



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

**PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN
FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

Juan Pablo Soria González

Asesorado por el Ing. Otto Fernando Andrino González

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN
FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JUAN PABLO SORIA GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL ING. OTTO FERNANDO ANDRINO GONZALEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE 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. Gustavo Benigno Orozco Godínez
EXAMINADOR	Ing. Romeo Nefalí López Orozco
EXAMINADOR	Ing. Esdras Feliciano Miranda Orozco
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:

PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 23 de septiembre de 2014.



Juan Pablo Soria González



Ref. EIME 48. 2015
Guatemala, 24 de JULIO 2015.

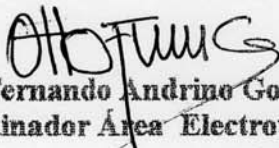
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puento Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN
FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA,** del
estudiante Juan Pablo Soria González que cumple con los requisitos
establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
D Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Otto Fernando Andrino González
Coordinador Área Electrotécnica



SRO



FACULTAD DE INGENIERIA

REF. EIME 48. 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; JUAN PABLO SORIA GONZÁLEZ titulado: PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Robero

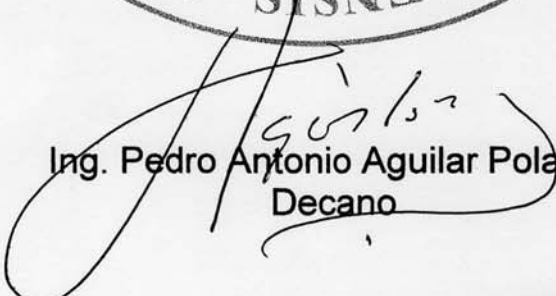


GUATEMALA, 31 DE JULIO 2015.



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: **PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA**, presentado por el estudiante universitario: **Juan Pablo Soria González**, 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, septiembre de 2015



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por permitirme alcanzar este momento tan importante en mi formación profesional, y con ello darme la oportunidad de vivir muchas experiencias inolvidables con mi familia y amigos. Gracias Señor.
- Mis padres** Karla Genoveva González de Soria y Eduardo Soria Flores, por ser un ejemplo de vida y apoyarme de forma incondicional en todo momento.
- Mis hermanos** Jose Carlos y Juan José Soria González, porque siempre están apoyándome en las buenas y malas.
- Mi abuela** Dalila González Álvarez de González, por apoyarme en todo momento, dándome consejos y cuidados con todo su amor.
- Mis abuelos** Eduardo Soria Santiago y Lidia Consuelo Flores Aguilar, por apoyo, por su cariño y amor.

Mis tíos

Por ser un ejemplo de vida y unidad, sus consejos, su apoyo en los momentos más difíciles, especialmente a Miguel Enrique González González, Gustavo Adolfo Soria Flores y Luis Fernando Soria Flores (q. e. p. d), los amo.

Mis primos

Por su cariño y apoyo, a todos los quiero.

Toda mi familia

Por su gran apoyo.

Mis amigos y amigas

Por todos esos momentos alegres que compartimos, por todas esas dificultades que vivimos y vencimos juntos durante nuestra formación profesional, por su amistad, siempre los llevaré en el corazón.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San Carlos
de Guatemala**

Alma máter.

Facultad de Ingeniería

Por acogerme y ser una fuente de
sabiduría y conocimiento.

**Escuela de Mecánica
Eléctrica**

Por haber contribuido a mi formación
profesional.

Ingeniero Otto Andrino

Por su amistad, asesoría y consejos,
infinitas gracias.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	XI
OBJETIVOS	XIII
INTRODUCCIÓN	XV
1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	1
1.1. ¿Qué es la energía solar fotovoltaica?.....	3
1.2. Principios básicos de funcionamiento	3
1.2.1. Célula solar	6
1.3. Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica.....	11
1.3.1. Sistemas de protección catódicos	12
1.3.2. Cercas eléctricas.....	12
1.3.3. Sistemas de iluminación.....	13
1.3.4. Telecomunicaciones y sistemas de monitoreo remotos	13
1.3.5. Bombas de agua accionadas por energía solar.....	14
1.3.6. Electrificación rural	15
1.3.7. Sistemas de tratamiento de aguas	15
2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO FOTOVOLTAICO.....	17
2.1. Módulo fotovoltaico	17
2.2. Acumulador (baterías)	20
2.3. Regulador	22
2.4. Inversor.....	24

2.5.	Protecciones eléctricas.....	26
2.6.	Sistema de puesta a tierra.....	27
2.7.	Sistema de anclaje	27
3.	TIPOS DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS Y DIMENSIONAMIENTO DE SUS COMPONENTES.....	29
3.1.	Instalación fotovoltaica autónoma	31
3.1.1.	Aplicaciones para instalaciones autónomas.....	32
3.2.	Instalación fotovoltaica conectada a la red	34
3.2.1.	Aplicaciones para instalaciones conectadas a la red	35
3.3.	Dimensionamiento de los componentes	37
3.3.1.	Consumo en kilovatios–hora a suministrar.....	38
3.3.2.	Evaluación del área disponible para la instalación	38
3.3.3.	Selección de generadores solares	39
3.3.4.	Selección de acumuladores o baterías	39
3.3.5.	Selección de regulador carga	39
3.3.6.	Selección del inversor.....	40
3.3.7.	Cables de conexión	40
3.3.8.	Soportería.....	40
4.	PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA	43
4.1.	Base de cálculo para equipos y accesorios	43
4.1.1.	Paneles solares	44
4.1.2.	Inversor	45
4.1.3.	Conductores	47
4.1.4.	Protección en DC.....	48
4.1.5.	Protección en AC.....	49
4.1.6.	Conectores	49

4.1.7.	Misceláneos	50
4.2.	Material e instalación de soportería	50
4.2.1.	Perfiles de aluminio	50
4.2.2.	Tornillería de acero inoxidable	51
4.2.3.	Grapa de inicio	51
4.2.4.	Grapa intermedia	52
4.3.	Montaje del sistema fotovoltaico	53
4.3.1.	Estructura.....	53
4.3.2.	Módulos generadores.....	54
4.3.3.	Equipos de control	55
4.3.4.	Conexión eléctrica.....	56
4.3.5.	Verificación de funcionamiento.....	58
5.	ANÁLISIS FINANCIERO	61
5.1.	Análisis financiero de la inversión	61
5.1.1.	Presupuesto de la instalación.....	62
5.1.2.	Previsión de ingresos anuales.....	66
5.1.3.	Previsión de gastos anuales.....	69
5.1.4.	Condiciones de financiación.....	69
5.1.5.	Periodo de retorno de la inversión del proyecto.....	70
5.1.6.	Cálculo del flujo de caja	71
5.1.7.	Valor presente neto (VAN) del proyecto	72
5.1.8.	Tasa interna de retorno (TIR) de la inversión del proyecto	74
5.2.	Resultado	75
	CONCLUSIONES	77
	RECOMENDACIONES.....	79
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Absorción y reflexión de la radiación solar	4
2.	Efecto fotovoltaico en una célula solar	7
3.	Comportamiento típico de las celdas solares y sus configuraciones	11
4.	Aplicaciones fotovoltaicas	12
5.	Esquema de construcción de una célula solar	18
6.	Esquema de construcción de un módulo fotovoltaico.....	19
7.	Función de los acumuladores o baterías.....	20
8.	Conexión de un inversor/regulador en una instalación autónoma a 12 V dc.....	25
9.	Esquema general de una instalación fotovoltaica autónoma	32
10.	Esquema general de una instalación fotovoltaica conectada a la red	35
11.	Esquema de la constitución de una central térmica solar de torre central	37
12.	Curva característica y obtención de valores de corriente y voltaje nominal para un panel solar	44
13.	Especificaciones técnicas de inversores para sistemas fotovoltaicos o afines.....	46
14.	Conector hembra/macho tipo MC4	50
15.	Grapa de inicio.....	51
16.	Grapa intermedia	52
17.	Imagen ilustrativa de las piezas estructurales utilizadas en el montaje de una instalación fotovoltaica de forma general	52

18	Montaje de paneles solares para instalación fotovoltaica de 5 kW _p	54
19.	Montaje de instalación fotovoltaica ubicada en la ciudad capital de Guatemala	55
20.	Centro de control de una instalación fotovoltaica.....	56
21	Cuadro de control de una instalación fotovoltaica de 5 kW _p ubicada en la ciudad capital de Guatemala	57
22	Verificación de niveles de tensión para la conexión de paneles solares	60
23.	Comportamiento de la producción de energía y el precio <i>spot</i>	67

TABLAS

I.	Características básicas de los principales tipos de baterías	22
II.	Características básicas de operación del inversor SunPI – 2500	47
III.	Tabla de costos de materiales necesarios para el desarrollo de una instalación fotovoltaica de 5 kWp con IVA incluido	62
IV.	Costo de mano de obra para el desarrollo de la instalación fotovoltaica conectada a la red de 5 kWp	65
V.	Valor total de inversión para el desarrollo de una instalación fotovoltaica de 5 kWp	66
VI.	Cálculo de ingresos por generación de energía eléctrica por fuente fotovoltaica	67
VII.	Eficiencia de paneles solares respecto a tiempo de uso	68
VIII.	Flujo de caja del proyecto fotovoltaico de 5 kWp durante 15 años de utilización.....	71
IX.	Tasa de interés e inflación proporcionados el 7 de octubre de 2014 por el Banco Nacional de Guatemala	72
X.	Criterios de interpretación del VAN	74

GLOSARIO

Acumulador	Elementos que tienen la capacidad de, al ser cargados, acumular energía que luego consumen mientras se descargan por su uso.
Anisotropía	Propiedad general de la materia según la cual, cualidades como: elasticidad, temperatura, conductividad, velocidad de propagación de la luz, entre otras, varían según la dirección en que son examinadas.
Autodescarga	Proceso de descarga espontánea y lenta que se produce en todas las baterías, incluso si se hallan desconectadas de la instalación eléctrica en donde sean utilizadas.
Célula monocristalinos	Se componen de secciones de un único cristal de silicio (Si) reconocibles por su forma circular u octogonal.
Célula policristalinos	Cuando están formadas por pequeñas partículas cristalizadas.
Célula solar	Dispositivo capaz de convertir la energía proveniente de la radiación solar.
Constante solar	Cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida

en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del sol.

Corriente de cortocircuito

Una falla de la aislación en un punto cualquiera de una red produce un brusco aumento de la corriente.

Corriente de iluminación

Corriente eléctrica relativamente grande que fluye a través de dispositivos fotosensibles, tales como un tubo fotomultiplicador, un fotodiodo o un CCD cuando está recibiendo luz.

Corriente de oscuridad

Corriente eléctrica relativamente pequeña, que fluye a través de dispositivos fotosensibles, tales como un tubo fotomultiplicador, un fotodiodo o un CCD, incluso cuando no está recibiendo luz.

Eficiencia de carga energía solar

Porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica de la luz solar total absorbida por un panel, cuando una célula solar está conectada a un circuito eléctrico.

Generadores

Dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrica entre dos de sus puntos transformando la energía mecánica en eléctrica.

Interruptor

Dispositivo utilizado para desviar o interrumpir el curso de una corriente eléctrica.

Inversor	Equipo encargado de cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.
Irradiación solar	Resulta de la integración de la irradiancia durante un cierto periodo de tiempo. Es una medición de energía incidente por unidad de superficie. [J/m ² o Wh/m ²].
Irradiancia solar	Energía incidente por unidad de tiempo (potencia) sobre la unidad de superficie. [W/m ²].
Módulo fotovoltaico	Conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos.
Potencia radiada por el sol	Cantidad de energía recibida en forma de radiación solar por unidad de tiempo y unidad de superficie, medida en la parte externa de la atmósfera terrestre en un plano perpendicular a los rayos del sol.
Protección contra corto circuitos	Dispositivo o dispositivos que buscan evitar daños causados por corrientes elevadas y perjudiciales para los elementos de una instalación.
Radiación global	Energía emitida por el sol, que se propaga en todas las direcciones a través del espacio mediante ondas electromagnéticas.

Radiación reflejada	Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo.
Radiación solar directa	Proviene directamente del sol sin haber sufrido ninguna modificación. Una única dirección de incidencia concentración.
Rendimiento energético	Relación entre la energía que suministramos a un sistema y la energía útil que obtenemos realmente.
Telecomunicaciones	Toda transmisión y recepción de señales de cualquier naturaleza, típicamente electromagnéticas, que contengan signos, sonidos, imágenes o, en definitiva, cualquier tipo de información que se desee comunicar a cierta distancia.
Telemetría	Tecnología que permite la medición remota de magnitudes físicas y el posterior envío de la información hacia el operador del sistema.
Soportería	Estructura física utilizada para sostener algún elemento.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación busca mostrar los procedimientos necesarios para desarrollar una instalación fotovoltaica conectada a la red.

En el primer capítulo, energía solar fotovoltaica, se muestran los principios teóricos que dieron como resultado final la posibilidad de crear paneles solares capaces de obtener la energía solar para transformarla en energía eléctrica y de esta manera lograr el desarrollo de instalaciones fotovoltaicas, con el fin de brindar servicio de energía eléctrica.

El segundo capítulo, se detallan los elementos que componen una instalación fotovoltaica. Cada uno tiene una función específica y es la unión de cada uno de ellos lo que hace posible el funcionamiento adecuado de la instalación.

En el tercer capítulo se explican los tipos de instalaciones fotovoltaicas, autónomas y conectadas a la red. Además, se indican algunas condiciones que deberán ser tomadas en cuenta para el dimensionamiento de los equipos.

El cuarto capítulo, se muestra el proceso de diseño utilizando un ejemplo real sobre una instalación fotovoltaica conectada a la red de 5 kW_p de potencia a instalar. El proceso se detalla desde el momento en que deben realizarse los cálculos para elegir los elementos que formarán la instalación hasta que finaliza, luego del montaje de la misma.

Por último, se desarrolla un análisis financiero de la instalación para mostrar los posibles beneficios económicos que representa una instalación fotovoltaica de generación distribuida. El análisis financiero toma en consideración el presupuesto de construcción de la instalación, los ingresos y egresos que se generarán a partir de ella, condiciones de financiamiento e índices financieros, tales como el valor presente neto (VAN) y la tasa interna de retorno de la inversión (TIR).

OBJETIVOS

General

Desarrollar una propuesta de diseño para una instalación fotovoltaica de generación distribuida.

Específicos

1. Analizar los fundamentos teóricos del funcionamiento de la energía fotovoltaica.
2. Describir los elementos de un sistema eléctrico fotovoltaico.
3. Determinar los tipos de instalación fotovoltaica y sus aplicaciones.
4. Desarrollar una propuesta de diseño para una instalación fotovoltaica conectada a la red utilizando un ejemplo real.
5. Realizar un análisis financiero de la instalación fotovoltaica, utilizada para el desarrollo de la propuesta de diseño para una instalación fotovoltaica conectada a la red.

INTRODUCCIÓN

En Guatemala, aún existen muchas comunidades o aldeas que poseen servicio de energía eléctrica deficiente y actualmente la sociedad depende de la energía eléctrica para su desarrollo.

Las necesidades básicas, tales como: almacenamiento de alimentos perecederos, alumbrado público y residencial durante la noche, sistemas eléctricos de bombeo de agua, entre otros, necesitan de energía eléctrica para ser utilizadas. Además, existen comodidades que utilizan energía eléctrica para conectar televisiones, microondas, sistemas de aire acondicionado, entre otros, tecnología las que mucha de la población guatemalteca no tiene opción de usar eficientemente, por el mal servicio de energía eléctrica.

Sin embargo, la energía eléctrica fotovoltaica representa una posibilidad para prestar este servicio de manera confiable, siempre que exista un periodo de irradiación solar en el sitio durante el día. Aunque, económicamente, las instalaciones eléctricas fotovoltaicas incurren en un gasto de inversión oneroso, es compensado por las ventajas técnicas que posee.

La ventaja más grande de una instalación fotovoltaica es que, esencialmente, utiliza la energía solar para su operación y de esa manera no incurre en gastos de combustible (diésel, bunker, entre otros) o preocupaciones por abastecimiento de recursos (hidroeléctricas, biomasa, entre otros).

La intención del presente trabajo de graduación es demostrar las posibilidades que existen para mejorar el nivel de vida de la población guatemalteca, que viven en áreas que tienen un mal servicio de energía eléctrica, al emplear instalaciones eléctricas fotovoltaicas.

1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

El sol ha sido, desde siempre, fuente de vida y energía para la Tierra. Se plantea ahora como medio de energía alternativo, limpio y posee la ventaja de evitar la dependencia de otras materias contaminantes y garantizar su duración al menos otros 6 000 millones de años.

La energía del Sol es emitida en todas las direcciones y longitudes de onda visible, desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. El 40 % está en la parte visible del espectro, el 50 % es infrarrojo y el resto ultravioleta. La emisión de rayos X y de ondas de radio es baja, solo aumenta en el caso de explosiones solares. Dicha emisión se describe mediante un espectro de intensidad radiante que establece la proporción en que participan las diferentes longitudes de onda de las que está compuesta la radiación.

El Sol es una estrella cuya superficie se encuentra a una temperatura media de 5 500 °C, y debido a complejas reacciones que producen una pérdida de masa, esta se convierte en energía, la misma es liberada y transmitida al exterior mediante la denominada radiación solar. La temperatura efectiva de la superficie es de unos 5 900 K, esto significa que la emisión de radiación de un cuerpo negro ideal que se encontrara a 5 900 K sería muy parecida a la del sol.

A continuación se muestran las definiciones básicas para comprender los conceptos expuestos dentro del desarrollo de los conocimientos sobre la energía solar.

- Irradiación solar (I): es la energía incidente por unidad de tiempo (potencia) sobre la unidad de superficie. [W/m^2].
- Irradiación o radiación solar (H): resulta de la integración de la irradiación durante un cierto periodo de tiempo. Es una medición de energía incidente por unidad de superficie. [J/m^2 o Wh/m^2].
- Constante solar (I_0): irradiación (para todas las longitudes de onda), proveniente del sol, que incide sobre la unidad de superficie expuesta perpendicularmente a los rayos solares fuera de la atmósfera de la Tierra. $I_0 = 1367$.
- Potencia radiada por el sol: 3,84—1 023 kW
- Potencia incidente sobre la tierra: 1,74—1014 kW
- Radiación solar directa (H_D): proviene directamente del Sol sin haber sufrido ninguna modificación. Una única dirección de incidencia concentración.
- Radiación solar difusa (H_d): la que llega a la superficie después de haber sufrido diferentes cambios de dirección, reflexiones y refracciones. Procede de la bóveda terrestre. Múltiples direcciones de incidencia.
- Radiación reflejada (H_r): proviene de la reflexión producida por el suelo o por otros elementos que rodean a la superficie considerada.
- Albedo (a): coeficiente de reflexibilidad.
- Radiación global (H_G): es la suma de todas las anteriores.

La cantidad de luz recibida por un sistema fotovoltaico en una localización dada, consta de tres componentes:

- Luz procedente directamente del Sol.
- Luz procedente del cielo tras ser difuminada por los gases y masas de vapor en suspensión en la atmósfera.
- Luz procedente de los dos componentes citados anteriormente, pero que han sido reflejadas por la Tierra y otras superficies.

1.1. ¿Qué es la energía solar fotovoltaica?

Es aquella que se obtiene por medio de la transformación directa de la energía del Sol en energía eléctrica. La energía solar se puede transformar de dos maneras.

La primera utiliza una parte del espectro electromagnético de la energía del Sol para producir calor y la transformación se realiza mediante el empleo de colectores térmicos. A la energía obtenida se le llama solar térmica.

La segunda utiliza la otra parte del espectro electromagnético de la energía del Sol para producir electricidad y la transformación se realiza por medio de módulos o paneles solares fotovoltaicos. A la energía obtenida se le llama solar fotovoltaica.

1.2. Principios básicos de funcionamiento

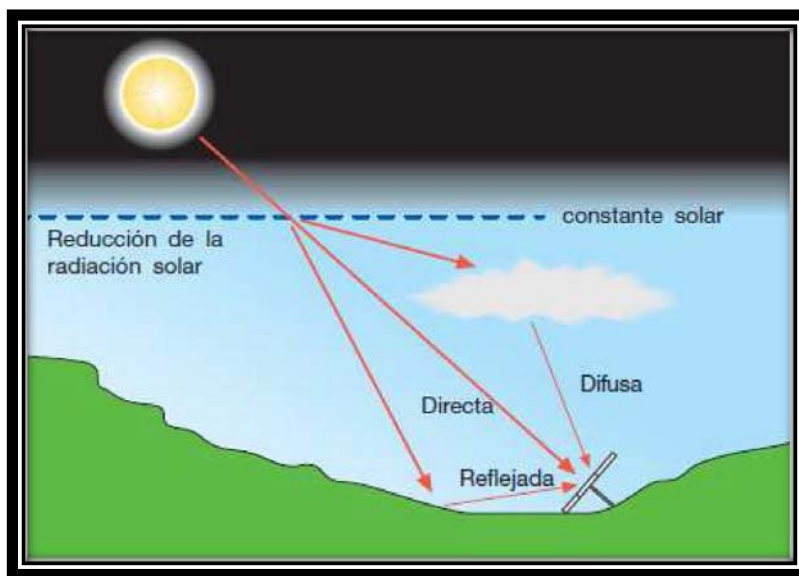
La radiación emitida por el Sol atraviesa el espacio vacío en todas direcciones. No sufre pérdidas apreciables por interacción con medios materiales. Sin embargo, la irradiación solar, definida como la densidad de flujo radiante solar, es atenuada de acuerdo con el cuadrado de la distancia. Parte de esta irradiación solar es interceptada por el planeta Tierra. Dada la relación entre la distancia con el Sol y el tamaño del planeta Tierra, es razonable asumir que su valor es constante en toda la superficie exterior de la atmósfera.

A su paso por la atmósfera, la radiación solar es sometida a una combinación de procesos de reflexión, atenuación y difusión que alteran sus características. La reflexión en las nubes disminuye la radiación incidente en la superficie terrestre mientras que la absorción por vapor de agua, ozono y dióxido

de carbono produce una modificación de las características espectrales de la radiación. Además, la dispersión por partículas modifica la distribución espacial de la radiación.

La atmósfera absorbe y refleja parte de la radiación solar, incluyendo parte de los rayos X y de la radiación ultravioleta, como puede observarse en la figura 1.

Figura 1. **Absorción y reflexión de la radiación solar**



Fuente: LOJANO CHACHA, Diego Iván. *Generación de energía fotovoltaica en Ecuador*. p. 63.

Dependiendo del tamaño de la partícula en interacción pueden distinguirse tres fenómenos de difusión:

- Difusión de Rayleigh: donde la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño de la partícula. Se produce en las capas altas y es responsable del color azul del cielo.
- Difusión de Mie: donde la longitud de onda es de magnitud similar al tamaño de la partícula. Se produce en las capas bajas de la atmósfera.
- Difusión no selectiva: aquella en la que la longitud de onda es mucho menor que el tamaño de la partícula.

Para el cálculo de la irradiación solar, que finalmente incide en una superficie arbitraria localizada en corteza terrestre, será útil distinguir tres contribuciones diferentes.

Estas contribuciones, comúnmente denominadas componentes, son:

- Radiación directa (B): representa la fracción de irradiación procedente en línea recta del Sol.
- Radiación difusa (D): cuantifica la radiación procedente de todo el cielo salvo del Sol, y por tanto incluye todos los rayos dispersados por la atmósfera según los procesos descritos. Es una radiación anisotrópica, cuyo valor depende de la zona celeste de procedencia. Más aún, dado que las propiedades de la atmósfera varían de forma aleatoria con el tiempo, la radiación difusa deberá ser estudiada como un proceso estocástico.
- Radiación del albedo (R): es aquella fracción de radiación procedente de la reflexión en el suelo. Habitualmente supone una contribución muy pequeña y en algunos casos puede ser despreciada.

La suma de estas tres componentes constituye la denominada irradiación global (G).

$$G = B + D + R$$

Es necesario disponer de un sistema formado por equipos, especialmente contruidos para realizar la transformación de la energía solar en energía eléctrica. Este sistema recibe el nombre de sistema fotovoltaico y los equipos que lo forman se denominan componentes fotovoltaicos.

1.2.1. Célula solar

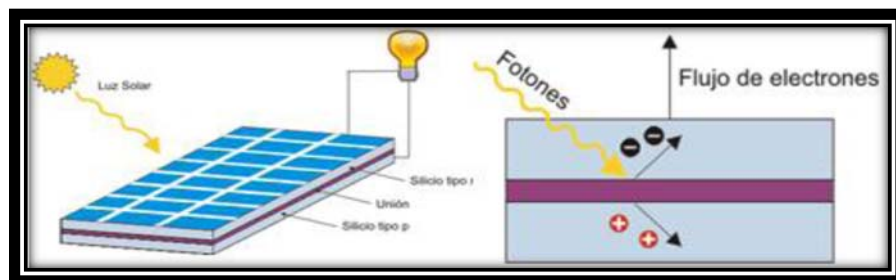
Aunque las celdas solares eficientes han estado disponibles recién desde mediados de los años 50, la investigación científica del efecto fotovoltaico comenzó en 1839, cuando el científico francés, Henri Becquerel descubrió que una corriente eléctrica podría ser producida haciendo brillar una luz sobre ciertas soluciones químicas.

El efecto fue observado primero en un material sólido (el metal selenio) en 1877. Este material fue utilizado durante muchos años para los fotómetros, que requerían de cantidades muy pequeñas de energía. Una comprensión más profunda de los principios científicos fue provista por Albert Einstein en 1905, y Schottky en 1930; la cual fue necesaria antes de que celdas solares eficientes pudieran ser confeccionadas. Una célula solar de silicio que convertía el 6 % de la luz solar que incidía sobre ella en electricidad fue desarrollada por Chapín, Pearson y Fuller en 1954, y esta es la clase de célula que fue utilizada en usos especializados, tales como satélites orbitales a partir de 1958.

Las celdas solares de silicio disponibles comercialmente en la actualidad tienen una eficiencia de conversión en electricidad de la luz solar que cae sobre ellas de cerca del 18 %, a una fracción del precio de hace treinta años. En la actualidad existen una gran variedad de métodos para la producción práctica de celdas solares de silicio (amorfás, monocristalinas o policristalinas), del mismo modo que para las celdas solares hechas de otros materiales (seleniuro de cobre e indio, telurio de cadmio, arseniuro de galio, entre otros).

Para entender la operación de una célula fotovoltaica, es necesario considerar la naturaleza del material y de la luz del sol. Las celdas solares están formadas por dos tipos de material, generalmente silicio tipo p y tipo n. La luz de ciertas longitudes de onda puede ionizar los átomos en el silicio y el campo interno, producido por la unión que separa algunas de las cargas positivas (agujeros) de las cargas negativas (electrones) dentro del dispositivo fotovoltaico. Los agujeros se mueven hacia la capa positiva o capa de tipo p y los electrones hacia la negativa o capa tipo n. Aunque estas cargas opuestas se atraen mutuamente, la mayoría de ellas solamente se pueden recombinar pasando a través de un circuito externo fuera del material, debido a la barrera de energía potencial interno.

Figura 2. **Efecto fotovoltaico en una célula solar**



Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales s62obre energía renovable*. p. 12.

La cantidad de energía que entrega un dispositivo fotovoltaico está determinado por:

- El tipo y el área del material
- La intensidad de la luz del sol
- La longitud de onda de la luz del sol

Por ejemplo, las celdas solares de silicio monocristalino, actualmente no pueden convertir más el de 25 % de la energía solar en electricidad, porque la radiación en la región infrarroja del espectro electromagnético no tiene suficiente energía como para separar las cargas positivas y negativas en el material.

Las celdas solares de silicio policristalino, en la actualidad, tienen una eficiencia de menos del 20 % y las celdas amorfas de silicio tienen actualmente una eficiencia cerca del 10 % debido a pérdidas de energía internas más altas que las del silicio monocristalino.

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

Una característica importante de las celdas fotovoltaicas es que el voltaje de la célula no depende de su tamaño, y sigue siendo bastante constante con el cambio de la intensidad de luz. La corriente en un dispositivo, sin embargo, es casi directamente proporcional a la intensidad de la luz y al tamaño. Para

comparar diversas celdas se las clasifica por densidad de corriente, o amperios por centímetro cuadrado del área de la célula.

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

Existen parámetros fundamentales que determinan las características de operación de la célula solar, tales como:

- Corriente de iluminación (I_L): generada cuando incide la radiación solar sobre la célula.
- Corriente de oscuridad: generada por la recombinación de los pares electrón–hueco que se produce en el interior del semiconductor.
- Tensión de circuito abierto (V_{oc}): máxima tensión que se obtiene en los extremos de la célula solar, que se da cuando no está conectada a ninguna carga. Es una característica del material con el que está construida la célula.
- Corriente de cortocircuito (I_{sc}): máximo valor de corriente que puede circular por la célula solar. Se da cuando sus terminales están cortocircuitados.

Cuando la célula solar es conectada a una carga, los valores de tensión e intensidad varían. Existirán dos de ellos para los cuales la potencia entregada sea máxima: V_m (tensión máxima) e I_m (intensidad máxima), que siempre serán menores que V_{oc} e I_{sc} . En función de estos valores, la potencia máxima que puede entregar la célula solar será:

$$P_m = V_m * I_m$$

Esto permite definir un parámetro de la célula solar que recibe el nombre de factor de forma (FF) y que se calcula mediante la ecuación:

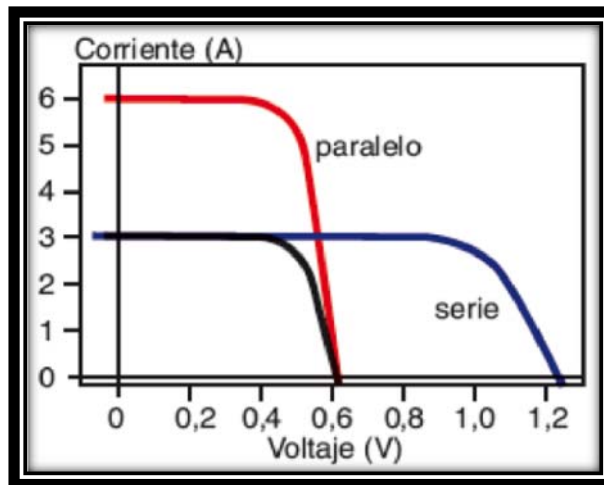
$$FF = \frac{V_m * I_m}{V_{oc} * I_{sc}}$$

Así pues, el factor de forma es la corriente entre la máxima potencia que puede entregar la célula a la carga y el producto de la tensión de circuito abierto y la corriente de cortocircuito. En las células solares más habituales, los valores típicos de FF son 0,7 o 0,8. La potencia que proporciona una célula solar de tamaño estándar (10 x 10 cm) es muy pequeña aproximadamente 1 o 2 W, por lo que, generalmente será necesario tener que asociar varias de ellas con el fin de proporcionar la potencia necesaria al sistema fotovoltaico de la instalación.

Es de este hecho de donde surge el concepto de panel solar o módulo fotovoltaico. Según la conexión eléctrica que se haga de las células, se puede encontrar con diferentes posibilidades:

- La conexión en serie de las células permitirá aumentar la tensión final en los extremos de la célula equivalente.
- La conexión en paralelo permitirá aumentar la intensidad total del conjunto.

Figura 3. **Comportamiento típico de las celdas solares y sus configuraciones**



Fuente: LOJANO CHACHA, Diego Iván. *Generación de energía fotovoltaica en Ecuador*. p. 84.

1.3. Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica

Durante de los años ochenta y principios de los noventa, el mayor mercado para los paneles solares estaba en las fuentes de alimentación para áreas remotas y en algunos productos de consumo (relojes, juguetes y calculadoras). Sin embargo, a mediados de los años noventa fue lanzado un importante esfuerzo para desarrollar paneles solares integrados en la construcción de edificios para ser conectados a la red. El tejado fotovoltaico, actualmente está liderando el desarrollo del mercado en Japón, Europa y los EE.UU.

La energía solar fotovoltaica se utiliza para hacer funcionar lámparas eléctricas, para iluminación o hacer funcionar radios, televisores y otros electrodomésticos de bajo consumo energético; generalmente, en aquellos lugares donde no existe acceso a la red eléctrica convencional.

Figura 4. **Aplicaciones fotovoltaicas**



Fuente: *Aplicaciones de las celdas fotovoltaicas _ textos científicos.htm* Consulta: 23 de octubre de 2014.

Sin embargo, la clasificación de las instalaciones solares fotovoltaicas se puede realizar en función de la aplicación a la que son destinadas.

1.3.1. Sistemas de protección catódicos

Es un método de proteger las estructuras de metal contra la corrosión. Es aplicable a puentes, tuberías, edificios, estanques, perforaciones y líneas ferroviarias. Para alcanzar la protección catódica se aplica un pequeño voltaje negativo a la estructura de metal y este evita que se oxide o aherrumbre. El terminal positivo de la fuente es conectado a un ánodo galvánico o de sacrificio que es, generalmente, un pedazo del metal de desecho, el cual es corroído en vez de la estructura que se desea proteger.

1.3.2. Cercas eléctricas

Se utilizan extensamente en agricultura para evitar que el ganado o los depredadores entren o deje un campo cerrado. Estas cercas tienen uno o dos alambres vivos que se mantienen con 500 voltios de corriente continua. Estos

dan una dolorosa descarga, pero inofensiva a cualquier animal que los toque. Esta descarga es suficiente para evitar que el ganado derribe los cercos. Estas cercas, también se utilizan en recintos de la fauna y áreas protegidas. Requieren de un alto voltaje, pero muy poca corriente y a menudo están situadas en áreas alejadas donde el costo de energía eléctrica es alto. Estas necesidades se pueden resolver mediante un sistema fotovoltaico compuesto de células solares, un acondicionador de energía y una batería.

1.3.3. Sistemas de iluminación

Generalmente se requiere iluminación en lugares remotos donde el costo de emplear energía de la red es demasiado alto. Tales aplicaciones incluyen la iluminación de seguridad, ayudas a la navegación, señales iluminadas en los caminos, señales en cruces ferroviarios y la iluminación de aldeas. Las células solares pueden satisfacer tales usos, aunque siempre se requerirá de una batería de almacenaje. Estos sistemas, generalmente consisten de un panel fotovoltaico más una batería de almacenaje, un acondicionador de energía y una lámpara fluorescente de corriente continua de baja tensión y alta eficiencia. Estos sistemas son muy populares en áreas remotas, especialmente en países en vías de desarrollo y es uno de los usos principales de células solares.

1.3.4. Telecomunicaciones y sistemas de monitoreo remotos

Las buenas comunicaciones son esenciales para mejorar la calidad de vida en áreas alejadas. Sin embargo, el costo de energía eléctrica de hacer funcionar estos sistemas y el alto costo de mantenimiento de los sistemas convencionales han limitado su uso. Los sistemas fotovoltaicos han proporcionado una solución rentable a este problema con el desarrollo de estaciones repetidoras de telecomunicaciones en áreas remotas. Estas estaciones típicamente consisten de

un receptor, un transmisor y un sistema basado en una fuente de alimentación fotovoltaica. Existen miles de estos sistemas instalados alrededor del mundo y tienen una excelente reputación por su confiabilidad y costos relativamente bajos de operación y mantenimiento.

Principios similares se aplican a radios y televisiones accionadas por energía solar, los teléfonos de emergencia y los sistemas de monitoreo. Los sistemas de monitoreo remotos se pueden utilizar para recolectar datos del tiempo u otra información sobre el medio ambiente y transmitirla automáticamente vía radio a una central.

1.3.5. Bombas de agua accionadas por energía solar

Existen más de 10 000 bombas de agua accionadas por energía solar en el mundo. Son utilizadas extensamente en granjas para proveer el agua al ganado. En países en vías de desarrollo se utilizan extensivamente para bombear agua de pozos y de ríos a las aldeas para consumo doméstico y la irrigación de cultivos. Un típico sistema de bombeo accionado por energía fotovoltaica consiste en un conjunto de paneles fotovoltaicos que accionan un motor eléctrico, el que impulsa la bomba. El agua se bombea de la tierra o afluente a un tanque de almacenaje que proporciona una alimentación por gravedad. No es necesario un almacenaje de energía en estos sistemas. Los sistemas de bombeo accionados por energía solar se encuentran disponibles en proveedores de equipo agrícola y son una alternativa rentable a los molinos de viento agrícolas para el abastecimiento de agua en áreas alejadas.

1.3.6. Electrificación rural

Las baterías de almacenaje se utilizan en áreas aisladas para proporcionar corriente eléctrica de la baja tensión para iluminación y comunicaciones, así como también para vehículos. Un sistema fotovoltaico de carga de baterías consiste en un pequeño conjunto de paneles solares más un regulador de carga. Estos sistemas se utilizan extensamente en proyectos rurales de electrificación, en países en vías de desarrollo.

1.3.7. Sistemas de tratamiento de aguas

En áreas alejadas, la energía eléctrica se utiliza para desinfectar o purificar agua para consumo humano. Las celdas fotovoltaicas se utilizan para alimentar una luz fuerte ultravioleta utilizada para matar bacterias en agua. Esto se puede combinar con un sistema de bombeo agua accionado con energía solar.

2. ELEMENTOS DE UN SISTEMA ELÉCTRICO FOTVOLTAICO

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que aprovechan la energía producida por el Sol y la convierten en energía eléctrica. De forma general, una instalación o sistema fotovoltaico está conformado por un grupo de elementos básicos que garantizan un funcionamiento adecuado, si son utilizados adecuadamente.

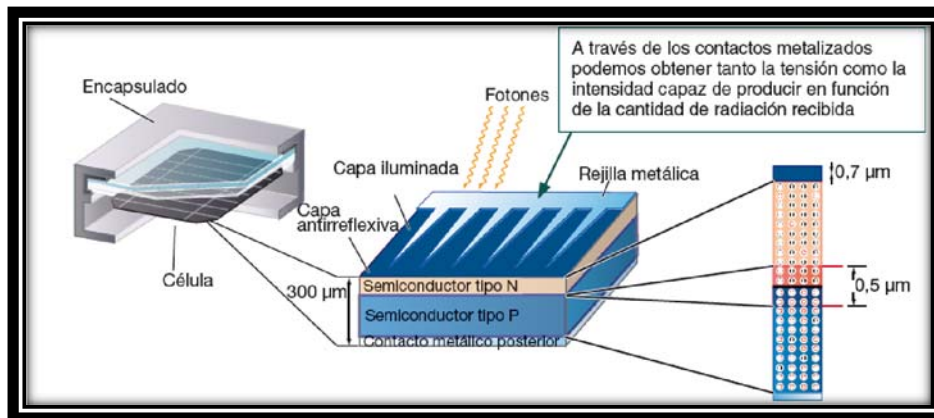
Los elementos básicos de una instalación fotovoltaica son:

- Módulo fotovoltaico
- Acumulador (batería)
- Regulador
- Inversor
- Protecciones eléctricas
- Sistema de puesta a tierra
- Sistema de anclaje

2.1. Módulo fotovoltaico

El elemento principal en cualquier instalación fotovoltaica es su generador, y recibe el nombre de célula solar. Se caracteriza por convertir directamente la energía que recibe del Sol en electricidad de corriente continua.

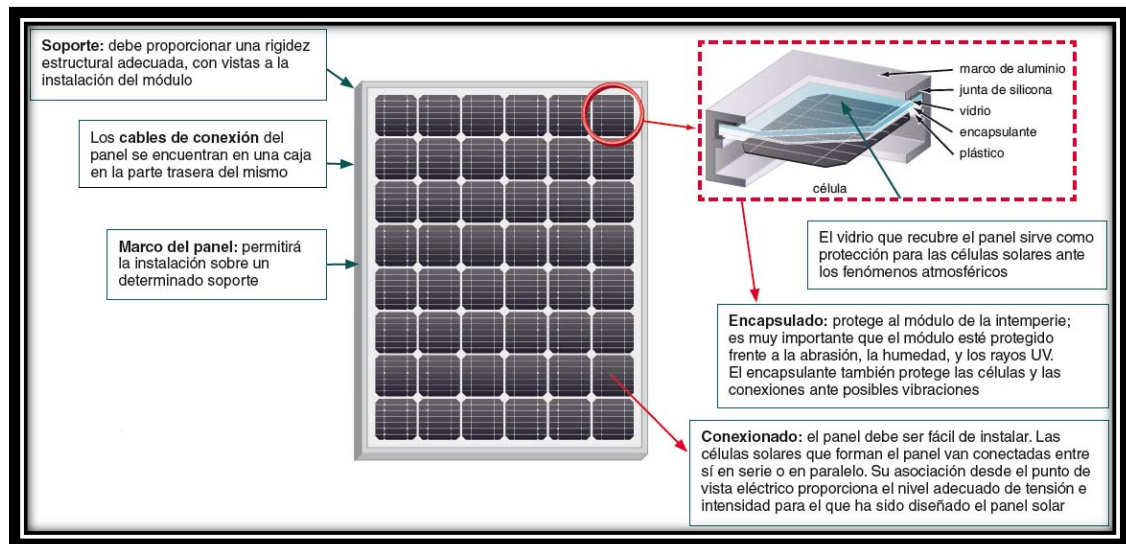
Figura 5. Esquema de construcción de una célula solar



Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 16.

Un panel solar o módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Proporciona en su salida de conexión una tensión continua (DC), y se diseña para valores concretos de tensión que definirán los parámetros de operación.

Figura 6. Esquema de construcción de un módulo fotovoltaico



Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 18.

Los tipos de módulos fotovoltaicos se diferencian por el método de construcción y los materiales utilizados; existen de silicio cristalino (monocristalinos y policristalinos) y de silicio amorfo.

- Monocristalinos: se obtienen de silicio fundido y dopado con boro. Generalmente son azules homogéneos.
- Policristalinos: se obtienen de silicio fundido y dopado con boro, pero con menor número de fases de cristalización. La superficie está estructurada en cristales y contiene distintos tonos de azul.
- Amorfos: tiene la ventaja de depositarse en forma de lámina delgada y sobre un sustrato como vidrio o plástico. Tienen un color marrón homogéneo, pero no existe conexión visible entre las células.

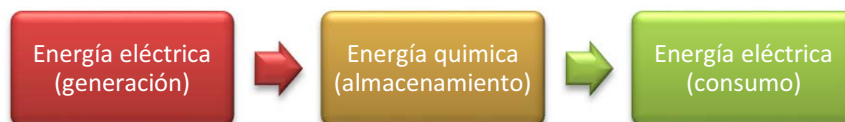
2.2. Acumulador (baterías)

El suministro de energía solar a los módulos fotovoltaicos (paneles) presenta una variación por diferentes motivos. Algunas variaciones son predecibles, como la duración del día y la noche o las estaciones del año, pero existen muchas causas que pueden producir alteraciones de manera aleatoria en la energía recibida por los paneles.

De lo anterior surge la necesidad de utilizar algún dispositivo de almacenamiento de energía para aquellos momentos en que la radiación recibida en los paneles solares no sea la apropiada para obtener un desempeño satisfactorio de la instalación.

Las baterías son dispositivos que transforman la energía química en eléctrica y que permiten almacenar energía. La función de las baterías en una instalación fotovoltaica se describe en la figura 7.

Figura 7. **Función de los acumuladores o baterías**



Fuente: elaboración propia.

Las baterías son recargadas desde la electricidad producida por los paneles solares, a través de un regulador de carga, y pueden entregar su energía a la salida de la instalación, donde será consumida. Las baterías deben cumplir tres objetivos al ser utilizadas en instalaciones fotovoltaicas:

- Almacenar energía durante un determinado tiempo
- Proporcionar potencia instantánea elevada
- Fijar la tensión de trabajo de la instalación

Para elegir un acumulador de energía para instalaciones fotovoltaicas se deben considerar los siguientes parámetros:

- Capacidad: es uno de los parámetros más importantes, se define como la cantidad de electricidad que puede entregar en una descarga completa partiendo de un estado de carga total del mismo. Se mide en amperios hora (Ah), y se calcula como el producto de la intensidad de descarga del acumulador durante el tiempo en el que está actuando.
- Eficiencia de carga: relación entre la energía empleada para recargar la batería y la energía realmente almacenada.
- Autodescarga: proceso mediante el cual el acumulador, sin estar en uso, tiende a descargarse.
- Profundidad de descarga: cantidad de energía, en tanto por ciento, que se obtiene de la batería durante una determinada descarga, partiendo de un estado de carga total del mismo. Está relacionada directamente con la vida útil del acumulador.

Las baterías se clasifican en función de la tecnología utilizada en su fabricación y de los electrolitos utilizados. A continuación se presentan las características básicas de los principales tipos baterías en el mercado:

Tabla I. **Características básicas de los principales tipos de baterías**

Tipo de batería	Tensión de celda	Tiempo de recarga	Autodescarga por mes	núm. de ciclos	Capacidad (tamaño)	Precio
Plomo-ácido	2	8 - 16 horas	< 5 %	Medio	30 - 50 kW/kg	Bajo
Níquel-cadmio	1.2	1 hora	20 %	Elevado	50 - 80 kW/kg	Medio
Níquel-metal hydride	1.2	2 - 4 horas	20 %	Medio	60 - 120 kW/kg	Medio
Ion de litio	3.6	2 - 4 horas	6 %	Medio - bajo	110 - 160 kW/kg	Alto

Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 27.

2.3. Regulador

El dimensionamiento de la instalación fotovoltaica se realiza de forma que, garantice el suministro de energía en las peores condiciones de luminosidad solar. Por ello se toman de referencia los valores de irradiación en invierno, lo que en verano puede provocar que la energía aportada por los paneles solares sea mucho mayor a la estimada por cálculos.

Para un funcionamiento adecuado de la instalación fotovoltaica, se debe instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles y los acumuladores. Este elemento funciona en ambas zonas de la instalación,

generación y consumo, y tiene como misión evitar situaciones de carga y sobredescarga de la batería, con el objetivo de alargar su vida útil.

En la parte relacionada con la carga del acumulador, garantiza que tenga la carga necesaria y evitar situaciones de sobrecarga, y en la parte de descarga del acumulador se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar la descarga excesiva del mismo.

Dado que los paneles solares tienen una tensión nominal mayor que la de la batería, sí no existiera regulador se podrían producir sobrecargas. El motivo de que la tensión nominal de los paneles sea así, es debido a dos razones:

- Atenuar posibles disminuciones de tensión por el aumento de la temperatura ambiente.
- Asegurar la carga adecuada de la batería.

Dependiendo de su construcción y forma de operación, los reguladores pueden clasificarse en:

- Tecnología del interruptor: por su construcción pueden ser a base de relés electromecánicos o de estado sólido.
- Estrategia de desconexión del consumo: puede determinarse por niveles de tensión o algoritmos de cálculo y comparación de energía.
- Posición del interruptor de control de generación: por su operación pueden ser en serie o paralelo.

2.4. Inversor

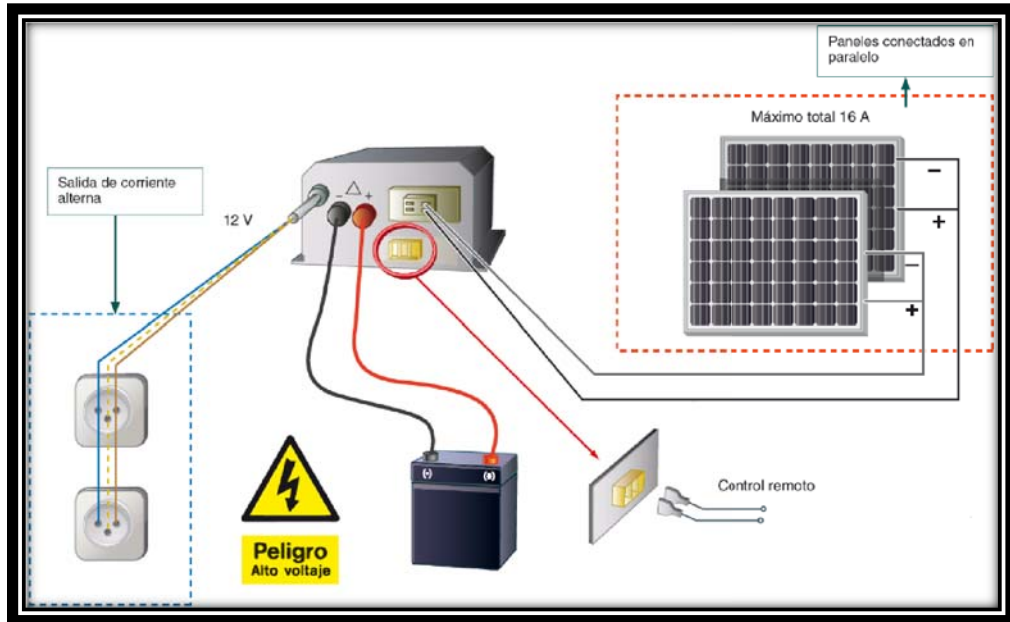
Es un elemento imprescindible que se encarga de convertir la corriente continua de la instalación proveniente de los paneles solares en corriente alterna para ser entregada a los dispositivos de que la requieran.

Las características deseables para un inversor DC-AC son las siguientes:

- Alta eficiencia: debe funcionar adecuadamente para un amplio rango de potencias.
- Bajo consumo en vacío: no convertirse en carga para el sistema al no tener cargas conectadas.
- Fiabilidad: alta resistencia a los picos de arranque.
- Protección contra cortocircuitos.
- Seguridad: no representar amenaza para el sistema y para el usuario.
- Regulación de tensión y frecuencia de salida: ser compatible con la red eléctrica al que se desea conectar.

Algunos inversores funcionan también, como reguladores. Si ese fuera el caso, no deberá incluirse el regulador como dispositivo adicional. A continuación, en la figura 8 se muestra el esquema de un inversor/regulador.

Figura 8. **Conexión de un inversor/regulador en una instalación autónoma a 12 V dc**



Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 24.

Los parámetros que determinan las características y prestaciones de un inversor son los siguientes:

- Potencia: determinará la potencia máxima que podrá suministrar.
- Número de fases: pueden ser monofásicos o trifásicos dependiendo de su capacidad y de los requerimientos de la instalación.
- Rendimiento energético: debe ser alto sin importar la gama de potencia en la que se encuentre. El rendimiento del inversor es mayor, cuánto más próximo se trabaja a su potencia nominal.

- Protecciones: el inversor debe incorporar algunas protecciones generales, que como mínimo, deben ser las siguientes:
 - Interruptor automático
 - Limitador de tensión máxima y mínima
 - Limitador de frecuencia máxima y mínima
 - Protección contra contactos directos
 - Protección por sobrecarga
 - Protección contra cortocircuito
 - Bajos niveles de emisión e inmunidad de armónicos

2.5. Protecciones eléctricas

Aunque ya se han mencionado algunas protecciones con las que debe contar el inversor a utilizar en la instalación, estas son comúnmente instaladas específicamente para el inversor de corriente por su fábrica.

Sin embargo, son necesarias algunas protecciones complementarias para proteger el sistema fotovoltaico de forma general y, principalmente, al personal humano involucrado con la misma.

La protección básica para la instalación fotovoltaica son interruptores termomagnéticos. Estas protecciones operan para proteger a la instalación de cortocircuitos y corrientes elevadas durante largos periodos de tiempo, y deberán ser instalados tanto para el área de corriente continua como para la de corriente alterna, de acuerdo a los valores correspondientes de operación

2.6. Sistema de puesta a tierra

Es la unión de todos los elementos metálicos que mediante cables de sección suficiente entre las partes de una instalación y un conjunto de electrodos, permite la desviación de corrientes de falla o de las descargas de tipo atmosférico, y consigue que no se pueda dar una diferencia de potencial peligrosa en los edificios, instalaciones y superficie próxima al terreno.

En una instalación fotovoltaica, la mayor parte de sus elementos estarán expuestos a descargas atmosféricas, por lo que se debe de realizar la puesta a tierra, uniendo eléctricamente todos los elementos de la instalación con el sistema de puesta a tierra de la edificación en la que se esté ejecutando dicha instalación.

2.7. Sistema de anclaje

También llamado o de fijación es utilizado para la colocación de cada elemento de la instalación. Aunque cada elemento tiene un sistema diferente, el más importante es el de los módulos solares, estos son el corazón de la instalación y son sometidos a las peores condiciones por estar a la intemperie.

El sistema de anclaje debe ser una estructura que soporte dichas condiciones y brinde rigidez mecánica que permita el funcionamiento de los paneles solares de la mejor forma posible.

3. TIPOS DE INSTALACIONES FOTOVOLTAICAS Y DIMENSIONAMIENTO DE SUS COMPONENTES

Las instalaciones fotovoltaicas responden a diferentes necesidades de la población y su dimensionamiento se basa en la magnitud de potencia pico instalado, tomando en cuenta todas las consideraciones descritas en el capítulo dos del presente documento.

Su aparente sencillez es muy engañosa debido a que su correcta ejecución gira en torno a más problemas de los que se pueden imaginar: seguridad, caídas de tensión, ubicación de equipos, entre otros. Además, estos problemas deberán resolverse bajo las necesidades específicas de la localidad en la que se desea realizar la instalación.

Una instalación fotovoltaica representa una abrupta invasión del universo físico y cultural del usuario, aunque haya sido diseñada y ejecutada satisfactoriamente, debido a que con el transcurso del tiempo podrían presentarse algunas incomodidades con la ubicación de los elementos de la misma (batería, inversor, entre otros.). Sin embargo, no puede confundirse dificultad con sofisticación, ya que las instalaciones fotovoltaicas no dejan de tener sencillez y debe aprovecharse cualquier recurso disponible en la localidad, tanto material como humano para realizar la instalación deseada.

De forma general existen dos tipos de instalaciones fotovoltaicas: autónomas y conectadas a la red. Se debe contemplar la posibilidad de que se presenten errores de ejecución en cualquiera de ellas, siendo los errores más frecuentes los siguientes:

- Batería con baja carga inicial
- Ubicación de equipos de forma que incomoden el entorno del usuario
- Sombras en los generadores solares (paneles)
- Poca o nula adaptación entre reguladores y baterías
- Defectos en el cableado
- Desprotección frente a la inversión de polaridad
- Fallos de estanquidad

Es importante resaltar que los errores mencionados no son de carácter solar, es decir, generados por acción del sol con los equipos que conforman la instalación fotovoltaica, sino que son de carácter humano por la falta de consideración de los aspectos ligados a la idea de un sistema y al recurso directo de las prácticas habituales en la electrificación convencional (corriente alterna y tensión elevada), que resultan a veces incongruentes con la corriente continua y baja tensión que se utilizan en esta aplicación.

De forma individual, los errores mencionados podrían despreciarse equivocadamente. Sin embargo, en conjunto son responsables de que el funcionamiento del sistema fotovoltaico no esté a la altura de lo que se espera de ellos. Despreciar su incidencia y poner mayor énfasis en los proyectos de aspectos de apariencia más enjundiosa (optimización de costes, algoritmos complejos de regulación, entre otros) han preparado el camino que, con frecuencia, llevan al fracaso a las diversas aplicaciones fotovoltaicas.

3.1. Instalación fotovoltaica autónoma

También conocidos como sistemas aislados, son instalaciones que generan energía eléctrica para ser consumida por usuarios definidos, sin necesidad de estar conectadas a una red eléctrica de distribución de energía.

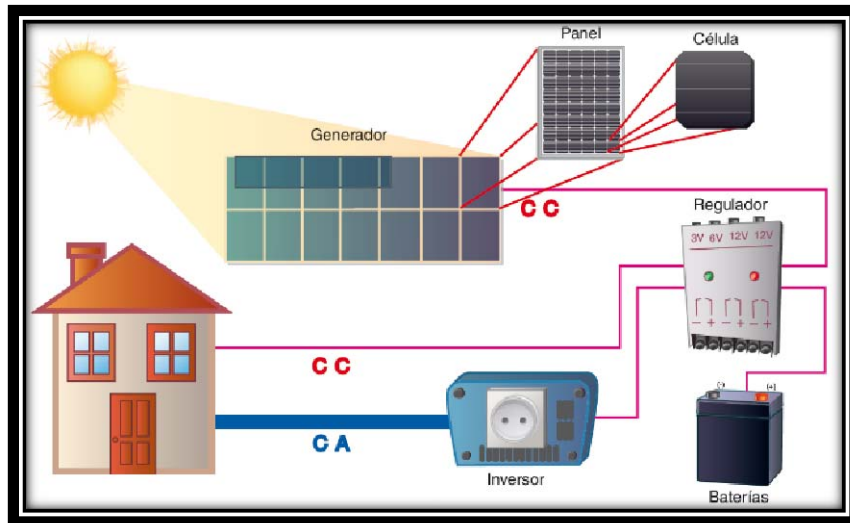
Los sistemas aislados se utilizan normalmente, para proporcionar electricidad a los usuarios con consumos de energía muy bajos, por lo que no compensa pagar el coste de la conexión a la red, o para los que sería muy difícil conectarlos por su posición debido a la falta de accesibilidad del sector en el que se encuentran.

En estos sistemas fotovoltaicos, autónomos, es necesario almacenar la energía eléctrica generada para garantizar la continuidad de la erogación en los momentos en los que no es producida por el generador fotovoltaico, y para ello se guarda en una serie de acumuladores recargables (baterías), dimensionados de manera que garanticen la autonomía para los periodos en los que el sistema no produce energía eléctrica.

Además, debe ser instalado un regulador de carga para preservar las baterías de un exceso de carga del generador fotovoltaico y de un exceso de descarga, debido a la utilización de energía eléctrica, ya que ambas condiciones son perjudiciales para el funcionamiento y duración de las baterías.

En la figura 9 que se muestra el esquema básico de una instalación fotovoltaica autónoma para electrificación rural, como las aplicaciones de este tipo de sistema.

Figura 9. **Esquema general de una instalación fotovoltaica autónoma**



Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 27.

En la figura 9 se observa que los paneles (generadores) reciben la energía proveniente del sol y la procesan para enviar energía eléctrica de corriente directa o continua (CC) al regulador. El regulador da continuidad al proceso, almacenando la energía en los acumuladores (baterías) y abasteciendo la carga de la energía necesaria con corriente directa.

El inversor es el responsable del cambio de energía eléctrica de corriente directa en corriente alterna, generalmente es utilizado en los sistemas de electrificación.

3.1.1. **Aplicaciones para instalaciones autónomas**

A continuación se detalla la diversidad de posibilidades en las que pueden ser utilizadas estas instalaciones:

- Espaciales: sirven para proporcionar energía eléctrica a elementos colocados por el ser humano en el espacio, tales como los satélites de comunicaciones. La investigación en esta área propició el desarrollo de los equipos fotovoltaicos, tal y como se conocen en la actualidad.
- Telecomunicaciones: telefonía rural, vía radio; repetidores de telefonía, televisión, entre otros.
- Electrificación de zonas rurales y aisladas: estas instalaciones se pueden realizar en cualquier lugar y están pensadas para aquellos países o regiones en desarrollo que no cuentan con acceso a una red eléctrica de distribución comercial.
- Señalización: se aplica a señales de tráfico luminosas, formadas por diodos emisores de luz, alimentados por un panel solar y una batería.
- Alumbrado público: se utiliza en zonas en las que resulta complicado llevar una línea eléctrica de alumbrado convencional.
- Bombeo de agua: estas instalaciones están pensadas para lugares, como: granjas, ranchos, entre otros. Se pueden realizar en cualquier lugar. Su uso puede ser tanto para agua potable como para riego.
- Telemetría: permite realizar medidas sobre variables físicas y transmitir la información a una central.

3.2. Instalación fotovoltaica conectada a la red

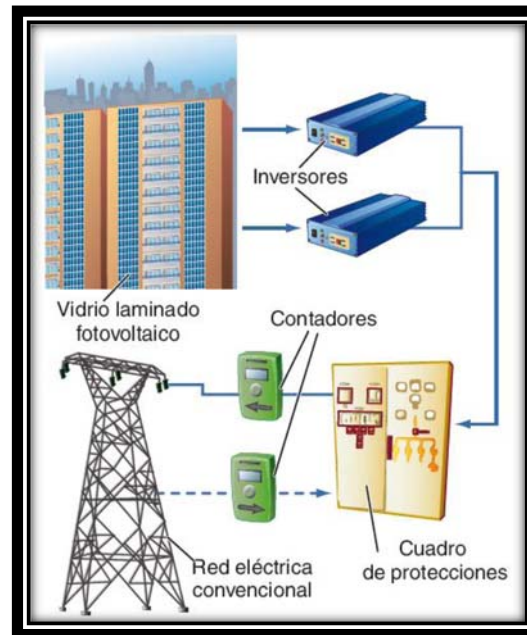
Las instalaciones conectadas a la red de tipo fotovoltaico son utilizadas en puntos en los que existe accesibilidad para conexión a la red eléctrica de distribución local, y pueden ser tan grandes, como lo permitan los recursos disponibles para ejecutar la instalación.

En ellas, el productor no utiliza la energía directamente, sino que es vendida al organismo encargado de la gestión de la energía eléctrica en el país. Tiene la ventaja de que la producción de electricidad se realiza precisamente en el periodo de tiempo en el que la curva de demanda de electricidad aumenta, es decir durante el día, siendo muy importantes los kilovatios generados de esta forma.

Tiene la peculiaridad de poder funcionar perfectamente sin acumulador, debido a que durante el periodo en que no se genera energía eléctrica con la ayuda del Sol puede tomar la energía necesaria para operar de la red a la que se encuentra conectada. Sin embargo, deben ser consideradas las protecciones mencionadas en el capítulo dos de este documento, para que no exista ningún inconveniente con la instalación y su operatividad.

En la figura 10 se muestra el esquema básico de una instalación fotovoltaica autónoma para electrificación urbana, como ejemplo de las aplicaciones de este tipo de sistema.

Figura 10. **Esquema general de una instalación fotovoltaica conectada a la red**



Fuente: Biomass Users Network (BUN–CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 29.

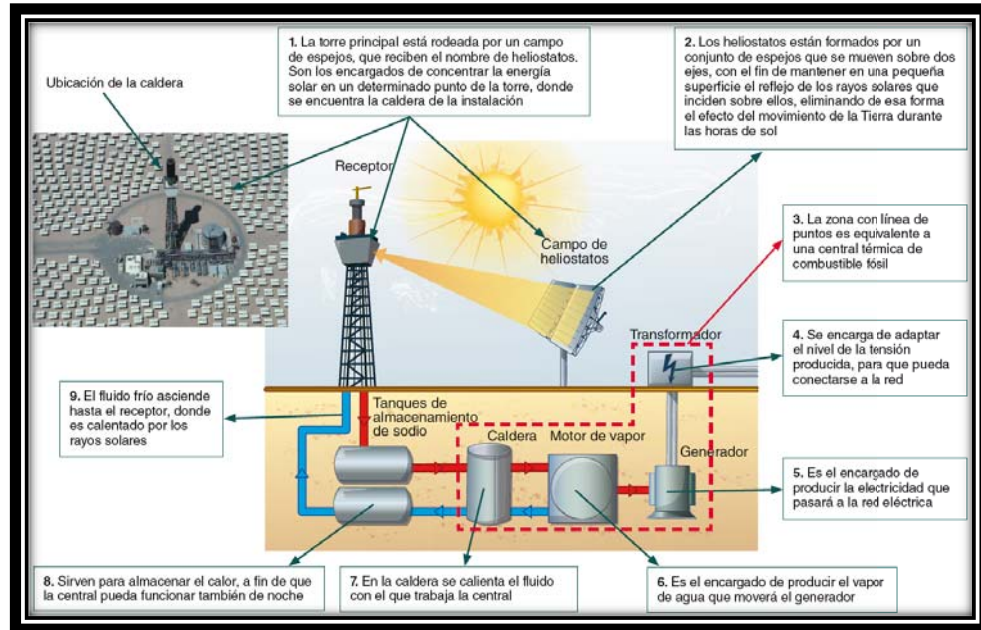
En la figura 10 se puede apreciar que se utilizan dos contadores de energía, utilizados para medir la energía que aporta y consume la instalación fotovoltaica, debido a que durante el día genera energía que es entregada a la red, pero durante la noche consume una parte de esa energía en equipos auxiliares y de protección para garantizar su operatividad.

3.2.1. **Aplicaciones para instalaciones conectadas a la red**

A continuación se detalla la diversidad de posibilidades en las que pueden ser utilizadas estas instalaciones:

- Centrales fotovoltaicas y huertos solares: recintos en los que se concentra un número determinado de instalaciones fotovoltaicas de diferentes propietarios con el fin de vender la electricidad producida a la compañía eléctrica, con la cual se haya establecido el contrato. Cada instalación tiene su propietario y todas ellas se ubican en el mismo lugar.
- Edificios fotovoltaicos: es una de las últimas aplicaciones desarrolladas para el uso de la energía fotovoltaica. La energía fotovoltaica es el sistema de energías renovables más adecuado para la generación de electricidad en zonas urbanas sin provocar efectos ambientales adversos.
- Domiciliares: para autoproducción y suplir el consumo energético de un espacio habitacional convencional general.

Figura 11. **Esquema de la constitución de una central térmica solar de torre central**



Fuente: Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable*. p. 33.

3.3. Dimensionamiento de los componentes

El dimensionamiento de los equipos que constituyen una instalación fotovoltaica se define por las necesidades del consumo que el usuario de la instalación desea cubrir.

Como todo proyecto, se debe seguir un protocolo para diseñar y preparar la ejecución de una obra. A continuación se detallarán algunos detalles básicos, que deben considerarse para realizar una instalación fotovoltaica y son básicos ya que pueden existir una gran cantidad de detalles que no se han mencionado en el presente texto, debido a que las características de este tipo de obras

cambian de acuerdo a un sin número de factores (localidad, consumo del usuario, presupuesto, entre otros).

3.3.1. Consumo en kilovatios–hora a suministrar

Se debe determinar cuál es la carga total en kilovatios–hora que el usuario de la instalación necesita suministrar con la instalación fotovoltaica. No se puede iniciar ningún proceso de diseño o planificación sin antes saber, por completo, qué es lo que se necesita diseñar. Para totalizar la carga es necesario evaluar qué equipos eléctricos (electrodomésticos, iluminación, maquinaria, y en general, cualquier cosa que utilice energía eléctrica suministrada por la instalación fotovoltaica) se van a conectar y hacer una suma de consumo energético de potencia eléctrica en vatios (W), o en algunos de sus múltiplos (MW, kW, entre otros).

3.3.2. Evaluación del área disponible para la instalación

El espacio físico disponible para ejecutar una instalación fotovoltaica debe ser un área en la que no existan sombras, ya que perjudica la generación de energía eléctrica al bajar el rendimiento de los generadores solares (paneles). Las sombras son producidas cuando la luz solar se pone en contacto con cualquier objeto o edificación cercana al área en cuestión, provocando un despliegue de sombra sobre esta. Lograr delimitar el área para ejecución de la instalación es fundamental para garantizar su funcionamiento, rendimiento y los intereses del usuario.

3.3.3. Selección de generadores solares

Existe una gran variedad de marcas, potencias, tamaños, precios, entre otros, de generadores solares. Lo importante es lograr encontrar el panel solar adecuado para garantizar el suministro de energía que abastezca las necesidades del usuario y que se adecúe al espacio físico disponible. Se pueden utilizar diferentes tamaños y potencias de generadores solares para lograr el aprovechamiento del área disponible y la maximización de energía eléctrica generada.

3.3.4. Selección de acumuladores o baterías

Las baterías estarán sometidas a un proceso de carga y descarga constantemente. Se deben elegir los acumuladores necesarios para garantizar el consumo total en kilovatios-hora para abastecer de energía eléctrica entre uno y tres días (temporada de lluvia o día nublado). Además, para que una batería tenga una larga vida útil se debe pensar en tratar de reducir la cantidad de energía entregada por esta y evitar descargas profundas o completas.

3.3.5. Selección de regulador carga

El regulador de carga deberá poder entregar y soportar un nivel de corriente, amperios-hora, mayor que el suministrado por los paneles solares y que el consumido por la carga. La razón es muy sencilla, el regulador de carga deberá tener la capacidad de recargar los acumuladores y protegerlos para alargar la vida útil de los mismos.

3.3.6. Selección del inversor

El objetivo de la instalación fotovoltaica es suministrar energía eléctrica a una carga determinada y la conexión entre la carga y la instalación fotovoltaica se hace a través del inversor. Para la selección del inversor debe considerarse el nivel de voltaje de la carga y la potencia eléctrica que deberá ser entregada por el mismo. Lo más recomendable es elegir un inversor con un rango de voltaje, tanto de entrada como de salida, variable y de mayor capacidad (kilovatios) que la instalación. Estos dispositivos son de costo elevado y sería muy perjudicial que se dañará, ya que sin él, la instalación no cumple con su objetivo.

3.3.7. Cables de conexión

Estos son fundamentales en la instalación y deben ser elegidos cuidadosamente para lograr un buen funcionamiento del sistema fotovoltaico. Para seleccionar los conductores se debe analizar cada tramo de la instalación y saber cuál es el nivel de corriente que circulará en cada uno de ellos. Con frecuencia los cables más gruesos se encuentran en los tramos de corriente directa, debido a que el voltaje en esos puntos es más bajo, y por consiguiente la corriente es elevada.

3.3.8. Soportería

Aunque muchas veces se descuidan los dispositivos de fijación, lo que conlleva a improvisación, es importante determinar con qué tipo de estructura, tornillería, y elementos de sujeción en general serán utilizados para garantizar que los elementos que conforman al sistema fotovoltaico no se encuentren situaciones comprometedoras o de riesgo. Es importante no confundirse, ya que

lo anterior no limita la posibilidad de utilizar recursos locales, de la ubicación en donde será ejecutada la obra.

La ejecución de un sistema fotovoltaico pareciera ser muy sencillo, y lo es cuando se ha realizado una planificación y diseño adecuado para realizarla. Sin embargo, la planificación y diseño sin duda serán afectados por un sin número de factores (condiciones climáticas, oposición por parte de la población local, abastecimiento de materiales, mano de obra calificada, entre otras) durante la ejecución, que deberán ir siendo solventados uno a uno con paciencia y dedicación.

4. PROPUESTA DE DISEÑO PARA UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA DE GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Para realizar el diseño adecuado de una instalación fotovoltaica se deben cumplir algunos procedimientos para obtener un resultado adecuado. Básicamente se debe dimensionar la estación bajo los parámetros de dimensionamiento mencionados en el apartado (3.3) del capítulo tres del presente documento.

La guía para el desarrollo de una instalación fotovoltaica de generación distribuida consiste en:

- Base de cálculo para equipos y accesorios
- Material e instalación de soportería
- Montaje del sistema fotovoltaico

A continuación se detalla el procedimiento necesario para ejecutar una instalación fotovoltaica conectada a la red de 5 kW_p, realizada dentro de la ciudad capital de la República de Guatemala.

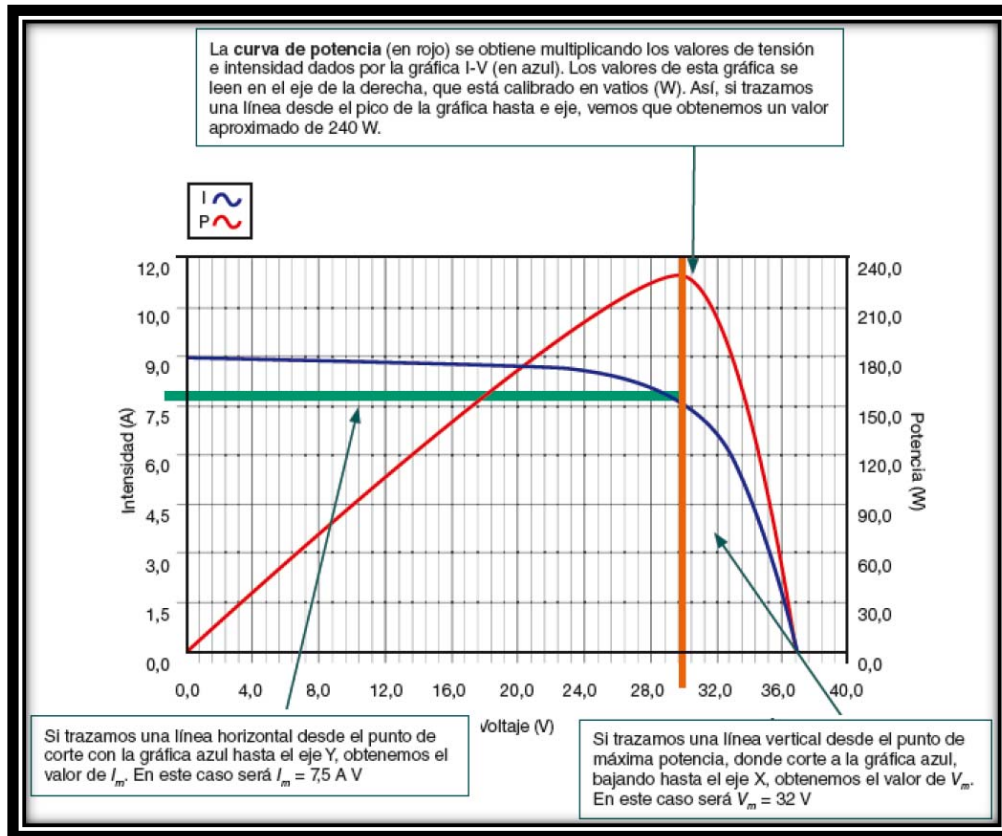
4.1. Base de cálculo para equipos y accesorios

El propósito de la base de cálculo es dimensionar la instalación fotovoltaica, eligiendo los elementos adecuados que permitan cumplir con el objetivo de la misma y entregar una determinada cantidad de energía (kilovatios-hora).

4.1.1. Paneles solares

Para la elección de los paneles solares que se utilizarán en cualquier instalación son necesarios los datos del fabricante para considerar las ventajas propuestas para estos equipos:

Figura 12. **Curva característica y obtención de valores de corriente y voltaje nominal para un panel solar**



Fuente: LOJANO CHACHA, Diego Iván. *Generación de energía fotovoltaica en Ecuador*. p. 182.

Sin embargo, se debe tener cuidado, porque los valores proporcionados por el fabricante son obtenidos bajo algunas condiciones de irradiación solar y temperatura ambiente. En la práctica existirá una desviación para dichos valores por la diferencia de condiciones entre el valor teórico y la vida real.

Conociendo la potencia pico estimada por hora ($5kW_p$) se puede calcular la cantidad de paneles necesarios, dependiendo de la potencia pico nominal de los mismos, en este caso es de $240 W_p$. Al referirme a potencia pico, significa la potencia máxima que puede generar el panel solar en condiciones óptimas, es decir, con las condiciones ideales de operación.

$$Cantidad\ de\ paneles = \frac{E_{hora}}{P_p}$$

$$Cantidad\ de\ paneles = \frac{5\ 000,00\ W}{240,00\ W/unidad}$$

$$Cantidad\ de\ paneles = 20,83\ unidades$$

$$Cantidad\ de\ paneles \cong 21\ unidades$$

4.1.2. Inversor

Para la elección del inversor se debe tomar en cuenta el tipo de servicio y la frecuencia de operación; en este caso el servicio es 120 V monofásico de cuatro hilos (L_1 , L_2 , N y tierra física), con frecuencia de trabajo de 60 Hz. A continuación se detalla una tabla de especificaciones en la figura 13, para inversores de diferentes capacidades.

Figura 13. Especificaciones técnicas de inversores para sistemas fotovoltaicos o afines

Model	SunPI-300	SunPI-500-S	SunPI-600	SunPI-1000	SunPI-1500	SunPI-2000	SunPI-2500	SunPI-3000	
Input	DC Voltage	12V or 24V or 48V or 110V							
	Voltage Range	10-15VDC or 21-30VDC or 42-60VDC or 100-120VDC							
	No Load Current Draw	<0.6	< 0.6A	< 0.8A	< 0.8A	< 0.8A	< 0.9A	< 0.9A	< 0.95A
	Efficiency	> 85%							
	DC Connector	Cables With Clips or Car Adaptor							
Output	AC Voltage	100/110/120VAC or 220/230/240 VAC							
	Continuous Power	300W	500W	600W	1000W	1500W	2000W	2500W	3000W
	Surge Power	600W	1000W	1200W	2000W	3000W	4000W	5000W	6000W
	Waveform	Pure Sine Wave							
	Frequency	50Hz or 60Hz							
	AC Regulation	5%							
Protection	Low Voltage Alarm	10V DC±0.2V or 20V DC±0.3V or 40V DC±0.4V or 100V DC±1V							
	Low Voltage Shut Down	9.5V DC±0.2V or 19V DC±0.3V or 38V DC±0.4V or 96VDC±5V							
	Over Load	Shut Off Output							
	Over Voltage Shut Down	15.5V or 30.5V or 61.2V or 120V							
	Over Thermal	Shut Off Output Automatically							
	Fuses	Short Circuit							
Environment	Working Temperature	Between -10°C and +50°C							
	Working Humidity	20%~90%RH non-condensing							
	Storage Temperature	Between -30°C and +70°C							
Package	Dimension(L*W*H)cm	16*15*5.2	21*15*7	21*15*7	34*15*7	34*15*7	38*15*8.8	34*15*15.2	34*15*15.2
	Net Weight KG	0.85	1.4	1.5	2.5	2.8	3	5.9	6.1
	Gross Weight KG	1.1	1.8	1.9	3.1	3.4	3.6	7	7.2
	Inner Box Dimension cm	20*17*7.5	32*18*10	32*18*10	42*18*10	42*18*10	42*18*10	42*18*10	42*18*10
	Carton Dimension cm	42.5*34*36	43.5*19.5*22.5	43.5*19.5*22.5	43.5*19.5*22.5	43.5*19.5*22.5	43.5*19.5*22.5	43.5*19.5*22.5	43.5*19.5*22.5
	Carton Weight	18KGS,16PCS	7KGS,4pcs	7KGS,4pcs	6.5KGS,2pcs	7KGS,2pcs	7.5KGS,2pcs	14KGS,2pcs	14.5KGS,2pcs
Others	Start	Soft Start							
	Cooling Ways	Cooling Fan							
	Total Harmonic Distortion	THD < 4%							
	Certificates	CE & RoHS Approval							

Fuente: *Manual de especificaciones técnicas Panalsolar*. p. 11

De acuerdo con la información de la figura 13, y por las condiciones del sitio en donde se realizará la instalación, se utilizarán dos inversores SunPI-2500.

Dichos inversores cuentan con las siguientes características básicas:

Tabla II. **Características básicas de operación del inversor SunPI – 2500**

PARÁMETRO	VALOR ACEPTADO
Voltaje de entrada (V, DC)	100-120
Voltaje de salida (V, AC)	220-240
Corriente de entrada (A)	15
Corriente de salida (A)	12
Eficiencia (%)	> 85%
Tipo de señal de salida	senoidal pura
Frecuencia de salida (Hz)	50-60

Fuente: elaboración propia.

Además de las características mencionadas para los inversores, es importante reconocer que también son utilizados como dispositivos de regulación y para monitoreo remoto. Estos inversores cuentan con funciones adicionales a las de un inversor convencional y se adaptan muy bien a las instalaciones conectadas a la red, debido a que en estas no se hace necesario el cálculo de los acumuladores (baterías), ya que este tipo de instalación puede solicitar el complemento de energía a la red de distribución a la que esté conectada.

4.1.3. Conductores

Los conductores eléctricos deberán dimensionarse de acuerdo con las necesidades propias del caso de estudio, utilizando los criterios básicos para selección de conductores de conocimiento general para un técnico en electricidad

de acuerdo con la corriente soportada por el calibre de conductor y la corriente nominal de operación necesaria del sistema a instalar.

De acuerdo con la elección de inversores, se conoce el valor de corriente eléctrica para corriente continua (entrada) y corriente alterna (salida), 15 y 12 amperios respectivamente.

Considerando el valor de corriente que se manejará en los diferentes tramos de la instalación, se determina que el conductor adecuado será uno que pueda soportar una corriente máxima de 20 amperios. Por lo anterior, el cable para la conexión eléctrica será de tipo AWG–THHN–núm.12 con aislamiento de 600V y capaz de soportar corrientes eléctricas de hasta 20 amperios.

4.1.4. Protección en DC

En Guatemala no se exige un sistema de protección en instalaciones pequeñas, por el momento. Sin embargo, es recomendable colocar dichas protecciones para proteger al usuario de cualquier problema que pudiera surgir con el uso de la instalación.

Las protecciones se deben ajustar lo mejor posible a los parámetros nominales de operación de la instalación en desarrollo, con el objetivo de salvaguardar, principalmente, las vidas humanas que interactúan con la instalación. La protección mínima recomendada consiste en un interruptor termomagnético con valor nominal de acción cercano al valor de corriente nominal de operación de la instalación.

En el caso de estudio que se plantea en este documento, se conoce que la corriente nominal de operación para corriente continua será de 15 amperios.

Lo anterior indica que la protección deberá tener un valor de acción cercano a 15 amperios, pero de valor levemente mayor para permitir que dicha instalación opere con normalidad. El valor elegido para el caso de estudio es 20 amperios, por ser un valor comercial y fácil de obtener con cualquier distribuidor de equipos eléctricos de protección.

4.1.5. Protección en AC

En Guatemala, Empresa Eléctrica de Guatemala S. A. solicita para la conexión de un sistema fotovoltaico a la red de corriente alterna debe tener como mínimo un interruptor termomagnético de acuerdo a los valores nominales de corriente de la instalación de estudio.

En el caso de estudio que se plantea en este documento, se conoce que la corriente nominal de operación para corriente continua será de 12 amperios.

Lo anterior indica que la protección deberá tener un valor de acción cercano a 12 amperios, pero de valor levemente mayor para permitir que dicha instalación opere con normalidad. El valor elegido para el caso de estudio es 15 amperios, por ser un valor comercial y fácil de obtener con cualquier distribuidor de equipos eléctricos de protección.

4.1.6. Conectores

Los paneles solares tienen, de fábrica, terminales especiales que facilitan la conexión y garantizan la estanqueidad para el trabajo a la intemperie. Estos se conocen como: conectores MC4.

Figura 14. **Conector hembra/macho tipo MC4**



Fuente: *Manual de instalación Panalsolar*. p.16

4.1.7. Misceláneos

En este apartado al encontrar los materiales más comunes, como: cinta de aislar, conectores de torsión, elementos para canalización, entre otros.

4.2. Material e instalación de soportería

La soportería es la base de la instalación y desempeña un rol importante en la misma. Se logra la estabilidad mecánica de la instalación y contempla diferentes materiales que dependen de la ubicación en donde se realice la instalación. Sin embargo, de forma general se utilizan los siguientes materiales:

4.2.1. Perfiles de aluminio

El aluminio tiene una alta resistencia a la corrosión y es muy liviano, por lo que lo hace el elemento ideal para elaborar las estructuras de los paneles solares. Además, posee ventajas mecánicas de manipulación y es relativamente económico para la aplicación.

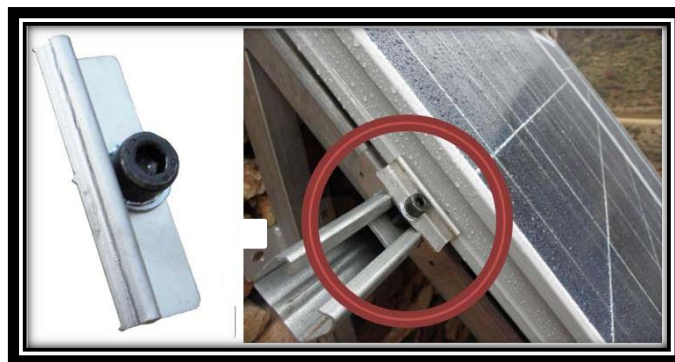
4.2.2. Tornillería de acero inoxidable

Es importante evitar el problema de la corrosión en cualquier instalación, y fundamental para una instalación fotovoltaica. La diversidad de elementos de sujeción de acero inoxidable permite realizar diferentes tipos de estructuras, evitando el tema de corrosión en los puntos de unión de los diferentes elementos que conforman dicha estructura.

4.2.3. Grapa de inicio

Elemento específico para la sujeción de los paneles solares sobre la estructura que se haya construido con el fin de soportar y agrupar los módulos fotovoltaicos. Básicamente, se deben colocar en los extremos de cada una de las filas o columnas del arreglo diseñado para la instalación. Pueden ser de aluminio (normalmente) o de acero inoxidable.

Figura 15. **Grapa de inicio**

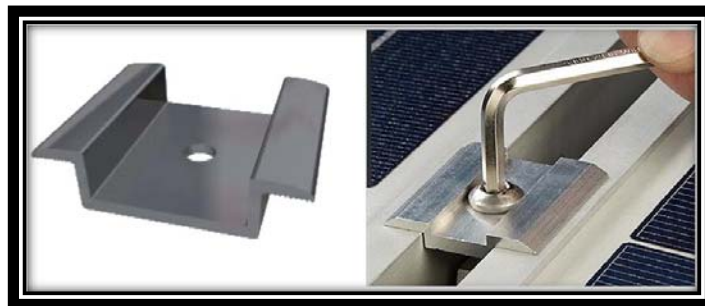


Fuente: Ing. Carlos Ponce <http://www.autosolar.es/accesorios-electricos/fijacion> . Consulta: 23 de octubre de 2014.

4.2.4. Grapa intermedia

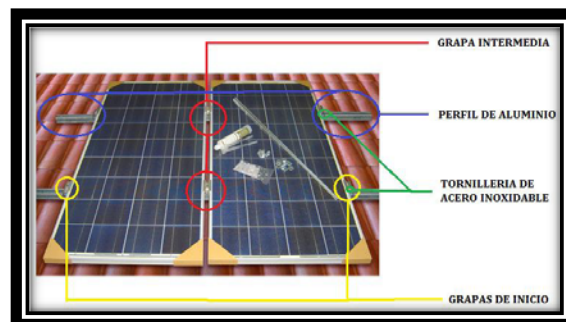
Como la grapa de inicio, es un elemento para la sujeción de los paneles solares sobre la estructura diseñada para soportar y agrupar los módulos fotovoltaicos. Sin embargo, la diferencia radica en la ubicación de las mismas. Las grapas intermedias se colocan entre paneles solares.

Figura 16. Grapa intermedia



Fuente: Ing. Carlos Ponce, <http://www.autosolar.es/accesorios-electricos/fijacion> . Consulta: 23 de octubre de 2014.

Figura 17. Imagen ilustrativa de las piezas estructurales utilizadas en el montaje de una instalación fotovoltaica de forma general



Fuente: elaboración propia, con programa Sketchup 2013.

4.3. Montaje del sistema fotovoltaico

Este se realiza mediante un proceso que inicia en la colocación de la estructura que soportará a los equipos involucrados, y finaliza en la verificación de la funcionalidad del mismo.

A continuación se detallan los procedimientos esenciales para el desarrollo adecuado de un montaje de una instalación fotovoltaica.

4.3.1. Estructura

La colocación de la estructura que soportará a los elementos de la instalación fotovoltaica se puede dividir en dos. Una de ellas consiste en la soportería que sujetará los módulos generadores (paneles solares) fijos en el lugar de su instalación, y la otra se refiere a la forma de colocar los equipos de control y de transformación de energía.

Figura 18. **Montaje de paneles solares para instalación fotovoltaica de 5 kW_p**



Fuente: Geserv GT S. A.

4.3.2. Módulos generadores

La estructura necesaria para la fijación de los paneles solares, se debe colocar con orientación norte-sur. El tema de la orientación requiere atención, debido a que la posición adecuada tendrá un mejor rendimiento en la generación de energía. Además, muchos autores del tema recomiendan instalar los módulos solares con una inclinación entre 5 ° y 15 ° respecto a la horizontal, para mejorar la eficiencia de generación hasta en un 5 % tomando como referencia módulos en posición totalmente horizontal.

Figura 19. **Montaje de instalación fotovoltaica ubicada en la ciudad capital de Guatemala**



Fuente: Geserv GT S. A.

4.3.3. Equipos de control

La estructura de este tipo es diferente con cada instalación. Sin embargo, se compone de accesorios que puedan brindar seguridad a los equipos de protección y conversión de energía, y básicamente son la estética del punto de control y conexión del sistema fotovoltaico.

Figura 20. **Centro de control de una instalación fotovoltaica**



Fuente: Geserv GT S. A

4.3.4. Conexión eléctrica

La conexión eléctrica de la instalación, también se divide en varias secciones.

- Módulos solares

La conexión eléctrica entre paneles solares se realiza colocándolos en conexión serie o paralelo, hasta lograr el valor de potencia fotovoltaica deseada, bajo las condiciones de operación nominal que permita el funcionamiento conjunto del resto de elementos.

- Cuadro de protecciones

El cuadro de protecciones es ensamblado de acuerdo a los valores nominales de operación. Se debe colocar protecciones para el conjunto de elementos de corriente directa y alterna de forma independiente, buscando salvaguardar la vida del personal que opere el sistema bajo cualquier circunstancia.

Figura 21. **Cuadro de control de una instalación fotovoltaica de 5 kW_p ubicada en la ciudad capital de Guatemala**



Fuente: Geserv GT S. A.

- Protección a tierra

La conexión a tierra se realiza al unir eléctricamente la tierra física de la instalación fotovoltaica, con el sistema de tierra del sitio en el que se implementa dicha instalación.

- Conexión a la red

La conexión entre la red eléctrica de la localidad en donde se implementará la instalación fotovoltaica se realiza mediante la colocación de un interruptor termomagnético, acorde a los valores nominales de operación de la instalación fotovoltaica, posterior al medidor de energía eléctrica de la distribuidora de energía eléctrica (contador).

Además, para el caso de estudio de este documento, se debe realizar la solicitud de cambio del medidor de energía eléctrica al distribuidor del servicio de energía eléctrica.

4.3.5. Verificación de funcionamiento

De forma rutinaria existen algunos parámetros eléctricos que deben revisarse durante el proceso de la instalación y al finalizar la misma, con el objetivo de garantizar su funcionamiento adecuado.

- Tensión eléctrica de paneles solares

La tensión de paneles debe ser de tal magnitud, que pueda ser recibida por el inversor de corriente directa en alterna sin problema.

Esto se logra mediante la conexión eléctrica de paneles, que es independiente entre cada instalación.

- Tensión eléctrica de la red

Se debe verificar que el inversor sea capaz de acoplarse a la red eléctrica de la localidad en la que se implementará la instalación fotovoltaica. Además, se debe considerar la frecuencia.

- Aislamiento

Verificar la conexión a tierra para drenar corrientes atmosféricas y no deseadas durante la operación del sistema.

- Indicadores

En caso de implementación de alarmas, realizar un simulacro de fallas para corroborar la operación de los indicadores implementados y sus acciones correspondientes.

Figura 22. Verificación de niveles de tensión para la conexión de paneles solares



Fuente: Geserv GT S. A.

5. ANÁLISIS FINANCIERO

El análisis financiero de un proyecto consiste en el cálculo de la rentabilidad prevista del mismo a lo largo del periodo de la actividad. De su posterior evaluación, junto con el resto de ventajas, inconvenientes y riesgos, se obtiene la viabilidad real del proyecto.

El objetivo de una instalación para generación de energía eléctrica es el beneficio económico por el desarrollo de la actividad, y es la razón por la que la rentabilidad de una instalación es el factor determinante para la ejecución de este tipo de proyectos.

El correcto análisis financiero no es únicamente para evaluar la rentabilidad del proyecto, sino también pretende predecir el posible comportamiento del mismo buscando evitar o limitar los prejuicios económicos de los inversionistas.

5.1. Análisis financiero de la inversión

Como caso de estudio, se evaluará una instalación fotovoltaica conectada a la red con un valor esperado de producción de generación eléctrica de $5kW_p$ situada en la zona 7 de la ciudad capital de Guatemala.

Dicha instalación fue realizada luego de elaborar el análisis financiero que se detalla a continuación.

5.1.1. Presupuesto de la instalación

En el presupuesto de la instalación se contemplan equipos y materiales necesarios para el desarrollo de la instalación, así como datos de mano de obra por el personal requerido para ejecutar el proyecto.

A continuación se detallan las cantidades y los costos unitarios y totales correspondientes a los equipos, materiales e insumos:

Tabla III. **Tabla de costos de materiales necesarios para el desarrollo de una instalación fotovoltaica de 5 kW_p con IVA incluido**

#	DESCRIPCIÓN	unidad	cantidad	precio material	Subtotal material
1	Panel solar policristalino de 240 Watt	unidad	21	Q 440,00	Q 9 240,00
2	Inversor sunPI - 2500	unidad	2	Q 7 900,00	Q 15 800,00
3	Terminal macho y hembra tipo MC4 para conexión entre paneles	unidad	25	Q 8,50	Q 212,50
4	Regleta de 12 bornes para cable 10-12 (6MM ²)	unidad	1	Q 18,73	Q 18,73
5	Riel DIN 35MMx1MT perforado	metro	2	Q 16,85	Q 33,70

Continuación de la tabla III.

#	DESCRIPCIÓN	unidad	cantidad	precio material	Subtotal material
6	Interruptor termomagnético de 2x16 A para riel DIN	unidad	2	Q83,93	Q167,86
7	Terminal abierta aislada #12-10 para tornillo 3/16"	unidad	20	Q 1,85	Q 37,00
8	Cable TSJ - 3x10	metro	100	Q 11,00	Q 1 100,00
9	Gabinete metálico IP66	unidad	1	Q 711,72	Q 711,72
10	Porta fusible 12A/1000V	unidad	1	Q 30,00	Q 30,00
11	Fusible 12 A /1000V	unidad	1	Q 15,00	Q 15,00
12	Abrazaderas Hanggler 3/4"	unidad	30	Q 2,40	Q 72,00
13	Tarugos de 1/4	unidad	30	Q 0,25	Q 7,50
14	Tornillos busca rosca de 1x1/4"	unidad	30	Q 0,25	Q 7,50
15	Roldanas de 1/4"	unidad	30	Q 0,20	Q 6,00
16	Cinta aislante	unidad	2	Q 30,00	Q 60,00
17	Contador socket CL-100 240 3H monofásico	unidad	1	Q 634,86	Q 634,86

Continuación de la tabla III.

#	DESCRIPCIÓN	unidad	cantidad	precio material	Subtotal material
18	Caja tipo <i>socket</i> cuadrada monofásica 100A 120/240V	unidad	1	Q 367,86	Q 367,86
19	Conector PVC con tuerca para tubo gris de 3/4"	unidad	8	Q 2,10	Q 16,80
20	Tubo PVC de 3/4" color gris	unidad	8	Q 6,40	Q 51,20
21	Vuelta PVC gris de 3/4"	unidad	8	Q 1,25	Q 10,00
22	Coplas PVC gris de 3/4"	unidad	12	Q 0,50	Q 6,00
23	Luz indicadora 240V	unidad	1	Q 25,00	Q 25,00
24	Sierra para tubo	unidad	3	Q 5,00	Q 15,00
25	<i>Niple bushing</i> 1-1/4"	unidad	4	Q 10,73	Q 42,92
26	Protección por sobre tensión.	unidad	2	Q 225,00	Q 450,00

Continuación de la tabla III.

#	DESCRIPCIÓN	unidad	cantidad	precio material	Subtotal material
27	Pegamento para PVC "TANGIT" 1/8 de galón	unidad	1	Q 114,82	Q 114,82
				Total:	Q 29 253,97

Fuente: elaboración propia.

A continuación se detallan los costos de mano de obra para la ejecución de la instalación fotovoltaica conectada a la red de 5 kW_p, correspondiente al caso de estudio.

Tabla IV. **Costo de mano de obra para el desarrollo de la instalación fotovoltaica conectada a la red de 5 kW_p**

DESCRIPCIÓN	Cantidad	Costo por día	Días para la ejecución	Subtotal de M.O.
Supervisor eléctrico	1	Q 267,00	2	Q 534,00
Técnico electricista	3	Q 167,00	1	Q 501,00
Programador	1	Q 200,00	1	Q 200,00
Total:				Q1 235,00

Fuente: elaboración propia.

Se describe la totalidad de la inversión de acuerdo a los detalles anteriores:

Tabla V. **Valor total de inversión para el desarrollo de una instalación fotovoltaica de 5 kW_p**

DESCRIPCIÓN	Subtotal de inversión
Equipos, materiales e insumos	Q 29 253,97
Mano de obra	Q 1 235,00
Total de coste de inversión:	Q 30 488,97

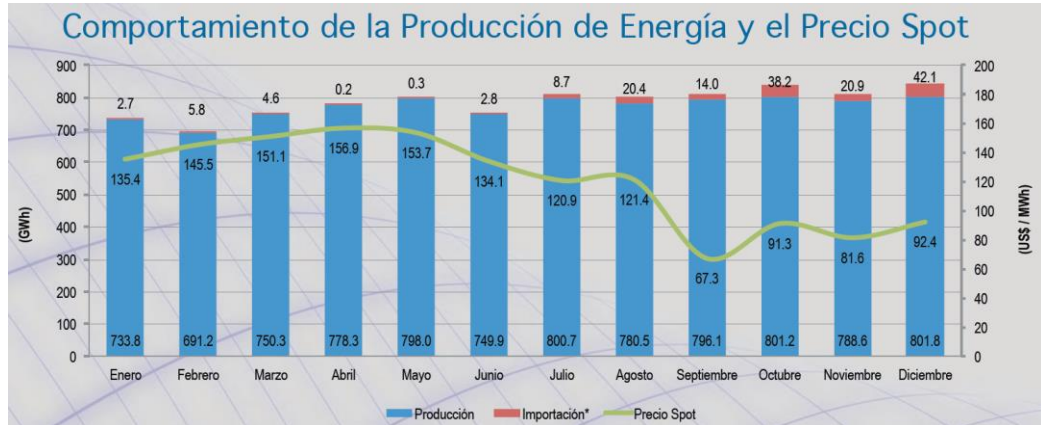
Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Previsión de ingresos anuales

Los ingresos anuales están definidos por la cantidad de kilovatios-hora generados y el valor económico promedio (precio *spot*) que posean en tiempos determinados.

Para hacer el cálculo de ingresos anual se utilizarán periodos de tiempo de un mes, por lo que se empleara el precio *spot* del año 2013, de acuerdo a lo publicado por el Administrados del Mercado Mayorista (AMM) en su informe estadístico concerniente a dicho periodo (2013).

Figura 23. Comportamiento de la producción de energía y el precio spot



Fuente: informe estadístico del 2013, Administrador del Mercado Mayorista (AMM).

El cálculo de ingresos se detalla en la tabla VI, utilizando un factor de conversión equivalente a Q 7,70 = \$ 1,00 (Banco Nacional de Guatemala 7/10/2014):

Tabla VI. Cálculo de ingresos por generación de energía eléctrica por fuente fotovoltaica

#	PERIODO	kWh mensual	Precio Spot (kWh)	Subtotal de Ingresos	Ingreso mensual (Q)
1	Enero	300,00	\$ 0,13540	\$ 40,62	Q 312,77
2	Febrero	320,00	\$ 0,14550	\$ 46,56	Q 358,51
3	Marzo	415,00	\$ 0,15110	\$ 62,71	Q 482,84
4	Abril	440,00	\$ 0,15690	\$ 69,04	Q 531,58
5	Mayo	460,00	\$ 0,15370	\$ 70,70	Q 544,41
6	Junio	405,00	\$ 0,13410	\$ 54,31	Q 418,19

Continuación de la tabla VI.

#	PERIODO	kWh mensual	Precio Spot (kWh)	Subtotal de Ingresos	Ingreso mensual (Q)
7	Julio	375,00	\$ 0,12090	\$ 45,34	Q 349,10
8	Agosto	350,00	\$ 0,12140	\$ 42,49	Q 327,17
9	Septiembre	310,00	\$ 0,06730	\$ 20,86	Q 160,65
10	Octubre	280,00	\$ 0,09130	\$ 25,56	Q 196,84
11	Noviembre	265,00	\$ 0,08160	\$ 21,62	Q 166,50
12	Diciembre	255,00	\$ 0,09240	\$ 23,56	Q 181,43
Ingreso total (anual)					Q 4 029,99

Fuente: elaboración propia.

La vida útil de los módulos fotovoltaicos es equivalente a 30 años con eficiencia variable, como se describe en la tabla VII.

Tabla VII. **Eficiencia de paneles solares respecto a tiempo de uso**

Tiempo (años)	Eficiencia
$t < 10$	$n > 90 \%$
$10 < t < 20$	$80\% < n < 90 \%$
$t > 20$	$n < 80 \%$

Fuente: Río Solar - info@riosolar.com. Consulta: 29 de octubre de 2014

5.1.3. Previsión de gastos anuales

Se considera un valor económico de mantenimiento para la instalación, que básicamente consiste en limpieza de paneles y revisión de conexión de las terminales eléctricas, por costo no mayor a Q 600,00 anuales.

5.1.4. Condiciones de financiación

La financiación es un factor importante para cualquier tipo de proyecto, ya que es el motor financiero para la ejecución del mismo. Para lograr un plan de financiamiento es fundamental demostrar la rentabilidad del proyecto de forma cuantificable.

Aunque existen diferentes entidades que podrían financiar un proyecto de esta categoría, se debe buscar el que menor coste represente. Lo anterior se refiere a que nada es regalado, y que cualquier entidad que aporte el recurso económico para la financiación del proyecto cobrará una tasa de interés con base en la rentabilidad y la tasa interna de retorno (VAN y TIR) del proyecto.

También existe la posibilidad, en proyectos pequeños, de autofinanciación. La autofinanciación consiste en la integración de grupos de consumidores interesados en adquirir un bien inmueble sin pagar intereses, quienes mediante aportaciones periódicas constituyen un fondo común que es administrado por consorcio improvisado y vigilado por un fideicomiso irrevocable con una institución bancaria, que garantiza que única y exclusivamente se destinarán dichas cantidades a la adquisición de los bienes inmuebles o remodelaciones de los integrantes del grupo.

Siendo la inversión inicial del proyecto de Q 30 488,97 puede tomarse como un caso de autofinanciación, debido a que no es un monto exuberante y alcanzable por una persona que desea modificar su condición económica referente al pago de energía eléctrica para evitar el pago de intereses y el papeleo administrativo, que involucra la solicitud de un financiamiento de este tipo, al tratarse de un proyecto relativamente pequeño.

5.1.5. Periodo de retorno de la inversión del proyecto

A continuación se realiza el cálculo del periodo de retorno de la inversión para el proyecto de energía solar fotovoltaica desarrollado, utilizando la siguiente ecuación:

$$T = \frac{I}{E - M}$$

Donde:

T = tiempo de recuperación de la inversión en años

I = inversión total del proyecto

E = beneficio anual producido por la venta de energía generada

M = costos de mantenimiento y egresos anuales, sin incluir financiación

$$T = \frac{Q\ 30\ 488,97}{Q\ 4\ 029,99 - Q\ 600,00}$$

$$T = 8,89 \text{ años}$$

$$T \approx 9 \text{ años}$$

De esta forma se muestra que se recuperará la inversión del proyecto en nueve años de los veinticinco que tiene de vida útil.

5.1.6. Cálculo del flujo de caja

Para encontrar los ingresos netos de cada año, dentro del tiempo de vida útil del proyecto, se consideran los gastos de inversión con signo negativo y los beneficios obtenidos con signo positivo. En la tabla VIII se presentan los resultados del flujo de caja del proyecto para un periodo de quince años.

Tabla VIII. **Flujo de caja del proyecto fotovoltaico de 5 kW_p durante 15 años de utilización**

Año	Inversión	Beneficios	Ingreso neto
0	Q 30 488,97	-	-Q 30 488,97
1	-	Q 3 429,99	Q 3 429,99
2	-	Q 3 498,59	Q 3 498,59
3	-	Q 3 568,56	Q 3 568,56
4	-	Q 3 639,93	Q 3 639,93
5	-	Q 3 712,73	Q 3 712,73
6	-	Q 3 786,99	Q 3 786,99
7	-	Q 3 862,73	Q 3 862,73
8	-	Q 3 939,98	Q 3 939,98
9	-	Q 4 018,78	Q 4 018,78
10	-	Q 4 099,16	Q 4 099,16
11	-	Q 4 181,14	Q 4 181,14
12	-	Q 4 264,76	Q 4 264,76
13	-	Q 4 350,06	Q 4 350,06
14	-	Q 4 437,06	Q 4 437,06
15	-	Q 4 525,80	Q 4 525,80

Continuación de la tabla VIII.

Año	Inversión	Beneficios	Ingreso neto
Total	Q 30 488,97	Q 59 316,25	Q 28 827,28

Fuente: elaboración propia.

Para el cálculo del flujo de caja se utilizaron los datos proporcionados por el Banco Nacional de Guatemala para el periodo del 7 de octubre de 2014, obteniendo, según se describe la tabla IX.

Tabla IX. **Tasa de interés e inflación proporcionados el 7 de octubre de 2014 por el Banco Nacional de Guatemala**

Tasa de interés simple	7,00 %
Tasa de inflación	4,33 %

Fuente: Banco de Guatemala.

5.1.7. Valor presente neto (VAN) del proyecto

El VAN es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión definida. El procedimiento de cálculo consiste en descontar al momento actual todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se resta la inversión inicial, de modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto.

El VAN, esencialmente, es una herramienta que se utiliza para verificar la rentabilidad de un proyecto utilizando la siguiente ecuación:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0$$

Donde:

V_t representa los flujos de caja en cada periodo t

I_0 = valor del gasto de inversión inicial

n = número de periodos considerados

k = tipo de interés

Sí el proyecto no tiene riesgo, se tomará como referencia el tipo de la renta fija, de tal manera que con el VAN se estimará si la inversión es mejor que invertir en algo seguro, sin riesgo específico.

En la tabla X se detallan los criterios de interpretación de resultados para el cálculo del valor presente neto (VAN):

Tabla X. **Criterios de interpretación del VAN**

Valor	Significado	Decisión a tomar
VAN > 0	La inversión producirá ganancias por encima de la rentabilidad exigida.	El proyecto puede aceptarse.
VAN < 0	La inversión producirá pérdidas por debajo de la rentabilidad exigida.	El proyecto debe rechazarse.
VAN = 0	La inversión no producirá ganancias o pérdidas.	La decisión deberá basarse en otros criterios, como la obtención de un mejor posicionamiento en el mercado u otros factores.

Fuente: elaboración propia.

Resultado del cálculo del VAN utilizando como herramienta de cálculo las funciones del libro excel con la ayuda de la función VAN:

$$\text{VAN} = 4\,647,53$$

5.1.8. Tasa interna de retorno (TIR) de la inversión del proyecto

El TIR es un método de valoración de inversiones que mide la rentabilidad de los cobros y los pagos actualizados, generados por una inversión y que se expresan de forma porcentual.

Analíticamente se calcula despejando el tipo de descuento (r) que iguala el VAN a cero, utilizando la siguiente ecuación:

$$VAN = 0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{Q_t}{(1+r)^t}$$

Donde:

r= tasa de retorno o TIR

A= desembolso inicial con signo positivo

Q_t= flujos netos de caja de cada período

t= periodo evaluado

La TIR permite determinar si una inversión es apropiada, así como realizar la jerarquización entre varios proyectos:

- Son apropiadas aquellas inversiones que tengan una TIR superior a la rentabilidad que se exige a la inversión “k” (r>k). En este caso, mayor al 7,00 %.
- Entre las diversas inversiones apropiadas es preferible la que tenga una TIR mayor.

Resultado del cálculo de la TIR utilizando como herramienta de cálculo las funciones del libro excel con la ayuda de la función TIR:

$$TIR = 11 \%$$

5.2. Resultado

De los valores obtenidos al calcular el valor presente neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR) se concluye:

- El proyecto es económicamente rentable y produce un beneficio económico para el inversionista considerable.
- El tiempo de retorno de la inversión es de aproximadamente nueve años, pero el sistema fotovoltaico tiene una vida útil mínima de veinticinco años.
- Se obtiene una tasa interna de retorno (TIR) mayor en 4 % que la tasa proporcionada por una inversión similar a plazo fijo correspondiente.

CONCLUSIONES

1. Se muestra el desarrollo de una propuesta de diseño para una instalación fotovoltaica de generación distribuida.
2. Las instalaciones fotovoltaicas son opciones para resolver problemas del servicio eléctrico, en lugares a los que operan bajo servicio de mala calidad, en cuanto a niveles de voltaje y continuidad de servicio.
3. Los fundamentos teóricos para el desarrollo de lo que actualmente se conoce como una instalación fotovoltaica, inician con el aprovechamiento de la energía irradiada por el sol.
4. Los elementos principales que componen una instalación fotovoltaica de generación distribuida son: paneles solares e inversor de corriente.
5. Dependiendo de la necesidad de consumo eléctrico de energía en kilovatios-hora que se desee abastecer, se deberán dimensionar los equipos buscando de manera eficiente la mayor cantidad de generación eléctrica posible.
6. Las principales ventajas de una instalación fotovoltaica son: fácil implementación, poco mantenimiento, costo de materia prima de generación nulo, amigable con el ambiente, entre otros.

7. En el entorno económico, un sistema fotovoltaico brinda una mejor tasa interna de retorno que un banco al depositar a plazo fijo el equivalente en dinero del costo de la instalación fotovoltaica, tal y como se demuestra en el análisis financiero realizado en este documento.

RECOMENDACIONES

1. Socializar con entidades gubernamentales la posibilidad de implementar este tipo de sistema para proveer a los habitantes del país que no cuentan con servicio de energía eléctrica la oportunidad de adquirirlo.
2. Desarrollar y aplicar criterios de sostenibilidad que garanticen que la energía renovable y la eficiencia energética sea compatible con los objetivos ambientales y de desarrollo del país.
3. Realizar jornadas de concientización social, para mostrar los beneficios ambientales que poseen los sistemas fotovoltaicos para protegen el ecosistema de la emisión de gases nocivos para el ambiente.
4. Antes de la colocación de los paneles es necesario comprobar que estos funcionen correctamente, evaluando que el voltaje y la intensidad sean los que indica el fabricante en la hoja de especificaciones, debido a que es mucho más fácil comprobarlos antes de instalarlos para detectar posibles fallos de funcionamiento.
5. A los grupos bancarios del país, que consideren la posibilidad de participar como financistas en el sector eléctrico, con el fin de ofrecer productos específicos para los proyectos y poder dar financiación a los nuevos proyectos fotovoltaicos que se encuentran en fase de estudio y desarrollo dentro del país.

6. A los centros de formación técnica que consideren el uso del presente trabajo de graduación, para el desarrollo de técnicos con capacidad de diseñar y ejecutar instalaciones fotovoltaicas de generación distribuida.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ayuntamiento de Pamplona. *Energía solar térmica y fotovoltaica*. EnerArgen. Depósito Legal: 4.031/ 2008. 283 p.
2. Biomass Users Network (BUN-CA). *Manuales sobre energía renovable: solar fotovoltaica*. San José, Costa Rica: 42 p. il. 28x22 cm. ISBN: 9968-9708-9-1, 2004. 97 p.
3. EMPLEO, J. D.-C. *Manual del proyectista solar fotovoltaica*. España: Castilla y León, 2004. 63 p.
4. LAMIGUEIRO, O. P. *Energía solar fotovoltaica*. España: 2010. 193 p.
5. LOJANO CHACHA, Diego Iván. *Generación de energía fotovoltaica en Ecuador*. Ecuador, 2013. 220 p.
6. PERPIÑAN, O. *Energía solar fotovoltaica*. Edición 1.5 Creative 2013. 423 p.
7. Solar, C. R. (n.d.). *Instalación solar fotovoltaica con conexión a red sobre cubierta*. IDAE. 114 p.
8. SALGADO, J. F. *Compendio de energía solar fotovoltaica, térmica y termoeléctrica*. Madrid: Mundi-Prensa, España 2008. 254 p.

