

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA  
SOLAR FOTOVOLTAICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RURAL  
DEL EJE CAFETERO.

ELIZABETH MARÍN CANO  
DIEGO QUINTERO MORENO

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA  
PEREIRA  
2017

METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE ENERGÍA  
SOLAR FOTOVOLTAICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RURAL  
DEL EJE CAFETERO.

ELIZABETH MARÍN CANO  
DIEGO QUINTERO MORENO

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniera e  
Ingeniero Electricista

Director

M.Sc. Jorge Humberto Sanz Álzate  
Profesor Titular Universidad Tecnológica de Pereira

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2017

Nota de Aceptación.

---

---

---

---

---

---

Firma del Director.

Pereira, Junio de 2017

## **Agradecimientos**

A nuestras familias, por su amor y apoyo incondicional.

Al Ingeniero Jorge Humberto Sanz, por su valiosa colaboración y orientación como director del trabajo de grado.

A Oscar Marino Quintero y Oscar Darío Villada, por brindarnos consejos y opiniones oportunas.

## **Resumen**

El desarrollo de una metodología para implementar en proyectos de energía solar fotovoltaica en el eje cafetero, constituye un instrumento base que le permite a municipios, usuarios, entes territoriales y operadores de red, identificar y formular las demandas energéticas insatisfechas y convertirlas en proyectos de inversión. Se busca brindar de forma sistemática y sencilla requerimientos primordiales para tal estructuración, incluyendo las etapas que van desde la recolección de información, la caracterización por recurso energético, hasta los aspectos normativos para los elementos que constituyen una solución solar aislada.

## CONTENIDO

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>3</b>
1.1	Definición del problema	3
1.2	Planteamiento del problema	4
1.3	Justificación	4
1.4	Objetivos	5
1.4.1	Objetivo general	5
1.4.2	Objetivos específicos	5
1.5	Estado del arte	6
1.6	Estructura del trabajo de grado	8
<b>2</b>	<b>ENERGÍA SOLAR</b>	<b>10</b>
2.1	Geometría solar	10
2.1.1	Coordenadas solares	11
2.2	Radiación solar	13
2.2.1	Radiación solar sobre una superficie	14
2.2.2	Radiación solar sobre una superficie inclinada	16
<b>3</b>	<b>SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS</b>	<b>19</b>
3.1	Componentes de un SFA	19
3.1.1	Módulo solar	19
3.1.2	Efectos de la Irradiancia y temperatura	22
3.1.3	Baterías y acumuladores	25
3.1.4	Reguladores e inversores	28
3.1.4.1	Regulador de carga	28
3.1.4.2	Inversores	28
<b>4</b>	<b>PLANTEAMIENTO DE PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RURAL DEL EJE CAFETERO.</b>	<b>30</b>

4.1	Actores involucrados en la implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica en el eje cafetero.....	30
4.2	Aspectos generales para la estructuración de proyectos.....	31
4.2.1	Iniciación del proyecto.....	31
4.2.1.1	Levantamiento de información.....	31
4.2.1.2	Caracterización de la demanda energética.....	32
4.2.1.3	Acercamiento a la comunidad.....	34
4.2.1.4	Investigación ambiental.....	34
4.2.2	Planificación del proyecto.....	34
4.2.3	Estudios técnicos.....	34
4.2.3.1	Estudios Financieros.....	35
4.2.3.2	Formulación ante fondos estatales.....	35
4.2.3.3	Evaluación del proyecto.....	36
4.2.4	Etapa de ejecución.....	36
4.2.4.1	Asignación de recursos.....	37
4.2.4.2	Ejecución de obras.....	37
4.2.4.3	Seguimiento y control.....	37
<b>5</b>	<b>CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL PLANTEAMIENTO DE UN PROYECTO TIPO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL EJE CAFETERO.....</b>	<b>38</b>
5.1	Criterios modelo de diseño.....	38
5.1.1	Solución solar aislada.....	39
5.2	Especificaciones técnicas.....	42
5.3	Normatividad general.....	46
5.3.1	Paneles fotovoltaicos.....	46
5.3.2	Regulador de carga.....	47
5.3.3	Inversores.....	47
5.3.4	Baterías.....	47
5.4	Proceso constructivo.....	47
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>7</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>51</b>
<b>8</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>55</b>

## Lista de Ilustraciones

Ilustración 1.Coordenadas solares.....	12
Ilustración 2. Diagrama solar, Pueblo Rico Risaralda.....	13
Ilustración 3.Tipos de radiación solar sobre una superficie .....	15
Ilustración 4. Célula Solar .....	19
Ilustración 5. Estructura Célula Solar.....	21
Ilustración 6. Característica corriente-tensión de una célula solar en función de la irradiancia. ....	22
Ilustración 7. Característica corriente-tensión de la célula solar en función de la temperatura.....	23
Ilustración 8. Variación porcentual de la tensión de circuito abierto, la intensidad de cortocircuito y la potencia máxima de una célula solar con la temperatura. ....	23
Ilustración 9. Módulo fotovoltaico de 36 células.....	25
Ilustración 10.Sistemas fotovoltaicos con acumulación. a) Con convertidor CC/CC, b) Con inversor CC/CA .....	26
Ilustración 11. Radiación horizontal sobre los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío. ....	40
Ilustración 12.Esquema sistema fotovoltaico aislado.....	42
Ilustración 13.Configuración de paneles: 3 ramas, cada uno con 2 paneles en serie.....	46



## Lista de Tablas

Tabla 1. Valor medio mensual de la irradiación sobre superficie horizontal en diferentes municipios del eje cafetero.....	17
Tabla 2. Valores típicos de potencia para artefactos de uso rural .....	33
Tabla 3. Tipo de solución solar aislada según radiación y piso térmico.....	41
Tabla 4. Proyecto Tipo B .....	43
Tabla 5. Proyecto Tipo C .....	44
Tabla 6. Proyecto Tipo E .....	44
Tabla 7. Proyecto Tipo F.....	45
Tabla 8. Proyecto Tipo G .....	45

## Lista de Anexos

A.0 1 Modulo fotovoltaico, características eléctricas y costo. ....	51
A.0 2 Baterías, parámetros eléctricos y costo.....	52
A.0 3 Regulador de carga, características eléctricas y costos. ....	53
A.0 4 Inversor, especificaciones y costo .....	54

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se definen Zonas No Interconectadas (ZNI) como aquellas “áreas geográficas en donde no se presta el servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado Nacional” [1]. Según los principales operadores de red para los departamentos de Caldas y Quindío, al finalizar el año 2016, se tiene un total de 932 viviendas desatendidas por el sistema de servicio de energía eléctrica interconectada, mientras que las proyecciones del ICEE (Índice de cobertura de energía eléctrica) estimaban para el eje cafetero en el 2015 un total de 413 viviendas sin servicio de energía eléctrica, con usuarios ubicados en localidades rurales de 11 municipios específicos del eje cafetero [2].

La baja capacidad de pago de los usuarios en contraste con el alto costo de expansión del servicio de energía eléctrica (aproximadamente 6.5 millones de pesos por usuario), el desinterés en la atención de los mercados dispersos debido a la baja demanda por parte de los operadores de red, la incierta sostenibilidad de los proyectos energéticos, el crecimiento migratorio del área rural al área urbana, la baja coordinación interinstitucional e inter-organizacional, además de la deficiencia en la formulación y estructuración de los proyectos que dificultan el acceso a los fondos de apoyo financiero; se destacan como las principales barreras para la universalización de éste vital servicio público y su desarrollo. [3]

El gobierno nacional cuenta con el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas IPSE, entidad que tiene como propósito incentivar la participación de las entidades regionales del sector privado en la ejecución y operación de los proyectos energéticos, además de apoyar técnica, administrativa y financieramente a las empresas establecidas, sin embargo este instituto ha tenido que asumir la responsabilidad de la operación y mantenimiento de los proyectos debido a la ausencia de un esquema regional adecuado. [4]

De acuerdo a los puntos expuestos, se hace necesario realizar un análisis regional, donde se identifiquen las necesidades de energía en las localidades rurales del eje cafetero, considerando las opciones de desarrollo local para establecer una metodología que facilite la identificación, formulación y estructuración de proyectos integrales, apoyando el crecimiento y desarrollo de las comunidades rurales y de proyectos independientes ambientalmente responsables.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Los diagnósticos de la situación energética en las ZNI, concluyen que el principal problema para la prestación del servicio eléctrico, la ausencia de las entidades que brinden una gestión acorde a los requerimientos técnicos y administrativos en la implementación de proyectos de energización rural; la estructuración de un modelo empresarial que cumpla con los requisitos legales y se apoye en el uso eficiente de los recursos regionales y de la nación, representa una pieza fundamental para la solución a este problema, puesto que los entes privados o especializados pueden ejercer un mayor control y continua verificación de los proyectos implementados para así garantizar su sostenibilidad.

La energización rural retoma importancia por los planteamientos establecidos en las bases para el plan nacional de desarrollo 2010-2014 y en las bases del plan nacional de desarrollo 2014-2018, donde se plantea que la energía eléctrica promueve la equidad regional, contribuyendo a dar condiciones igualitarias a todos los pobladores, facilitando su potencial productivo y competitivo.

El propósito de plantear una metodología para el desarrollo de proyectos de energía solar y de eficiencia energética, es brindar una herramienta que tenga en cuenta lineamientos financieros, institucionales y regulatorios, asociados a la promoción de fuentes energéticas confiables para localidades con y sin conexión al sistema interconectado nacional, con el fin de ampliar la oferta energética dentro de un uso adecuado de las fuentes regionales, facilitando la promoción de proyectos piloto que involucren la participación del sector privado enfocados a mejorar la calidad de vida de la población cafetera.

Esta metodología es llevada a cabo bajo los principios económicos que sugieren realizar pasos y procedimientos de cumplimiento, con una rigurosidad científica en la caracterización y formulación de proyectos de energización rural.

## **1.3 Justificación**

Dado que la población rural es de gran importancia en todos los países, siendo en las ZNI el origen de los recursos fundamentales como el agua, fuentes de oxígeno y alimentos básicos; las cifras reflejan desigualdades económicas y falta de acceso a los servicios básicos necesarios.

El objeto de este desarrollo metodológico se basa en aportar a la mejora del conocimiento sobre el impacto y las limitantes de los sistemas fotovoltaicos en la agricultura y el desarrollo rural dirigido a la sostenibilidad, con el fin de conseguir un compromiso político y económico para los proyectos y programas de energía fotovoltaica.

Este aporte impactaría a la zona con desarrollo educativo, productivo y doméstico, ya que contribuiría a la implementación de sistemas de riego, fertilización, preparación de tierras, tareas básicas como la elaboración y conservación de alimentos y demás beneficios que trae la electricidad.

Actualmente la tecnología solar fotovoltaica **no es competitiva** en Colombia, pues los costos de estas instalaciones son altos comparados con la mayoría de países que tienen una industria solar desarrollada, como es el caso de los países europeos. Sin embargo, se pretende propiciar un escenario optimista para la inclusión de proyectos de generación con energía renovable gracias a la implementación de la Ley 1715 de 2014, considerando que para el periodo comprendido entre 2015-2030 Colombia crecerá en una nueva industria con inversión en la generación limpia de electricidad [5].

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Proponer alternativas para la generación de energía eléctrica y utilización de fuentes renovables en la zona rural del Eje cafetero, que ayuden a promover el desarrollo integral de estas comunidades, logrando aumentar la producción agropecuaria y el desarrollo social, así como incentivar el uso de las energías renovables como fuente primaria, para mitigar el impacto negativo al medio ambiente y así garantizar un desarrollo viable y eficiente.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Presentar la energía solar fotovoltaica como alternativa para la generación de energía eléctrica para su posible utilización en iluminación interior, exterior, sistemas de bombeo y refrigeración.
- Proponer el uso de la tecnología Led y Microled en sistemas de iluminación alimentados eléctricamente por paneles fotovoltaicos.
- Realizar un análisis técnico de las capacidades de carga típicas en viviendas del sector rural, aplicando una guía de proyectos tipo para cada uno de los municipios del eje cafetero.

## 1.5 Estado del arte

Con el fin de iniciar una transición hacia el uso de los recursos energéticos de carácter renovable, China, Alemania, España y Estados Unidos, se consolidan hoy en día como países pioneros en el desarrollo de las mayores capacidades instaladas en tecnologías para el aprovechamiento de la energía hidráulica, eólica, solar, geotérmica y de biomasa, como fuentes de origen renovable. Dada la disponibilidad de al menos una de las fuentes catalogadas como renovables en cualquier posición geográfica del planeta, y la abundancia de una o varias de éstas fuentes en algunas regiones favorecidas, representan grandes potenciales energéticos para ser aprovechados de tal forma que la relación costo-beneficio aumente en la medida en que la investigación, desarrollo y despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años [6].

En el año 2010, el Ministerio de Minas y Energía (MME) estableció a través de la adopción del Plan de acción indicativo 2010-2015 del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía y demás formas de energía no convencionales (PROURE) metas indicativas para lograr una participación del 3,5% de Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) en términos de la capacidad instalada del Sistema Interconectado Nacional (SIN) para el año 2015, e incrementar dicha participación al 6,5% para el año 2020 [6]. De acuerdo con cifras disponibles a diciembre de 2014, a tal fecha, la participación de las FNCE en el SIN era del 2,71% en capacidad instalada, hecho que obedece a las barreras existentes para una mayor penetración de estas fuentes.

Así mismo, la Resolución MME 18-0919 de 2010 estableció metas equivalentes para el caso de las Zonas no interconectadas (ZNI), que consisten en una participación de 20% y 30% de FNCE en las capacidades de generación instaladas, para los años 2015 y 2020, respectivamente. Al año 2014, las cifras que maneja el Instituto de Planificación y Promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no interconectadas (IPSE) proyectan la existencia de 167 MW en capacidad instalada y 151 MW disponibles, distribuidos en unas 1.269 plantas de generación, en tanto que para el año 2013 se reporta que se tenían 16,33 MW de capacidad instalada en FNCE, con lo cual se podría hablar de un orden de participación del 10,8% [6].

La energía solar hoy en día representa la segunda fuente avanzada de energía renovable de mayor penetración en el mundo, después de la eólica, con una producción que equivale a 0,85% y 1% de la demanda mundial de electricidad lograda a través de una capacidad instalada de 139 GW en 2013. En este mismo año ésta tecnología superó por primera vez en términos de crecimiento a la energía eólica con un incremento en la capacidad instalada de 39 GW (frente a 35 GW de eólica), presentando a la vez un crecimiento promedio del 55% anual para los últimos 5 años. Países como Alemania, China e Italia lideran los mercados de la energía solar contando con capacidades instaladas del orden de 36, 19 y 18 GW,

respectivamente. [6]

Para el caso de Colombia, las fuentes disponibles de información de recurso solar indican que el país cuenta con una irradiación promedio de 4,5 kWh/m<sup>2</sup>/día [7], la cual supera el promedio mundial de 3,9 kWh/m<sup>2</sup>/día, y está muy por encima del promedio recibido en Alemania (3,0 kWh/m<sup>2</sup>/día), país que hace mayor uso de la energía solar fotovoltaica a nivel mundial, con aproximadamente 36 GW de capacidad instalada a 2013 [8]. Esto representa para Colombia y particularmente para los municipios del eje cafetero una gran ventaja al tener un buen recurso energético promedio a lo largo del año y al no experimentar estaciones climáticas.

Dentro de las múltiples tecnologías renovables existe una gran variedad y gran expectativa en cuanto a los costos actuales y el potencial de reducción de éstos a futuro, teniendo en cuenta que se estima la disminución de precios cuando cuenten con el impulso necesario para el desarrollo y evolución en lo referente a materia prima y al desarrollo de las tecnologías auxiliares como lo es el almacenamiento de energía.

Los costos de la generación actual y la reducción de los mismos a futuro es el eje de desarrollo a nivel académico. Teniendo en cuenta este factor, es posible clasificar el conjunto de tecnologías renovables en cuatro categorías diferenciadas [9]:

- Tecnologías maduras de bajo costo: aquellas tecnologías renovables con costos de generación más bajos y con menor recorrido en disminución de costos debido a la madurez de la tecnología.
- Tecnologías en desarrollo: aquellas tecnologías con elevados costos de generación en la actualidad, pero con gran recorrido de reducción de costos (*ej. solar fotovoltaica y termoeléctrica*).
- Otras tecnologías maduras, con opciones limitadas de reducción de costo, sin embargo, con costos más competitivos que las tecnologías en desarrollo, pero menos competitivos que las energías renovables líderes en costos (*ej. biomasa*).
- Tecnologías con alto nivel de incertidumbre respecto a su viabilidad comercial, (*ej. marina*), donde los avances que se alcancen en los próximos años serán claves para que alcancen escala comercial.

La energía solar fotovoltaica está considerada, dentro de las fuentes de tipo renovable, como la de más reciente aparición. Los módulos fotovoltaicos están contruidos principalmente de silicio monocristalino y policristalino, debido a sus características de sencillez, modularidad, fiabilidad y operatividad, la energía fotovoltaica presenta un gran campo de aplicaciones para pequeños consumos, como fuente de electricidad en el mismo lugar de la demanda. Por esta razón los sistemas fotovoltaicos son una buena opción para electrificación de sitios aislados de la red de interconexión eléctrica, principalmente en las zonas rurales.

Los sistemas fotovoltaicos están compuestos principalmente por un módulo

fotovoltaico, un regulador de carga, un inversor, un banco de baterías y la carga a ser alimentada.

La conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica de distribución consiste en generar electricidad mediante paneles solares fotovoltaicos e inyectarla a la misma. En países como España, Alemania o Japón, las compañías de distribución eléctrica están obligadas por ley a comprar la energía inyectada a su red por estas centrales fotovoltaicas.

El precio de venta de la energía también está fijado por ley, de manera que se incentiva la producción de electricidad a partir de energía solar, al resultar estas instalaciones amortizables en un periodo de tiempo que puede oscilar entre los 7 y 10 años.

Este tipo de centrales fotovoltaicas pueden ir desde pequeñas instalaciones de 1 a 5 kWp (kilovatios pico o máxima potencia que genera el panel) en terrazas o tejados, a instalaciones de hasta 100 kWp (kilovatios pico) sobre cubiertas de bodegas industriales, hasta plantas de varios Megavatios (MW); destacando ventajas como el no consumo de combustible, no producción de polución ni contaminación ambiental, son silenciosos, tienen una vida útil superior a los 20 años, son resistentes a condiciones climáticas extremas y tienen bajo mantenimiento. Sin embargo es de considerar desventajas, debido a limitaciones que deben llevar a sus usuarios a la moderación en el consumo y al empleo de aparatos de consumo con elevados rendimientos. Los rendimientos del sistema aún son bajos, básicamente por las bajas eficiencias de las celdas solares (15 – 20 %), de igual forma el precio y el gran tamaño de los paneles solares frenan su expansión, puesto que la tecnología disponible actualmente requiere de una gran superficie de captación, además de su dependencia intrínseca a factores externos (condiciones climáticas) [6].

## **1.6 Estructura del trabajo de grado**

El trabajo de grado está organizado de la siguiente manera; en el capítulo 2, se muestran conceptos relevantes que describen el aprovechamiento de la energía solar y su aplicación en la producción de electricidad, se muestra la importancia del diagrama solar como herramienta para caracterizar el comportamiento energético aplicable a la ubicación de paneles fotovoltaicos, en el capítulo 3, se describen los componentes de un sistema solar fotovoltaico aislado, que desde el punto de vista técnico, económico y ambiental son una alternativa para lugares donde no se dispone de suministro de la red de distribución eléctrica o es necesaria una gran inversión económica para alcanzarla, en el capítulo 4, se describen las pautas a tener en cuenta para el planteamiento de proyectos de energía solar fotovoltaica,



incluyendo una serie de actividades con el fin de estructurar de manera correcta el alcance, formulación, consecución de recursos, implementación y seguimiento de los proyectos de energía solar fotovoltaica. En el capítulo 5, se plantea como caso de interés la demanda a atender para una vivienda rural unifamiliar para cualquiera de los 71 municipios ubicados en el eje cafetero, distinguiendo criterios vitales para su implementación, además de diferenciar las condiciones que limitan y distinguen cada tipo de proyecto.

Por último, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones.

## 2 ENERGÍA SOLAR

La energía solar es una fuente renovable e inagotable de energía utilizada para la producción de calor y electricidad, la energía solar se caracteriza por ser un producto ecológicamente limpio que no produce emisiones peligrosas.

La utilización de la energía solar es un proceso relativamente nuevo para la producción de electricidad. El rápido desarrollo de la industria comenzó a mediados del año 2000 y fue impulsada por las políticas (principalmente por países de la UE) para reducir la dependencia de los hidrocarburos en la industria y el deseo de alcanzar los objetivos de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. El rápido desarrollo de la industria ha contribuido a la disminución de los costos de producción de los paneles y al aumento progresivo de su eficiencia [10].

### 2.1 Geometría solar

El movimiento terrestre se compone de una traslación alrededor del sol y un giro sobre su eje. En este movimiento alrededor del sol, la tierra sigue una elipse de baja excentricidad en la que el sol ocupa uno de los focos. Debido a la baja excentricidad de la elipse, la distancia entre el sol y la tierra durante este movimiento de traslación definido en un año es variable. La ecuación 1 describe la distancia recorrida.

$$r = r_0 \left\{ 1 + 0,017 \sin \left[ \frac{2\pi \cdot (d_n - 93)}{365} \right] \right\} \quad (1)$$

Donde  $d_n$  es el número del día del año (1 el 1 de enero) y  $r_0$  es la distancia promedio en este trayecto  $r_0 = 1.496 \times 10^8 km = 1UA$  denominada unidad astronómica.

En el movimiento de giro, la tierra rota sobre sí misma alrededor de su eje polar, perpendicular al plano ecuatorial terrestre. Entre el eje polar y el plano de la elipse hay un ángulo constante de  $23,45^\circ$ . Esta inclinación es la causante de las estaciones, de las diferentes duraciones de las noches y los días en verano y en invierno y se denomina declinación. La ecuación 2 permite su cálculo, aunque la declinación varía, y se puede suponer constante durante un mismo día.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \sin \left( \frac{2\pi \cdot (d_n + 284)}{365} \right) \quad (2)$$

Geográficamente es posible definir con precisión una posición cualquiera de la tierra empleando las coordenadas de latitud y longitud, referenciadas a la línea del Ecuador y al meridiano de Greenwich respectivamente.

La latitud  $\varphi$ , es la distancia que existe entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el ecuador medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto. Esta medida de  $0^\circ$  a  $90^\circ$  y se define como positiva en el hemisferio norte y negativa en el hemisferio sur.

De forma análoga, la longitud es la distancia angular entre un punto cualquiera de la superficie terrestre y el meridiano de Greenwich, este meridiano divide a la tierra en dos hemisferios, Oriental y Occidental. La longitud se mide de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  y se define como positiva hacia el hemisferio occidental y negativa hacia el hemisferio oriental. Por ser el meridiano de referencia a Greenwich le corresponde una longitud cero.

### 2.1.1 Coordenadas solares

El movimiento que realiza la tierra es percibido como un movimiento aparente del sol a través de la esfera celeste, donde cada punto de esta esfera es una dirección en el cielo vista desde la tierra.

En el sistema de coordenadas de la esfera celeste, relacionado con el usado para definir la longitud y latitud terrestres, se especifica la posición del sol mediante dos ángulos denominados elevación y acimut [11].

Las coordenadas solares, se definen respecto a la dirección vertical que apunta hacia el centro de la tierra y hacia arriba interceptando la esfera celeste en un punto denominado *cenit*. La unión con el hemisferio opuesto de la esfera celeste define su punto inverso denominado *Nadir* (Ilustración 1). Los ángulos que forman el sistema de coordenadas solar son; *Elevación Solar*  $\gamma_s$  (formado por los rayos solares con la horizontal; toma valores de  $(90^\circ - \varphi - \delta)$  en el solsticio de invierno a  $(90^\circ - \varphi + \delta)$  en el solsticio de verano, donde  $\varphi$  es la latitud del lugar y  $\delta$  la declinación),  $\psi_s$  *Acimut Solar* (formado por el meridiano del sol y el meridiano del lugar, toma como referencia el Sur en el hemisferio norte y el norte en el hemisferio sur, tiene valores positivos  $\theta_{zs}$  de  $0^\circ$  a  $180^\circ$  hacia el oeste y negativos de  $0^\circ$  a  $-180^\circ$  hacia el este) y el *Ángulo Cenital* (formado por la dirección del sol y la vertical, es complementario a la elevación solar).

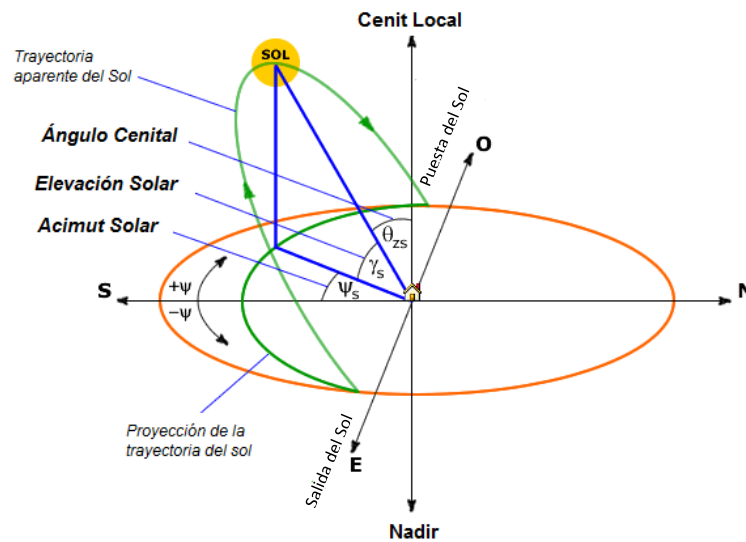


Ilustración 1. Coordenadas solares

El conjunto de trayectorias del sol en un lugar determinado se representa en una carta solar, esta refleja la posición del sol, acimut y elevación, en cada hora desde el punto de vista de un observador que mira hacia el Sur (en el hemisferio norte. En el hemisferio sur mira hacia el Norte). Este instrumento es de gran utilidad para determinar las pérdidas por sombras que se producen en un generador fotovoltaico.

La Ilustración 2, muestra la carta solar del municipio de Pueblo Rico Risaralda.

Se toma como referencia la línea que representa un mes; Octubre de 2017, se sitúa la posición en el Este, amanece a las 6:00 AM con una elevación de  $2^\circ$  y acimut  $105^\circ$ , a las 11 de la mañana (11 AM), presenta una elevación de  $71^\circ$  y acimut  $135^\circ$ , a las 5 de la tarde (5 PM) se tiene una elevación de  $12^\circ$  y acimut  $260^\circ$ .

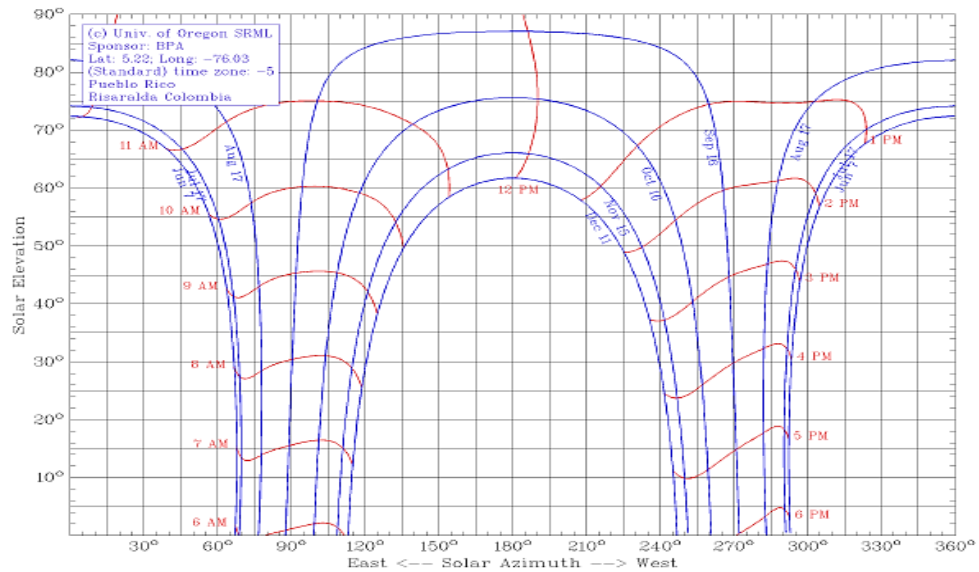


Ilustración 2. Diagrama solar, Pueblo Rico Risaralda.

## 2.2 Radiación solar

La radiación solar es la energía que el sol genera mediante reacciones nucleares de fusión que se producen en su núcleo. Esta energía se transmite en forma de radiación electromagnética alcanzando la atmósfera terrestre en un espectro electromagnético de longitudes de onda que van aproximadamente de  $0,15 \mu m$  a  $4 \mu m$ .

La radiación electromagnética proveniente del Sol se propaga radialmente en el espacio vacío, sin sufrir pérdidas apreciables por interacción con medios materiales.

A través de la atmósfera, antes de llegar a la superficie terrestre, la radiación solar es sometida a diferentes procesos de reflexión, absorción y difusión que alteran sus características. Si bien la reflexión en las nubes disminuye la radiación que impacta sobre la superficie terrestre, mientras que la absorción por ozono,  $CO_2$  y vapor de agua modifica las características espectrales de la radiación y la dispersión por partículas modifica la distribución espacial de la radiación.

Estos efectos varían según la cantidad de atmósfera que ha de atravesar la radiación solar para una longitud de onda determinada (*Ley de Beer Lambert*). Para especificar esta distancia se emplea el concepto de masa de aire (AM, *air mass*), como la relación entre el camino recorrido por los rayos directos del sol a través de la atmósfera hasta la superficie receptora y el que recorrerán en caso de incidencia vertical.

La masa de aire se calcula con la ecuación 3. Donde  $\gamma_s$  es el ángulo de elevación solar en grados y  $\theta_{zs}$  es el ángulo o distancia cenital.

$$AM = \frac{1}{\gamma_s} = \frac{1}{\cos \theta_{zs}} \quad (3)$$

La potencia máxima especificada de un módulo fotovoltaico está usualmente indicada para un valor de AM igual a 1,5; lo cual corresponde a un ángulo cenital  $\theta_{zs}$  de 48.2°.

### 2.2.1 Radiación solar sobre una superficie

Para medir cuantitativamente la radiación solar se utilizan las magnitudes de potencia y energía, de la radiación que llega a una unidad de superficie, estas son denominadas *Irradiancia*  $\psi$  e *Irradiación*.

$$\psi = \frac{P_{in}}{A_s} \quad (4)$$

De la ecuación 4, se define que la irradiancia es la potencia incidente por unidad de superficie, medida en vatios por metro cuadrado [W/m<sup>2</sup>]. En general la irradiancia es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del sol, razón por la cual el valor de la irradiancia varía de acuerdo a las estaciones del año.

La irradiación es definida como la suma de las irradiancias en un periodo de tiempo determinado, es decir la cantidad de energía solar recibida durante un tiempo. Ésta es expresada en Joules por metro cuadrado (J/m<sup>2</sup> por hora, día semana, mes año, etc. según el caso).

Para el cálculo de la irradiancia solar que incide sobre una superficie, se distinguen tres componentes de la radiación.

- Radiación Directa,  $B$  : la forman los rayos recibidos en línea recta del Sol.
- Radiación Difusa,  $D$  : procedente de todo el domo solar, excluyendo al Sol. Es formada por rayos dispersados por la atmósfera en dirección al receptor.
- Radiación reflejada o de albedo  $R$  o  $AL$  : fracción de radiación procedente de la reflexión en el suelo. Regularmente su aporte es muy pequeño y puede ser despreciada.

$$G = B + D + R \quad (5)$$

La suma de las radiaciones descritas, recibe el nombre de *radiación global*, esta es la radiación solar total que recibe la superficie de un receptor.

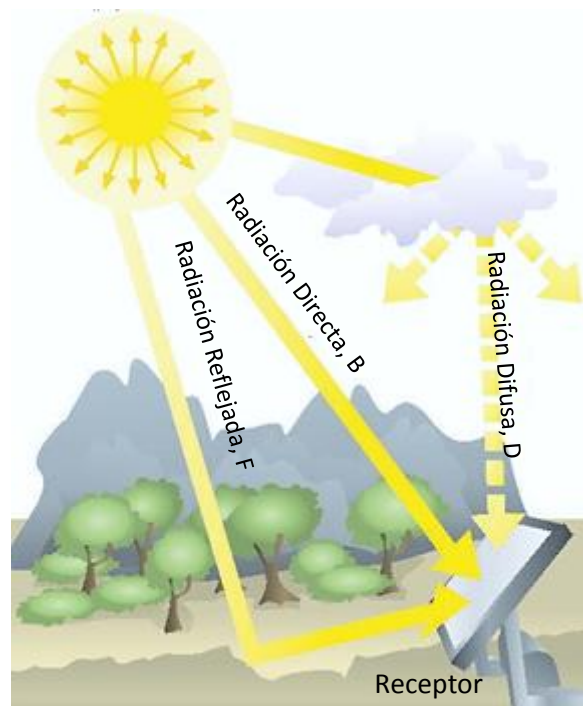


Ilustración 3. Tipos de radiación solar sobre una superficie

Experimentalmente la irradiancia medida en la parte externa de la atmósfera terrestre es  $1367 \text{ W/m}^2$ . Este valor recibe el nombre de constante solar  $B_0$  y es recibida cuando la tierra está situada a una distancia de  $1 \text{ UA}$  del sol.

En condiciones de masa de aire  $AM$  igual a 1, el cual es el recorrido atmosférico mínimo, la irradiancia se reduce, llegando a la superficie terrestre con  $1000 \text{ W/m}^2$ ; valor de irradiancia normalizado empleado para definir los parámetros nominales de los módulos fotovoltaicos. [11]

Para expresar de manera adecuada el comportamiento de la radiación solar es importante incluir la forma de cada componente de la irradiancia o irradiación, el instante en que es recibida, el periodo promedio de los valores y el lugar de incidencia.

Para expresar el lugar de incidencia es viable emplear la inclinación o acimut de la superficie y orientación  $(\alpha, \beta)$ , si se encuentra en posición horizontal con (0), si la superficie es perpendicular al vector solar con (n) o si se está directamente en el plano del generador con (1).

Interpretando de una expresión como  $G_{d,m}(1)$ , como una irradiancia global, para un promedio mensual, en el plano del generador.

## 2.2.2 Radiación solar sobre una superficie inclinada

Es posible calcular el valor promedio anual de la irradiación global sobre una superficie inclinada a partir de los valores medios anuales o mensuales de la irradiación global diaria horizontal  $G_a(0)$ , utilizando como datos de partida la latitud  $\varphi$  de la localidad y la inclinación óptima  $\beta_{opt}$  de la superficie del generador [12].

La irradiación global anual que se obtiene sobre la superficie con inclinación óptima y acimut cero es:

$$G_a(\beta_{opt}) = \frac{G_a(0)}{1 - 1,46 \times 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \times 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2} \quad (6)$$

Donde  $G_a(\beta_{opt})$  será el valor promedio anual de la irradiación global sobre una superficie con inclinación óptima, expresado en kWh/m<sup>2</sup>.

$G_a(0)$  expresa el promedio anual de la irradiación global horizontal en kWh/m<sup>2</sup> y  $\beta_{opt}$  es la inclinación óptima de la superficie en grados, expresada como:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |\varphi| \quad (7)$$

Es conveniente orientar la superficie del generador de forma óptima es decir  $\alpha = 0$  y  $\beta_{opt}$ . Sin embargo esta precisión no siempre se puede cumplir, debido a factores limitantes como la estructura arquitectónica, la resistencia al viento, la acumulación de residuos, nieve y entre otros.

Las pérdidas ocasionadas debido a inclinaciones y orientaciones no óptimas, se consideran aplicando un coeficiente de reducción de energía denominado factor de irradiación  $FI$  calculado con las siguientes expresiones [11]:

Para ángulos de inclinación:  $15^\circ < \beta \leq 90^\circ$

$$FI = 1 - \left[ 1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 + (3,5 \cdot 10^{-5}) \cdot \alpha^2 \right] \quad (8)$$

Para ángulos de inclinación:  $\beta < 15^\circ$

$$FI = 1 - \left[ 1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{opt})^2 \right] \quad (9)$$



Donde  $FI$  es el factor de irradiación (adimensional) y  $\beta$  es la inclinación real de la superficie en grados ( $^{\circ}$ ).

Luego la irradiación sobre la superficie con inclinación y acimut no óptimos se calcula multiplicando la irradiación sobre la superficie con inclinación óptima por el factor de irradiación.

$$G_a(\alpha, \beta) = FI \cdot G_a(\beta_{opt}) \quad (10)$$

En la tabla 1, se muestra el valor medio mensual de la irradiación sobre superficie horizontal en diferentes municipios del eje cafetero.

**Valor Medio Mensual De La Irradiación Global Diaria Horizontal**  $[G_{da}(0)] [kW \cdot h / (m^2 \cdot día)]$

Municipio	Longitud y Latitud ( $^{\circ}$ )	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
Aguadas (Caldas)	5.609°, -75.456°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	3,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51
Aranzazu (Caldas)	5.271°, -75.491°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	4,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51
La Dorada (Caldas)	5.454°, -74.665°	4,83	4,87	4,93	4,75	4,86	5,07	5,47	5,53	5,28	4,8	4,62	4,54	4,96
Manzanares (Caldas)	5.252°, -75.157°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	3,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51
Norcasia (Caldas)	5.574°, -74.889°	4,83	4,87	4,93	4,75	4,86	5,07	5,47	5,53	5,28	4,8	4,62	4,54	4,96
Pijao (Quindio)	4.333°, -75.705°	4,55	4,72	4,77	4,52	4,52	4,6	4,92	4,97	4,8	4,56	4,44	4,37	4,64
Risaralda (Caldas)	5.164°, -75.767°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	4,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51
Salamina (Caldas)	5.408°, -75.487°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	3,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51
Salento (Quindio)	4.637°, -75.571°	4,55	4,72	4,77	4,52	4,52	4,6	4,92	4,97	4,8	4,56	4,44	4,37	4,62
Santuario (Risaralda)	5.075°, -75.964°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	3,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51
Villamaría (Caldas)	5.045°, -75.515°	4,35	4,51	4,49	4,31	4,44	4,52	4,93	3,95	4,7	4,47	4,3	4,12	4,51

Tabla 1. Valor medio mensual de la irradiación sobre superficie horizontal en diferentes municipios del eje cafetero.

Se calcula la irradiación global anual que recibe una superficie inclinada con inclinación óptima y acimut cero a ser instalada en Norcasia (Caldas).

De la tabla 1, para Norcasia se tiene una latitud de  $\varphi = 5.574^{\circ}$  y un valor medio anual de la irradiación global diaria horizontal,  $G_{da}(0) = 4,96 \text{ kWh/m}^2$ .

Inclinación óptima:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \cdot |\varphi| = 3,7 + 0,69 \cdot 5,574 = 7,55^{\circ}$$

Irradiación global anual horizontal:

$$G_a(0) = 365 \cdot 4,96 = 1810,4 \text{ kWh} \cdot \text{h} / \text{m}^2$$

Irradiación global anual para la superficie con inclinación óptima:

$$G_a(\beta_{opt}) = \frac{G_a(0)}{1 - 1,46 \times 10^{-4} \cdot \beta_{opt} - 1,19 \times 10^{-4} \cdot \beta_{opt}^2} = \frac{1810,4}{1 - 1,46 \times 10^{-4} \cdot 7,55 - 1,19 \times 10^{-4} \cdot 7,55^2} = 1824,8 \text{ kW} \cdot \text{h} / \text{m}^2$$

### 3 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS AUTÓNOMOS

Los sistemas fotovoltaicos autónomos (SFA), son utilizados para abastecer de energía eléctrica a receptores o viviendas aisladas que no tienen conexión a la red de distribución de energía eléctrica.

En general la mayoría de sistemas fotovoltaicos autónomos son de poca potencia, algunos disponen de un único módulo y generan potencias con magnitudes en decenas de vatios hasta los que generan potencias incluso de 10 kW.

Los sistemas fotovoltaicos autónomos, desde el punto de vista técnico, económico y ambiental para lugares donde no se dispone de suministro de la red de distribución eléctrica o es necesaria una gran inversión económica para alcanzarla.

#### 3.1 COMPONENTES DE UN SFA

##### 3.1.1 Módulo solar

La celda solar es un dispositivo que convierte la energía solar en electricidad, basada en el efecto fotovoltaico. Cuando los fotones debidos a la luz solar son absorbidos por la célula éstas transfieren la energía del fotón a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico.

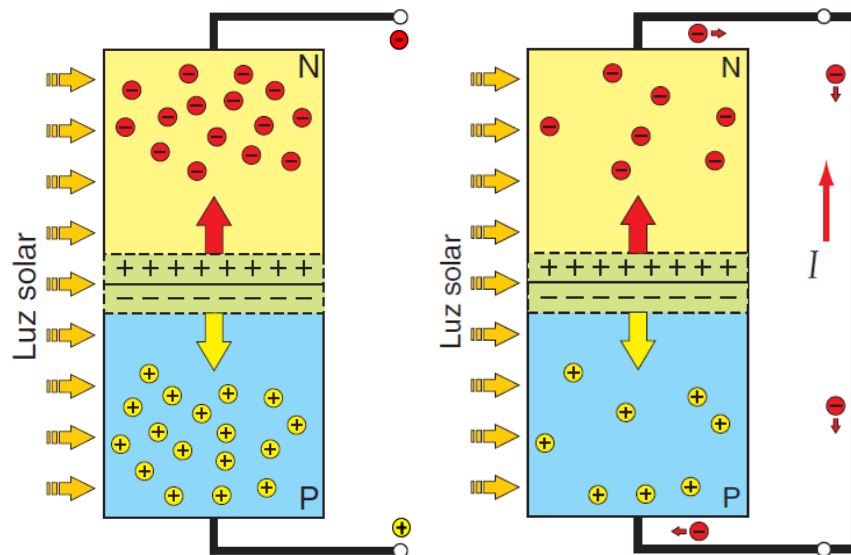


Ilustración 4. Célula Solar

Las partes más importantes de la célula solar son las capas de semiconductores, ya que es donde se crea la corriente de electrones. Estos semiconductores son especialmente tratados para formar dos capas de diferente dopados (tipo p y tipo N) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en la otra. Cuando la luz solar atraviesa la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Debido a estas propiedades las células se fabrican de este tipo de materiales ya que actúan como aislantes a bajas temperaturas y como conductores cuando se aumenta la energía [12].

### **Tipos de paneles solares**

- ❑ **Silicio Mono cristalino** Son constituidas principalmente de cristales puros de silicio por lo que son las más eficientes. Sin embargo su costo es el más elevado.
- ❑ **Silicio Poli cristalino** Son construidas de silicio pero con una estructura más aleatoria. Por tanto son menos eficientes pero más económicas en su fabricación.
- ❑ **Materiales Amorfos** Son construidas de silicio sin una estructura cristalina. Son muy económicos pero poco eficientes.

Para cada tipo de panel la celda está encapsulada en un acetato con el fin de proteger el panel. En la parte superior se utiliza una capa de vidrio templado con un material anti reflejo para que la mayor parte de la energía de los rayos se transfiera a la celda.

Una célula solar está construida a partir silicio, un material semiconductor con un espesor aproximado entre 100 y 500  $\mu\text{m}$  a la cual se le ha mezclado impureza como el Boro (impureza trivalente, región P) e igualmente se le adiciona una pequeña capa de Fósforo (impureza pentavalente, región N), obteniendo así la unión PN.

Para aumentar la eficiencia de la célula, la cara que recibe la luz solar se somete a un proceso denominado texturización, que crea micro pirámides superficiales para reducir la reflexión en la superficie de la célula. Sobre esta superficie se dispone una rejilla metálica que proporciona una buena conexión eléctrica dejando al descubierto la mayor cantidad posible de superficie receptora de luz solar. Esto se consigue disponiendo láminas metálicas interconectadas muy delgadas, estas láminas son el terminal negativo de la célula y el terminal positivo se obtiene laminando totalmente el otro lado la célula. Para terminar la construcción de la célula

se aplica una capa de material anti reflexivo para que así se facilite el ingreso de fotones.

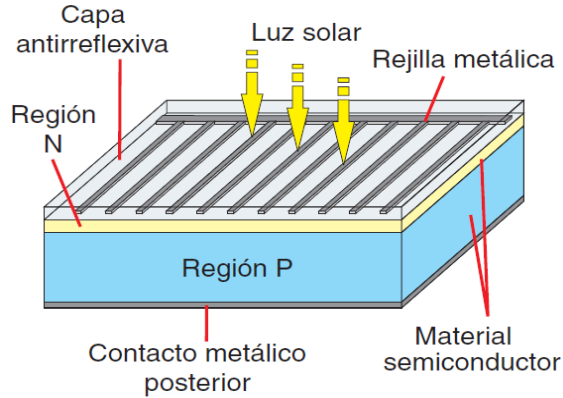


Ilustración 5. Estructura Célula Solar

### Potencia máxima y eficiencia

La potencia máxima de la célula está dada por el producto de la corriente y la tensión máxima entregada por ésta a la carga conectada.

$$Pl = Vl * Il \quad (11)$$

Donde,  $Pl$  es la potencia entregada por la célula [W],  $Il$  es la intensidad de corriente suministrada por la célula [A] y  $Vl$  la tensión en el receptor conectado a la célula [V].

La eficiencia  $\eta$  indica el porcentaje de energía solar recibida sobre la superficie de la célula que se convierte en energía eléctrica.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{G \times Ac} \quad (12)$$

Donde,  $\eta$  es la eficiencia o rendimiento de conversión [%],  $P_{\max}$  la potencia máxima [W],  $G$  la irradiación en condiciones estándar de medida y  $Ac$  el área superficial de la célula [m<sup>2</sup>]

### 3.1.2 Efectos de la Irradiancia y temperatura

Como se mencionó, los valores de irradiancia normalmente van de 0 a 1000 W/m<sup>2</sup> y soportan temperaturas de hasta 50°C por encima de la temperatura ambiente. Es necesario tener en cuenta el efecto que producen estas condiciones en la célula solar. En la ilustración 6, se evidencia el efecto de la irradiancia en la característica corriente – tensión (i-u) de una célula celular en condiciones constantes de 25° grados. Allí se evidencia como la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$  varía con la irradiancia, mientras que la tensión de circuito abierto  $U_{oc}$ , lo hace mínimamente respecto a los cambios ésta, considerándola para efectos prácticos constante. [12]

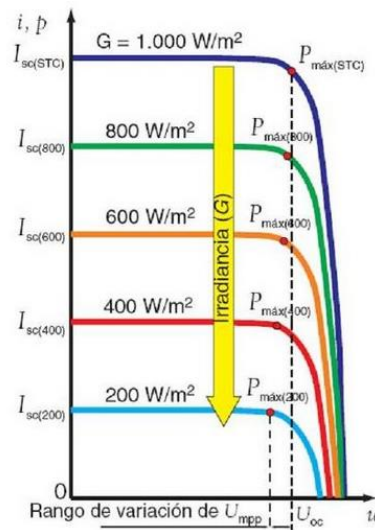


Ilustración 6. Característica corriente-tensión de una célula solar en función de la irradiancia.

De esta manera, la potencia generada por una célula solar, será mayor o menor según la irradiancia a la que se esté expuesta. En la Ilustración 6, se definen con los puntos de funcionamiento la máxima potencia para cada valor de irradiancia.

La Ilustración 7, muestra el efecto de la temperatura sobre la característica corriente-tensión, es de notar como la tensión de circuito abierto disminuye cuando aumenta la temperatura y la corriente de cortocircuito aumenta cuando esta aumenta, aunque este cambio es pequeño y puede considerarse constante, es evidente que si esta situación se presenta, la potencia entregada por la célula como producto de la tensión por la corriente, disminuirá cuando aumente la temperatura [12].

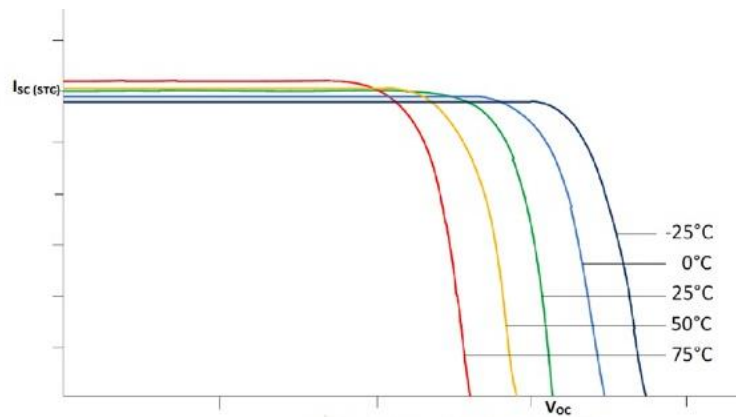


Ilustración 7. Característica corriente-tensión de la célula solar en función de la temperatura.

La relación existente con la temperatura y la tensión de circuito abierto, la corriente de corto circuito y la potencia máxima de una célula solar, se muestra en la Ilustración 8 mediante una variación porcentual. Se refleja como la potencia máxima es inferior al 90% con temperaturas cercanas a los  $50^{\circ}\text{C}$ , valor que se puede alcanzar con una temperatura ambiente de  $30^{\circ}\text{C}$  ( $20^{\circ}\text{C}$  a  $45^{\circ}\text{C}$  puede alcanzar una célula por encima de la temperatura ambiente en condiciones de mala disipación de calor).

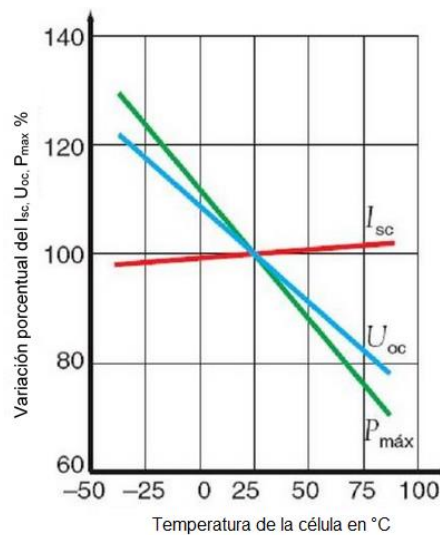


Ilustración 8. Variación porcentual de la tensión de circuito abierto, la intensidad de cortocircuito y la potencia máxima de una célula solar con la temperatura.

La temperatura de trabajo de una célula solar depende de la temperatura ambiente y de la irradiancia, su cálculo aproximado se muestra a continuación.

Donde,  $T_c$  es la temperatura de trabajo de la célula ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_a$  es la temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $TONC$  es la temperatura de operación nominal de la célula (NOCT por sus siglas en inglés y comúnmente especificada por fabricantes alrededor de  $45^{\circ}\text{C}$ ), y  $G$  es la irradiancia en vatios por metro cuadrado ( $\text{w}/\text{m}^2$ ).

$$T_c = T_a + G \cdot \frac{TONC - 20}{800} \quad (13)$$

Si bien, el principal efecto del aumento de la temperatura en la célula es la reducción de la potencia entregada por esta, siendo ideal la operación a una temperatura ambiente y en condiciones donde disipadores de calor puedan reducir la temperatura de la célula. Se debe tener especial cuidado para las instalaciones ubicadas en los municipios de Norcasia, Viterbo, Victoria y la Dorada del departamento de Caldas y en La Virginia del departamento de Risaralda ya que estos municipios están ubicados a menos de 1000 msnm y se presentan temperaturas promedio iguales o superiores a los  $25^{\circ}$  centígrados.

### **Módulos fotovoltaicos**

Ya que una célula solar produce una potencia típica de 1.5 W, esta magnitud no es suficiente para un uso común de esta tecnología y es necesario conectar varias células para obtener niveles de tensión y potencia útiles.

La mayoría de los módulos fotovoltaicos tienen entre 36 y 96 células conectadas en serie y en algunos casos pueden tener conexiones en paralelo de grupos en serie, además de estas configuraciones el módulo tiene protecciones atmosféricas, aislamientos dieléctricos y una estructura metálica que ayude a su manipulación e instalación.

### **Componentes de los módulos fotovoltaicos**

Los módulos fotovoltaicos están compuestos por:

- Una cubierta frontal, típicamente de vidrio templado entre 3 y 4mm de espesor con el fin de proteger a la célula de agentes externos que puedan dañar el módulo.
- Una cubierta posterior de Polivinilo fluoruro o de poliéster, que también protege al módulo de humedad y otros posibles daños por agentes



atmosféricos.

- Un marco de aluminio para proporcionar rigidez mecánica al módulo.
- Caja de conexiones con bornes para facilitar la conexión a la carga.
- Las células que son conectadas por medio de soldaduras en grupos definidos por los fabricantes según el requerimiento eléctrico en la ilustración 9 se muestra un módulo de 36 células.

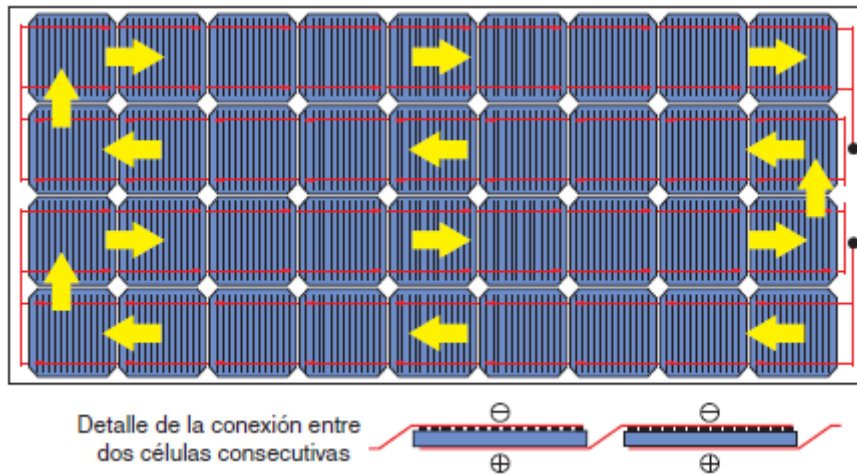


Ilustración 9. Módulo fotovoltaico de 36 células

### 3.1.3 Baterías y acumuladores

Un sistema fotovoltaico autónomo (SFA), produce energía eléctrica para satisfacer la demanda de cargas eléctricas no conectadas a la red. Estos sistemas emplean un sistema de acumulación energética para almacenar la energía excedente generada y utilizarla en periodos en los que la generación es inferior al consumo.

Una batería secundaria o recargable es un acumulador electroquímico, con la propiedad de almacenar energía eléctrica mediante una transformación en energía electroquímica.

Brinda autonomía al sistema fotovoltaico al satisfacer los requerimientos de consumo en cualquier momento, proporcionando picos de corriente superiores a los que proporciona el generador fotovoltaico, contribuyendo a la estabilización del sistema y evitando fluctuaciones no convenientes para los equipos de consumo.

En la actualidad existe una variada gama de baterías para las instalaciones solares

fotovoltaicas, basadas en tecnologías de ácido – plomo, iones de Litio y níquel-cadmio [13].

La utilización de acumuladores, requiere el uso de un regulador que controle el proceso de carga y descarga para proteger su vida útil. Para sistemas donde se requiera una corriente continua regulada y estable, se requiere el un convertidor CC/CC conectado aguas abajo del regulador de carga (Ilustración 10.a (izquierda)) o bien si el circuito asociado requiere corriente alterna, se incluye un inversor o convertidor CC/CA (Ilustración 10.b (derecha)).

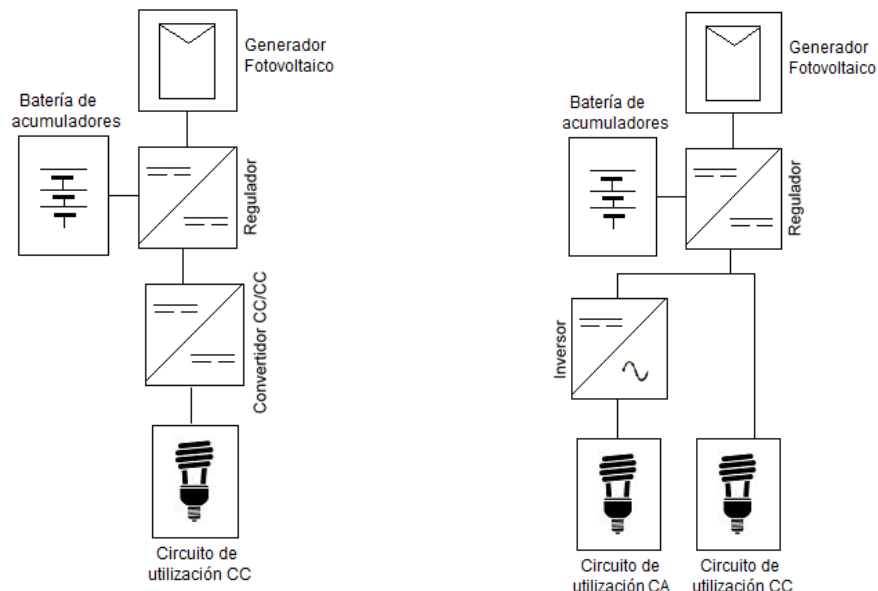


Ilustración 10. Sistemas fotovoltaicos con acumulación. a) Con convertidor CC/CC, b) Con inversor CC/CA

## Parámetros

La confiabilidad y eficiencia de los circuitos asociados a la instalación eléctrica final y en especial para condiciones aisladas, dependen en gran medida del sistema de almacenamiento. Las magnitudes o parámetros que definen una batería, toman valores dependientes de su construcción y de las aplicaciones a las que va destinado.

- **Capacidad nominal**, es la carga eléctrica que puede ser extraída de una batería hasta llegar a la descarga total.

- **Régimen de carga/ descarga**, es la corriente aplicada a una batería para restablecer / extraer la capacidad nominal. Se presenta como la tasa entre la capacidad nominal y la corriente. Es decir si se tiene una capacidad de 300 Ah, se habla de un régimen de carga (descarga)  $C_{10}$ , cuando se aplican/extraen 30 A, en 10 horas se restablece (extrae) la capacidad.
- **Estado de carga (SOC)** , es la capacidad de una batería parcialmente cargada, dividida por su capacidad nominal.
- **Profundidad de descarga (DOD)** , es el complemento del estado de carga. Los reguladores de las baterías incluyen protecciones contra descargas excesivas, usualmente para mantener niveles mínimos de 20-30% de la capacidad nominal.
- **Tensión nominal**, o valor asignado de funcionamiento, generalmente comercializados en mono bloques de 12 a 24 V.
- **Tensión de corte**, es la tensión con la que finaliza la batería. Depende del régimen de descarga y del tipo de batería. Determina la profundidad de descarga máxima,  $PD_{max}$  y la capacidad útil  $C_u$  , donde

$$C_u = PD_{max} \cdot C_{nom} \quad (14)$$

## Dimensionamiento

La capacidad nominal de la batería puede determinarse a partir del consumo medio diario para un periodo de autonomía determinado, en el cual la batería ha de abastecer el consumo del circuito en utilización en ausencia total de generación fotovoltaica.

$$C_{nom} = \frac{Q_d \cdot A}{PD_{max}} \quad (15)$$

Siendo  $Q_d$  el consumo medio diario en Ah/día y  $A$  el periodo de autonomía en días. Para aplicaciones residenciales, la profundidad de descarga  $PD_{max}$  suele tomarse como 0,7.

Esta ecuación considera, que el rendimiento de la batería y el regulador es 100%, sin embargo en la aplicación de proyectos de debe tenerse en cuenta el valor real.

### 3.1.4 Reguladores e inversores

#### 3.1.4.1 Regulador de carga

Si bien por medio de baterías de acumuladores, un sistema fotovoltaico puede proporcionar energía eléctrica en cualquier momento a su circuito asociado, dado que el proceso de carga y descarga realizado al recibir energía eléctrica del módulo fotovoltaico durante el día y entregándose al circuito de consumo durante la noche o en horas de baja radiación solar.

El control de este proceso de carga y descarga es realizado por un dispositivo llamado regulador de carga, el cual protege a la batería contra la descarga profunda o sobrecarga.

Este proceso se representa por medio de un diodo que impide la circulación de corriente de la batería hacia el generador fotovoltaico y por un interruptor que desconecta la batería de acumuladores; el interruptor se abre cuando hay sobrecarga o sobredescarga o se cierra para conectar la batería de acumuladores al circuito de consumo.

#### Dimensionamiento de reguladores

- La *tensión nominal* de los reguladores corresponde a la del sistema fotovoltaico para la que se ha diseñado el regulador. Generalmente están en magnitudes de 12, 24 y 48 V.
- *Corriente nominal*, es la corriente del generador fotovoltaico a controlar por el regulador. Tiene el mismo valor tanto en la entrada del regulador fotovoltaico como en la salida hacia el circuito de consumo. Se selecciona en función de la corriente de cortocircuito del generador fotovoltaico. Se aplica un factor de seguridad de 1,25 para prever días donde la irradiancia sobrepasa los 1000 W/m<sup>2</sup>.

#### 3.1.4.2 Inversores

El inversor es un dispositivo con la función de convertir la corriente continua producida por el generador fotovoltaico, en corriente alterna, con los parámetros adecuados de tensión y frecuencia.

Los inversores para sistemas fotovoltaicos autónomos pueden ir conectados a la salida del regulador de carga o en bornes del acumulador de baterías.

En sistemas autónomos, la energía eléctrica producida por el generador fotovoltaico, pretende utilizarse por receptores de uso doméstico como lámparas, televisión, refrigeración etc. Si bien algunos de estos elementos funcionan con corriente continua, suelen ser más costosos y de difícil acceso. Se tiene además en cuenta que, las tensiones habituales (12V o 24V) que se utilizan en los sistemas fotovoltaicos autónomos, limitan su uso a sistemas de poca potencia. Razón por la que si se requiere utilizar un dispositivo, que funciona con corriente alterna o la potencia del sistema es superior a 1 kW, es preciso disponer de algún sistema que convierta la corriente continua en corriente alterna.

### **Dimensionamiento de un inversor**

- *Tensión nominal de entrada*, debe coincidir con la tensión nominal de la batería de acumuladores, regularmente 12, 24 y 48 V.
- *Potencia nominal*, correspondiente a la suma de todas las potencias de los receptores que puedan funcionar simultáneamente, esta no debe sobrepasar la potencia nominal.

Los inversores además, deben estar protegidos frente a situaciones como sobrecargas que excedan límites permitidos, cortocircuito en la salida de corriente alterna, desconexión del acumulador o tensión fuera del margen de operación.

#### **4 PLANTEAMIENTO DE PROYECTOS DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA Y EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR RURAL DEL EJE CAFETERO.**

La expansión de la cobertura de energía eléctrica está asociada en gran parte a dar solución a problemáticas socio-económicas originadas por características típicas de la población rural objeto de estudio, algunas de estas son la falta de recursos educativos, económicos y ausencia de presencia del estado, debido a estas y otras necesidades el estudio de implementación de fuentes de energía no convencionales se convierte en el énfasis de este proyecto.

A continuación se establecen las barreras identificadas para la universalización del servicio de energía eléctrica en el eje cafetero.

- Baja capacidad de pago por parte de los usuarios versus el incremento en los costos de expansión del servicio de energía eléctrica.
- Desconocimiento y escaso aprovechamiento de los potenciales de recursos energéticos en las áreas rurales y precisamente de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER).
- Deficiencia en la formulación y estructuración de proyectos que dificultan el acceso a fondos de apoyo financiero.
- Deficiencia en la identificación de esquemas empresariales incluyentes y adaptables a las condiciones de las áreas rurales.
- Desinterés de los operadores de red en atención de mercados dispersos debido a la baja demanda y a los altos costos de administración, operación y mantenimiento.

##### **4.1 Actores involucrados en la implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica en el eje cafetero.**

La generación de alianzas entre actores regionales y el apoyo de entidades nacionales como ejes involucrados en la implementación de proyectos de energía solar fotovoltaica puede clasificarse en tres principales tipos, aportantes, socios estratégicos y cooperación nacional e internacional.

El gobierno central, un gestor local, actores regionales y cooperación nacional e

internacional son identificados como posibles aportantes.

El gobierno central y actores regionales incluyendo a las entidades encargadas del planeamiento energético y productivo de la zona, pueden permitir la promoción e implementación para las fases de un proyecto de energización.

El gestor local está delegado a interiorizar, adaptar y desarrollar la metodología para la implementación del proyecto, además de dar continuidad a las fases de perdurabilidad.

Cooperación nacional e internacional puede aportar asistencia técnica, metodológica o financiera para la implementación de proyectos que generen impacto social, se distingue como su principal aporte la asistencia técnica en el fortalecimiento de capacidades institucionales y regionales.

## **4.2 Aspectos generales para la estructuración de proyectos**

La estructuración de proyectos de energía solar fotovoltaica, considera algunos principios que al ser cumplidos, aumentan la efectividad en su desarrollo. El proyecto debe contemplar requisitos y requerimientos necesarios para llevar a cabo su desarrollo en tiempo, dinero, gestión y calidad, debe estar definido en el contexto político, económico y social del país, además de permitir el crecimiento y desarrollo de una zona particular bien sea para ampliar mercados o desarrollando nuevos proyectos.

El proyecto debe ser viable técnica, financiera, social y económicamente, como resultado de un proceso del análisis de diferentes alternativas y adaptable a nuevas tecnologías.

Se propone seguir una serie de actividades con el fin de estructurar de manera correcta el alcance, formulación, consecución de recursos, implementación y seguimiento de los proyectos de energía solar fotovoltaica.

### **4.2.1 Iniciación del proyecto**

#### **4.2.1.1 Levantamiento de información**

Es importante tener claridad que cada proyecto a implementar debe ser ajustado a realidades y características propias de cada zona; niveles de radiación, caracterización de la demanda según el número de beneficiarios, horas de

prestación del servicio y entre otras hacen parte de los aspectos a tener en cuenta para establecer criterios posteriores de índole técnico.

Para tal efecto se considera que los métodos de levantamiento de información y obtención de evidencias de mayor aceptación son los siguientes:

- **Observación directa**, como una labor de campo en la cual se realiza una revisión in situ de la situación.
- **Entrevistas**, se realizan con un interlocutor que atiende un cuestionario con el objetivo de obtener información de validez.
- **Encuestas**, se realiza sobre cuestionarios predeterminados, con preguntas cerradas ajustadas al tema de consumo y solvencia económica.
- **Mixtas**, considerando una combinación de las anteriores.

La preparación del levantamiento de información se puede realizar bajo las siguientes disposiciones.

**Estructuradas**, basadas en herramientas predeterminadas, como cuestionarios y listas de chequeo.

**Semi-estructuradas**, Se tiene una determinación previa de los objetivos del levantamiento de información pero no se cuenta con cuestionarios predeterminados, puede haber listas de chequeo generales y aspectos de tipo abierto.

**No estructuradas**, Realizadas de manera inadvertida sobre la zona de interés, aunque poco conveniente para un procedimiento riguroso.

#### **4.2.1.2 Caracterización de la demanda energética**

Los requerimientos de energía en el área rural son de diversa índole, pero de manera general con un índice energético relativamente bajo respecto al consumo urbano. Los usos más frecuentes de energía están a orientados a la preparación y conservación de alimentos, iluminación, usos domésticos y una proporción en actividades productivas.



Para estructurar adecuadamente la demanda energética de una familia o comunidad rural, se debe elaborar una guía de consumo energético previsto, a continuación se muestran los valores típicos de potencia que tienen los artefactos con uso frecuente en el área rural, de acuerdo a aquellos que según el etiquetado energético implementado para Colombia representan bajo consumo.

<b>Uso de energía eléctrica</b>	<b>Potencia (Watt)</b>
Bombillas tecnología LED	<b>10-30</b>
Radio	<b>30</b>
Televisor	<b>80</b>
Plancha	<b>800-1200</b>
Ducha	<b>2000-3000</b>
Refrigerador	<b>40-200</b>
Licuada	<b>40-150</b>
Bomba de agua	<b>500-746</b>

Tabla 2. Valores típicos de potencia para artefactos de uso rural

La tecnología Micro Led se recomienda como fuente de iluminación interna y externa de las viviendas rurales debido a su alta eficiencia, rentabilidad y su gran aporte al medio ambiente debido a que su consumo de energía es hasta de un 75% inferior a una bombilla tradicional.

Las características más importantes de esta tecnología es que se aprovecha cerca de 90% de la energía que produce ya que no tienen gran desperdicio por calor, la vida útil de las luminarias es en promedio de 50000 horas de uso superando por más de 20000 horas a una bombilla tradicional, no genera radiación ultravioleta ni infrarrojos, es luz completamente direccional que permite iluminar solo la zona a la cual está dirigida.

Debido a las características mencionadas esta tecnología va de la mano con los proyectos de energía solar fotovoltaica ya que ayuda a mejorar la eficiencia y reducir consumos [14].

#### **4.2.1.3 Acercamiento a la comunidad**

Se establece con la comunidad, la entidad territorial y el operador de red los deberes, derechos, expectativas y compromisos respecto a la ejecución del proyecto, a través de espacios de socialización que permitan intervenciones de los directos posibles beneficiarios de los proyectos, logrando así identificar con la comunidad capacidades de pago, generalidades técnicas , beneficios e impacto social en general.

#### **4.2.1.4 Investigación ambiental**

Es necesario realizar investigaciones, trámites y permisos ambientales, con el fin de elaborar un conjunto detallado de actividades, que producto de una evaluación ambiental lleve a prevenir, mitigar, corregir o compensar los impactos y efectos ambientales que puedan causarse por el desarrollo del proyecto de energía solar fotovoltaica.

La elaboración de un proyecto de manejo ambiental debe incluir los planes de seguimiento, monitoreo y contingencia en caso de presentarse abandono de por parte de los beneficiarios.

#### **4.2.2 Planificación del proyecto**

#### **4.2.3 Estudios técnicos**

A la hora de diseñar y formular proyectos de energías no convencionales se deben tener en cuenta los aspectos técnicos involucrados para la constitución de estos, ya que definen en gran parte el éxito en la etapa de ejecución dichos proyectos.

Los principales datos a tener en cuenta para los proyectos de energía solar son:

- Recurso energético disponible en la zona.
- Estudio de carga instalada en las viviendas e instalaciones a alimentar.
- Especificaciones técnicas de los equipos.
- Cantidades de obra.
- Planos.
- Memorias de cálculo.
- Vida útil de cada elemento a implementar.

- Plan de mantenimientos.
- Análisis de la ubicación de los módulos solares y demás elementos para un óptimo desempeño.
- Diseño final de la mejor alternativa de diseño teniendo en cuenta el mínimo costo.

#### **4.2.3.1 Estudios Financieros**

El presupuesto representa financieramente las actividades del proyecto con los costos unitarios y cantidades de obra necesarios para la ejecución, debe incluir los costos indirectos como administración, imprevistos, utilidad y costos asociados a interventoría. Se sugiere llevar el control de forma digital.

El análisis de precios unitarios APU, debe contener costos desagregados de materiales, mano de obra, equipos y transporte, identificando la composición, jornadas de trabajo, cantidades y entre otros. Los precios de los materiales asociados al proyecto deben estar de acuerdo a los precios del mercado.

La planificación de las actividades debe estar consignada en un cronograma, que permita relacionar tiempos y actividades con el fin de realizar seguimiento a la ejecución del proyecto.

#### **4.2.3.2 Formulación ante fondos estatales**

Si el desarrollo del proyecto requiere recursos estatales, el formulador del proyecto, entidad territorial o empresa prestadora de servicios públicos, previo a desarrollar un proyecto de inversión, debe realizar una serie de actividades con el fin de acceder satisfactoriamente a los recursos que tiene el gobierno nacional a través de los fondos; Faer (Fondo de apoyo financiero para la electrificación rural), Fazni (Fondo de apoyo financiero para la energización de las zonas no interconectadas), FNR (Fondo nacional de regalías), Fondo Especial Cuota de Fomento y Programa Prone (Programa de normalización de redes).

Estos fondos otorgan recursos no reembolsables para la constitución de proyectos de energía eléctrica en el territorio nacional, cada uno de ellos puede o no solicitar cofinanciación por parte de terceros [16].

Los fondos de financiación cuentan con formatos establecidos para la presentación de proyectos. A continuación se enlistan los requerimientos generales

1. Carta de presentación
2. Aval técnico y financiero

3. Estudio técnico
  - a. Estudios técnicos de ingeniería
  - b. Estudio de mercado
  - c. Diseños técnicos
  - d. Planos técnicos
4. Presupuesto, análisis de precios unitarios y cronograma
  - a. Presupuesto
  - b. Análisis de precios unitarios
  - c. Cronograma
5. Metodología general ajustada MGA (Disponible en la Red)
6. Certificado plan de desarrollo
7. Certificado de no presentación a otros fondos
8. Certificados de cofinanciación
9. Certificado de tradición y libertad (si aplica)
10. Avalúo del lote (si aplica)
11. Consulta previa
12. Licencias y permisos ambientales

**Nota.** Algunos de los fondos en Colombia pueden exigir requisitos adicionales para el estudio de la propuesta. Se debe tener presente que éstos no financian actividades relacionadas con negociación de servidumbres, compra de predios, planes de manejo ambiental, ni licencias ambientales, permisos de la empresa, derechos de conexión y entre otras.

#### **4.2.3.3 Evaluación del proyecto**

En esta etapa se realiza el estudio de viabilidad del proyecto por parte de los fondos, ministerio de minas y energía y empresas electrificadoras para dar aval o rechazar los proyectos.

#### **4.2.4 Etapa de ejecución**

#### **4.2.4.1 Asignación de recursos**

La asignación de recursos es realizada por comités administrativos de cada fondo conformado por el Ministerio de Minas y Energía, Departamento Nacional de Planeación y Ministerio de Hacienda y Crédito Público.

#### **4.2.4.2 Ejecución de obras**

Cuando se tienen aprobados todos los requerimientos técnicos, ambientales y financieros se procede a ejecutar la obra en el sector donde se identificó la problemática, involucrando a la comunidad para generar empleo, alto sentido de pertenencia y conocimiento técnico de la obra que se está llevando a cabo.

#### **4.2.4.3 Seguimiento y control**

El procedimiento de seguimiento y control del proyecto establece un conjunto de acciones que se llevarán a cabo para la comprobación de la correcta ejecución de las actividades del proyecto establecidas en la planificación del mismo, proporcionando un entendimiento del progreso del proyecto de forma que se puedan tomar las acciones correctivas si es el caso, se hará necesario capacitar en aspectos básicos a la población en lo referente a funcionamiento y medidas de protección ante el riesgo eléctrico que puedan presentar las instalaciones.

Es importante destacar que la sostenibilidad del proyecto de energía solar fotovoltaico debe garantizar el funcionamiento en el tiempo como mínimo durante la vida útil de los paneles solares (20 años en promedio) y en lo posible estar ligada a no afectar los ingresos de la comunidad, siendo eje de apoyo a modelos de negocio que faciliten la sostenibilidad de los mismos.

## **5 CRITERIOS TÉCNICOS PARA EL PLANTEAMIENTO DE UN PROYECTO TIPO DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL EJE CAFETERO**

Para el proceso de formulación de un proyecto de esta índole, se distinguen criterios vitales para una correcta implementación, criterios que están asociados a condiciones que limitan y diferencian cada tipo de proyecto.

Se plantea como caso de interés la demanda a atender para a una vivienda rural unifamiliar con un sistema solar aislado, considerando características propias como el detalle de la demanda y del recurso solar disponible.

### **5.1 Criterios modelo de diseño**

- **Ubicación**

La vivienda rural debe ser identificada con datos como área (m<sup>2</sup>) y pendiente (%) en el lugar destinado a las obras. Se debe asegurar que el predio no cuente con electricidad ni se encuentre en planes de interconexión al Sistema Interconectado Nacional SIN o a Sistemas de Distribución Local SDL, datos a consultar con el operador de red de la región.

- **Dispersión**

Es necesario cuantificar la distancia entre hogares a atender, es posible llevar a cabo un proceso de georreferenciación para cada beneficiario, de tal forma que se verifique que los usuarios a atender estén dispersos.

- **Usuarios**

Se sugiere que el proyecto atienda un total de 20 viviendas unifamiliares rurales o un número superior, esta cantidad permite optimizar labores de logística e instalación, además de influir en la presentación del proyecto dado el impacto que puede generar.

- **Recurso**

La radiación solar debe definirse para el/los municipios involucrados en el proyecto, a partir del mapa de radiación del IDEAM, mediciones satelitales o en sitio para determinar el recurso solar disponible en kWh/m<sup>2</sup>.

- **Piso Térmico**

Ya que en el eje cafetero se encuentran diferentes pisos térmicos desde cálidos a en las orillas del río Cauca, hasta las heladas cumbres de los nevados, es necesario identificar y diferenciar específicamente si el predio se encuentra en piso térmico cálido (menos de 1000 msnm) o en piso templado frío (mayor a 1000 msnm), esto permite caracterizarlo dentro de la guía de diseño para la solución solar.

### **5.1.1 Solución solar aislada**

El tipo de solución relaciona los criterios del recurso disponible y las características ambientales de la zona para encontrar una solución adecuada en tamaño, configuración y costo aproximado.

Si el estudio realizado cumple con los requisitos planteados anteriormente, se debe adecuar el proyecto a la realidad de cada zona, cabe señalar que la etapa de diseño e instalación del sistema fotovoltaico debe estar coordinada por un profesional en cada uno de los predios involucrados.

Una vez obtenidos los datos de radiación y piso térmico de la zona, se procede a caracterizar el tipo de solución diferenciada según el Ministerio de Minas y Energía en tipos de A-H, adaptables a las condiciones de los municipios. En la Ilustración 11 se muestra la radiación solar horizontal y su rango de intensidad sobre los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío.

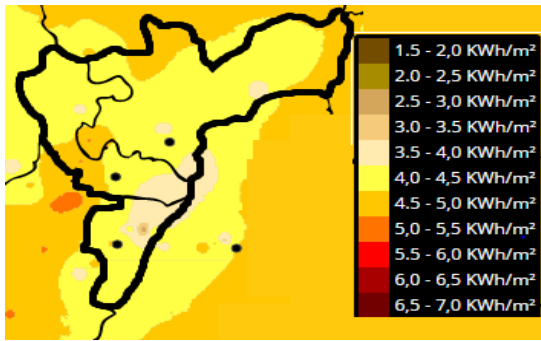


Ilustración 11. Radiación horizontal sobre los departamentos de Caldas, Risaralda y Quindío.

De los 71 municipios comprendidos en el eje cafetero, se realiza la caracterización a los tipos de solución adoptados por el Ministerio de Minas y Energía, en la tabla 3 se muestran los resultados.

Aproximadamente el 70% de los municipios se ajustan a una solución solar aislada tipo F, la cual está delimitada por una radiación en un rango de 3,5 a 4,5 kWh/m<sup>2</sup> y altura superior a los 1000 msnm, un 17% a la tipo G, un 5,7% de los municipios a la solución tipo B y con menor porcentaje de ajuste las soluciones E y C aplicable a dos municipios respectivamente. .



Rango de Radiación kWh/m <sup>2</sup>	Piso térmico menor a 1000 msnm	Piso térmico mayor o igual a 1000 msnm
2,5-3,0 3,0-3,5	Tipo A	Tipo E Filandia Salento
3,5-4,0 4,0-4,5	Tipo B Norcasia Victoria La Virginia	Tipo F Anserma Apía Aranzasu Armenia Belén de Umbría Buenavista Calarcá Chinchiná Circasia Córdoba Dosquebradas Filadelfia Génova Guática La Merced La Tebaida Manizales Manzanares Marquetalia Marsella Marulanda Mistrató Montenegro Neira Pensilvania Pereira Pijao Pueblo Rico Quimbaya Quinchía Riosucio Risalralda Salamina Samaná Santa Rosa de Cabal Santuario Villamaría
4,5-5,0 5,0-5,5	Tipo C Viterbo La Dorada	Tipo G Marmato Supía Belalcazar San José Palestina Aguadas Pácora Balboa La Celia
5,5-6,0 6,0-6,5	Tipo D	Tipo H

Tabla 3. Tipo de solución solar aislada según radiación y piso térmico

## 5.2 Especificaciones técnicas

El esquema propuesto para la implementación del sistema se compone de los elementos descritos detalladamente en el capítulo 3 y mostrados a continuación.

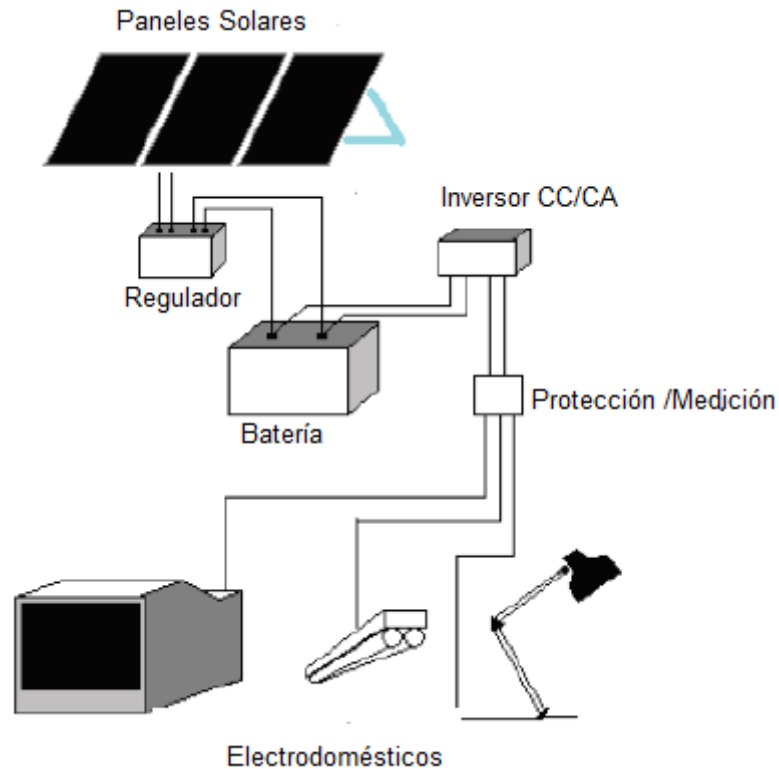


Ilustración 12. Esquema sistema fotovoltaico aislado

El consumo promedio de energía mensual para los hogares de municipios ubicados en una altitud inferior a 1000 msnm se estima en 95 kWh/mes y para los ubicados a una altitud superior se define el consumo en aproximadamente 65 kWh/mes. [Programa energía limpia USAID].

La solución fotovoltaica se calcula para un día y medio de autonomía, es decir 36 horas de disponibilidad de energía eléctrica permanente las 24 horas.

Cabe señalar que la batería permite la acumulación de energía de manera finita; por esta razón es importante llevar a cabo procesos de sensibilización con la comunidad

beneficiaria acerca del consumo y de los electrodomésticos a utilizar, ya que si se conectan electrodomésticos muy grandes, técnicamente antiguos e ineficientes, o si se dejan encendidos cuando no se están usando, el tiempo de suministro puede acortarse mientras no haya radiación.

Se sugiere una conexión mixta en serie y paralelo para los paneles propuestos, este tipo de conexión es ideal para obtener un voltaje apropiado y lograr una mayor capacidad de corriente para la instalación, habitualmente es utilizada para sistemas con potencia superior a 200 W.

Como solución individual para una vivienda unifamiliar, en el sistema fotovoltaico a instalar, la cantidad de paneles está relacionado con la irradiación de la zona y la cantidad de baterías del banco acumulador es dimensionado de acuerdo al consumo promedio del hogar, esta relación aplicada a los elementos constitutivos se describe para los cinco proyectos tipo identificados para los municipios del eje cafetero.

- Proyecto Tipo B (Norcasia y Victoria (Caldas), La Virginia (Risaralda))

<b>Tipo B</b>		
	<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Potencia Sistema [W]</b>	1240	
<b>Panel [W]</b>	310	4
<b>Configuración Paneles</b>	2 Ramas de 2 paneles en serie por rama	
<b>Inversor</b>	1200 VA / 48Vdc /120 Vac	1
<b>Regulador (A- V)</b>	30 A - 150 V	1
<b>Batería (Ah-V)</b>	220 Ah -12 V	4
<b>Banco Baterías</b>	Configuración en serie a 48 V	
<b>Protección Eléctrica</b>	30	1

Tabla 4. Proyecto Tipo B

- ❑ Proyecto Tipo C (La Dorada y Viterbo (Caldas))

<b>Tipo C</b>		
	<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Potencia Sistema [W]</b>	1040	
<b>Panel [W]</b>	260	4
<b>Configuración Paneles</b>	1 Rama de 4 paneles en serie por rama	
<b>Inversor</b>	1200 VA / 48Vdc /120 Vac	1
<b>Regulador (A- V)</b>	20 A - 150 V	1
<b>Batería (Ah-V)</b>	220 Ah -12 V	4
<b>Banco Baterías</b>	Configuración en serie a 48 V	
<b>Protección Eléctrica</b>	20	1

Tabla 5. Proyecto Tipo C

- ❑ Proyecto Tipo E (Filandia y Salento (Quindío))

<b>Tipo E</b>		
	<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Potencia Sistema [W]</b>	1240	
<b>Panel [W]</b>	310	4
<b>Configuración Paneles</b>	2 Ramas de 2 paneles en serie por rama	
<b>Inversor</b>	1200 VA / 48Vdc /120 Vac	1
<b>Regulador (A- V)</b>	30 A - 150 V	1
<b>Batería (Ah-V)</b>	150 Ah -12 V	4
<b>Banco Baterías</b>	Configuración en serie a 48 V	
<b>Protección Eléctrica</b>	30	1

Tabla 6. Proyecto Tipo E

- ❑ Proyecto Tipo F (( Anserma, Aranzazu, Chinchiná, Filadelfia, Neira, La Merced, Manizales, Manzanares, Risalralda, Villamaría, Marulanda, Pensilvania, Marquetalia, Riosucio, Salamina, Samaná (Caldas), Apía, Belén de Umbría, Dosquebradas, Guática, Marsella, Mistrató, Pereira, Pueblo Rico, Quinchía, Santa Rosa de Cabal, Santuario (Risaralda), Armenia, Buenavista, Calarcá, Circasia, Córdoba, Génova, La Tebaida, Montenegro, Pijao, Quimbaya (Quindio)).

<b>Tipo F</b>		
	<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Potencia Sistema [W]</b>	930	
<b>Panel [W]</b>	310	3
<b>Configuración Paneles</b>	1 Rama de 3 paneles en serie por rama	
<b>Inversor</b>	1200 VA / 48Vdc /120 Vac	1
<b>Regulador (A- V)</b>	20 A - 150 V	1
<b>Batería (Ah-V)</b>	150 Ah -12 V	4
<b>Banco Baterías</b>	Configuración en serie a 48 V	
<b>Protección Eléctrica</b>	20	1

Tabla 7. Proyecto Tipo F

- Proyecto Tipo G (Marmato, Supía, Belalcázar, San José, Palestina, Aguadas, Pácora (Caldas) y Balboa, La Celia (Risaralda))

<b>Tipo G</b>		
	<b>Característica</b>	<b>Cantidad</b>
<b>Potencia Sistema [W]</b>	780	
<b>Panel [W]</b>	260	3
<b>Configuración Paneles</b>	1 Rama de 3 paneles en serie por rama	
<b>Inversor</b>	1200 VA / 48Vdc /120 Vac	1
<b>Regulador (A- V)</b>	20 A - 150 V	1
<b>Batería (Ah-V)</b>	150 Ah -12 V	4
<b>Banco Baterías</b>	Configuración en serie a 48 V	
<b>Protección Eléctrica</b>	20	1

Tabla 8. Proyecto Tipo G

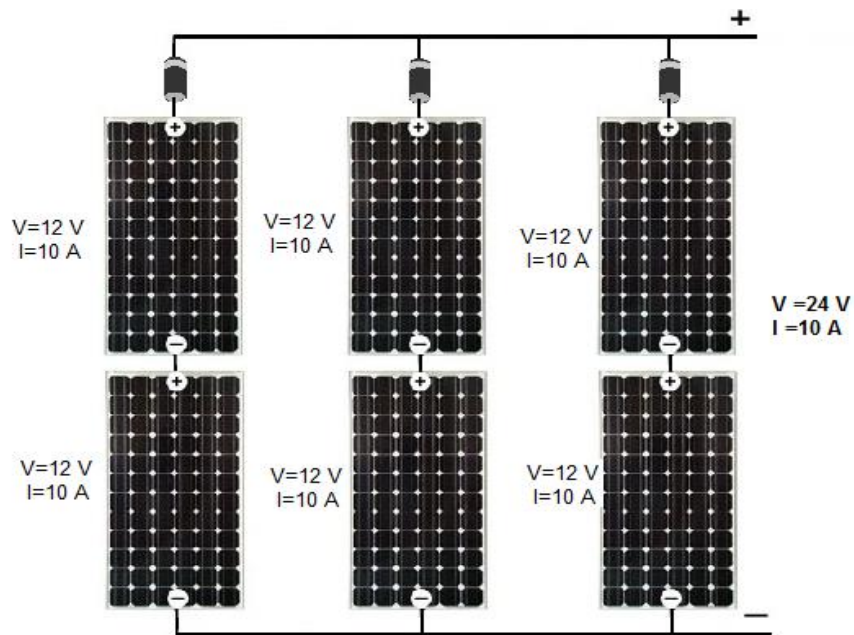


Ilustración 13. Configuración de paneles: 3 ramas, cada uno con 2 paneles en serie.

### 5.3 Normatividad general

Para los proyectos que involucren electricidad están establecidas unas normas y estándares de calidad mínimos nacionales e internacionales que son de obligatorio cumplimiento, por ello se recomienda comprar los materiales a proveedores que entreguen certificados de sus productos. A continuación se describen las normas que aplican para cada elemento de las instalaciones fotovoltaicas.

#### 5.3.1 Paneles fotovoltaicos

Deben cumplir con las especificaciones contempladas en la norma IEC-61730 de 2009, sobre seguridad en módulos fotovoltaicos, ésta norma está dividida en dos partes, en la IEC 61730- 1, requisitos para la construcción y la IEC 61730-212 requisitos para las pruebas.

Dependiendo del tipo de panel a instalar, la normatividad técnica aplicable es así:

- i. Paneles de Silicio Cristalino: norma NTC 2883 de 2006.
- ii. Paneles fotovoltaicos de película delgada (Thin Film): norma NTC 5464 de 2010.
- iii. Paneles en condiciones especiales: norma NTC 5512 de 2013.

### **5.3.2 Regulador de carga**

Se debe cumplir con la norma NTC6016 de 2013, la cual define los requisitos del comportamiento y rendimiento de los controladores de carga de batería y todas las que apliquen para estos reguladores.

### **5.3.3 Inversores**

Para Artefactos electrodomésticos y similares: norma NTC2183 de 2014 y NTC5759 de 2010, que establecen las pautas de medida de rendimiento de los acondicionadores de potencia usados en los sistemas fotovoltaicos aislados y en los conectados a la red eléctrica.

### **5.3.4 Baterías**

Se debe cumplir la norma NTC 5287 de 2009, la cual suministra la información necesaria referente a los requisitos de las baterías que se utilizan en los sistemas solares fotovoltaicos y de los métodos de ensayo típicos utilizados para verificar la eficiencia de las baterías.

## **5.4 Proceso constructivo**

La instalación de un sistema fotovoltaico como proceso para la producción de electricidad de uso doméstico requiere de etapas constructivas que abarcan un conjunto de fases realizables de forma sucesiva y/o simultánea, pero siempre iniciando con la localización del proyecto; esta etapa y otras cuatro identificadas se describen a continuación.

- **Localización y adecuación del terreno**

Seleccionar la ubicación más conveniente para el proyecto es la etapa inicial, requiere de un estudio que genere beneficios para los usuarios y para el rendimiento del sistema.

La adecuación del terreno consiste en ejecutar labores de limpieza, nivelación de terreno y despeje del área de vegetación que pueda interferir. Si bien el impacto que la instalación fotovoltaica debe generar es mínimo y no deben verse afectadas las actividades agrícolas siempre y cuando los nuevos cultivos no generen sombras. En caso de no poder corregir el efecto producido por las sombras, es necesario replantear la ubicación de la instalación.

- **Excavaciones**

La excavación para el soporte de la estructura, debe tener una profundidad adecuada según la cantidad de paneles a instalar, las condiciones del terreno y la intensidad del viento que se presente en la zona.

La base puede ser de tipo celosía o tipo poste, de aluminio, acero galvanizado o con tratamiento ante agentes corrosivos, también puede ser de madera o fibra de vidrio.

- **Instalación de celdas solares**

Como se mencionó en el capítulo 2, para las regiones que se encuentran en el hemisferio norte, se recomienda que los paneles estén dirigidos al sur y viceversa. Aunque Colombia tiene regiones en ambos hemisferios, todos los municipios del eje cafetero se encuentran en el hemisferio norte esto definido por la línea del ecuador y por las coordenadas de latitud de cada uno de ellos.

Se sugiere que el grado de inclinación de los paneles puede ser el mismo que la latitud, sin embargo para el caso de los municipios del eje cafetero donde la latitud es inferior a diez grados, es posible mantener los mismos diez grados con respecto a la horizontal y orientados hacia el sur.



Los paneles propuestos son de 60 y 72 células, pueden ser de material policristalino o monocristalino, deben cumplir con los estándares técnicos mínimos.

- **Instalación elementos del sistema**

Todas las instalaciones deben cumplir con el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - RETIE y la Norma Técnica Colombiana NTC 2050.

Se debe proporcionar una conexión a tierra de los equipos, es decir, todas las partes metálicas expuestas del sistema, (incluyendo gabinete del regulador, gabinete del interruptor del arreglo, marco de los módulos y estructuras de montaje), deben ser puestas a tierra mediante conductores.

- **Instalación redes internas y electrodomésticos**

Para la construcción y montaje se debe aplicar el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas - Retie, la Norma Técnica Colombiana NTC 2050 y seguir las recomendaciones de los fabricantes de los equipos a instalar. Es necesario que todos los materiales para la construcción de las instalaciones eléctricos tengan certificación.

## 6 CONCLUSIONES

Se concluye que la energía solar es una fuente eficaz y ambientalmente amigable para el desarrollo de proyectos de energía eléctrica en zonas donde se requieren alternativas de energización ya sea por difícil acceso o elevado costo asociado a llevar el servicio a estos sectores alejados, esta tecnología va de la mano con nuevas alternativas desarrolladas para mejorar la eficiencia de estos sistemas, como lo son neveras de corriente continua, sistemas de bombeo de alta eficiencia, iluminación de bajo consumo y una conciencia en los usuarios del buen uso y aprovechamiento del recurso.

Los proyectos de energización rural en el eje cafetero como zona de estudio son de vital importancia para garantizar el derecho que tienen los ciudadanos de contar con servicios públicos, esto se ve reflejado en las normas y leyes que en la actualidad se están desarrollando para mejorar el servicio y también promover e incentivar el uso de nuevas fuentes primarias de energía para la generación de electricidad.

Esta metodología se considera como una alternativa para agilizar las tareas de formulación y diseño según las características de demanda de las viviendas y el recurso energético disponible de las diversas zonas del eje cafetero, permitiendo que el proyecto final tenga en cuenta todos los aspectos técnicos y normativos.

## 7 ANEXOS

### A.0 1 Modulo fotovoltaico, características eléctricas y costo.

Para los proyectos tipo establecidos, se encuentran en el mercado nacional distribuidores que cumplen el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas-RETIE, para los módulos sugeridos con potencias de 270 W y 310 W, el costo oscila desde \$594.000 a \$704.000 para módulos de 60 y 72 celdas respectivamente.



#### MODULO FOTOVOLTAICO POLICRISTALINO

##### Electrical Characteristics @ STC\*

MODEL	UP-M255P	UP-M260P	UP-M265P	UP-M270P	UP-M275P
Max Power Pm (Wp)	255	260	265	270	275
Max Power Voltage Vm (V)	30.8	31.0	31.2	31.4	31.6
Max Power Current Im (A)	8.26	8.39	8.49	8.60	8.70
Open-Circuit Voltage Voc (V)	38.2	38.4	38.5	38.6	38.7
Short-Circuit Current Isc (A)	8.66	8.70	8.78	8.88	8.98
Module Efficiency	15.7%	16.0%	16.3%	16.6%	16.9%
Maximum System Voltage (V)	1000(IEC)/1000(UL)				
Power Tolerance	0/+3%				
Series Fuse Rating (A)	20A				

\*STC: Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, Module temperature 25°C, AM=1.5

6" Poly Series  
6" PV Module 60 cells

##### Electrical Characteristics @ STC\*

MODEL	UP-M305P	UP-M310P	UP-M315P	UP-M320P	UP-M325P
Max Power Pm (Wp)	305	310	315	320	325
Max Power Voltage Vm (V)	36.1	36.3	36.5	36.7	36.9
Max Power Current Im (A)	8.45	8.54	8.63	8.72	8.81
Open-Circuit Voltage Voc (V)	45.8	46.0	46.2	46.4	46.6
Short-Circuit Current Isc (A)	8.74	8.82	8.90	8.98	9.06
Module Efficiency	15.70%	16.0%	16.2%	16.5%	16.7%
Maximum System Voltage (V)	1000(IEC)/1000(UL)				
Power Tolerance	0/+3%				
Series Fuse Rating (A)	20A				

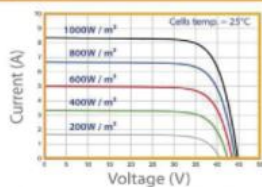
\*STC: Irradiance 1000 W/m<sup>2</sup>, Module temperature 25°C, AM=1.5

6" Poly Series  
6" PV Module 72 cells

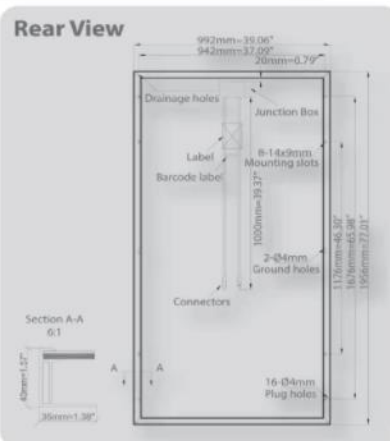
##### Temperature Coefficients

NOCT (°C)	45 ± 2
Temperature Coefficients of Isc (% / °C)	0.05 ± 0.01
Temperature Coefficients of Voc (% / °C)	-0.30 ± 0.02
Temperature Coefficients of Im (% / °C)	-0.02 ± 0.02
Temperature Coefficients of Vm (% / °C)	-0.42 ± 0.03
Temperature Coefficients of Pm (% / °C)	-0.43 ± 0.05

##### IV Curves



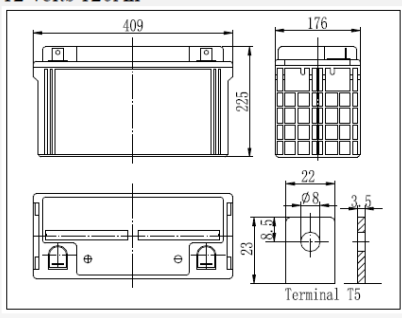
\* Deviation of Vm (V), Im (A), Voc (V) and Isc (A) of ±2.0%.



## A.0 2 Baterías, parámetros eléctricos y costo.

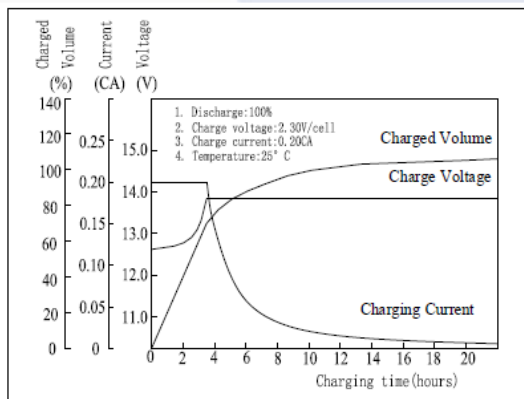
Las baterías recomendadas para los sistemas fotovoltaicos están diseñadas para una vida útil aproximada de 10 años si se tienen en cuenta las recomendaciones del fabricante. El precio aproximado a cada unidad es de \$1.110.000.

### Batería MTEK Ref.MT 121200

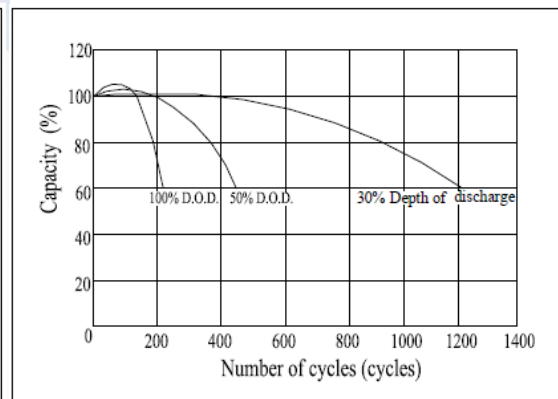
<p>MT121200 12 volts 120Ah</p> 	<p>MT121200 having its design life of 10 years @ 20 degree Celsius for floating application and around 1200 cycles for 30% depth of discharge for cyclic application.</p> <p>As our product were all rechargeable , highly efficient, maintenance free &amp; leakage proof usable in all positions and it meets the standards of JISC, BS, DIN, IEC etc.</p> <p>We're ISO9001certified &amp;UL approved as well as CE</p> <p>Our containers were all ABS resin and grades were : UL94-HB, UL94V-0 &amp; UL94V-2 (flame retardant types could be arranged).</p>
--	--

Nominal voltage	12 volts
Capacity	120 ampere hours @20°C, 10 hours rated (cut off voltage 1.80V/cell)
Dimension	L: 409 mm W: 176 mm H: 225 mm TH: 225 mm
Weight approx.	35 kg or 77.2 pounds
Internal resistance	Approx. 4 mΩ
Self-discharge rate	Approx. 3% per month @ 25 degree Celsius
Operation temperature range	Discharged: -15 to 50 degree Celsius (5 to 122 degree F)
	Charging: 5 to 35 degree Celsius (41 to 95 degree F)
	Storage: 0 degree to 40 degree Celsius (32 to 104 degree F)
Floating charge voltage	13.50 to 13.80 volts (-15mv / degree Celsius )
Cyclic charging voltage	14.50 to 14.90 volts (-20mv / degree Celsius)
Maximum charging current	36 ampere (A)
Boost/equalizing charge	Not required
Terminal material	Copper
Container material	General ABS resin

### Característica de carga (25°C)



### Ciclo de vida (25°C)



### A.0 3 Regulador de carga, características eléctricas y costos.

Se recomienda el regulador EPsolar Tracer 3215BN MPPT, el costo aproximado de estos dispositivos es de \$360000.



## 7 Technical Specifications

• Electrical Parameters

Table 7-1

Description	Parameter
Nominal system voltage	12VDC / 24VDC Auto work
Rated charge current	Tracer1215BN 10A
	Tracer2215BN 20A
	Tracer3215BN 30A
	Tracer4215BN 40A
Rated discharge current	Tracer1215BN 10A
	Tracer2215BN 20A
	Tracer3215BN 20A
	Tracer4215BN 20A
Maximum battery voltage	32V
Max. solar input voltage	150VDC
Max. PV input power	Tracer1215BN 130W (12V) 260W (24V)
	Tracer2215BN 260W (12V) 520W (24V)
	Tracer3215BN 390W (12V) 780W (24V)
	Tracer4215BN 520W (12V) 1040W (24V)
Self-consumption*	≤50mA(12V) ≤27mA(24V)
Charge circuit voltage drop	≤0.26V
Discharge circuit voltage drop	≤0.15V
Temperature compensate coefficient	-3mV/°C/2V(default)
Communication	RS485(RJ45 interface)

## A.0 4 Inversor, especificaciones y costo

Se toma como referencia el convertidor CC/CA Referencia FX3048T de OUT BACK Power según las especificaciones de los proyectos Tipo, el costo aproximado de este equipo es \$9.225.000.



### Specifications

	Sealed Models			Vented Models		
	FX2012T	FX2524T	FX3048T	VFX2812	VFX3524	VFX3648
Nominal DC Input Voltage	12 VDC	24 VDC	48 VDC	12 VDC	24 VDC	48 VDC
Continuous Power Rating at 25° C (77° F)	2000 VA	2500 VA	3000 VA	2800 VA	3500 VA	3600 VA
AC Voltage/Frequency	120 VAC 60 Hz	120 VAC 60 Hz	120 VAC 60 Hz	120 VAC 60 Hz	120 VAC 60 Hz	120 VAC 60 Hz
Continuous AC RMS Output at 25° C (77° F)	17.0 amps AC	20.8 amps AC	25.0 amps AC	23.3 amps AC	29.2 amps AC	30.0 amps AC
Idle Power	Full	~ 20 Watts	~ 20 Watts	~ 23 Watts	~ 20 Watts	~ 23 Watts
	Search	~ 6 Watts	~ 6 Watts	~ 6 Watts	~ 6 Watts	~ 6 Watts
Typical Efficiency	90%	92%	93%	90%	92%	93%
Total Harmonic Distortion	Typical	2%	2%	2%	2%	2%
	Maximum	5%	5%	5%	5%	5%
Output Voltage Regulation	± 2%	± 2%	± 2%	± 2%	± 2%	± 2%
Maximum Output Current	Peak	56 amps AC	70 amps AC	70 amps AC	56 amps AC	70 amps AC

## 8 REFERENCIAS

- [1] Congreso de la Republica de Colombia, Ley 143 de 1994. Diario Oficial No. 41.434, de 12 de julio de 1994, Artículo 11.
- [2] Central Hidroeléctrica de Caldas CHEC S.A E.S.P y Empresa de Energía del Quindío EDEQ S.A E.SP. Informes de sostenibilidad 2016.
- [3] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Guía para la elaboración de un plan de energización rural sostenible. ISBN: 978-958-8363-27-1, Editorial Scripto S.A.S, Bogotá DC, Colombia. Junio de 2015.
- [4] Republica de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. Documento Conpes 3108. Programa de energización rural para zonas no interconectadas. Bogotá DC, Abril de 2001.
- [5] Omar Fredy Prias Caicedo, Ministerio de Minas y Energía. Programa de uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales PROURE, {en línea} {9 de abril de 2010}, disponible en: {[https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe\\_Final\\_Consultoria\\_Plan\\_de\\_accion\\_Proure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347](https://www.minminas.gov.co/documents/10180/558752/Informe_Final_Consultoria_Plan_de_accion_Proure.pdf/e8cdf796-d7b1-4bb1-90b9-e756c7f48347)}
- [6] Unidad de Planeación Minero Energética- UPME, Ministerio de Minas y Energía. Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia {en línea} {2015}, disponible en {[http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion\\_Energias\\_Renovables/INTEGRACION\\_ENERGIAS\\_RENOVANLES\\_WEB.pdf](http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf)}
- [7] Unidad de Planeación Minero Energética. Atlas de Radiación Solar Colombia {en línea}, disponible en: {[http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas\\_Radiacion\\_Solar/1-Atlas\\_Radiacion\\_Solar.pdf](http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/1-Atlas_Radiacion_Solar.pdf)}
- [8] Renewable Energy Policy for the 21th Century. Reporte de Estatus Global, {en línea} {2016}, disponible en {[http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR\\_2016\\_Full\\_Report\\_REN21.pdf](http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2016/06/GSR_2016_Full_Report_REN21.pdf)}
- [9] Instituto para la diversificación y ahorro de energía IDEA. Evolución tecnológica y prospectiva de costes de las energías renovables. Estudio Técnico PER 2011-2020. España, 2011. {En línea}.disponible en: {[http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos\\_11227\\_per\\_2011-2020\\_def\\_93c624ab.pdf](http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_11227_per_2011-2020_def_93c624ab.pdf)}
- [10] Centro analítico para el gobierno de la Federación Rusa. Development of Solar Technology in the World. {en línea}, {Octubre 2013}, disponible en: {<http://ac.gov.ru/files/publication/a/1206.pdf>}

- [11] Pepiñán L, Oscar. Energía Solar Fotovoltaica. Versión 1.8. Marzo de 2015. Licencia no comercial por Creative Commons. Disponible en: {<http://oscarperpinan.github.io/esf/>}
- [12] Castejon O. Agustin, Santamaria H. Germán. Instalaciones solares fotovoltaicas. Editex, S.A. España, 2010. ISBN: 978-84-9771-655-X
- [13] Jossen Andreas, Garcke Juegen, Uwe S. Dirk. Operation conditions of batteries in PV applications. Elsevier, Solar Energy. Diciembre 2003.
- [14] Sitio web oficial Micro Plus. Disponible en {<http://www.microplusgermany.com/es/pag-1-tecnologia-micro-led-plus.php>}
- [15] Ministerio de Minas y Energía, Unidad de Planeación Minero Energética UPME. Guía para la formulación y presentación de proyectos a los fondos FAER, FAZNI, FNR, FECF y programa PRONE. ISBN: 958-97750-9-8 Milenio Editores e Impresores. Bogotá DC, Colombia, 2006.