuando de repente se necesita más luz. Entonces, dependiendo de la necesidad de electricidad es importante calcular un balance óptimo para la capacidad instalada.

Lamentablemente mucha gente prefiere ahorrar en baterías con la sorpresa, más adelante, de baterías muertas en poco tiempo. La entonces expresada opinión que las baterías son malas frecuentemente, no es correcta, era su uso inapropiado.

La temperatura tiene gran influencia sobre la batería, una temperatura entre 20 °C y 25 °C es lo óptimo para una batería en uso.

A más alta temperatura, la vida es más corta. Una temperatura 10° arriba del óptimo puede cortar la vida por la mitad. Por otro lado hay que tomar en cuenta que la capacidad de almacenar energía disminuye en temperaturas bajas. Entonces para una batería sin uso, es preferible mantenerla a una temperatura más baja.

La temperatura también influye en cómo cargar una batería. Con el aumento de la temperatura hay que disminuir el voltaje para evitar una gasificación, pero todavía asegurando una carga por completo. Una gasificación en baterías selladas (libre de mantenimiento) no es recuperable: el líquido se pierde por las válvulas sin tener la posibilidad de rellenarlas. Por eso, todos los controladores buenos tienen una compensación de temperatura incorporada.

3.6. Eficiencia de baterías solares

La eficiencia de las baterías varía según tipo, temperatura, vejez, el estado de descarga y su calidad de construcción. También hay que considerar que los productores miden la capacidad de sus baterías sobre diferente tiempo, lo que dificulta compararlas. Una batería descargada con una corriente alta en poco tiempo tiene menos capacidad que la misma descargada con una corriente pequeña sobre un tiempo prolongado. Normalmente se indican la capacidad de la batería descargada sobre 24 horas (a 25 °C), pero algunos fabricantes miden la capacidad hasta 100 horas y así indican un valor comparativo más alto de la competencia.

Más importante es la diferencia entre la cantidad de energía que entra en la batería (cargando) y la disponible en ella (descargando). Esta eficiencia de Coulomb (también llamada eficiencia de Faraday) es en baterías normales de plomo entre 70 % y 85 %. Significa, por ejemplo que de 100 Ah producidos para cargar la batería, solamente entre 70 Ah y 85 Ah son disponible; el resto de la energía se pierde principalmente en calor. Las baterías de buena calidad, sobre todo los de tipo AGM, pueden tener una eficiencia hasta 95 %.

Hay una clara tendencia a usar más los de tipo AGM por su buena relación de vida por precio y su manejo fácil con poco peligro. Las baterías tipo VRLA son las únicas del tipo plomo que se permite transportar en aviones.

Existen baterías líquidas tradicionales aptos para aplicaciones solares y eólicas de muy alta calidad con una vida extrema (a precios extremos) que se usan frecuentemente en operaciones militares por ejemplo las de Solar-One con una garantía de 10 años.

En mercados con una oferta reducida, baterías de ciclo profundo que se usan en la minería o para carretillas elevadoras (montacargas) son una opción viable, donde el mejor precio puede justificar una vida algo menor.

Para alguien que siempre pueda asegurar la atención necesaria, una batería líquida tradicional puede ser la mejor opción sobre todo considerando el precio.

Como sea, no se recomienda ahorrar en baterías. Ellas son la parte vital de cualquier sistema independiente de la red.

3.7. Interacción entre módulos fotovoltaicos y baterías

Normalmente el banco de baterías y los módulos fotovoltaicos trabajan conjuntamente para alimentar las cargas. Durante la noche, toda la energía demandada por la carga la provee el banco de baterías. En horas tempranas de la mañana los módulos comienzan a generar, pero si la corriente que entregan es menor que la exigida por la carga, la batería deberá contribuir en el aporte. A partir de una determinada hora de la mañana la energía generada por los módulos fotovoltaicos supera la energía promedio demandada. Los módulos no solo atenderán la demanda sino que además, todo exceso se almacenará en la batería que empezará a cargarse y a recuperarse de su descarga de la noche anterior. Finalmente durante la tarde, la corriente generada decrece y cualquier diferencia con la demanda la entrega a la batería. En la noche, la generación es nula y todo el consumo lo afronta la batería.

3.8. Subsistema de regulación

El subsistema de regulación siempre debe estar integrado en un sistema aislado de generación de energía eléctrica. Cualquier equipo de generación eléctrica que pueda sobrecargar excesivamente las baterías que alimenta, requiere un regulador de carga.

Este componente regula el flujo de electricidad desde el sistema de captación (módulos fotovoltaicos) hasta las baterías (suministrándoles la tensión e intensidad adecuadas al estado de carga en que estas se encuentren). Además, el regulador tiene la misión de mantener la batería plenamente cargada sin que sufra sobrecargas que pudieran deteriorarla.

La misión del regulador se centra, en evitar que, debido a una sobrecarga excesiva proporcionada por un panel y por un aerogenerador, causan perjuicio al acumulador, acortando la vida del mismo. Esta función es un requisito mínimo exigible a cualquier regulador, anulando o reduciendo al mínimo la inyección de corriente procedente del campo fotovoltaico o bien, del eólico.

El regulador de carga es un equipo capaz de evitar la sobrecarga del acumulador. A la vez limita la tensión de la batería a unos valores adecuados para el mantenimiento, en estado de flotación, del grupo de baterías; disipando la restante en forma de calor a través de una resistencia instalada en el interior del regulador.

Protege a la batería contra la sobre descarga. Esta tendría lugar si la demanda de consumo eléctrico en la instalación provocase un estado de carga en la batería lo suficientemente bajo que, de mantenerse, resultaría perjudicial para la misma. Asimismo, un buen regulador debe ajustar la tensión a la que debe finalizar la carga de las baterías en función de los valores de la temperatura ambiente, de la velocidad del viento, de la intensidad suministrada por los módulos fotovoltaicos.

También le facilitan al usuario información básica sobre el funcionamiento de su instalación, monitorizando valores de tensión, intensidad, estado de carga y otros. Gran parte de los reguladores utilizados habitualmente disponen, en mayor o menor medida, de esta función.

Existen dos tipos fundamentales de reguladores, serie y paralelo (*shunt*), cuyas características principales se describen a continuación:

- Serie: el control de sobrecarga se efectúa interrumpiendo la línea campo de generación-batería, mientras que el control de sobre descarga se efectúa interrumpiendo la línea batería-consumo.

Cuando el interruptor de control es de tipo electrónico (transistor) evita producir la descarga inversa de la batería hacia el campo de generación eléctrica (paneles FVs, aerogeneradores). Este interruptor no disipa potencia cuando está interrumpiendo la corriente de carga. Por lo tanto que este tipo de reguladores es adecuado para instalaciones de cualquier potencia.

- Paralelo: el control de sobrecarga se efectúa cortocircuitando el campo generador, mientras que el control de sobre descarga se efectúa interrumpiendo la línea batería-consumo, al igual que el regulador tipo serie.

Independiente del tipo de interruptor (electrónico o electromecánico), es necesario un diodo interno que impida que el cortocircuito afecte a la batería, evitando así la descarga inversa de la batería hacia el campo de generación eléctrica. Este interruptor disipa potencia cuando está cortocircuitando la corriente de carga, por lo que este tipo de regulador se limita a instalaciones de baja potencia.

Al igual que en el regulador tipo serie, durante su funcionamiento, el diodo interno genera una pequeña caída de tensión en la línea campo de generación-batería.

3.9. Subsistema de acondicionamiento de potencia

La misión de este subsistema consiste en hacer compatibles entre sí las características eléctricas (tensión, intensidad, frecuencia, y otros.) de los diferentes subsistemas que componen una instalación aislada, incluidos los receptores.

Dos son las principales adaptaciones que pueden ser necesarias: la adaptación de los niveles de tensión continua entre subsistemas, llevada a cabo mediante los convertidores de tensión continua a continua, y la transformación a corriente alterna de la energía eléctrica suministrada por las baterías y módulos fotovoltaicos. La modificación del valor de la tensión (generalmente es necesario elevar la tensión) llevada a cabo por los inversores u onduladores. El convertidor de tensión continua-continua o seguidor de potencia se utiliza cuando no todos los receptores tienen la misma tensión nominal.

Los inversores, en cambio, son dispositivos que transforman la corriente continua, suministrada por el generador de energía (paneles fotovoltaicos) o sus componentes de almacenamientos (baterías), en corriente alterna CA. Todo en forma necesaria para alimentar la mayoría de los receptores domésticos e industriales.

Los inversores disponibles para uso fotovoltaico se ofrecen algunas características que se describen a continuación:

- **Potencia nominal:** es aquella que puede suministrar el inversor de forma continuada. Su rango comercial oscila normalmente entre los 100 y 5000 vatios, aunque existen de potencias superiores.

- Capacidad de sobre descarga: se refiere a la capacidad del inversor para suministrar una potencia considerablemente superior a la nominal, así como al tiempo que puede mantener esta situación.
- Forma de onda: en los terminales de salida del inversor aparece una señal alterna caracterizada principalmente por su forma de onda y los valores de tensión eficaz y frecuencia de la misma.
- Eficiencia o rendimiento, relación expresada en tanto por ciento, entre las potencias presentes a la salida y a la entrada del inversor. Su valor depende de las condiciones de carga del mismo, es decir, de la potencia total de los aparatos de consumo alimentados por el inversor en relación con su potencia nominal. Además de las ya mencionadas, los modernos inversores disponibles para sistemas aislados, disponen de toda serie de características, entre ellas: protección contra sobrecargas, protección contra cortocircuitos, protección térmica, protección contra inversión de polaridad, estabilización de la tensión de salida, arranque automático, señalización de funcionamiento y estado.
- Inversores autónomos: utilizados en los sistemas fotovoltaicos y eólicos de baja potencia autónomos o aislados de la red eléctrica externa. Hay algunas variantes de este tipo en el mercado.
- Entrada de batería: es el más común, en el que la entrada del inversor se conecta única y directamente a la batería o acumulador. Este tipo de inversores suele disponer de la función de protección contra la sobre descarga de la batería, ya que esta conexión directa constituye una línea de consumo no controlada por el regulador.

- Entradas de batería y generador auxiliar: permite la conexión directa de un grupo electrógeno o un sistema eólico auxiliar, o de la propia red externa, posibilitando la carga de las baterías y la alimentación directa del consumo.
- Salida alterna y continua: hay inversores que disponen de doble salida, continua y alterna, diseñados especialmente para su utilización en sistemas que precisan estos dos tipos de alimentación.

Las características de la tensión alterna generada es uno de los parámetros de calidad más relevantes, se determina el tipo de receptores a los que alimenta.

Los inversores producen tres tipos de forma de onda distintas, la primera es la generación de ondas senoidales puras, similares a las suministradas por las centrales eléctricas. Determinados inversores producen ondas casi senoidales como aproximación a la onda ideal. El tercer tipo consiste en la onda cuadrada que difieren grandemente de las senoidales puras.

Los inversores, de forma de onda senoidal, generan una tensión idéntica a la que se produce en las centrales eléctricas de las compañías suministradoras de energía eléctrica. Son aptos para alimentar cualquier tipo de receptor de corriente alterna, incluidos los más sensibles a la presencia de componentes armónicas.

La mayoría de los inversores aceptan tensiones continuas de entrada de 12 V, 24 V, 32 V o 48 V y suministran en la salida tensión alterna de 110 V y 60 Hz. Las potencias nominales abarcan desde los 50 W hasta los 6 kW.

Aunque actualmente los inversores han evolucionado de una manera impresionante. La avanzada electrónica, de la que se dispone hoy en día, permite conseguir una electricidad casi igual a la que hay disponible en la red eléctrica. El inversor depende de la potencia de la instalación, de la calidad de onda senoidal que se precise, si se desea que además de inversor sea cargador, de la frecuencia, de la potencia simultánea máxima, y del voltaje. La elección final depende, como todo, de las necesidades y accesibilidad.

3.10. Subsistema de control, medida y protección

El funcionamiento de una instalación eléctrica, con energías renovables, es de una manera fiable y segura, y precisa de dispositivos que realicen al menos, las siguientes funciones:

- Control: las funciones que deben realizar los dispositivos de control dependen de la complejidad y requerimientos de la instalación fotovoltaica, posición de seguridad de los módulos. En caso de condiciones ambientales extremas, supervisión de los parámetros característicos de la instalación (temperaturas, intensidades, tensiones, demanda y suministro de potencia, y otras).

La supervisión y control de estas funciones se realiza mediante un sistema electrónico de control, que siendo ser un ordenador con un software específico, un autómata programable o un controlador diseñado específicamente para tal fin. A estas funciones deben añadirse las funciones de supervisión y control realizadas por el regulador y el inversor en sus propios subsistemas.

- Medida: la medida de la energía eléctrica producida y consumida por el sistema, se hace imprescindible en el caso de instalaciones conectadas a la red, y en el caso de instalaciones autónomas. Para ello, se utilizan contadores de energía eléctrica (energía activa, es decir, kilowatt hora), bien sean del tipo tradicional, electromecánicos, o del tipo electrónico
- Protección: las instalaciones fotovoltaicas, deben incorporar dispositivos y sistemas de protección para que su funcionamiento se realice con un alto nivel de seguridad, tanto para las personas como para los bienes. La mayoría de protección afecta al sistema eléctrico, aunque, también se incorporan protecciones que afecten a otros sistemas, como, por ejemplo, sistemas para disminuir el riesgo de explosión en el subsistema de acumulación. Entre las protecciones que afectan al sistema eléctrico cabe mencionar:
 - Protección contra sobrecargas y cortocircuito, protección contra contactos directos e indirectos, protección contra sobre tensiones.
 - En algún subsistema de la instalación, varias de estas protecciones están agrupadas e integradas en un único dispositivo, como en el regulador.

4. DISEÑO DEL SISTEMA DE ENERGÍA SOLAR FOTVOLTAICA

4.1. Definición del sistema

Para el diseño del sistema se describen las cargas a conectar al sistema fotovoltaico. Estos sistemas de energía fotovoltaica están diseñados para que sean utilizados durante todo el año.

Tabla V. Consumo teórico de energía eléctrica

Cantidad	Tipo	Equipo	Consumo [W]	Horas de uso por día	Consumo por día [Wh]
1	Cocina	Iluminación	15	3	45
1	Habitación	Iluminación	15	3	45
1	Habitación 2	Iluminación	15	3	45
1	Baño	Iluminación	15	3	45
1	Sala/comedor	Iluminación	15	3	45
1		Radio	30	4	120
1		TV	70	3	210
TOTAL			175		555

Fuente: elaboración propia.

4.2. Consumo eléctrico real de las cargas

La energía diaria teórica requerida (carga diaria) se calculó sumando el producto entre la potencia de cada aparato o elemento de consumo, por el tiempo medio diario de funcionamiento de cada uno. Normalmente no es suficiente con determinar el valor medio mensual del consumo diario, esto supone un valor de la carga diaria en watt hora para cada mes. Se suelen separar los consumos en corriente continua de los consumos en corriente alterna, pues están afectados de factores de pérdidas distintos.

La energía real necesario, E_{elect} , se calcula teniendo en cuenta las eficiencias de los distintos subsistemas y las pérdidas. De este modo:

$$E_{elec} = \frac{ETCC}{\eta_b} + \frac{ETCA}{\eta_{inv}} \quad [1]$$

Donde:

E_{TCC} : carga diaria en corriente continua

E_{TCA} : carga diaria en corriente alterna

η_b : eficiencia carga/descarga de la batería

η_{inv} : eficiencia media diaria del inversor

En estos sistemas solo se utilizarán consumos en corriente alterna, por lo que la ecuación queda simplificada, así:

$$E_{elec} = \frac{ETCA}{\eta_b * \eta_{inv}} \quad [2]$$

Para el diseño de ambos sistemas se utilizan valores de $\eta_b = 0,88$ y $\eta_{inv} = 0,8$, entonces, el consumo real de los dos sistemas da como resultado:

E_i : consumo eléctrico teórico del sistema = 555 Wh/día

Utilizando la ecuación [2], se obtiene lo siguiente:

$$E_{elec} = \frac{555}{0,88 * 0,8} = 792,86$$

4.2.1. Promedio de la radiación diaria disponible

Se debe estimar, para cada mes, (hora sol). El promedio de la energía (expresada en kilowatt hora/metro cuadrado*día) de la irradiación solar que incide, durante un día, sobre un metro cuadrado de una superficie situada en el lugar de instalación de los paneles fotovoltaicos y con la misma orientación e inclinación que estos.

Concepto de hora sol pico, (HSP): dado que las características nominales de los módulos fotovoltaicos corresponden a una potencia de la radiación solar incidente de 1 kW/m², la energía producida a lo largo de todo un día por un módulo. En un emplazamiento incide una irradiación media diaria de Horas Sol kilowatt/metro cuadrado, será la misma que producirá dicho módulo si le incidiera una radiación solar constante de potencia 1 kW/m² durante un día imaginario que tuviera un número de horas de sol (todas ellas con 1 kW/m²) igual a HS.

Por ello, al valor de HS, expresado en kilowatt hora/metros cuadrados se le denomina HSP: indica la cantidad de horas de sol, con una intensidad de

radiación de 1 kW/m². Este incide perpendicularmente sobre la superficie de un módulo fotovoltaico, que tendrá un día imaginario en el que el módulo recibiría la misma energía que en un día real. Este razonamiento es válido en el supuesto de que la eficiencia de los módulos fotovoltaicos sea independiente de la potencia de la radiación incidente, suposición bastante válida, aunque no exacta.

La energía media diaria de la radiación disponible para cada mes, expresada en kilowatt hora/metros cuadrados*día o en HSP.

Los datos de irradiación se obtuvieron al utilizar el software METEONORM Versión 6.0 (demo). Los registros de información más próximos a San Marcos, son el de Quetzaltenango; el cual se encuentra al este de San Marcos, a 50 km de la cabecera departamental San Marcos y a 65 km del emplazamiento del sistema aproximadamente. En cuanto a la altitud, el municipio Esquipulas Palo Gordo, San Marcos, se encuentra a 2 501 msnm y Quetzaltenango a 2 340 msnm; pero la comunidad Buena Vista que está en el área rural de este municipio, se encuentra a una altura menor, aproximadamente 2 400 msnm .

Tabla VI. **Irradiación media de la radiación global de una superficie a distintos ángulos de inclinación**

	Gh	Gk0	Gk10	Gk15	Gk20	Gk25	Gk30	Gk35	Gk40	Gk45	Gk50
Enero	5,47	5,45	6,06	6,31	6,51	6,68	6,81	6,89	6,93	6,92	6,88
Febrero	6,16	6,16	6,67	6,86	7,01	7,12	7,18	7,19	7,16	7,08	6,96
Marzo	6,19	6,18	6,42	6,48	6,5	6,49	6,43	6,33	6,2	6,02	5,82
Abril	6,98	6,98	6,96	6,88	6,76	6,6	6,4	6,16	5,88	5,57	5,23
Mayo	5,3	5,3	5,12	4,99	4,84	4,65	4,44	4,22	3,98	3,72	3,45
Junio	5,23	5,23	5,01	4,86	4,69	4,49	4,27	4,04	3,79	3,53	3,25

Continuación de la tabla VII.

Julio	5,47	5,47	5,21	5,08	4,89	4,68	4,45	4,19	3,92	3,63	3,33
Agosto	5,78	5,78	5,68	5,57	5,44	5,28	5,08	4,86	4,61	4,34	4,05
Septiembre	5,15	5,1	5,23	5,22	5,18	5,11	5,02	4,89	4,74	4,57	4,36
Octubre	4,8	4,79	5,02	5,09	5,14	5,15	5,14	5,09	5,02	4,91	4,78
Noviembre	4,61	4,61	4,99	5,13	5,25	5,34	5,39	5,42	5,41	5,37	5,29
Diciembre	4,85	4,85	5,42	5,65	5,85	6,02	6,15	6,24	6,28	6,29	6,26
Año	5,5	5,49	5,64	5,67	5,66	5,62	5,5	5,45	5,32	5,15	4,96

Gh: irradiación media de la radiación global horizontal

Gk: irradiación media de la radiación global superficie inclinada

Radiación en kilowatt hora/metro cuadrado*día

Fuente: elaboración propia, con programa Meteonorm Versión 6.0.

4.2.2. Irradiación mínima mensual

Se observan los valores de irradiación para distintos ángulos de inclinación, durante todos los meses del año. Tomando en cuenta que en Guatemala se manifiestan dos estaciones: verano e invierno.

Se puede observar en la tabla XII, que la irradiación media es menor durante el mes de junio, para los ángulos de inclinación de 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45° y 50°; no así para 0° y 10° de inclinación, pues el mes con menor irradiación es noviembre.

Ahora bien ¿a qué ángulo es preciso colocar los módulos fotovoltaicos, si la irradiación es menor durante el mes de junio? Se debe escoger el ángulo de inclinación, con mayor irradiación durante el mes de junio.

Al revisar los datos de la tabla X, el ángulo de inclinación adecuado para los módulos durante el mes de junio, es 15°. Este se utilizará para realizar todos los cálculos del diseño del sistema. Obsérvese que el promedio anual de irradiación es de 5,67 kW/m²*día.

Para determinar el peor mes del año, según la radiación solar y el consumo de la instalación a diseñar, a un ángulo de inclinación determinado de los módulos, se procede de la siguiente forma:

Para cada uno de los meses del año se calcula el cociente entre el consumo medio total diario de energía eléctrica, Eelec. También el promedio de la radiación diaria disponible en el lugar de ubicación de los módulos fotovoltaicos, HS.

$$E_{elec} = \frac{555}{0,88 * 0,8} = 792,86$$

$$Y = \frac{E_{elec}}{H_s} \quad [3]$$

Utilizando la ecuación 3

$$Y = \frac{792,86}{6,31} = 125,65$$

El cociente Y, expresado en metros cuadrados, representa 1 000 veces la superficie necesaria para que la energía media diaria de la radiación solar incidente sobre esta sea igual a la energía diaria consumida por los receptores. También el cociente Y, expresado en metros cuadrados, representa 1 000 veces la superficie que debería tener un módulo fotovoltaico ideal, de

rendimiento igual al 100 %; para satisfacer las necesidades diarias de energía eléctrica de la instalación receptora.

El subsistema de captación fotovoltaico se dimensiona para cubrir las necesidades durante el peor mes, es decir, aquel en el que la relación entre el promedio diario de las necesidades de energía eléctrica y la radiación solar media diaria disponible resulta desfavorable. Es decir le corresponda el valor Y_{max} , valor máximo de los valores de Y de cada mes.

Tabla VII. **Datos calculados del cociente Y para todos los meses del año, determinación del peor mes del año**

	Gk15°	Consumo	Y
Enero	6,31	700,75	111,053
Febrero	6,86	700,75	102,150
Marzo	6,48	700,75	108,140
Abril	6,88	700,75	101,853
Mayo	4,99	700,75	140,430
Junio	4,86	700,75	144,187
Julio	5,08	700,75	137,942
Agosto	5,57	700,75	125,807
Septiembre	5,22	700,75	134,243
Octubre	5,09	700,75	137,671
Noviembre	5,13	700,75	136,598
Diciembre	5,65	700,75	124,026

Fuente: elaboración propia, con programa Meteonorm Versión 6.0.

4.3. Subsistema de captación de energía

Lo compone específicamente el módulo fotovoltaico, ya que este dispositivo provecha la energía del sol y la convierte en energía eléctrica. En el

capítulo uno se ha descrito el funcionamiento básico de los módulos fotovoltaicos.

Dentro de este sistema de captación de energía hay que mencionar la fuente de energía natural, para luego ser convertida en energía eléctrica, es entonces la radiación solar disponible en el lugar de instalación del sistema (emplazamiento). Comúnmente no existen datos tabulados concretos de la radiación solar en la ubicación exacta de la instalación fotovoltaica planeada (a menos que se estime a partir de expresiones analíticas), por lo que deben tomarse los datos correspondientes a la ubicación, con datos disponibles, más representativa del emplazamiento escogido, lo que, normalmente, significa la ubicación más cercana.

Debe prestar especial atención a los datos de radiación utilizados corresponden a superficies con las mismas características de orientación e inclinación que los módulos fotovoltaicos.

Los valores de radiación diaria disponible presentan en distintas unidades, siendo las más comunes: kilowatt hora/metros cuadrados, megajoules/metros cuadrados y kilojoules/metros cuadrados. En el método de cálculo utilizado, los datos de la energía solar diaria disponible se expresan en kilowatt hora/metro cuadrado.

4.4. Elección del tipo y número de módulos fotovoltaicos

En este punto es imprescindible tener realizada la elección del tipo de módulo fotovoltaico concreto que va a instalarse, o, al menos, la potencia pico de los módulos, P_{mod} , expresada en W_P .

Todos los cálculos y el dimensionado que se desarrollan a partir de aquí, se refieren al peor mes y se realizan con los datos correspondientes a dicho mes.

En primer lugar se va a calcular la energía producida por un único módulo fotovoltaico, de la potencia pico escogida, P_{mod} (Wp), durante un día cualquiera (perteneciente al peor mes). Para ello se debe recordar que la potencia pico de un módulo es la potencia que produce el panel medida en unas condiciones estándar que suponen una radiación incidente de $1\ 000\ \text{W/m}^2$ (lo mismo sucede con la intensidad pico y la tensión nominal).

La energía producida, durante una hora, por un panel de potencia pico (watt pico) sobre el que incide una radiación solar de una intensidad igual a $1\ 000\ \text{W/m}^2$ es igual a P_{mod} (Wh). HS ($\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día}$) $\cdot P_{mod}$ (Wp) = energía diaria producida por un panel (Wh/día).

Tomando en cuenta la expresión anterior, el número de paneles N_{mod} , necesarios para cubrir las necesidades diarias de los receptores viene dado por la siguiente ecuación.

$$N_{mod}(\text{número de módulos}) = 1.1 \frac{E_{elect} \left(\frac{\text{Wh}}{\text{día}} \right)}{\left[HS \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2} * \text{día} \right) * P_{mod}(\text{Wp}) \right]} \quad [4]$$

Lo que equivale también a:

$$N_{mod}(\text{número de módulos}) = 1.1 \frac{Y_{max} \left[\frac{\text{Wh/día}}{\text{kWh/m}^2 * \text{día}} \right]}{P_{mod}(\text{Wp})} \quad [5]$$

$$N_{mod}(\text{número de módulos}) = 1,1 \frac{Y_{max}[(\text{Wh/día})/(\text{kWh/m}^2 \cdot \text{día})]}{P_{mod}(\text{Wp})} \quad [5]$$

El coeficiente 1,1 es un factor de ingeniería para hacer frente a imprevistos y a la depreciación de las prestaciones de los diferentes componentes del sistema fotovoltaico por diferentes causas. Las cuales son depreciación debida al envejecimiento, pérdida de rendimiento debida a que los valores nominales suelen ser referidos por el fabricante para una temperatura de los módulos de 25 °C mientras que, frecuentemente, estos trabajan a temperaturas superiores a 40 °C, entre otros. Equivale a un sobredimensionamiento del 10 % por la aplicación de este sistema fotovoltaico aislado en una comunidad rural, según sus necesidades energéticas se pueden utilizar módulos fotovoltaicos con potencia máxima (pico) desde 40 W. Sin embargo, se van a utilizar módulos fotovoltaicos de 65 W de potencia pico o máxima.

$$\begin{aligned}
 Y_{max} &= 144,187 \\
 P_{mod} &= 65 \text{ Wp} \\
 N &= \frac{(1,1 * 144,187)}{65} = 2,44 \cong 3
 \end{aligned}$$

El número de módulos que deben conectarse en serie (N_{Smod}), se determina, primeramente, fijando la tensión de trabajo nominal del sistema fotovoltaico ($V_{T,acu}$). De tal manera que la tensión de salida del arreglo fotovoltaico (V_{mod}) (normalmente, 12 V) igual a la tensión de las baterías, es el número entero superior al cociente entre la tensión nominal del sistema y la tensión nominal del módulo.

$$N_{s, mod} = \frac{V_{T, ACU}}{V_{P, mod}} \quad [6]$$

El voltaje o tensión nominal del módulo no debe confundirse con el voltaje o tensión de circuito abierto; ya que la mayoría de los módulos de 36 células tienen un voltaje nominal de 12 V.

El número de módulos conectados en paralelo ($N_{P,mod}$) (en realidad, $N_{P,mod}$ es el número de ramas o conjuntos de $N_{S,mod}$ módulos conectados en serie que deben conectarse en paralelo), puede hallarse como:

$$N_{p,mod} = \frac{\left(\frac{N_{mod} P_{mod}}{V_{P,mod}}\right)}{I_{p,mod}} \quad [7]$$

El número total de módulos fotovoltaicos, N_{mod} , es igual al producto:

$$N_{mod} = N_{S,mod} * N_{p,mod} \quad [8]$$

El número final total de modelos, N_{mod} debe expresarse como el producto de dos números naturales, $N_{S,mod} \times N_{P,mod}$, siendo uno de ellos prefijado $N_{S,mod}$. De modo que, si el número de paneles obtenido inicialmente no cumple esta condición, deberá aproximarse al mínimo número inmediato superior que la cumpla, modificando, para ello el valor de $N_{P,mod}$ (puesto que el valor de $N_{S,mod}$ viene fijado por la tensión de trabajo de las baterías y no se modifican).

Si la tensión de trabajo del subsistema de acumulación tendrá un valor de $V_{t,acu} = 12$ [Volts.] y la tensión nominal o pico de cada módulo fotovoltaico es $V_{p,mod} = 17,4$ [Volts.], entonces:

Utilizando las ecuaciones [6], [7] y [8], se obtiene:

$$N_{s,mod} = \frac{12V}{17,4V}$$

$$N_{s,mod} = 0,69$$

$$N_{s,mod} = 1 \text{ módulo en serie}$$

$$NP,mod = \frac{(3 * 65)}{3,75}$$

$$NP,mod = 5,97 \text{ módulos} \cong 6 \text{ módulos en paralelo}$$

$$Nmod = Ns,mod * Np,mod$$

$$Nmod = 1 \text{ módulo en serie} \times 6 \text{ módulos en paralelo}$$

$$Nmod = 6 \text{ módulos de } 65 \text{ Wp}$$

El sistema fotovoltaico está compuesto por 6 módulos de potencia pico mayor-igual a 65 Wp. Los módulos se conectan en paralelo, porque la tensión de trabajo del subsistema de acumulación a diseñar será de 12 V.

4.4.1.1. Características técnicas de la superficie de captación

Los módulos fotovoltaicos que se van a utilizar en esta aplicación son de silicio policristalino, con potencia pico mayor-igual a 65 Wp.

La elección del módulo se realizó según costo y disponibilidad tecnológica en Guatemala; ya que el costo de un módulo depende de la potencia, calidad y fabricante.

A continuación se presentan las especificaciones del módulo que se utilizará en el diseño y construcción de los dos sistemas fotovoltaicos.

Tabla VIII. **Especificaciones del módulo**

Potencia nominal [W]	65
Tolerancia de potencia[%]	-5
Tensión de sistema máximo [V]	750
Tensión con potencia nominal [V]	17,4
Corriente con potencia nominal [A]	3,75
Voltaje circuito abierto [V]	21,7
Corriente en corto circuito [A]	3,99
Potencia nominal [W] 47	47
Tensión con potencia nominal [V] 17,4	17,4
Corriente con potencia nominal [A]	3,01
Voltaje circuito abierto [V]	19,7
Corriente en corto circuito [A]	3,22
NOCT [°C]	47
Coeficiente de temperatura de la tensión en circuito abierto [V/°C]	$-8,21 \times 10^{-2}$
Coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito [A/°C]	$1,59 \times 10^{-3}$
Reducción del nivel de eficacia	1 000
W/m ² a 200 W/m ²	6,1
MEDIDAS	
Largo [mm]	751
Ancho [mm]	652
Altura/ incluyendo caja de contacto [mm]	36/54
Peso [kg]	6
Tipo de conexión Bornes	atornillables
Caja de contacto [mm] 120x180x46	120x180x46
CELULAS	
Cantidad por módulo	36
Tecnología celular	Policristalina
Forma celular	Rectangular
Conexión de células	3 busbar

Fuente: elaboración propia.

4.5. Ubicación de los módulos fotovoltaicos

La ubicación del o los módulos fotovoltaicos deben ser la más próxima a las viviendas, y se instalarán donde su exposición a los rayos solares sea la mejor, para obtenerla. Es decir, la estructura soporte y, por ende, los módulos fotovoltaicos se ubicarán en un lugar libre de sombras, especialmente, durante las horas centrales del día; de modo que los módulos, una vez montados, dispongan de la orientación e inclinación más adecuada.

El anclaje de los módulos será sobre el suelo, muy cercanos a las viviendas. Para ello, en la distancia y que sea mínima entre los módulos, se evita producir pérdidas en el transporte de energía eléctrica, a través del cableado.

Debido a la situación geográfica de Guatemala, la trayectoria del sol sobre el plano del observador, es bastante diferente a la trayectoria del sol en España, especialmente durante el verano.

Las horas de sol promedio mensual durante el día se muestran a continuación:

Tabla IX. **Horas de salida, puesta del sol y horas de sol durante el día, en 2006**

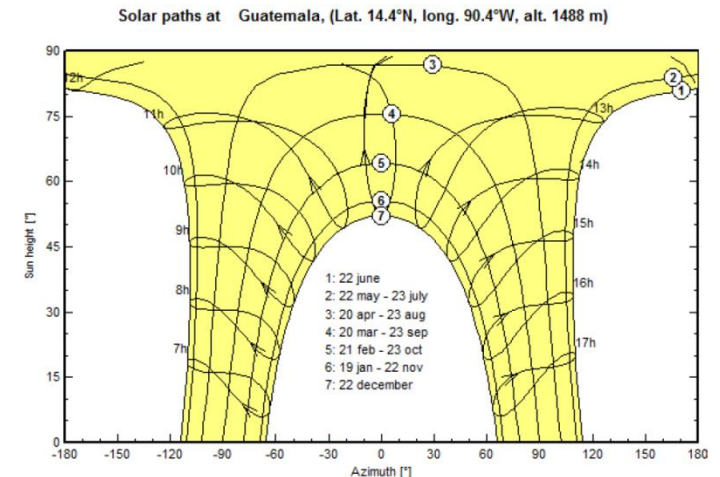
Mes	Hora de salida	Horas de puesta del sol	Horas de sol durante el día
Enero	6:27	17:51	11:24
Febrero	6:22	18:04	11:42
Marzo	6:07	18:10	12:03
Abril	5:47	18:15	12:28

Continuación de la tabla IX.

Mayo	5:34	18:22	12:48
Junio	5:32	18:30	12:58
Julio	5:39	18:31	12:52
Agosto	5:46	18:21	12:35
Septiembre	5:49	18:01	12:12
Octubre	5:53	17:41	11:48
Noviembre	6:03	17:31	11:28
Diciembre	6:17	17:36	11:19

Fuente: *Horario*. www.insivumeh.gob.gt/folleto/duracionsolar2006.xls. Consulta: 5 de marzo de 2013.

Figura 13. **Trayectoria del sol (hora solar) en Guatemala**



Fuente: *Trayectoria del sol*. http://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=es.

Consulta: 5 de marzo de 2013.

Según los valores de la irradiación o radiación solar obtenida, utilizando el programa METEONORM Versión 6.0, se determinó que el ángulo de inclinación al que los módulos se van a instalar es de 15°, respecto a la horizontal, el cual

será fijo. Se utilizará tanto en la estación invernal como en la de verano. Utilizando la irradiación o irradiación solar obtenida con un ángulo de inclinación de 15°, se efectuaron los cálculos para diseñar y dimensionar los dos sistemas fotovoltaicos, tomando en cuenta el mes más desfavorable; es decir, aquel que tenía el valor de irradiación o irradiación solar menor, de todos los meses del año.

Como en el mercado hay módulos fotovoltaicos de diversas potencias máximas: 5, 30, 50, 75, 100, 150, 165 (W), y otras.; según la demanda de energía que se precise.

Asimismo, hay paneles de diversas calidades, según las celdas cristalinas de silicio semiconductor de las que están formados sean monocristalinas (la más eficientes y caras), policristalinas (menos eficientes pero más baratas) o amorfas (poco eficientes pero muy baratas).

4.6. Subsistema de acumulación de energía

Los acumuladores o baterías deben conectarse adecuadamente para conseguir los requerimientos eléctricos de conexión con el resto del sistema fotovoltaico.

En primer lugar, todos los elementos que se van a conectar deben ser del mismo tipo e idénticas características (misma capacidad y tensión) y funcionar en las mismas condiciones. Ya se tiene conocimiento que, cuando se conectan varios acumuladores en serie, se suman las tensiones, y la capacidad total obtenida es igual a la capacidad individual de uno de los acumuladores. Cuando se conectan varios acumuladores en paralelo, la capacidad total obtenida es igual a la que poseen cada uno de los acumuladores conectados.

En la medida de lo posible se evitará la conexión de acumuladores en paralelo debido a que, si existen acumuladores que se encuentran, por diversas causas, en distinto estado electroquímico. Estos pueden establecerse corrientes eléctricas que circulen entre los distintos acumuladores conectados, disminuyendo la eficiencia y las prestaciones del conjunto. En la conexión de elementos acumuladores en serie, se deben, seleccionar acumuladores individuales que, tengan aproximadamente la capacidad total que se desea. De lo contrario deben conectarlos en paralelo, situación que debe evitarse en lo posible conectando tantos elementos individuales como sean necesarios para obtener la tensión de trabajo requerida.

Los acumuladores deben ubicarse lo más cerca posible del conjunto de módulos fotovoltaicos, para evitar las posibles pérdidas de tensión que se originan. Las conexiones deben realizarse de la mejor manera, ya que comúnmente son las causantes de las caídas de tensión. Además la batería se debe aislar del suelo mediante una bancada de madera o material resistente al ácido y colocadas en cualquier lugar ventilado para evitar la acumulación de hidrógeno y oxígeno. Esta acumulación que se desprende en la parte final de la carga de la batería, aunque al ser la carga de los módulos fotovoltaicos lenta, no se produce una excesiva gasificación.

Los acumuladores deben mantenerse a una temperatura entre 15 °C y 25 °C. Una temperatura más baja producirá una disminución de la capacidad disponible de la batería y una más elevada generará un acortamiento de la vida útil. El rendimiento óptimo de un acumulador se produce a los 20 °C aproximadamente.

En los sistemas individuales a diseñar, el consumo energético es distinto porque la energía eléctrica diaria solicitada por los receptores, no es igual para los dos usuarios definidos.

Debido a que en Guatemala, la energía eléctrica es distribuida a 110 V en corriente alterna, 60 Hz; la obtención de equipos en corriente alterna es más accesible tecnológica y económicamente, que la de equipos en corriente continua. Aunque ambos sistemas van a utilizar lámparas de bajo consumo para la iluminación y equipos electrónicos a 110 V en corriente alterna. El consumo de energía de estos receptores (lámparas, radio y televisión) son diferentes para cada usuario. Para la adquisición de las baterías es importante determinar tanto la capacidad (Ah) como la tensión de trabajo (V) del subsistema de acumulación. Esta última es igual a 12 V en ambos sistemas diseñados.

Para realizar el dimensionado de este subsistema de acumulación deben conocerse de antemano los siguientes parámetros:

- PD,max: profundidad máxima de descarga profunda u ocasional, expresada en tanto por uno. En el caso de acumuladores de plomo-ácido PD,max suele estar comprendida entre 60 % y 80 % de su valor, mientras que, en el caso de acumuladores de NiCd es igual a la unidad.
- PD,diaria: profundidad máxima de descarga diaria o superficial admisible. En el caso de acumuladores de plomo-ácido, suele valer alrededor de 0,2, mientras que, en el caso de acumuladores de Ni/Cd, es igual a la unidad.

- $V_{T,acu}$: tensión de trabajo del subsistema de acumulación o baterías, expresada en voltios (los valores más habituales de $V_{T,acu}$ son: 6 V, 12 V, 24 V, 36 V, 48 V y 120 V).
- V_{acu} : tensión nominal de cada elemento acumulador o vaso (alrededor de 2 V en acumuladores de plomo-ácido y entre 1,2 y 1,3 V en acumuladores de NiCd). Las tensiones son mayores en el caso de tratarse de baterías, compuestas de varios vasos.

Debe establecerse el número de días de autonomía de las baterías (N_D) es decir, la cantidad de días que la instalación receptora puede abastecerse de la energía eléctrica suministrada exclusivamente por las baterías.

Ah (amperios hora) y una tensión nominal igual a V_{acu} (voltios) viene dado por el producto de las dos magnitudes anteriores (recuérdese: $1 W = 1 V * 1 A$)

$$E(Wh) = C' (Ah) V_{acu} (V) \quad [16]$$

Por otro lado, la energía que debería almacenarse en un sistema de acumulación, E_{acu} (Wh). Este admite una profundidad de descarga del 100 % para suministrar la energía consumida por la instalación receptora durante los días de autonomía especificados, N_D , viene dada por:

$$E_{acu} (Wh) = N_D * E_{elec, \text{m}áx} (Wh/día) \quad [17]$$

El promedio de la energía eléctrica diaria solicitada por la instalación receptora, para el mes en el que el consumo de los receptores es máximo ($E_{elec, \text{m}áx}$). Esta expresada en watt hora/día.

La energía que debería almacenarse en el sistema de acumulación, E_{acu} (Wh), tras añadir un factor de seguridad de 1,1 por las pérdidas en los cables, viene dada por:

$$E_{acu} (Wh) = \frac{1,1 [N_D * E_{elec, \text{máx}} (\frac{Wh}{\text{día}})]}{P_{D, \text{max}}} \quad [18]$$

La capacidad necesaria del sistema de acumulación, C'_T (Ah), se obtiene como:

$$C'_T (Ah) = \frac{E_{acu} (Wh)}{V_{T, acu} (V)} \quad [19]$$

$$C'_T (Ah) = \frac{1,1 [N_D * E_{elec, \text{máx}} (Wh/\text{día})]}{[P_{D, \text{max}} * V_{T, acu} (V)]} \quad [20]$$

Para los sistemas a diseñar se fijan los valores de los parámetros mencionados anteriormente, como sigue:

$N_D = 1$ días de autonomía

$P_{D, \text{max}} = 0,6$ de profundidad máxima de descarga

$V_{T, acu} = 12$ V es la tensión de trabajo de las baterías

Dado a que el valor del parámetro de profundidad máxima de descarga permitido esta entre 0,6 y 0,8 (descargas profundas).

Definido lo anterior se puede continuar con el cálculo

$E_{elec,m\acute{a}x} = 792,86 \text{ Wh/d\acute{a}a}$

De la ecuaci3n [20], se obtiene:

$$C_T (Ah) = \frac{1,1 [3 \text{ d\acute{a}a} * 792,86 \text{ Wh/d\acute{a}a}]}{[0,6 * 12 \text{ V}]}$$

$$C_T (Ah) = 363,39 \text{ Ah}$$

En el mercado hay diversidad de fabricantes de acumuladores y bater\edas, por ello la elecci3n de las bater\edas debe realizarse seg\un la capacidad y tensi3n de trabajo que requieren los sistemas fotovoltaicos.

Especificaciones de la bater\eda a utilizar en los sistemas fotovoltaicos dise\eados:

- Bater\eda Monoblock 400 Ah
- Aplicaciones:
 - Sistemas de energ\eda solar fotovoltaica
 - Sistemas *back-up*
 - Telecomunicaciones y torres repetidoras de celulares
 - Servicios de emergencia
 - Se\nalizaci3n
- Detalles de construcci3n:
 - Aleaci3n de plomo
 - Placa plana
 - Electrolito 1,26
 - Caja y tapa: de polietileno de alta resistencia
- Instrucciones de carga:
 - Tensi3n de flotaci3n: 13,8 V a 25 °C

- Tensión de ecualización y carga: 15 V a 25 °C

Para el sistema se deberán de utilizar 2 baterías colocadas en paralelo, para obtener de esta forma la capacidad de 363,39Ah, a una tensión de trabajo de 12 V. Aunque esta disposición en paralelo no es tan aconsejable, por diferencias en las baterías que pueden ocasionar mal funcionamiento de carga y descarga, se puede disminuir tal riesgo, utilizando baterías con las mismas especificaciones y de una sola marca comercial.

4.7. Subsistema de regulación

Independiente de las características y prestaciones específicas de cada modelo concreto del regulador, deben especificarse los valores nominales de tres parámetros eléctricos, comunes al inversor, para que sea adecuado a una instalación fotovoltaica determinada. Estos parámetros son: la tensión nominal mínima de trabajo del regulador, la tensión máxima de trabajo del regulador y la intensidad nominal del interruptor de acoplamiento entre los módulos fotovoltaicos y las baterías.

La potencia de los módulos fotovoltaicos se da a condiciones estándar de medida CEM, referidas a 1 000 W/m² de irradiación y 25 °C de temperatura de célula. Este valor se suele denominar potencia pico y es la potencia nominal por la cual se paga cuando se compra un módulo fotovoltaico. La potencia de un módulo fotovoltaico en operación real es directamente proporcional a la irradiación recibida.

Pero también la potencia disminuye con el aumento de la temperatura, del orden del 4 % por cada 10 °C de aumento de temperatura respecto de los 25 °C. Es necesario decir que un módulo fotovoltaico en operación puede

alcanza los 70 °C en función de la irradiación y la temperatura ambiente. Sin embargo, para la determinación de las tensiones de trabajo del regulador máxima y mínima se fijaron las temperaturas de célula 10 °C y 70 °C, respectivamente, con un valor de irradiación de 1 000 W/m² para ambas temperaturas.

La intensidad nominal del interruptor de conexión y desconexión de la corriente eléctrica desde el generador fotovoltaico hacia el subsistema de acumulación $I_{Reg,gen-acu}$, debe ser igual a la máxima intensidad de corriente que es capaz de suministrar el campo fotovoltaico, es decir, I_{Tcc} (A).

$$I_{Reg,gen-acu} = I_{SC,gen} = I_{SC,mod} * N_{P,mod} \text{ [21]}$$

Deben preverse los aumentos de las intensidades y las tensiones suministradas por los módulos fotovoltaicos en condiciones medioambientales determinadas, multiplicando, para ello, el valor anterior por 1,25. Por lo tanto, el regulador debe estar diseñado para soportar el anterior valor, utilizando un factor de seguridad.

$$I_{Reg,gen-acu} = 1,25 * I_{SC,gen} = 1,25 * I_{SC,mod} * N_{P,mod} \text{ [22]}$$

Utilizando para estos cálculos datos de un módulo fotovoltaico de 65 Wp.

Utilizando las ecuaciones [21] y [22], se obtiene:

$$I_{SC,mod} = 3,99 \text{ A}$$

$$N_{P,mod} = \text{módulo en paralelo}$$

$$I_{Reg,gen-acu} = 1,25 * 3,99 * 6 = 29,94 \text{ A}$$

Se debe utilizar un regulador con los parámetros de funcionamiento siguientes:

Intensidad nominal del regulador 4,99 A.

Tensión máxima $V_{\text{máx}} = 18,9 \text{ V}$.

Tensión mínima $V_{\text{mín}} = 14,4 \text{ V}$.

Especificaciones de los reguladores a utilizar en los dos sistemas fotovoltaicos diseñados:

- Punto de regulación 14,3 V
- Desconexión por bajo voltaje 11,5 V
- Reconexión por bajo voltaje 12,6 V
- Tipo de carga PWM Serie (modulación de ancho de pulso)

Protecciones electrónicas:

- Cortocircuito y exceso de corriente — sistema de carga solar y carga
- Polaridad inversa, en sistema de carga solar, en la carga y en la batería
- Corriente inversa por la noche
- Alto voltaje — en la carga
- Rayos — en sistema solar, en la carga y en la batería
- Tropicalización placa de circuito — recubrimiento según norma
- Terminales — protegidos contra corrosión
- Terminales para tamaños de cable de hasta 4 mm^2
- Indicaciones de estado

La intensidad nominal del interruptor de acoplamiento entre las baterías y los receptores, $I_{Acu,recep}$, debe ser, como mínimo, igual a la intensidad total absorbida por la instalación receptora. En este caso los receptores en CA la intensidad total es igual a la intensidad máxima absorbida por el inversor, teniendo en cuenta su rendimiento.

Además, la tensión media en bornes debe estar entorno a los 14 V – 14,5 V para sistemas fotovoltaicos de 12 V nominales. Esto en la salida del regulador hacia las baterías, debido a que han ocurrido situaciones en las que hay generación de energía en los módulos (radiación), pero las baterías no se cargan porque el regulador no está funcionando correctamente, pues su dimensionamiento no es correcto.

4.8. Subsistema de acondicionamiento de potencia

Para el dimensionamiento de este subsistema se especificaron los requerimientos del sistema:

- Forma de onda necesaria.
- Voltaje DC de entrada que se ha de corresponder con el voltaje de batería, o con el voltaje de salida del convertidor DC/DC.
- Voltaje AC de salida que ha de corresponderse con el voltaje AC de los consumos en AC.
- Potencia total de los receptores, es decir la potencia total AC teórica.
- Tiempo máximo de operación en condiciones de sobrecarga.
- Rendimiento del inversor a potencia nominal.
- Anotar las especificaciones del inversor, tomar datos de fabricante.

Tabla X. **Requerimientos del subsistema de acondicionamiento de potencia**

Requerimientos del sistema	Valores
a. Forma de onda	Senoidal
b. Voltaje DC	12 V
c. Voltaje AC	110 V
d. Potencia total de los receptores	145 V
e. Tiempo de operación en sobrecarga	20 minutos
f. Rendimiento a carga nominal	159,5 W

Fuente: elaboración propia.

Se dimensionan para cubrir las necesidades energéticas diarias (de uno o varios días, respectivamente) de los receptores. Un inversor se dimensiona para satisfacer la demanda de potencia (en régimen permanente) máxima de los receptores, potencia del inversor en servicio continuo, P_{inv} , que es igual al valor máximo de la suma de las potencias de todos los receptores que funcionan simultáneamente.

Es recomendable un cierto sobredimensionamiento de la potencia del inversor en servicio continuo, un 10 %, para situaciones no previstas de funcionamiento simultáneo de grandes receptores.

Los inversores se caracterizan por dos potencias: la potencia en servicio continuo P_{inv} (mencionada anteriormente) y la potencia pico o en servicio intermitente PP_{inv} .

$$P_{inv} = 1,10 * E_{elect,max} \quad [23]$$

$$E_{elect,max} = 175 W$$

De la ecuación [23] se obtiene:

$$P_{inv} = 1,10 * 175 = 192,50 \text{ W}$$

La corriente máxima entre la batería y el inversor se determina, según la ecuación siguiente:

$$I_{Acu \text{ recep}} = I_{Acu \text{ inv}} \geq I_{Máx, \text{ inv}} = \frac{P_{inv}}{V_{Min} T_{acu} \eta_{inv}}$$

Siendo $I_{Acu \text{ inv}}$ la intensidad nominal del interruptor de acoplamiento entre las baterías y el inversor. $V_{Min} T_{acu}$ es el menor valor de la tensión del subsistema de acumulación con el que funciona el inversor, es en esta situación cuando el inversor absorbe una intensidad mayor. η_{inv} es la eficiencia del inversor a plena potencia (no necesariamente igual a la eficiencia máxima del inversor).

Para el sistema diseñado se determinará la corriente máxima entre la batería y el inversor:

$$P_{inv} = 192,50 \text{ W}$$

$$V_{Min} T_{acu} = 12 \text{ V}$$

$$\eta_{inv} = 0,9$$

De la ecuación [24]

$$I_{Acu \text{ inv}} = \frac{192,50 \text{ W}}{12 \text{ V} * 0,9} = 17,82 \text{ A}$$

Tabla XI. **Potencia de servicio continuo P_{inv} del subsistema de acondicionamiento de la red (inversor) y corriente entre la batería IAcu inv y el inversor para los dos sistemas diseñados, según el consumo**

Potencia eléctrica en AC (W)	Capacidad del inversor P_{inv} (W)	Corriente batería-inversor IACUINV (A)
175	192,5	17,82

Fuente: elaboración propia.

4.9. Conexión y transporte de la energía eléctrica

Dada las características específicas de las instalaciones fotovoltaicas se destacan algunas consideraciones del dimensionado de los conductores especialmente importantes. El subsistema de captación fotovoltaica y las conexiones entre las baterías y los reguladores e inversores merecen un tratamiento especial en lo que al dimensionado de los conductores. El resto sigue las pautas normales de diseño de las instalaciones eléctricas convencionales.

En el subsistema de captación de energía (módulos fotovoltaicos), la intensidad de cortocircuito, ISC_{mod} , de los módulos facilitada por los fabricantes se ve incrementada al aumentar la irradiancia y la temperatura. La primera alcanza, ocasionalmente, valores de 1 200 W/m² o incluso superiores, especialmente en momentos de alta irradiación solar y altas componentes de radiación reflejada adicional. Por todo ello, la intensidad máxima suministrada

por los módulos debe estar sobredimensionada respecto a la intensidad de cortocircuito, se aconseja un sobredimensionamiento de 25 %.

En los subsistemas de captación fotovoltaica y las conexiones entre las baterías y los reguladores e inversores, debe prestarse especial atención a los valores de la máxima intensidad y tensión, pues se verán sometidos los conductores. Por consiguiente, la intensidad máxima suministrada por los módulos fotovoltaicos es: $I_{Max, mod} = 1,25 * I_{SC, mod}$. Los conductores que transportan corriente eléctrica procedente directamente de los módulos fotovoltaicos deben admitir el paso de una intensidad como mínimo igual a: $I_{Conductor, mod} \geq 1,25 * I_{SC, mod}$ (caso general); para Estados Unidos $I_{Conductor, mod} \geq 1,25 * 1,25 * I_{SC, mod} = 1,56 * I_{SC, mod}$.

Para los sistemas diseñados, los conductores que transportan corriente eléctrica procedente de los módulos al regulador deben admitir el paso de una intensidad mínima igual a 4,99 A para el usuario tipo 1 y 9,97 A para el usuario tipo 2.

Por su parte, la tensión en circuito abierto $V_{OC, mod}$ de los módulos fotovoltaicos aumenta al disminuir la temperatura. En días fríos pero soleados, la tensión en circuito abierto supera ampliamente el valor facilitado por el fabricante.

Para tener en cuenta lo anterior debe tomarse como tensión máxima de los módulos, la tensión en circuito abierto facilitada por el fabricante multiplicado por un factor, normalmente 1,25. En consecuencia, la tensión de aislamiento de los conductores debe escogerse considerando dicho factor.

En los sistemas diseñados utilizando módulos de 65 Wp, la tensión máxima de los módulos es de 27,12 V, para ambos sistemas. Por lo tanto la tensión de aislamiento de los conductores debe seleccionarse tomando en consideración dicho valor.

Los cables utilizados para acoplar las baterías entre sí y con el resto de equipamiento deben soportar las condiciones corrosivas y húmedas del recinto en el que estarán ubicadas. Además, no deben emplearse conductores de aluminio debido a que prestan problemas corrosivos.

Debe prestarse especial atención en que los conductores conectados a las baterías. Estos deben soportar las posibles elevadas intensidades de cortocircuito (fácilmente de varios miles de amperios) que pueden presentarse. Esto en función del tiempo de respuesta de las protecciones correspondientes.

Los conductores de la línea de conexión entre los acumuladores y el inversor se dimensionan para soportar la máxima intensidad que puede absorber el inversor sobredimensionada por un factor 1,25. Se deben tener en cuenta los picos de intensidad transitoria que se presentan al conectar determinados tipos de receptores, especialmente los motores eléctricos.

- Circuitos eléctricos
 - Identificación: identificar y conocer las peculiaridades de los distintos circuitos eléctricos que forman el sistema fotovoltaico resulta algo muy conveniente, si no imprescindible. A continuación se describen los circuitos principales que se encuentran en un sistema fotovoltaico.

- Protección: el cableado de un sistema fotovoltaico debe cumplir con el reglamento electrotécnico de baja tensión, en este caso se utiliza el reglamento español Real Decreto 842/2002.

También debe asegurarse de especificar cable para exterior, resistentes a la degradación por la acción de la luz solar. Considerar la opción de entubar los conductores.

En la región donde se instalarán los sistemas fotovoltaicos, la temperatura no supera los 30 °C, por lo que no es necesario considerar la corrección por temperatura, para el cableado.

Una vez identificados y caracterizados los circuitos eléctricos principales consideran los medios de desconexión y protección para cada uno de ellos.

Se usan interruptores y fusibles para proteger los equipos y al personal. Los interruptores permiten cortar manualmente el flujo de corriente en caso de emergencia. Los fusibles proporcionan protección contra sobrecorrientes en caso de cortocircuito del sistema o de fallo a tierra. En un sistema fotovoltaico es recomendable separar mediante fusibles e interruptores el generador fotovoltaico, el regulador de carga, la batería. Los interruptores AC no son aptos para operar en DC.

- Cableado: las conexiones bien hechas y seguras son esenciales si se desea que el sistema funcione correctamente de acuerdo con el dimensionado realizado y tenga una larga vida útil. La instalación de interruptores y fusibles es muy importante para el funcionamiento y mantenimiento seguro del sistema.

La correcta selección y calibre de los conductores aumenta el rendimiento y fiabilidad del sistema fotovoltaico. Dimensionar los conductores para que las caídas de tensión sean inferiores al 3 % en cualquiera de los circuitos.

A diferencia de los sistemas de electrificación convencionales, los sistemas fotovoltaicos suelen instalarse en lugares donde dicha instalación no se ha provisto. Por tal motivo, lo habitual es realizar un tendido del cableado a la vista, sujeto a los muros y paredes existentes (grapas, con bridas o bajo canaleta), o bien enterrado (bajo tubo) cuando no hay elementos de edificación que faciliten dicha sujeción.

El cableado del generador fotovoltaico, tanto de interconexión de los módulos como de conexión con el regulador, discurre generalmente (al menos en parte) a la intemperie. Por ello, debe adoptarse las medidas adecuadas para que este cableado resulte resistente contra los efectos de la humedad y la radiación ultravioleta (cable con aislamiento apropiado, cable bajo tubo, y otros).

Un aspecto fundamental del cableado de una instalación fotovoltaica es la identificación de la polaridad de cada conductor y del terminal al que se debe conectar.

La técnica más común de identificación de la polaridad del cableado es la utilización de cables de distintos colores y el marcado de las terminaciones de los mismos con cinta de distinto color. A continuación se muestra el código de colores habitual en instalaciones fotovoltaicas:

Tabla XII. **Colores habitual en instalaciones fotovoltaicas**

Polaridad	Color
Positiva	Rojo o marrón
Negativa	Negro, Azul o blanco

Fuente: elaboración propia.

La canalización común de conductores pertenecientes a distintos circuitos dan lugar, si no se toman las medidas oportunas, a confusiones y equívocos de consecuencias graves, tanto desde el punto de vista de la seguridad como de funcionamiento. El marcado correspondiente a la identificación de la polaridad y de los terminales se debe realizar antes de la canalización de los cables.

Los cables con aislamientos y cubiertas de PVC, EPR y especiales para instalaciones fijas o móviles hasta 450/750 V se fabrican bajo las Normas: UNE 21031, UNE 21160, UNE 21153, UNE 21027.

- La Norma UNE 21031 está en correspondencia con la Norma CE-NELEC HD-21 en la que vienen fijadas las siglas de designación:
- Letra inicial H=conforme con las normas armonizadas europeas. A=cable de tipo nacional reconocido.
- Tensión: 03= tensión nominal del cable 300/300 V; 05= tensión nominal del cable 300/500 V; 07= tensión nominal del cable 450/750 V.
- Materiales de aislamiento y cubierta: B: EPR (etileno propileno) N: PCP (neopreno); V: PVC (policloruro de vinilo); X=XLPE (polietileno reticulado).

- Forma de cable: H: colocado al final de la designación. Cables planos cuyos conductores se separan. H2: colocado al final de la designación. Cables planos cuyos conductores no pueden separarse.
- Conductor: U= Conductor rígido, unipolar; R= conductor rígido, de varios alambres cableados; K= Conductor flexible, Clase 5, para instalación fija; F= Conductor flexible, Clase 5, para instalación móvil; H= Conductor flexible, Clase 6, para instalación móvil; separados de la designación por un guión.
- Número de conductores: Signo X cuando no hay conductor amarillo/verde o letra G cuando hay conductor amarillo/verde. Sección de conductor en mm².

Para determinar la sección de los conductores, se utiliza la ecuación siguiente:

$$S = \frac{2LI}{\sigma(Va - Vb)} \quad [25]$$

Dónde:

L: longitud del tramo

I: corriente a circular

Va-Vb: caída máxima de tensión

σ : conductividad eléctrica del cobre a 90 °C= 47,04 m /_*mm² o 47,04 E+06 S/m (siemens por metro).

Para corriente alterna se debe incluir el factor de potencia fdp ($\cos \Phi$); de tal manera que la ecuación anterior es igual a:

$$S = \frac{2LI\cos\varphi}{\sigma(V_a - V_b)} \quad [26]$$

Cálculo de la sección de los conductores para el sistema del usuario tipo 1

Para todas las líneas $V_a - V_b = 1,5 \%$

- Módulos-regulador

$$V_{mod-acu} = 12 \text{ V}$$

$$L = 8 \text{ m}$$

$$I_{m\acute{a}x} = 4,99 \text{ A}$$

$$V_a - V_b = 0,015 * 12 \text{ V} = 0,18 \text{ V}$$

De la ecuación [25], se obtiene

$$S = \frac{2 * 8 \text{ m} * 4,99 \text{ A}}{47,04 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} (0,015 * 12 \text{ V})} = 9,43 \cong 9 \text{ o } 10 \text{ mm}^2$$

- Regulador-batería

$$V_{reg-acu} = 12 \text{ V}$$

$$L = 2,5 \text{ m}$$

$$I_{m\acute{a}x} = 4,99 \text{ A}$$

$$V_a - V_b = 0,015 * 12 = 0,18 \text{ V}$$

De la ecuación [25], se obtiene:

$$S = \frac{2 * 2,5 \text{ m} * 4,99 \text{ A}}{47,04 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} (0,015 * 12\text{V})} = 2,5 \cong 3 \text{ mm}^2$$

- Bateria-inversor

$$V_{acu-inv} = 12 \text{ V}$$

$$L = 2,5 \text{ m}$$

$$I_{m\acute{a}x} = 6,62 \text{ A}$$

$$V_a - V_b = 0,015 * 12 = 0,18 \text{ V}$$

De la ecuaci3n [25], se obtiene:

$$S = \frac{2 * 2,5 \text{ m} * 6,62 \text{ A}}{47,04 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} (0,015 * 12\text{V})} = 3,91 \cong 4 \text{ mm}^2$$

- Inversor a las l3neas en corriente alterna (receptores) d-1. Iluminaci3n

$$V_{inv-rec} = 110 \text{ V}$$

$$L = 20 \text{ m}$$

$$I_{m\acute{a}x} = 15 \text{ A}$$

$$V_a - V_b = 0,015 * 110 = 1,65 \text{ V}$$

$$\cos \Phi = 0,9$$

De la ecuaci3n [26], se obtiene:

$$S = \frac{2 * 25 \text{ m} * 15 \text{ A} * 0,9}{47,04 \frac{\text{m}}{\text{mm}^2} (0,015 * 110\text{V})} = 8,70 \cong 9 \text{ mm}^2$$

Para unificar el uso del tamaño de cableado, para la línea del módulo-regulador, se recomienda cable de 10 mm², para las líneas del regulador-batería y batería-inversor de 4 mm², para las líneas en corriente alterna de iluminación y bases de enchufe 10 mm².

5. SEGURIDAD INDUSTRIAL EN EL MONTAJE Y CONEXIÓN DEL SISTEMA

El propósito de la seguridad durante el montaje y conexión de la instalación fotovoltaica es evitar cualquier daño personal y material. Se deben adoptar las medidas de seguridad en las vías de paso en el montaje e instalación para que no exista dicho peligro (triángulos, conos, cintas de limitación de paso, y otras). Esta se debe aplicar desde la fase de diseño de la instalación fotovoltaica, tanto desde el punto de vista material, como personal.

5.1. Seguridad durante el montaje

El transporte del material a pie de obra debe realizarse de modo que no sufra ningún daño. En este sentido, conviene tener en cuenta las siguientes consideraciones y recomendaciones:

- Mantener todo el material en sus cajas y embalajes originales.
- Respetar, cuando existan, las indicaciones de colocación dispuestas por el fabricante.
- Las baterías llenas de electrolito líquido deben colocarse siempre en posición vertical.
- Si es necesario apilar material, prestar especial atención a su fragilidad (peso que puede soportar). En este sentido, los módulos fotovoltaicos son los elementos más frágiles.

Los movimientos bruscos debidos a la inercia del vehículo, o a lo accidentado del terreno, pueden provocar daño en los materiales transportados.

El almacenamiento temporal (previo al montaje) del materia a pie de obra debe realizarse de modo que no sufra ningún daño. En este sentido, conviene tener en cuenta las siguientes consideraciones y recomendaciones:

- Tener el material al alcance de la vista o almacenarlo en un lugar seguro (de acceso restringido) para evitar hurtos y manipulaciones indebidas (por curiosidad) que puedan ocasionar golpes o caídas.
- No exponer el material a condiciones climáticas adversas. No exponer las baterías de forma prolongada a la radiación directa del Sol.
- La exposición de las células de un módulo fotovoltaico a la luz provoca la aparición de tensión en sus terminales. Para evitarlo se coloca el módulo boca abajo o cubrir la superficie de captación con algún elemento.

El propósito de la seguridad durante el montaje de una instalación fotovoltaica es doble, ya que implica la exposición del personal a condiciones ambientales y situaciones de peligro. Conviene tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Evitar cualquier deterioro o daño material de los elementos que forman parte de la instalación
- Evitar cualquier daño personal propio o ajeno (dentro del alcance de la instalación).

- Las baterías tienen peso considerable, de modo que una caída (incluso a la altura del suelo) provoca el deterioro de las placas y la inutilización de estas. En el transporte y colocación es recomendable la utilización de equipo adecuado para realizar esfuerzos humanos que provocan lesiones.

En el cableado de los circuitos de las baterías, el riesgo eléctrico se debe principalmente a la elevada intensidad de corriente que generan las baterías. Se recomienda portar accesorios personales metálicos (relojes, cadenas, y otros) durante la manipulación de los acumuladores.

5.2. Puesta a tierra

Es uno de los aspectos eléctricos de la instalación fotovoltaica que debe ser analizada con interés especial. La puesta a tierra de protección consiste en la unión eléctrica de las distintas masas metálicas y de ellas con tierra.

Protección contra tormentas: evitar las diferencias de potencial entre las distintas masas metálicas y tierra, debido a una posible acumulación de carga electrostática de origen atmosférico. Estas diferencias de potencial podrían provocar la aparición de una descarga electrostática y originar un incendio. Sirve también como vía de derivación a tierra de las corrientes de rayo.

La puesta a tierra de protección del generador fotovoltaico abarca tanto el marco metálico de los módulos como a la estructura.

El anclaje de los módulos a la estructura no se considera una puesta a tierra eficaz de los mismos, debido a que el tratamiento superficial de ambos elementos dificulta una conexión eléctrica fiable.

Cuando la distancia entre el generador fotovoltaico y el resto de la instalación no es considerable: la puesta a tierra de protección del campo fotovoltaico sirve como puesta a tierra de protección de todo el sistema.

6. INSTRUCCIONES PARA EL USO DE UN SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Se presenta la información básica para la conservación y utilización correcta y segura de la instalación fotovoltaica por parte del usuario.

Respecto a la utilización es conveniente informar al usuario acerca de las prestaciones y limitaciones de la instalación fotovoltaica, debido a que la misma ha sido diseñada para proporcionar un servicio eléctrico determinado y de acuerdo a criterios de utilización previamente determinados.

Generalmente, el mantenimiento a cargo del usuario es de tipo preventivo (ocasional o programado) y abarca todas aquellas comprobaciones y verificaciones que, ya sea por su sencillez o por su periodicidad, no justifican en modo alguno la intervención del técnico. La finalidad de estas tareas de mantenimiento es:

- Mantener la instalación (en la medida de lo posible) en un estado óptimo de conservación y funcionamiento similar al correspondiente a la puesta en marcha de la instalación.
- Detectar a tiempo posibles anomalías o defectos que influyan negativamente en el rendimiento general de la instalación fotovoltaica y en su prestación de servicio.

6.1. Inspección general del estado del campo fotovoltaico

Ocasional y ante condiciones ambientales especialmente adversas (de viento, lluvia o sol) se recomienda lo siguiente:

- Evitar el sombreado no previsto de los módulos fotovoltaicos debido a variaciones en la vegetación circundante o a la colocación de objetos próximos a los módulos. Este sombreado disminuye considerablemente la producción de energía eléctrica y, por tanto, las prestaciones de la instalación fotovoltaicas.
- Evitar la acumulación prolongada y permanente de objetos y depósitos de suciedad en la superficie de los módulos (especialmente los procedentes de las aves o de árboles). Sus efectos son análogos a los del sombreado.
- Cuando sea necesario, la limpieza de los módulos se debe realizar de forma manual, utilizando agua y productos no abrasivos, no emplear estropajos que puedan rayar la superficie de los módulos.
- No abrir las cajas de conexiones de los módulos, ni manipular el interior de las cajas o armarios de conexiones.

6.2. Inspección general del estado de los acumuladores

- Mantener el lugar donde se colocaron las baterías en las mismas condiciones que en la puesta en marcha de la instalación, evitando el almacenamiento descontrolado de objetos.

- No manipular las conexiones de los acumuladores.
- Comprobar que el nivel del electrolito (en los acumuladores de electrolito líquido) se mantiene entre los niveles mínimo y máximo. Los acumuladores de uso fotovoltaico suelen tener una reserva considerable de electrolito, de modo que la reposición del nivel se efectúa durante la visita programada de un técnico.
- Debe mantenerse dentro del margen comprendido entre las marcas de 'Máximo' y 'Mínimo'. Si no existen estas marcas, el nivel correcto del electrolito es de 20 mm por encima del protector de separadores. Si se observa un nivel inferior en alguno de los elementos se deben rellenar con agua destilada o desmineralizada. No debe rellenarse nunca con ácido sulfúrico.
- Si es necesario reponer el nivel del electrolito, utilizar únicamente agua destilada o desmineralizada, no sobrepasar el nivel máximo. Evitar salpicaduras y derrame de electrolito, evitar la penetración de impurezas en el interior de las celdas, utilizar un embudo de plástico o cristal (no metálico) y llevar guantes y gafas protectoras.
- Los terminales de la batería deben limpiarse de posibles depósitos de sulfato y cubrir con vaselina neutra todas las conexiones.
- Si se dispone de un densímetro se mide la densidad del electrolito. Con el acumulador totalmente cargado, debe ser de $1\,240 \pm 0,01$ a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Las densidades deben ser similares en todos los vasos. Diferencias importantes en un elemento es señal de posible avería.

- Para comprobar el estado de carga de las baterías se observan las señalizaciones e indicaciones del regulador de carga u otros aparatos de monitorización, que el estado de carga de las baterías es el previsto.
- Bajo ningún concepto es admisible el disponer en paralelo o en serie acumuladores o baterías de distinto modelo, capacidad o tiempo de uso (unión de baterías nuevas con antiguas y usadas, entre otras.), ya que esto provocaría pasos internos de corriente entre un elemento y otro, dando lugar al deterioro de las baterías más nuevas.

6.3. Inspección general del estado de los aparatos

Comprobar que los estados de conservación, limpieza y sujeción del regulador, inversor y demás aparatos eléctricos presentes en la instalación FV, se mantienen en condiciones similares a las de la pausa en marcha de la instalación. Cuando sea necesario, eliminar los restos de polvo y suciedad con un paño humedecido en agua o limpiador multiusos.

Ante cualquier indicio de degradación o alteración, en el estado de conservación de los aparatos (desgaste, quemaduras, golpes, y otros), comprobar si el funcionamiento de los mismos se ha visto afectado.

Seguir los procedimientos de comprobación rutinaria del funcionamiento de los aparatos, facilitados por el fabricante (en los manuales de operación de los aparatos) o por el instalador. En cualquier caso, comprobar:

- Indicaciones correctas de estado de funcionamiento y de monitorización.
- Ausencia de fallos, alarmas, zumbidos extraños, calentamientos, y otros.

7. PRESUPUESTO

A continuación se presenta el presupuesto de los equipos para la construcción de los sistemas fotovoltaicos diseñados, los costos están en dólares US\$.

Tabla XIII. **Presupuesto para el equipo del sistema fotovoltaico**

Equipo	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
Módulo fotovoltaico: - 65 W - Tensión nominal 12 Volts. - Tensión Pico 17,4 Volts.	\$. 450,00	6	\$. 2 700,00
Batería: - 12 voltios - 400 Ah - Tipo monoblock	\$. 350,00	2	\$. 700,00
Regulador: - Corriente nominal 4,99 Amp. -Tensión máxima 18,9 volts -Tensión mínima 14,4 volts	\$. 60,00	1	\$. 60,00
Inversor: - Forma de onda senoidal - Voltaje DC: 12 volts - Voltaje AC: 110 volts - Potencia: 175 W	\$. 70,00	1	\$. 70,00
Total			\$. 3 530,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Presupuesto obra eléctrica**

Cableado	Precio por metro	Distancia [mts]	Total
Módulo-módulo	\$. 2,25	1	\$. 2,25
Paneles-regulador	\$. 10,38	8	\$. 80,64
Regulador-batería	\$. 2,76	2,5	\$. 6,90
Batería-inversor	\$. 4,53	2,5	\$. 11,33
Iluminación AC	\$. 4,53	20	\$. 90,6
Toma corrientes AC	\$. 1,51	25	\$. 37,75
Montaje			
Mano de obra y estructuras de soporte	\$350,00	1	\$. 200,00
Total			\$. 429,47

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Presupuesto mano de obra civil**

Descripción	Total
Albañil durante 24 horas hábiles	\$. 62,50
Ayudante de albañil durante 24 horas hábiles	\$. 38,00
Total	\$. 100,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Presupuesto mano de obra electrónica**

Descripción	Total
Ingeniero electrónico a cargo del proyecto	\$. 190,00
Total	\$. 190,00

Fuente: elaboración propia.

El costo total aproximado por sistema instalado es de \$. 4 249,97.

Por motivos de inflación y fluctuación de costos, se asegura un monto de \$. 1 000,00 destinado a imprevistos.

Sumando un total de \$. 5 249,97 por sistema instalado.

CONCLUSIONES

1. En Guatemala, las fuentes de energía renovable ya son utilizadas para generar electricidad, como son las plantas hidroeléctricas; sin embargo, la energía solar fotovoltaica es usada en el rural del país y en la ciudad.
2. Según los datos de irradiación solar o irradiancia, en Guatemala, la energía solar con tecnología fotovoltaica es factible para generar energía eléctrica conectada a la red, solo si se cumplen la norma referente a generación de energía eléctrica con fuentes renovables.
3. El sistema fotovoltaico propuesto está capacitado para cubrir las necesidades básicas de las familias, iluminación y entretenimiento. Además se amplía de tamaño, incrementando la cantidad de fotoceldas según las necesidades energéticas de los consumidores.
4. La determinación del consumo eléctrico real permitió que los sistemas diseñados integran en sus cálculos las posibles pérdidas de energía en el cableado, baterías, inversor, módulos fotovoltaicos; evitando así la subestimación de los sistemas.
5. El sistema fotovoltaico tiene una capacidad de acumulación, por lo que se utilizarán 2 baterías de 12 voltios en paralelo, cada batería con capacidad de 400 Ah.

6. Los costos de los equipos y cableado se presentan en moneda extranjera (dólar) debido a la estabilidad de los precios para los proveedores.
7. El subsistema de acumulación es imprescindible en un sistema aislado, ya que con la presencia de baterías se cumplirán los requerimientos energéticos cuando la radiación sea mínima o nula.
8. Es importante no sobredimensionar ninguno de los subsistemas, especialmente el subsistema de acumulación, de existir un sobredimensionamiento, es posible que el subsistema de captación no genere suficiente energía para cargar las baterías, acortando con esto la vida de las baterías.

RECOMENDACIONES

1. Para la obtención de datos de radiación solar específicamente, es necesario que en Guatemala se realice una base de datos, que incluya información sobre radiación por regiones o departamentos, basado en distintos ángulos de inclinación.
2. Dentro de los estudios en las distintas ramas de ingeniería, deben incluirse contenidos sobre el uso de fuentes renovables para la generación de energía, ya que la problemática mundial en torno a los recursos no renovables y los fenómenos naturales, involucra también a países tercermundistas.
3. Las conexiones deben realizarse de la mejor manera, ya que comúnmente son las causantes de las caídas de tensión.
4. Como entidad educativa, la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, debe impulsar la ejecución de proyectos que beneficien a las personas de escasos recursos, especialmente en materia de acceso de energía eléctrica y agua, utilizando fuentes de energía renovable.
5. La creación de laboratorios en los que se experimente el funcionamiento de miniproyectos o proyectos piloto en cuestión de energías renovables (solar fotovoltaica, eólica, biomasa, y otras).

6. Realizar programas de capacitación, tanto para estudiantes como para técnicos en el ramo de construcción, montaje y mantenimiento de sistemas de energía solar fotovoltaica.

BIBLIOGRAFÍA

1. ANTONY, Falk; DÜRRSCHNER, Chirstian; REMMERS, Karl-Heinz. *Fotovoltaica para profesionales: Diseño, instalación y comercialización de plantas solares fotovoltaicas*. España: Sevilla. Solarpraxis, 2006. 334 p.
2. BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. 8 a. Ed. México. Editorial: Pearson, 2003. 891 p.
3. Censolar. *Energía solar y sus propiedades, radiación que llega a la tierra*. [en línea]. <<http://www.censolar.org>>. [Consulta: 4 de febrero de 2013].
4. Guatemala-solar. *Sistemas fotovoltaicos conectados a la res*. [en línea]. <<http://guatemala-solar.com/>>. [Consulta: 4 de febrero de 2013].
5. HART, Daniel W. *Electrónica de potencia*. Editorial: Prentice Hall; Pearson Educación. Madrid, España 2001. 475 p.
6. Inelsacontrols. *Baterías solares*. [en línea]. <<http://www.inelsacontrols.com/baterias.html>>. [Consulta: 3 de mayo de 2013].

7. Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). *Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, Guatemala, CA.* [en línea]. <<http://www.insivumeh.gob.>>. [Consulta: 3 de febrero de 2013].
8. Mauisolarsoftware. *Qué se puede hacer con la energía solar. Usos posibles de la energía solar.* [en línea]. <<http://www.mauisolarsoftware.com>>. [Consulta: 2 de febrero de 2013].
9. Ministerio de Energía y Minas. *Energía renovable en Guatemala, un mercado atractivo. Ministerio de Energía y Minas, Dirección General de Energía.* [en línea]. <www.mem.gob.gt/Portal/Documents/ImgLinks/2007-06/350/Guia%20del%20Inversionista.pdf>. [Consulta: 4 de julio de 2013].
10. Sadeesa. *Conozca sobre La Energía Solar - Sistema de Apoyo de Energía.* [en línea]. <<http://www.sadeesa.net/energiasol.html>>. [Consulta: 4 de septiembre de 2013].
11. Tech4cdm. *DIMENSIONADO DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO.* [en línea]. <[http://www.tech4cdm.com/userfiles/5_%20Dimensionado%20de%20un%20sistema%20PV%20en%20Peru%20\(Daniel%20Fraille\).pdf](http://www.tech4cdm.com/userfiles/5_%20Dimensionado%20de%20un%20sistema%20PV%20en%20Peru%20(Daniel%20Fraille).pdf)>. [Consulta: 4 de febrero de 2013].