

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UN
GENERADOR FOTOVOLTAICO DE 10KW CON CONEXIÓN A LA RED DE
POTENCIA EN LA PLANTA DE TRITURACIÓN Y MOLIENDA SERMITOL
(SERVICIOS MINEROS DEL TOLIMA)**

Autor: Sandra Milena Madero Zuluaga

PROYECTO EMPRESARIAL PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA
ELECTRÓNICA

Director: M. Ing. Edwin Francisco Forero

Docente de la Facultad de Ingeniería Electrónica Universidad Santo Tomás

Co-director: Ing. Rafael Orlando Lara

Jefe Departamento de Operaciones SERMITOL

Universidad Santo Tomás de Aquino

Facultad de Ingeniería Electrónica

Bogotá D.C.

2017

Nota de aceptación

Firma del director

Firma del co-director

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo, mi agradecimiento a Dios por darme esta maravillosa oportunidad de transformar mi vida a través del conocimiento. Gracias señor por tu infinita misericordia. A mi esposo todo mi amor, gracias por ser el artífice de iniciar esta aventura y creer en todo momento en mí, aun en aquellos momentos de tristeza y desolación. A mis hijos, por toda la paciencia y comprensión, siempre serán el motor de mi vida. A mis padres por toda la motivación y el apoyo, mi mayor ejemplo y orgullo. A los directivos de la empresa Sermitol que me acogieron con gran calor humano y me brindaron todo el acompañamiento durante el periodo de prácticas, linda experiencia. A mi universidad, la llevaré siempre en mi corazón, gracias por todos los seres humanos llenos de conocimiento y sabiduría que ayudaron a formar en mí una nueva mujer.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	8
1. PROBLEMA	9
2. ESTADO DEL ARTE	10
3. JUSTIFICACIÓN	12
4. OBJETIVOS	13
4.1. OBJETIVO GENERAL	13
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
5. FUNDAMENTACIÓN HUMANISTICA.....	14
6. MARCO CONCEPTUAL.....	15
6.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	15
6.1.1. El efecto fotovoltaico	15
6.2. ASPECTOS ENERGÉTICOS DIRECTOS.....	17
6.2.1. La radiación solar	17
6.2.1.1. La radiación sobre la superficie terrestre.....	20
6.3. EL PANEL FOTOVOLTAICO	20
6.3.1. Asociación de las células solares.....	21
6.3.1.1. Asociación en serie	22
6.3.1.2. Asociación en paralelo	22
6.3.2. Características eléctricas	23
6.4. EQUIPOS DE LAS INSTALACIONES SOLARES FOTOVOLTAICAS	26
6.4.1. Estructuras	26
6.4.1.1. Disposición de los paneles	27
6.4.2. Reguladores de carga	28
6.4.3. Inversores - Convertidores DC/AC	28
6.4.3.1. Clasificación de los inversores conectados a red	29

6.4.4. Protecciones de las instalaciones solares fotovoltaicas	31
6.5. TOPOLOGÍA SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	31
6.5.1. Sistemas conectados a red	32
6.5.2. Sistemas aislados	33
7. DISEÑO METODOLÓGICO	34
8. CARGAS ELÉCTRICAS PLANTA SERMITOL.....	35
8.1. Estimación de consumo.....	35
8.1.1. Cargas de potencia regulada y no regulada en el área administrativa	35
8.1.2. Cargas de potencia en el área de producción.....	36
9. DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO	38
9.1. Disposición de los paneles solares.....	38
9.2. Cálculo del número de paneles del generador fotovoltaico	40
9.3. Ajustes del inversor y generador	41
9.4. Dimensionado de la sección del conductor	44
10. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS	46
10.1. Selección de los Módulos Solares.....	46
10.2. Selección del Inversor	47
10.3. Estructura integrada 20 módulos.....	48
10.4. Selección Medidor Bidireccional	49
10.5. Selección Conectores.....	50
10.6. Selección Cable Recubierto PVC 6mm	50
11. DIAGRAMA ELÉCTRICO.....	51
12. PRODUCCIÓN ANUAL DE ELECTRICIDAD SOLAR.....	52
13. RENTABILIDAD DE LA INSTALACIÓN	53
CONCLUSIONES	56
ANEXOS.....	57
BIBLIOGRAFÍA	63
REFERENCIAS	65

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Efecto fotovoltaico.	16
Gráfica 2. Representación del espectro solar.	17
Gráfica 3. Concepto de ángulo de incidencia.	18
Gráfica 4. Variación del ángulo de incidencia debido a la curvatura terrestre	19
Gráfica 5. Células monocristalinas y Células policristalinas	21
Gráfica 6. Asociación serie de varias células solares fotovoltaicas del tipo C-Si. ...	22
Gráfica 7. Asociación paralelo de varias células solares fotovoltaicas del tipo C-Si	23
Gráfica 8. Curva I-V de un módulo fotovoltaico.....	25
Gráfica 9. Efecto de la intensidad radiante de la curva I-V	26
Gráfica 10. Orientación e inclinación de un colector.	27
Gráfica 11. Esquema inversor monofásico	30
Gráfica 12. Esquema inversor trifásico	30
Gráfica 13. Esquema unifilar de un sistema fotovoltaico conectado a la red.	32
Gráfica 14. Esquema unifilar de un sistema fotovoltaico aislado	33
Gráfica 15. Distancia mínima entre módulos	38
Gráfica 16. Distancia mínima entre módulos, sobre superficies inclinadas	40
Gráfica 17. Estructura Integrada KH915 Sunfer.....	48
Gráfica 18. Fronius Smart Meter 63A Trifásico 43kW	49
Gráfica 19. Conectores Weidmuller Pvstick	50
Gráfica 20. Cable unifilar 6mm RV-K con recubrimiento de PVC	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Top 10 de países con mejor capacidad instalada anual y capacidad total instalada	10
Tabla 2. Orientación óptima.	28
Tabla 3. Inclinaciones orientativas que se suelen dar a los módulos según la época del año.	28
Tabla 4. Consumos potencia regulada y no regulada en el área administrativa.	35
Tabla 5. Consumos potencia no regulada en el área de producción.	36
Tabla 6. Estimación de las pérdidas de las instalaciones solares fotovoltaicas.	42
Tabla 7. Superficie requerida para la instalación de 1kWp.	42
Tabla 8. Estimación de energía solar producida al año.	52
Tabla 9. Costo de la instalación.	53
Tabla 10. Proyección costo a 25 años de la energía producida por el generador fotovoltaico.	54
Tabla 11. Proyección costo/beneficio a 25 años.	55

RESUMEN

Sermitol forma parte de la actividad minera desarrollada en la región del Tolima, al ser productor de carbonato de calcio, arcilla ferruginosa y mármol. Se trabaja diariamente manejando proyecciones de producción esperada contra producción real, que se ve afectada por problemas de interrupción en la corriente eléctrica y que son generados principalmente por cortes en el suministro de energía limitando la productividad e incluso generando daños en los equipos industriales.

Como alternativa a la deficiente calidad del servicio en sitios rurales, se propone la generación de energía a través de paneles fotovoltaicos sacando provecho a los altos niveles de radiación solar que presenta nuestro país por la zona geográfica privilegiada en la que se encuentra¹. Con este sistema no solo se estará abasteciendo de un servicio amigable con el medio ambiente sino que además puede representar una solución definitiva ante futuras crisis energéticas.

Palabras claves: crisis energética, generación eléctrica, paneles fotovoltaicos, radiación.

¹ Anexo A. Mapa de Irradiación Solar en Colombia. IDEAM

INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de este proyecto, se estudiaron los conceptos fundamentales para entender el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos y como logran generar electricidad a partir de la radiación solar. Se hace un análisis de cargas en el área administrativa y de producción para determinar qué área podrá ser cubierta por los 10kWp generados por el sistema fotovoltaico a diseñar, dimensionando los equipos necesarios para su implementación, calculando el costo del proyecto con el fin de saber cuál será su rentabilidad y si es viable económicamente su ejecución.

En Colombia hasta la fecha se han realizado instalaciones de tecnología solar y eólica de conexión a red eléctrica nacional, como el proyecto de 1.053 paneles solares policristalinos que la compañía Panasonic instaló en la terraza del edificio Alkosto de la Avenida 68 en la ciudad de Bogotá. El nuevo sistema genera 268,5 kWp, y se estima reducirá 234.2 toneladas de CO₂ al año. Esta instalación on-grid está proyectado a 20 años con lo cual se espera que en total se reduzca aproximadamente 4.684 toneladas de CO₂.²

Hay que diversificar las opciones energéticas no desechando ninguna alternativa que demuestre su potencial. Con este principio, la energía solar fotovoltaica pide un sitio dentro de los esfuerzos globales para cambiar o adaptar nuestro modelo energético, y lo pide porque su propia naturaleza la hace idónea para responder a los problemas medioambientales del modelo actual y porque el costo para apoyar su desarrollo es asumible, al ser, por ejemplo, una pequeñísima parte del costo de las catástrofes debidas al cambio climático.

² REVISTA VIRTUALPRO. Procesos Industriales. 2014. <http://www.revistavirtualpro.com/noticias/panasonic-y-alkosto-se-unen-para-generar-energia-limpia-a-traves-del-sol-con-un-nuevo-sistema-fotovoltaico-instalado-en-alkosto-ave-68>
[Consulta: Miércoles 17 de Agosto de 2016]

1. PROBLEMA

Las energías no renovables o energías convencionales son fuentes de energía que se encuentran en la naturaleza en cantidades limitadas, las cuales, una vez consumidas en su totalidad, no pueden sustituirse, ya que no existe sistema de producción o de extracción de recursos como el petróleo, gas natural o carbón económicamente viable. Estos recursos no renovables en algún momento, se acabarán, y tal vez sea necesario disponer de millones de años para que vuelvan a aparecer, el uso indiscriminado de estos combustibles fósiles genera gases nocivos para la vida, por ejemplo el Dióxido de carbono, Monóxido de carbono y Monóxido de nitrógeno, que dan lugar al Efecto Invernadero.

El aumento de la concentración de dióxido de carbono (CO₂) proveniente del uso de combustibles fósiles, ha provocado la intensificación del fenómeno invernadero y una de sus principales consecuencias y que llevó a agravar la crisis energética en nuestro país fue la disminución de recursos hídricos por las sequías y la mayor evaporación del agua. Hay que tener presente que en Colombia la gran porción de la generación eléctrica se realiza a través de plantas de generación hidráulicas, lo que conlleva a una alta vulnerabilidad en los tiempos secos, cuando la lluvia escasea y como consecuencia el nivel de los embalses disminuye.

A parte de estar latente el fantasma del racionamiento en épocas de sequía, uno de los principales inconvenientes que se tienen en la empresa Sermitol, es la calidad de la energía eléctrica suministrada. Las frecuentes interrupciones y sobretensiones producidas en la red generan baja eficiencia de los equipos eléctricos, paradas subitas de la producción y pérdidas en el cumplimiento de las metas establecidas en la compañía en su plan anual.

2. ESTADO DEL ARTE

El crecimiento mundial de la energía solar fotovoltaica ha seguido una curva exponencial durante más de dos décadas. Durante este periodo de tiempo, ha evolucionado desde un nicho de mercado basado en aplicaciones de pequeña escala hasta convertirse en una fuente convencional de electricidad.

El Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía (IEA PVPS); es uno de los acuerdos de investigación y desarrollo en colaboración dentro de la Agencia, cuya misión es: “mejorar los esfuerzos internacionales de colaboración que faciliten el papel de la energía solar fotovoltaica como una piedra angular en la transición hacia sistemas de energía sostenibles”³. Un informe publicado por la IEA PVPS indica que en el año 2015 se instalaron en todo el mundo 50 GW de nuevas plantas fotovoltaicas, lo que representa un incremento del 25% con respecto al año 2014.

El informe denominado “SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS” (Instantánea del Mercado Global Fotovoltaico 2015”), es un avance de la edición completa del informe que se publicará en el tercer trimestre de 2016; destaca que en el año 2015 el mercado fotovoltaico reinició su crecimiento en casi todas las regiones del mundo⁴.

Tabla 1. Top 10 de países con mejor capacidad instalada anual y capacidad total instalada

TOP 10 COUNTRIES IN 2015 FOR ANNUAL INSTALLED CAPACITY				TOP 10 COUNTRIES IN 2015 FOR CUMULATIVE INSTALLED CAPACITY			
1		China	15,2 GW	1		China	43,5 GW
2		Japan	11 GW	2		Germany	39,7 GW
3		USA	7,3 GW	3		Japan	34,4 GW
4		UK	3,5 GW	4		USA	25,6 GW
5		India	2 GW	5		Italy	18,9 GW
6		Germany	1,5 GW	6		UK	8,8 GW
7		Korea	1 GW	7		France	6,6 GW
8		Australia	0,9 GW	8		Spain	5,4 GW
9		France	0,9 GW	9		Australia	5,1 GW
10		Canada	0,6 GW	10		India	5 GW

Tomado de (Snapshot of Global Photovoltaic Markets/2015)

³ El periódico de la energía. 2016. <http://elperiodicodelaenergia.com/la-capacidad-mundial-de-fotovoltaica-instalada-bate-todos-los-records-y-alcanza-los-227-gw-en-2015/> [Consulta: Miércoles 18 de Mayo de 2016]

⁴ SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS, 2015 [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS - A Snapshot of Global PV - 1992-2015 - Final.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf) [Consulta: Miércoles 18 de Mayo de 2016]

En Latinoamérica, la fotovoltaica se ha incrementado en los últimos años. Se ha propuesto la construcción de un buen número de plantas solares en diversos países, a lo largo de toda la región, con proyectos incluso por encima de 100 MW en Chile, liderando la producción solar en Latinoamérica. Este país inauguró en junio de 2014 una central fotovoltaica de 100 MW, que se convirtió en la mayor realizada hasta la fecha en Latinoamérica.⁵

A pesar de que en Colombia el crecimiento de las instalaciones fotovoltaicas son mas pausadas, los mapas de radiación solar reportados por la Unidad de Planeación Minero Energética UPME en el año 2005, fecha que, a pesar de ser lejana, no presenta diferencias con la situación actual, debido a que las variaciones de los niveles de radiación son prácticamente invariantes en el tiempo, este país posee niveles de insolación que se encuentran entre 3.5 kWh/m² día y 6 kWh/m² día⁶, valores que coinciden con los datos extraídos de la NASA y que ratifican un potencial fotovoltaico bastante positivo.

Según la tendencia global de decremento lineal del costo por metro cuadrado de los paneles solares a través del tiempo, se puede suponer que en los próximos años el costo por vatio generado por un sistema fotovoltaico tendrá la posibilidad de competir con el valor de la energía generada por las centrales eléctricas nacionales que dominan el mercado actual, además de convertirse en una alternativa financieramente atractiva para brindar soluciones energéticas a las zonas no interconectas del territorio nacional.

⁵ PV magazine. 2014. <http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/bachelet-inaugura-la-central-amanecer-solar-cap-de-100-mw-100015581/> [Consulta: Viernes 20 de Mayo de 2016]

⁶ Anexo A. Mapa de Irradiación Solar en Colombia. IDEAM

3. JUSTIFICACIÓN

Este proyecto tiene como propósito realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de generación fotovoltaico de 10kW con conexión a la red de potencia, en la planta de trituración y molienda SERMITOL (Servicios Mineros del Tolima); ubicada en el kilómetro 2.5 vía Payandé - San Luis (Tolima). Se busca garantizar un flujo de energía eléctrica limpia y eficiente, donde no solo se estén atacando los efectos nocivos de la generación eléctrica convencional, si no también se brinde una mejor calidad energética.

Como se ha visto anteriormente, la dependencia casi total de un modelo energético basado en el carbón, el gas y el petróleo está conduciendo a unas alteraciones en el clima de efectos desastrosos para el planeta. Las emisiones de gases aumentan anualmente y seguirán haciéndolo si no se modifica el abastecimiento energético. Para comprometer al sector privado, el gobierno Colombiano ha aprobado el decreto 2143 del 4 de noviembre de 2015 que contiene incentivos tributarios para promover las denominadas fuentes no convencionales de energía, entre las cuales se encuentra la energía solar.

El decreto contempla cuatro incentivos tributarios para los proyectos de energías renovables. En primer lugar, se introduce una deducción del impuesto de renta del 50 por ciento de las inversiones por un plazo de cinco años. En segundo lugar, se aplicará una depreciación acelerada de los activos. En tercer lugar, se exime de la aplicación del Impuesto al Valor Agregado (IVA) a los bienes asociados al proyecto. El decreto también contempla la exención del gravamen arancelario.

Estos incentivos tributarios, buscan que en Colombia exista una matriz de generación de energía más diversificada para darle ingreso a nuevas tecnologías en el sistema energético. Adicionalmente, los beneficios al adoptar este tipo de tecnologías también se verán reflejados en el ahorro de aproximadamente \$132.147.430 en costos de facturación por concepto de energía, la prolongación en la vida útil de los equipos y permitirá gozar de inmunidad parcial ante las eventuales desconexiones que se puedan presentar por parte de la compañía de distribución eléctrica.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un estudio de factibilidad para la implementación de un sistema de generación fotovoltaico de 10kW con conexión a la red de potencia, en la planta de trituración y molienda SERMITOL (Servicios Mineros del Tolima).

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1.** Definir las cargas asociadas al sistema de generación fotovoltaico, por medio de un estudio de las cargas eléctricas de la planta SERMITOL.
- 2.** Diseñar un sistema de generación fotovoltaico de 10kW con conexión a la red de potencia, especificando los equipos y materiales requeridos.
- 3.** Determinar los costos de implementación del sistema generador fotovoltaico diseñado con conexión a la red, así como la factibilidad técnica y económica del proyecto.

5. FUNDAMENTACIÓN HUMANÍSTICA

Gracias a la ingeniería se han desarrollado proyectos donde el hombre es capaz de masificar la producción a partir de la utilización indiscriminada de recursos naturales no renovables, lo que no se ha tenido en cuenta es que estos recursos en algún momento se pueden agotar y tardan en aparecer nuevamente en miles de años. En este momento, cuando nos vemos enfrentados a esta realidad, es donde debe generarse en las personas esa responsabilidad frente a la escasez y a los daños que trae el uso de elementos contaminantes en la naturaleza.

Por otro lado las instituciones encargadas de impartir conocimientos, están en la obligación de crear conciencia en los futuros profesionales para que estén en la constante búsqueda de desarrollar proyectos que mitiguen el daño ambiental. Por tanto, el hombre como ser cultural, tiene responsabilidad en el origen del problema y también en su solución. El compromiso debe estar en toda la sociedad, principalmente en los consumidores ya que son estos quienes deben optar por iniciativas que busquen cubrir las necesidades aprovechando cuando la naturaleza ofrece fuentes inagotables como en este caso particular lo es el sol, ya que su aprovechamiento puede representar una solución contundente al suministro energético.

Al implementar sistemas energéticos auto sostenibles, se atacan varios frentes sociales, en primer lugar se contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en segundo lugar se permite llegar a zonas remotas, donde no se cuenta con una red de distribución eléctrica por los altos costos que esto conllevaría y en tercer lugar, permite a cualquier ciudadano hacer un ahorro importante en su factura eléctrica si este sistema tiene conexión a la red de distribución, en caso contrario se contará con un sistema completamente autónomo que no tendrá efecto o alteración alguna en caso de presentarse crisis energética en el país, derivada por los distintos fenómenos ambientales.

Cabe resaltar que el costo económico de un posible racionamiento de energía es muy alto, sin contar con el impacto social que se desprende de los apagones. La forma en que las sociedades modernas funcionan dependen totalmente de su disponibilidad, cualquier actividad productiva o de la vida cotidiana bien sea educación, recreación o transporte requiere de un suministro eléctrico adecuado, estable y de fácil acceso.

6. MARCO CONCEPTUAL

Esta consulta fue basada en el curso de Energía Solar Fotovoltaica del Grupo San Valero, Estudios Superiores Abiertos SEAS. Universidad Católica de Ávila (España).

6.1. ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

La Energía solar, es la energía obtenida mediante la captación de la luz y el calor emitidos por el sol. La radiación solar que alcanza la tierra puede aprovecharse por medio del calor que produce, como también a través de la absorción de la radiación, por ejemplo, en dispositivos ópticos o de otro tipo. Es una de las llamadas energías renovables particularmente del grupo no contaminante, conocido como energía limpia o energía verde. La potencia de la radiación varía según el momento del día, las condiciones atmosféricas que la amortiguan y la latitud. Se puede asumir que en buenas condiciones de irradiación el valor es de aproximadamente 1000W/m^2 en la superficie terrestre. A esta potencia se le conoce como irradiancia. La radiación es aprovechable en sus componentes directa y difusa, o en la suma de ambas. La radiación directa es la que llega del foco solar sin reflexiones o refracciones intermedias. La difusa es la emitida por la bóveda celeste diurna gracias a los múltiples fenómenos de reflexión y refracción solar en la atmósfera, en las nubes y el resto de elementos atmosféricos y terrestres. La radiación directa puede reflejarse y concentrarse para su utilización, mientras que no es posible concentrar la luz difusa que proviene de todas las direcciones.

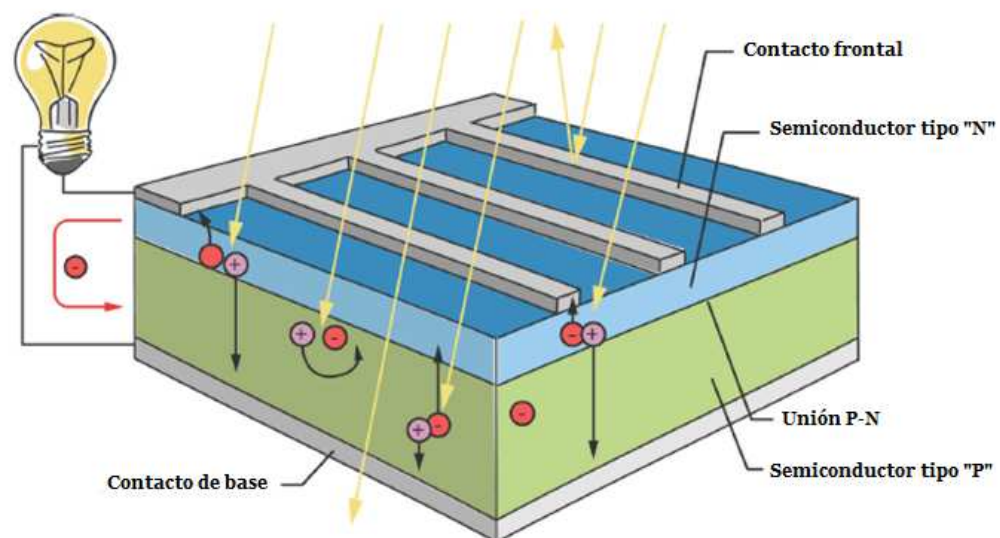
6.1.1. El Efecto Fotovoltaico

El Efecto Fotovoltaico (FV) es la base del proceso mediante el cual una célula FV convierte la luz solar en electricidad. La luz solar está compuesta por fotones, o partículas energéticas. Estos fotones son de diferentes energías, correspondientes a las diferentes longitudes de onda del espectro solar. Cuando los fotones inciden sobre una célula FV pueden ser reflejados, absorbidos o pueden pasar a su través. Únicamente los fotones absorbidos generan electricidad.

Cuando un fotón es absorbido, la energía del fotón se transfiere a un electrón de un átomo de la célula. Con esta nueva energía, el electrón es capaz de escapar de su posición normal asociada con un átomo para formar parte de una corriente en un circuito eléctrico. 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 diferentes dopadas (tipo p y tipo n) para formar un campo eléctrico, positivo en una parte y negativo en otra. Cuando la luz solar incide en la célula se liberan electrones que pueden ser atrapados por el campo eléctrico, formando una corriente eléctrica. Es por ello que estas células se fabrican a partir de este tipo de materiales, es decir, materiales que actúan como aislantes a baja temperatura y como conductores cuando se aumenta la energía.

Además de los semiconductores las células solares están formadas por una malla metálica superior u otro tipo de contrato para recolectar los electrones del semiconductor y transferirlos a la carga externa y un contacto posterior para completar el circuito eléctrico. También en la parte superior de la célula hay un vidrio u otro tipo de material encapsulado transparente para sellarla y protegerla de las condiciones ambientales, y una capa anti reflexiva para aumentar el número de fotones absorbidos.

Gráfica 1. Efecto fotovoltaico



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 2: Célula-módulo solar, F. 2.66, P. 105)

Estas células conectadas unas con otras, encapsuladas y montadas sobre una estructura soporte o marco, conforman un módulo fotovoltaico. Los módulos están diseñados para suministrar electricidad a un determinado voltaje (normalmente 12 o 24 V). La corriente producida depende del nivel de insolación. La estructura del módulo protege a las células del medio ambiente y son muy durables y fiables. Aunque un módulo puede ser suficiente para muchas aplicaciones, dos o más módulos pueden ser conectados para formar un generador FV. Los generadores o módulos fotovoltaicos producen corriente continua (DC) y pueden ser conectados en serie o en paralelo para poder producir cualquier combinación de corriente y tensión.

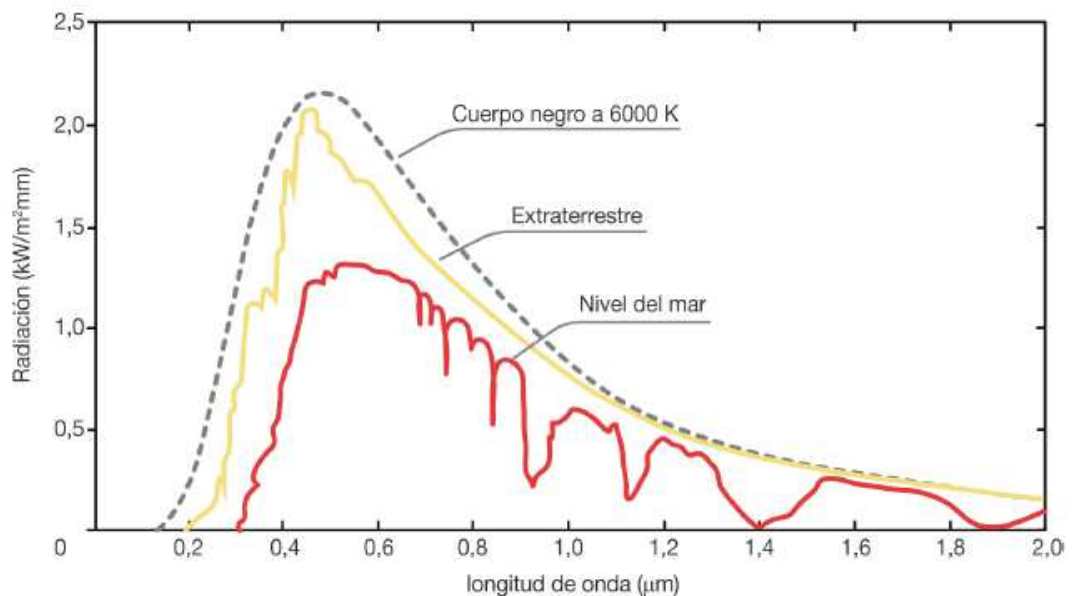
6.2. Aspectos Energéticos Directos

En este apartado se conocerán aspectos como la radiación solar, generación de la radiación solar, distribución espectral de la radiación solar, energía de radiación y la radiación sobre la superficie terrestre.

6.2.1. La Radiación Solar

Se conoce por radiación solar al conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el sol y se distribuyen desde infrarrojo hasta ultravioleta.

Gráfica 2. Representación del espectro solar



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 2: Célula-módulo solar, F. 2.65, P. 104)

La magnitud que mide la radiación solar que llega a la tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio x metro²).

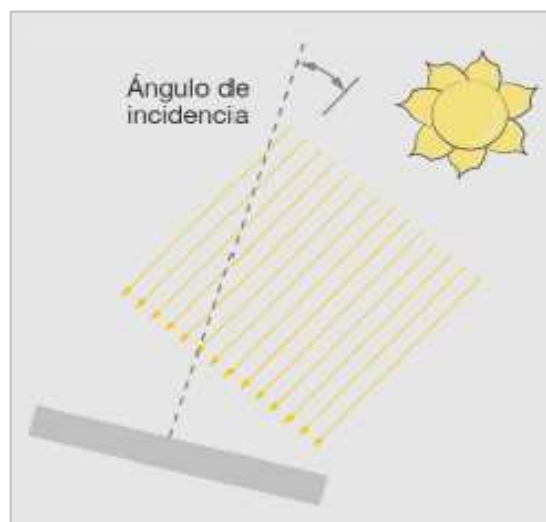
Energía de radiación: Si se instala una determinada superficie S perpendicularmente a los rayos solares de intensidad I , la energía radiante que incide sobre dicha superficie en un tiempo determinado t se denomina irradiación E y se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$E = I * S * t$$

Dónde:	E	Energía radiante o radiación. Se mide en julios (J), aunque suele darse también en calorías (cal) o en cualquier otro tipo de unidades de energía.
	I	Intensidad radiante. Se mide en W/m^2 .
	S	Superficie. Se mide en metros cuadrados (m^2).
	t	Tiempo en segundos.

Angulo de incidencia: El ángulo de incidencia α , es el ángulo formado por los rayos solares y la recta normal (perpendicular) a la superficie considerada.

Gráfica 3. Concepto de ángulo de incidencia



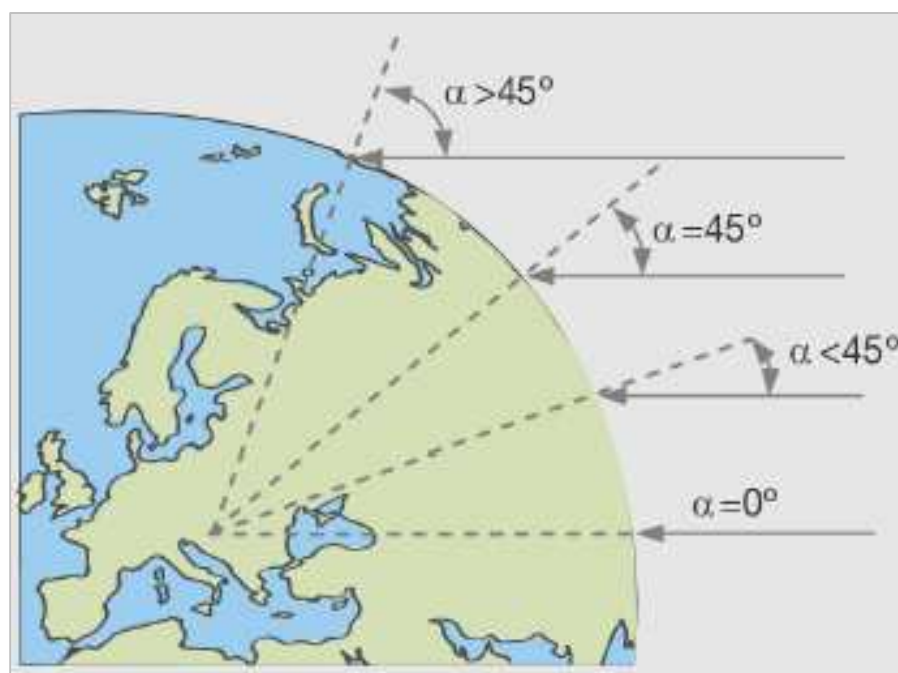
Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 1: Energía solar, F. 1.14, P. 32)

De este modo, si la superficie es perpendicular a los rayos, el ángulo de incidencia es 0° y la energía radiante que incide (la irradiación E) es máxima. Sin embargo, si la superficie se sitúa paralelamente a los rayos, el ángulo de incidencia es 90° y la energía radiante incidente es nula.

A medida que la superficie deja de ser perpendicular a los rayos solares, parte de estos rayos dejan de incidir sobre la superficie, lo que supone una “perdida” de radiación que produce un menor calentamiento de dicha superficie. Esta es la razón por la cual los rayos del sol calientan mucho más en las horas del medio día que a las primeras de la mañana o ultimas horas de la tarde.

También el ángulo de incidencia de los rayos solares es la causa de que las regiones alejadas del Ecuador reciban menos calor que las que están cercanas al mismo.

Gráfica 4. Variación del ángulo de incidencia debido a la curvatura terrestre.



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 1: Energía solar, F. 1.18, P. 34)

6.2.1.1. La radiación solar sobre la superficie terrestre

A causa de los fenómenos de reflexión, dispersión y absorción, a nivel de la superficie terrestre se distinguen tres tipos de radiación solar:

- Radiación directa
- Radiación difusa
- Radiación albedo

La radiación directa es la compuesta por aquellos rayos que llegan “directamente” del disco solar, como foco puntual, sin sufrir prácticamente ninguna desviación en su dirección (llegan “en línea recta”).

La radiación difusa se produce a causa de los rayos que han sufrido importantes cambios de dirección debido a la dispersión atmosférica, mientras que la radiación solar reflejada por el suelo corresponde a la radiación de albedo.

Si se suma los dos tipos de radiación (directa y difusa), se obtiene la denominada radiación hemisférica total, que es la que debe ser considerada.

6.3. El Panel Fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos o colectores solares fotovoltaicos están formados por un conjunto de celdas que producen electricidad a partir de la luz que incide sobre ellos. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, y corresponde con la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, que son:

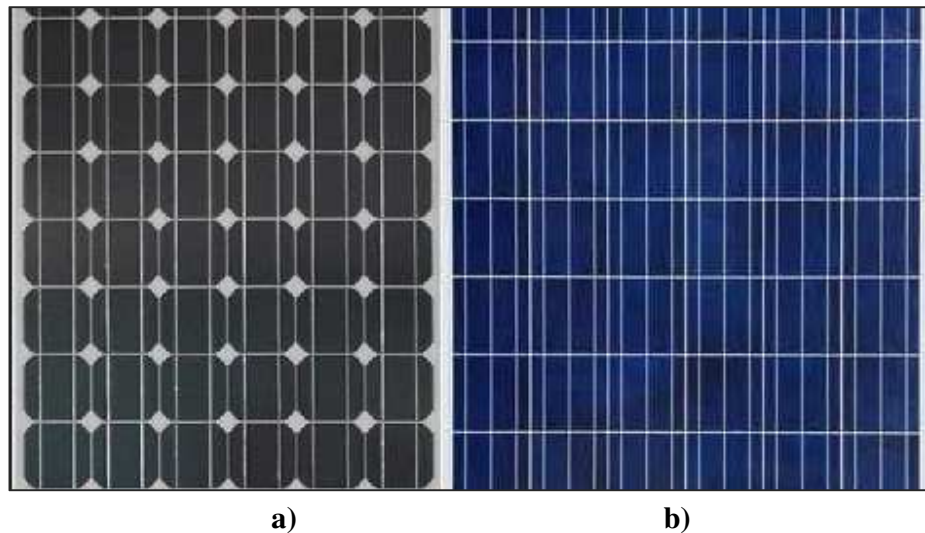
- Radiación de 1000W/m^2 .
- Temperatura de célula de 25°C (no temperatura ambiente).

Tipos de Células:

- **Monocristalinas:** La física cuántica da como eficiencia máxima teórica a la célula de silicio un valor en torno al 23%, en células comerciales fabricadas mediante procesos industriales, los valores de eficiencia están entre el 13% y el 20%. Aunque en su fabricación consume más energía y tiempo que las células policristalinas, son el tipo de células con la mayor eficiencia.

- **Policristalinas:** Los valores de eficiencia de estas células varían entre el 15% y el 18%. El color azul obtenido en las células de silicio policristalinas es provocado por el baño aplicado de anti reflectante.

Gráfica 5. a) Células monocristalinas b) Células policristalinas



Tomado de (<http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com.co/2013/04/que-panel-comprar-monocristalino-o-policristalino.html>)

- **Amorfas:** También llamadas células de capa fina. Su utilización es muy común en calculadoras y relojes. El rendimiento de los módulos de silicio amorfo está entre valores del 6% al 8%.
- **Arseniuro de Galio (GaAS):** Son células altamente eficientes, que se utilizan principalmente para aplicaciones espaciales como los satélites. Han llegado a alcanzar valores aproximados del 30% de eficiencia, pero son muy costosas.

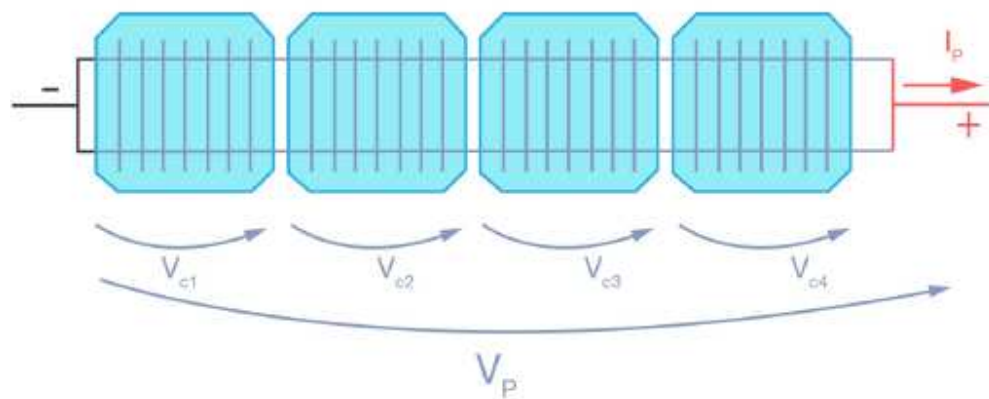
6.3.1. Asociación de las células solares

La mayoría de las aplicaciones donde se emplea la energía solar no trabaja a las tensiones ni potencias de una célula, por lo tanto es necesario la asociación de las mismas, dicha asociación puede ser para incrementar la tensión de trabajo o la corriente generada por la célula fotovoltaica.

6.3.1.1. Asociación serie

En este caso, se busca incrementar la tensión de trabajo de la célula solar, mientras que la corriente que circula por todas es la misma, para ello se conecta el polo negativo de la célula solar con el positivo de la siguiente.

Gráfica 6. Asociación serie de varias células solares fotovoltaicas del tipo c-Si



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 2: Célula-módulo solar, F. 2.85, P. 124)

Ecuación que representa el comportamiento de la corriente de la asociación en serie:

$$I_P = I_{C1} = I_{C2} = I_{C3} = I_{C4}$$

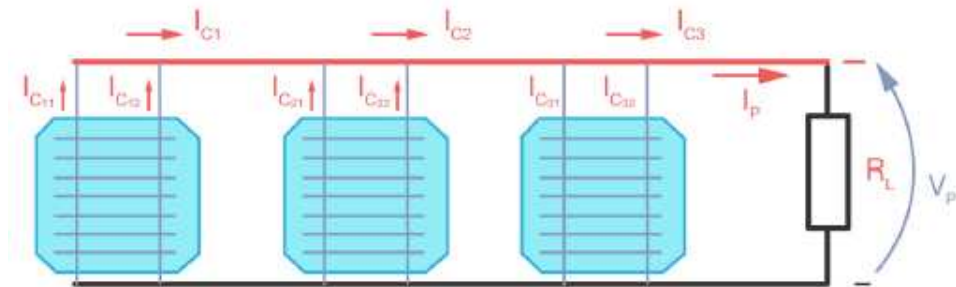
Ecuación que representa el comportamiento del voltaje de la asociación en serie:

$$V_P = V_{C1} + V_{C2} + V_{C3} + V_{C4}$$

6.3.1.2. Asociación paralelo

Si la conexión de las células se realiza en paralelo, la corriente generada por el modulo se ve incrementada al sumarse la corriente generada por cada una de las células solares, mientras que la tensión permanece igual para todas.

Gráfica 7. Asociación paralelo de varias células solares fotovoltaicas del tipo c-Si. Cada célula fotovoltaica incluye tiras de material conductor para el conexionado con el resto de células.



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 2: Célula-módulo solar, F. 2.86, P. 125)

Ecuación que representa el comportamiento del voltaje de la asociación en paralelo:

$$V_P = V_{C1} = V_{C2} = V_{C3} = V_{C4}$$

Ecuación que representa el comportamiento de la corriente de la asociación en paralelo:

$$I_P = I_{C1} + I_{C2} + I_{C3} + I_{C4}$$

6.3.2. Características eléctricas

Para caracterizar un panel solar desde el punto de vista eléctrico, lo primero es definir las condiciones en las que se realiza esta caracterización del elemento, es decir, su curva característica I-V bajo unas determinadas condiciones de iluminación y temperatura.

Condiciones estándar de medición (STC): Puede obtenerse a partir de la información característica que, conjuntamente con el modulo, debe suministrar el fabricante. Dicha información está formada por los valores de algunos parámetros medidos en las llamadas condiciones estándar de medida.

Los parámetros medidos en condiciones estándar son los siguientes:

- Irradiancia $G = 1000\text{W/m}^2$
- Temperatura de célula = 25°C .

Los parámetros que definen la respuesta de un panel solar son:

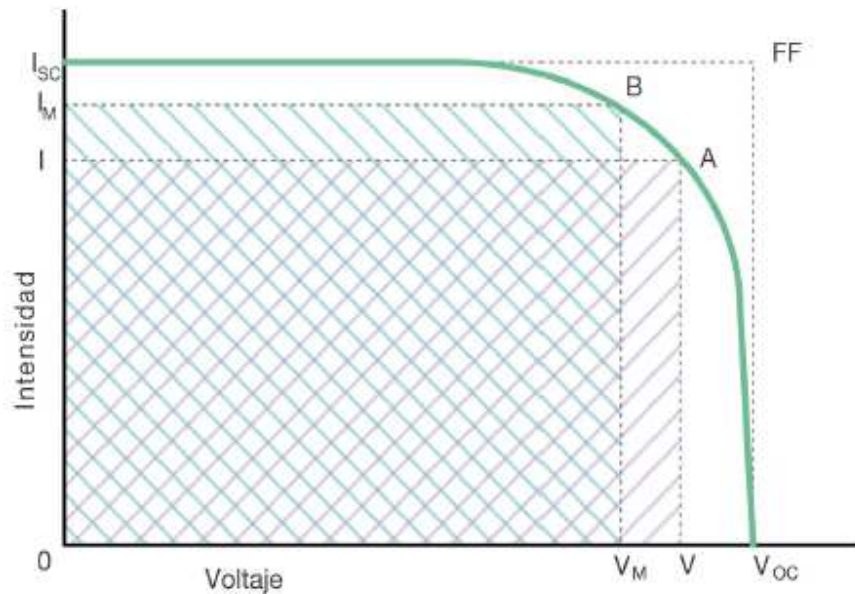
- **Corriente de cortocircuito (I_{sc}):** Es la máxima intensidad que se puede obtener de un panel solar en condiciones estándar de operación, o la obtenida entre bornes de un panel solar con una resistencia nula, por lo que la diferencia de potencial será nula también.
- **Voltaje a circuito abierto (V_{oc}):** Es el voltaje máximo que se puede obtener sin dejar corriente entre bornes de un panel solar (circuito abierto).
- **Corriente (I) a través de un determinado voltaje (V):** La corriente eléctrica producida a un voltaje V a través del circuito externo que une los bornes del panel, y que tiene una resistencia R .
- **Potencia máxima (P_M):** Trabaja en condiciones de potencia máxima cuando la resistencia del circuito externo sea tal que se tenga I_M y V_M para que su producto sea máximo.
- **Eficiencia total del panel:** Es el cociente entre la potencia eléctrica producida y la potencia de la radiación que incide en el panel.
- **Factor de forma (FF):** Concepto teórico que sirve para medir la forma de la curva que define las variables I y V , con la máxima potencia del panel solar fotovoltaico. La ecuación que representa el factor de forma es:

$$FF = \frac{P_M}{(I_{sc}V_{oc})} = \frac{I_M V_M}{I_{sc} V_{oc}}$$

El valor obtenido del factor de forma siempre va a ser menor de 1. Si el valor se aproxima a 1, la forma de la curva característica se parecerá a un rectángulo. Si el valor del FF es próximo a cero indica que hay una célula de mala calidad. Para las células de semiconductores cristalinos, el valor del factor de forma estará entre valores de 0,7 y 0,8.

Si se varía la resistencia externa entre cero e infinito se tendrá todos los valores (I - V), al unirlos se obtendrá la curva característica del panel o curva intensidad-voltaje.

Gráfica 8. Curva I-V de un módulo fotovoltaico



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 2: Célula-módulo solar, F. 2.89, P. 129)

A es un punto cualquiera de la gráfica (I-V), en donde se tendrá una igual al área del rectángulo (O-I-A-V). Si el punto A se mueve hacia la derecha, I disminuye, y por lo tanto, también lo hace el área antes descrita. Si por el contrario, A se mueve hacia la izquierda, llegará un momento en que el área también disminuirá.

Al punto B, en donde el área sea igual al área del rectángulo (O – I_M – B – B_M), se le llamara el punto de máxima potencia P_M. La curva característica I-V de iluminación representada por esta ecuación posee la forma estándar, obtenida por la ecuación Shockley, siendo:

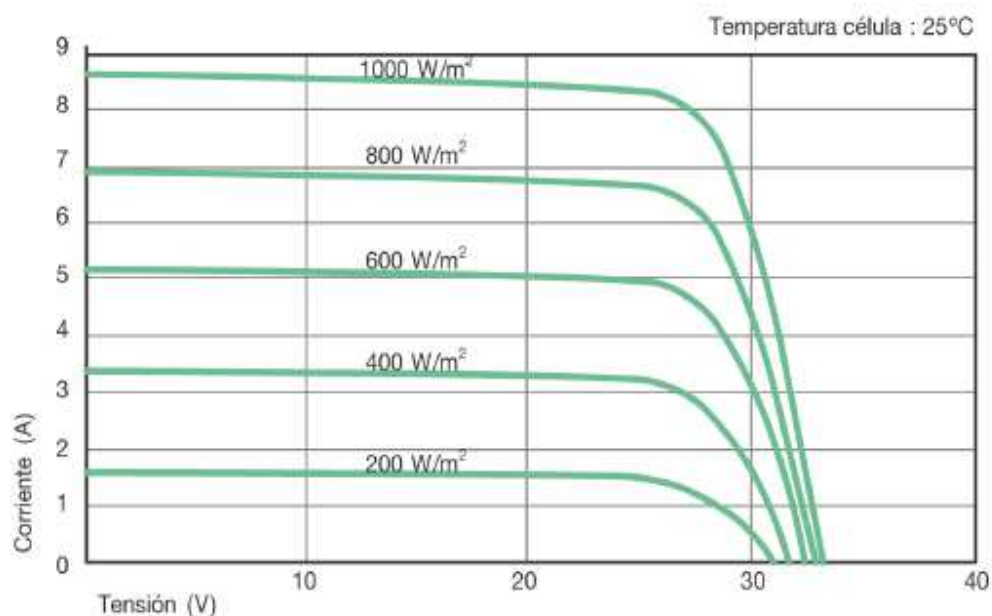
$$I = I_L - I_0 \cdot \left[e^{\left(\frac{q-v}{K \cdot T_c} \right)} - 1 \right]$$

Dónde: q= Carga del electrón ($1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$)

K= Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$)

T_c = Temperatura absoluta de la célula (K).

Gráfica 9. Efecto de la intensidad radiante de la curva I-V



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 2: Célula-módulo solar, F. 2.90, P. 130)

6.4. Equipos de las Instalaciones Solares Fotovoltaicas

En el apartado anterior se vio el componente principal de las instalaciones solares fotovoltaicas, el módulo solar. Además de este equipo, en función al tipo de instalación se encuentran otros componentes igual de importantes que se conocen por sus siglas en ingles BOS (Balance of System).

6.4.1. Estructuras

Para optimizar la producción de energía, es necesaria una orientación e inclinación determinada de los paneles, para ello se emplea un soporte o bastidor sobre el que se fija el panel solar fotovoltaico, esta estructura fijara la inclinación de los paneles solares.

Las funciones principales que realiza este componente son:

- Establecer la orientación (α o azimuth) y el ángulo de inclinación (β) óptimo de la instalación.

- Transmitir los esfuerzos soportados por el campo de generación.
- Dar rigidez al campo de paneles, así como garantizar la sujeción de los mismos.

Desde el punto de vista de la inclinación del panel para la optimización del rendimiento, se puede clasificar en dos grupos: instalaciones fijas y móviles (conocidas como seguidores solares).

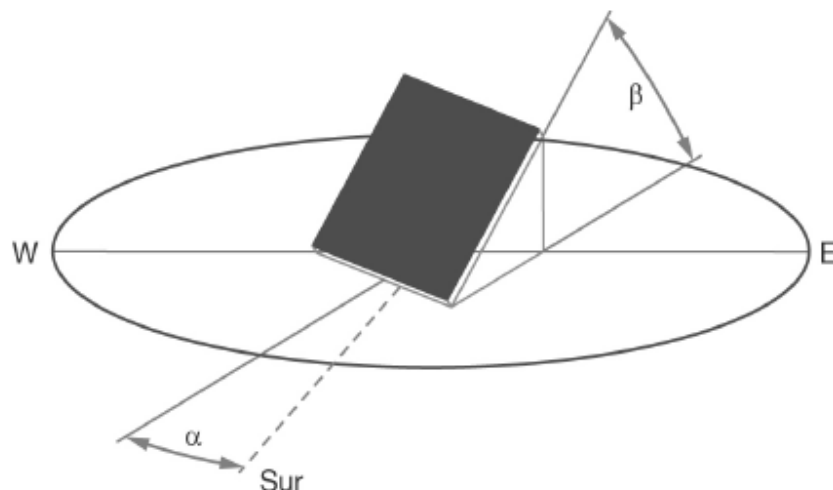
6.4.1.1. Disposición de paneles

La orientación α de un captador viene expresada por el azimut de la proyección horizontal de la recta normal (perpendicular) al plano del colector.

- Captador orientado hacia el sur: $\alpha = 0^\circ$.
- Captador orientado hacia el este: $\alpha = 0 - 90^\circ$.
- Captador orientado hacia el oeste: $\alpha = +90^\circ$.

La inclinación β del captador es el ángulo que forma el plano horizontal con el plano de la superficie definida por el colector. Para los captadores situados horizontalmente, su inclinación $\beta = 0^\circ$; y para los situados verticalmente $\beta = 90^\circ$.

Gráfica 10. Orientación e inclinación de un colector.



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 3: Equipos, F. 3.106, Pág. 158)

Para lograr la captación máxima de energía solar durante el periodo de uso de la instalación, deben seguirse las siguientes recomendaciones.

Tabla 2. Orientación óptima

Ubicación de la instalación	Orientación óptima
Hemisferio norte	Sur geográfico
Hemisferio sur	Norte geográfico

Tabla 3. Inclinaciones orientativas que se suelen dar a los módulos, según la época del año

Criterio	Inclinación óptima
Electrificación con demanda durante todo el año en viviendas, y otras funciones uniformes	Latitud geográfica +15°
Demanda preferente en invierno para instalaciones de servicios eléctricos, albergues...	Latitud geográfica +20°
Demanda preferente en primavera y verano	Latitud geográfica

6.4.2. Reguladores de carga

La función principal del regulador, es controlar la carga y descarga de la batería, de esta forma se evitan problemas y se aumenta su vida útil. Estos equipos realizan la función de estabilizar la tensión que generan los paneles solares fotovoltaicos a los valores de los consumos conectados en corriente continua.

6.4.3. Inversores o Convertidores DC/AC

Con el objetivo de poder utilizar los equipos eléctricos más comunes se transforma la electricidad de corriente continua a corriente alterna, transformando la corriente de origen de 12, 24 o 48 voltios en DC a la tensión de utilización 240 o 400 voltios en AC, para ello se emplea un inversor u ondulator.

Los inversores se pueden clasificar en función del tipo de onda producida:

- Onda Cuadrada.
- Onda Modificada Senoidal.
- Onda senoidal.

El inversor de onda senoidal tiene la onda como la corriente alterna, es el más perfecto de los tres, pero es el más caro, por lo que dependiendo de la aplicación se utiliza un equipo u otro.

El inversor es el elemento más importante de la instalación fotovoltaica conectada a red, funciona como adaptador entre el generador fotovoltaico y la red eléctrica, convirtiendo la energía generada por los paneles a las condiciones de la red.

Un inversor está compuesto por una etapa convertidora y por una etapa filtradora. La primera etapa se ocupa de producir a su salida una onda de impulso, a partir de la tensión en DC, proveniente del generador fotovoltaico, que tiene en su entrada, mientras que la etapa filtradora, tiene como misión eliminar los armónicos indeseados de la onda de impulsos, producida en la etapa sintetizadora o convertidora, para producir una onda totalmente senoidal.

Suele incorporar tanto en la parte DC como en la de AC, los equipos de protección necesarios frente a: Cortocircuitos, Tensión de red o Frecuencia fuera de rango, Sobretensiones, Perturbaciones presentes en la red, Control manual de encendido y apagado y Separación galvánica con la red de distribución.

6.4.3.1. Clasificación de los inversores conectados a red

Método de conmutación: Este criterio es uno de los más relevantes ya que del método de conmutación depende, directamente o indirectamente, algunas de las características más importantes, como la calidad de las señales de salida, el rango de potencia, la frecuencia de conmutación, la configuración del inversor y el esquema de control.

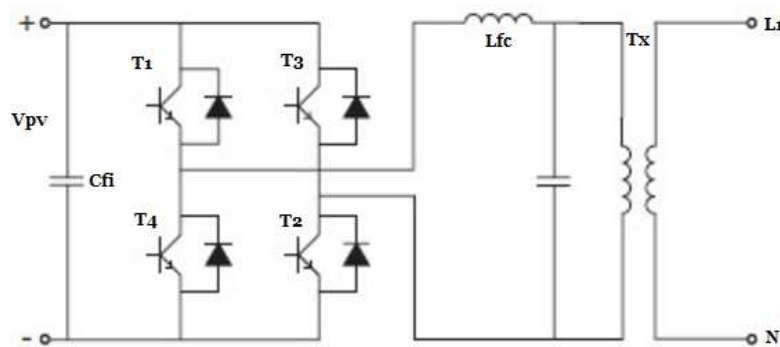
- Inversores controlados por la red o conmutados por línea:
 - ✓ Tiristores.
 - ✓ Capacidades: Mediana a Alta Potencia (50 a 5000 kW).
- Inversores autoconmutados tipo PWM:
 - ✓ Interruptores controlables (MOSFETs, GTOs, e IGBTs).
 - ✓ Capacidades: Varios cientos de Watts, hasta 500kW Aprox.

Frecuencia de Conmutación: Siguiendo este criterio, se puede encontrar los siguientes tipos de inversores: Inversores de baja frecuencia ($<10\text{kW}$), Inversores de media frecuencia ($10\text{-}50\text{kW}$), Inversores de alta frecuencia ($>50\text{kW}$).

Parámetro modulado: La selección de uno u otro tipo depende del propósito del sistema de generador y hay dos posibilidades: Inversores de control de voltaje e Inversores de control de corriente.

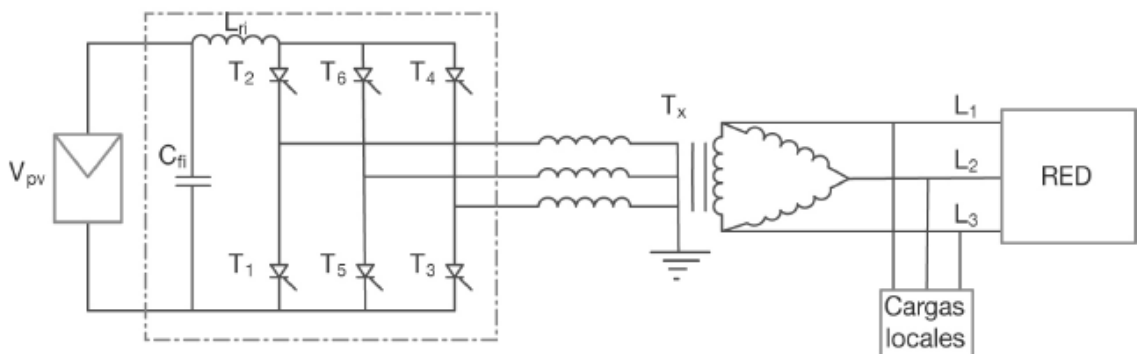
Configuración del circuito de potencia: Hay dos tipos de instalaciones; configuración tipo puente monofásico y configuración puente trifásico.

Gráfica 11. Esquema inversor monofásico



Tomado de (<http://renewablengineering.blogspot.com.co/2012/02/seleccion-de-inversor-i.html>)

Gráfica 12. Esquema inversor trifásico



Tomado de (SEAS, Estudios Superiores Abiertos. 3: Equipos, F. 3.143, P. 208)

6.4.4. Protecciones de la instalaciones solares fotovoltaicas

Estos elementos no solamente protegen a los elementos del sistema, módulos fotovoltaicos, reguladores e inversor, sino que además permiten garantizar la seguridad de los usuarios y operarios de mantenimiento.

- ✓ Instalación puesta a tierra: La toma de tierra se puede definir como la unión directa de determinadas partes de una instalación eléctrica, con la toma de tierra, permitiendo el paso a tierra de las corrientes de fuga o las descargas atmosféricas. Se pueden distinguir dos tipos de puesta a tierra dentro del generador fotovoltaico, a las cuales se les denomina, tierra de servicio y tierra de protección.
- ✓ Descargador de sobretensión: Los descargadores de sobretensión protegen la instalación de sobretensiones, que se originan fundamentalmente, como consecuencia de las descargas atmosféricas, conmutaciones de redes y fallas en las mismas.

Se pueden clasificar por categorías de acuerdo a la capacidad de los equipos para soportar sobretensiones. Dichas categorías indican los valores de tensión que dichos equipos deben soportar, así como, indican el valor límite máximo de tensión que deben permitir los diferentes dispositivos de protección.

6.5. Topología de Sistemas Fotovoltaicos

Típicamente, un sistema fotovoltaico se define como el conjunto de elementos mecánicos, electrónicos y eléctricos necesarios para captar y transformar la energía solar en energía eléctrica. Atendiendo a su configuración se clasifican en dos grupos.

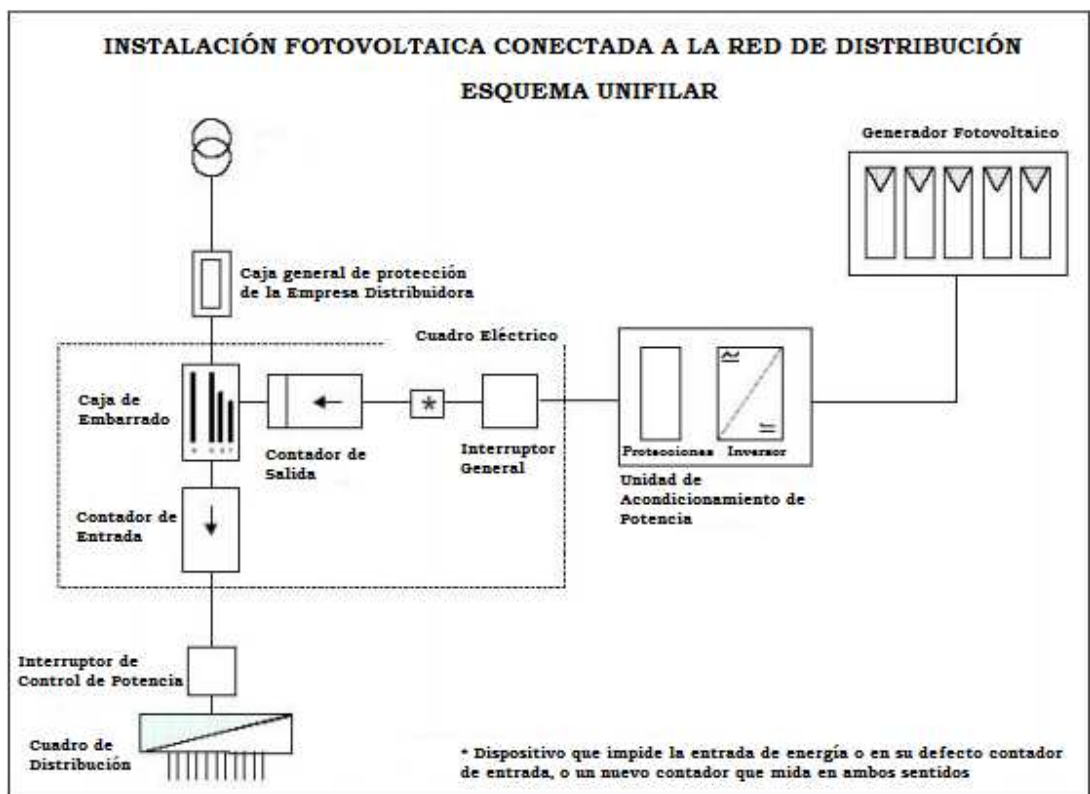
- Sistemas conectados a la red.
- Sistemas aislados.

6.5.1. Sistemas conectados a la red

Estos sistemas están compuestos por un generador fotovoltaico que se encuentra conectado a la red eléctrica convencional a través de un inversor, produciéndose un intercambio energético entre ésta y el sistema fotovoltaico, característico de este tipo de instalaciones. Así, el sistema inyecta energía en la red cuando su producción supera al consumo local, y extrae energía de ella en caso contrario.

En los sistemas conectados a red es necesario conectar con las líneas de distribución, cumpliendo con los requisitos demandados por la compañía eléctrica, incluyendo un sistema de medición. Es necesario tener en cuenta que en el caso de considerar sistemas conectados a red, es la misma red la que desempeña la tarea de acumulador, de capacidad infinita. La carga representa, en cambio, el usuario conectado a red, como sucede en cualquier otro sistema 'grid connected'.

Gráfica 13. Esquema unifilar de un sistema fotovoltaico conectado a la red



Tomado de (http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/11054/PFC_Roberto_Sanz_Moya.pdf?sequence=1)

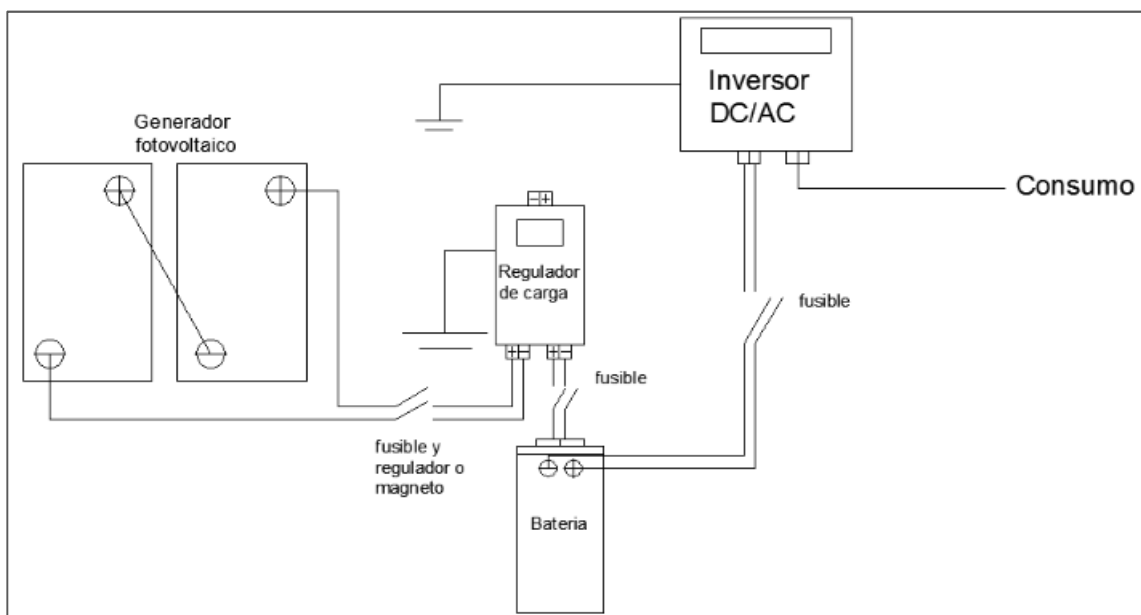
6.5.2. Sistemas Aislados

Los sistemas aislados se utilizan normalmente para proporcionar electricidad a los usuarios con consumos de energía muy bajos para los cuales no compensa pagar el costo de la conexión a red, o para los que sería muy difícil conectarlos debido a su situación geográfica.

Los sistemas aislados, por el hecho de no estar conectados a la red eléctrica, normalmente suelen contar con sistemas de acumulación de energía. La acumulación es necesaria porque el campo fotovoltaico puede proporcionar energía sólo en las horas diurnas, mientras que a menudo la mayor demanda por parte del usuario se concentra en las horas de la tarde y de la noche.

Una configuración de este tipo debe estar dimensionada de tal forma que permita, durante las horas de insolación, tanto la alimentación de la carga como la recarga del sistema de acumulación. Además de esto, el sistema de acumulación debe ser capaz de soportar un cierto número de días de baja insolación, debido principalmente a fenómenos climatológicos, sin que esto repercuta en la alimentación de las cargas.

Gráfica 14. Esquema unifilar de un sistema fotovoltaico aislado



Tomado de (<http://www.solarweb.net/forosolar/fotovoltaica-sistemas-aislados-la-red/35287-dudas-pequena-instalacion-fotovoltaica-aislada.html>)

7. DISEÑO METODOLÓGICO

El presente proyecto fue desarrollado en tres etapas, en la primera de ellas se reunió información primaria acerca del sistema solar fotovoltaico, pasando por definiciones y conceptos básicos fundamentales para entender su funcionamiento. Se recolectan los datos de valor medio mensual y anual de la irradiación diaria sobre superficie horizontal del lugar en kWh/(m²dia), obtenidos a partir de alguna de las fuentes citadas en los Anexos como son: el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) o los datos de Radiación Solar emitidos por la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA).

En la segunda etapa, se reúnen los datos de las cargas de potencia del área administrativa y del área de producción con el fin de especificar las cargas que soportará el sistema de generación fotovoltaico, analizando la superficie disponible. Los componentes que intervienen en el sistema fotovoltaico se dimensionan de acuerdo al tamaño del generador que para este proyecto será de 10kW; una vez clasificados los módulos se diseña la conexión en serie y en paralelo de los mismos con la finalidad de satisfacer los requerimientos del sistema.

Por último, en la tercera etapa y con base al diseño planteado se efectúa un estudio técnico y económico para determinar la viabilidad del proyecto. El sistema se proyecta a 25 años ya que está es la vida útil estimada para los paneles solares, haciendo las respectivas comparaciones frente a los cobros efectuados por la compañía que al día de hoy está suministrando este servicio. Al igual que, y no menos importante se estima la cantidad de CO₂ que se dejaría de emitir a la atmosfera.

8. CARGAS ELÉCTRICAS PLANTA SERMITOL

8.1. Estimación de Consumo

Para los valores de potencia, es preciso utilizar el valor nominal indicado en cada equipo. El número de horas diarias de funcionamiento de cada una de las cargas, multiplicadas por la potencia, nos dará la energía consumida por cada uno de ellos en un día (W).

8.1.1. Cargas de potencia regulada y no regulada en el área administrativa

Tabla 4. Tabla de consumos potencia regulada y no regulada en el área administrativa.

DEPENDENCIA "ARCHIVO"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	1	0,007	0,007
Ventilador	1	0,100	0,100
PC	1	0,150	0,150
Scanner	1	0,150	0,150
			0,407
DEPENDENCIA "CONTABILIDAD"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	1	0,007	0,007
Ventilador	1	0,100	0,100
Enfriador	1	0,170	0,170
PC	1	0,150	0,150
Impresora	1	0,900	0,900
			1,327
DEPENDENCIA "AUDITORIO"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	2	0,007	0,014
Ventilador	1	0,100	0,100
			0,114
DEPENDENCIA "HALL"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	2	0,007	0,014
PC	1	0,150	0,150
			0,164
DEPENDENCIA "OFICINAS 1"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	2	0,007	0,014
Ventilador	1	0,100	0,100
Aire Acondicionado	1	0,650	0,650
PC	3	0,150	0,450
Impresora	1	0,900	0,900
			2,114

DEPENDENCIA "OFICINAS 2"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	2	0,007	0,014
Televisor 50"	1	0,322	0,322
Aire Acondicionado	1	0,650	0,650
PC	3	0,150	0,450
Impresora	1	0,150	0,150
			1,586
DEPENDENCIA "OFICINAS 3"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	6	0,007	0,042
Enfriador	1	0,170	0,170
Aire Acondicionado	2	0,650	1,300
Nevera	1	0,265	0,265
PC	3	0,150	0,450
Impresora	1	0,150	0,150
			2,377
DEPENDENCIA "COCINA"	CANTIDAD	POTENCIA (kW)	POTENCIA TOTAL (kW)
Bombillos	1	0,007	0,007
Cafetera	1	0,500	0,500
Horno Microondas	1	1,000	1,000
Nevera	1	0,265	0,265
			1,772
TOTAL ÁREA ADMINISTRATIVA			9,861

8.1.2. Cargas de potencia en el área de producción

Tabla 5. Tabla de consumos potencia no regulada en el área de producción.

PLANTA DE TRITURADO 1	CANTIDAD	HP	F.P.	kW
Trituradora M2	1	20	0,84	14,914
Ventilador M3	1	9	0,84	6,711
Zaranda Principal M5	1	3,6	0,84	2,685
Zaranda Auxiliar M6	1	3,6	0,84	2,685
				26,994
PLANTA DE TRITURADO 2	CANTIDAD	HP	F.P.	CONSUMO (kW)
Trituradora	1	30	0,84	22,371
Molino Auxiliar	1	9	0,84	6,711
Zaranda Principal	1	3,6	0,84	2,685
Zaranda Auxiliar	1	3,6	0,84	2,685
				34,452
TOTAL ÁREA DE PRODUCCIÓN				61,446

De acuerdo a los valores de las cargas obtenidos en las Tablas 4 y 5, la demanda de potencia total de la planta está alrededor de 71,307 kW. El sistema generador fotovoltaico propuesto de 10kW estará en la capacidad de abastecer el consumo del área administrativa, ya que el total de la demanda en esta área es de 9,861 kW, correspondiente al 14,02% del consumo total.

Para abastecer la carga energética del área de producción se requiere de un generador fotovoltaico de aproximadamente 60kW, adicionalmente se estudiaría la posibilidad de instalar baterías para evitar que la energía solar producida no se desperdicie, ya que esta debe ser utilizada de manera constante.

9. DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

Los cálculos para el diseño del Sistema de Generación Fotovoltaico, están basados en el curso de Energía Solar Fotovoltaica del Grupo San Valero, Estudios Superiores Abiertos SEAS. Universidad Católica de Ávila (España).

9.1. Disposición de los paneles solares

Normalmente el espacio disponible para distribuir el campo solar suele ser limitado. Por ello, los módulos deben situarse en filas, unos detrás de otros, con el riesgo de que los situados delante proyecten sombras sobre los de atrás. Para evitar que esto ocurra, la disposición de los paneles se deberá hacer de la siguiente manera:

La separación entre filas de módulos se hará de forma que durante el medio día solar del día más desfavorable (altura solar mínima, h_0) del periodo de utilización, la sombra de la arista superior de una fila se proyecte como máximo sobre la arista inferior de la fila siguiente.

Como la instalación tendrá uso continuo durante todo el año, el día más desfavorable será el 21 de diciembre (hemisferio norte), ya que es cuando la altura solar es mínima durante el medio día solar, obteniendo el siguiente valor:

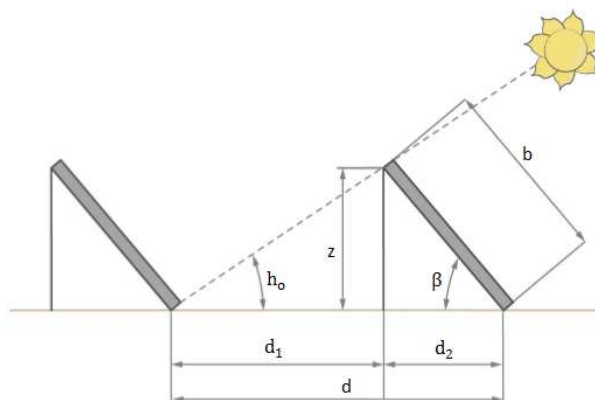
$$h_0 = (90^\circ - \Phi) - 23.5^\circ$$

Donde, Φ corresponde a la latitud.

$$h_0 = (90^\circ - 4.134^\circ) - 23.5^\circ$$

$$h_0 = 62.37^\circ$$

Gráfica 15. Distancia mínima entre módulos.



Respecto a las distancias horizontales puede verse claramente que:

$$d = d_1 + d_2$$

Y como:

$$d_1 = \frac{z}{\tan(h_0)}$$

$$d_2 = \frac{z}{\tan(\beta)}$$

Entonces:

$$d = \frac{z}{\tan(h_0)} + \frac{z}{\tan(\beta)}$$

Teniendo en cuenta que:

$$z = b \cdot \sin\beta$$

Por tanto:

$$d = \frac{b \cdot \sin\beta}{\tan(h_0)} + \frac{b \cdot \sin\beta}{\tan(\beta)} = b \cdot \left(\frac{\sin\beta}{\tan(h_0)} + \frac{\sin\beta}{\tan(\beta)} \right)$$

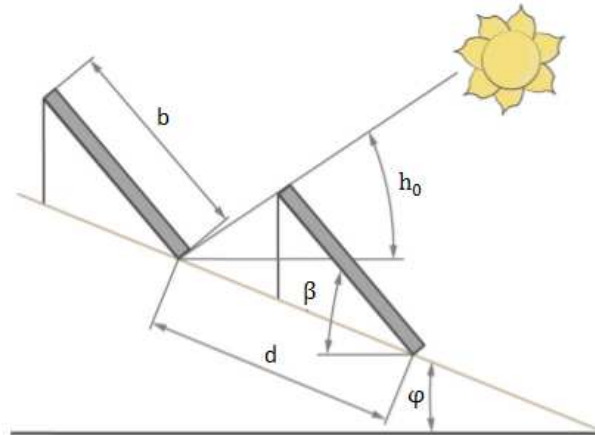
De esta manera, la fórmula para distancias mínimas entre las filas será:

$$d = b \cdot \left(\frac{\sin\beta}{\tan(h_0)} + \cos\beta \right)$$

A pesar de todo, incluso respetando las distancias mínimas durante las primeras y últimas horas del día de los meses de diciembre y enero, las sombras proyectadas por las hileras de paneles pueden llegar a cubrir parte de los situados detrás. Por ello, si se dispone de espacio suficiente es aconsejable aumentar un 25% la distancia mínima.

Como la instalación se hará sobre una superficie inclinada, la expresión para obtener la distancia mínima de separación entre filas de módulos será:

Gráfica 16. Distancia mínima entre módulos, sobre superficies inclinadas.



$$d = b \cdot \left(\frac{\text{sen}(180^\circ - h_0 - \beta)}{\text{sen}(h_0 + \varphi)} \right)$$

$$d = 1,965\text{m} \cdot \left(\frac{\text{sen}(180^\circ - 62.37^\circ - 45^\circ)}{\text{sen}(62.37^\circ + 20^\circ)} \right)$$

$$d = 1.89\text{m} + 25\%$$

$$d = 2,14\text{m}$$

9.2. Cálculo del número de paneles del generador fotovoltaico

Características Técnicas del Panel:

- $V_{\text{mpp}}(25^\circ\text{C}) = 36,52 \text{ V}$
- $I_{\text{MPP}}(25^\circ\text{C}) = 8,21 \text{ A}$
- $V_{\text{oc}}(25^\circ\text{C}) = 44,97 \text{ V}$
- $I_{\text{sc}}(25^\circ\text{C}) = 8,89 \text{ A}$
- Coeficiente de Tensión; $\alpha (U_{\text{OC}}) = -168,636 \text{ mV/K}$
- Coeficiente de Intensidad; $\beta (I_{\text{SC}}) = 2,0 \text{ mA/K}$
- Coeficiente de Potencia; $\gamma (P_{\text{nom}}) = -0.420 \text{ \% /K}$

Características Técnicas del Inversor:

- Rango de entrada de tensiones: 270 V – 800 V.
- Tensión Máxima del Inversor: 1000 V.

Calculo de la tensión más desfavorable según la temperatura a la que está el panel, aplicando los coeficientes indicados por el fabricante.

$$V_{oc(-10^{\circ}\text{C})} = 44,97\text{V} + (-35\text{K}) \cdot \left(-168,636 \frac{\text{mV}}{\text{K}}\right) = 50,87 \text{ V}$$

$$V_{\text{PMP}(-10^{\circ}\text{C})} = 36,52\text{V} + (-35\text{K}) \cdot \left(-168,636 \frac{\text{mV}}{\text{K}}\right) = 42,42\text{V}$$

$$V_{\text{PMP}(70^{\circ}\text{C})} = 36,52\text{V} + (45\text{K}) \cdot \left(-168,636 \frac{\text{mV}}{\text{K}}\right) = 28,93\text{V}$$

La tensión máxima se da con $V_{\text{PMP}(-10^{\circ}\text{C})}$, la tensión mínima se da con $V_{\text{PMP}(70^{\circ}\text{C})}$; por lo tanto el rango de tensión es de 28,93V y 42,42V.

El rango de tensión de entrada del inversor determina el número de módulos solares:

$$N_{\text{Máx},s} = \left\lceil \frac{V_{\text{INV},M}}{V_{\text{MOD},\text{PMP}(T-10^{\circ}\text{C})}} \right\rceil = \left\lceil \frac{800 \text{ V}}{42,42 \text{ V}} \right\rceil = 18,85 \approx 19$$

$$N_{\text{Mín},s} = \left\lceil \frac{V_{\text{INV},m,\text{PMP}}}{V_{\text{MOD},M(T70^{\circ}\text{C})}} \right\rceil = \left\lceil \frac{270 \text{ V}}{28,93 \text{ V}} \right\rceil = 9,33 \approx 9$$

9.3. Ajustes del inversor y generador

La relación de potencia del inversor respecto al generador solar debe estar entre 1 y 1,2; es decir, la potencia nominal del generador solar debe estar hasta un 20% por encima de la potencia nominal del inversor. Esta potencia de mas se instala con el fin de recuperar las pérdidas que se tengan en la instalación. Para este proyecto se aconseja instalar aproximadamente 11 kW_p, ya que el inversor tiene una potencia nominal de 10 kW_p (1,1 veces la potencia del inversor).

Tabla 6. Estimación de las pérdidas de las instalaciones solares fotovoltaicas.

FACTORES DE PÉRDIDAS	PÉRDIDAS	FACTOR
Temperatura de módulos	8%	0,92
Reflectancia angular y espectrales	3%	0,97
Cableado	2%	0,98
Dispersión de parámetros en el generador	2%	0,98
Polvo y/o suciedad de los módulos	3%	0,97
Errores en el seguimiento del PMP	2%	0,98
Rendimiento del inversor	5%	0,95

Empleando un factor de dimensionado de 0,1:

$$P_P = \frac{P_N}{F_S} = \frac{10 \text{ kW}}{(1 - 0,1)} = 11,11 \text{ kW}_P$$

La superficie requerida para la instalación va a depender de la tecnología a utilizar, como se puede ver en la siguiente tabla:

Tabla 7. Superficie requerida para la instalación de 1 kW_P.

TECNOLOGÍA	SUPERFICIE (m ²)
Silicio monocristalino	5 - 7
Silicio policristalino	6,5 - 8,5
Diseleniuro de indio cúprico (CIS)	8,5 - 10
Telururo de Cadmio (CdTe)	9 - 11
Silicio Amorfo	11 - 16

Conociendo que la potencia de la instalación es de 11,11 kW_P, y una superficie de 8,5 m² por kilovatio, ya que la tecnología a utilizar será de silicio policristalino; la superficie total para la instalación de los módulos solares será de:

$$11,11 \text{ kW}_P \cdot 8,5 \text{ m}^2/\text{kW}_P = 94,44 \text{ m}^2$$

Para dimensionar los módulos solares fotovoltaicos, conociendo que la potencia del generador es de 11,11 kW_p y los módulos seleccionados para la instalación tiene una potencia nominal igual a 300W_p, el número N a instalar será igual a:

$$N = \left[\frac{P_{GFV,M,STC}}{P_{MOD,M,STC}} \right] = \left[\frac{11110 \text{ W}_p}{300 \text{ W}_p} \right] = 37 \text{ Paneles}$$

Calculando el número de módulos en serie máximo y mínimo:

$$N_{Máx,s} = \left[\frac{V_{INV,OC}}{V_{MOD,OC(T-10^{\circ}C)}} \right] = \left[\frac{1000 \text{ V}}{50,87 \text{ V}} \right] = 19,66 \approx 20$$

Comprobando el número máximo para el rango de funcionamiento:

$$N_{Máx,s} = \left[\frac{V_{INV,Máx}}{V_{MOD,M(T-10^{\circ}C)}} \right] = \left[\frac{800 \text{ V}}{42,42 \text{ V}} \right] = 18,86 \approx 19$$

$$N_{Mín,s} = \left[\frac{V_{INV,Mín}}{V_{MOD,M(T70^{\circ}C)}} \right] = \left[\frac{270 \text{ V}}{28,93 \text{ V}} \right] = 9,33 \approx 9 \text{ Paneles}$$

Como se puede ver en los resultados, el número máximo de módulos es de 19 y el mínimo de 9, con un número total que no puede superar los 37 módulos. En la hoja de características del inversor, se observa que tiene dos entradas de PMP, por lo tanto se opta por instalar dos ramas en paralelo de 18 paneles en serie, una para cada entrada PMP del inversor.

$$N_p = \left[\frac{N}{N_s} \right] = \frac{37}{19} = 1,95 \approx 2$$

Una vez calculadas las ramas que se pueden instalar en paralelo, se realiza la verificación de la intensidad máxima en las diferentes entradas del inversor:

$$N_p \cdot 1,25 \cdot I_{MOD,SC,STC} \leq I_{INV,M,DC} = (2) \cdot (1,25) \cdot (8,89 \text{ A}) = 22,22 \text{ A} \leq 40,5 \text{ A}$$

$$N_p \cdot 1,25 \cdot I_{MOD,SC,STC} \leq I_{INV,M,DC} = (1) \cdot (1,25) \cdot (8,89 \text{ A}) = 11,11 \text{ A} \leq 24,8 \text{ A}$$

9.4. Dimensionado de la sección del conductor

Para el dimensionado de la sección del conductor, se deben tener en cuenta los siguientes criterios:

- Máxima intensidad admisible por el conductor.
- Máxima caída de tensión permisible en el conductor.

Tramo rama de módulos-caja de continua

- Criterio de máxima intensidad admisible por el conductor.

De acuerdo con el estándar internacional IEC 60364-7-712, el conductor de cada rama debe soportar 1,25 veces la intensidad de cortocircuito del modulo.

$$I_{\max,adm} = 1,25 \cdot 8,89A = 11,11A$$

- Criterio de la máxima caída de tensión permisible en el cable.

Suponiendo que en este tramo la caída de tensión es de 1% en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico y una longitud aproximada de 30m.

$$S_{m,rama} = \frac{2 \cdot L_{rama} \cdot I_{MOD,M,STC}}{\Delta V_{rama} \cdot N_{ms} \cdot V_{MOD,M,STC} \cdot \sigma}$$

$$S_{m,rama} = \frac{2 \cdot 30m \cdot 8,89A}{0,01 \cdot 19 \cdot 44,97 \cdot 56}$$

$$S_{m,rama} = 1,11 \text{ mm}^2$$

Donde σ : Conductividad, para Cu 56.

La sección comercial superior es de $1,5\text{mm}^2$ con una intensidad máxima admisible de 30A. No obstante lo anterior, en las instalaciones fotovoltaicas conectadas a la red se ha generalizado el uso de una sección mínima de 4mm^2 , con independencia de los resultados obtenidos al aplicar los criterios anteriores.

Tramo de alterna

- Criterio de máxima intensidad admisible por el conductor.

El conductor de cada rama debe soportar 1,25 veces la intensidad nominal a la salida del inversor. Dicha intensidad nominal del inversor se deduce de la potencia y tensión AC nominales del inversor.

$$I_{INV,AC} = \frac{10.000W}{280V} = 35,71 \text{ A}$$

$$I_{max.adm} = 1,25 \cdot I_{INV,AC} = 1,25 \cdot 35,71 \text{ A} = 44,64 \text{ A}$$

Verificando la intensidad máxima admisible, la sección de 6mm^2 admite una intensidad de 66 A.

- Criterio de la máxima caída de tensión permisible en el cable.

Suponiendo que en este tramo la caída de tensión es de 1,5% en el punto de máxima potencia del generador fotovoltaico y una longitud aproximada de 8m.

$$S_{m,rama} = \frac{\sqrt{3} \cdot L_{AC} \cdot I_{INC,AC} \cdot \cos\varphi}{\Delta V_{rama} \cdot V_{INV,AC} \cdot \sigma}$$

$$S_{m,rama} = \frac{\sqrt{3} \cdot 8 \cdot 35,71 \text{ A} \cdot 1}{0,015 \cdot 280 \cdot 56}$$

$$S_{m,rama} = 2,10\text{mm}^2$$

Teniendo en cuenta los dos criterios analizados, se tomara la sección del conductor de 6mm^2 .

10. SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS

Se seleccionan los equipos que reúnan las características técnicas requeridas, para cubrir la demanda energética proyectada para la instalación.

10.1. Selección de los Módulos Solares

Módulos fotovoltaicos policristalinos A-300P de ATERSA	Solar Module Polycrystalline LW-M300W de LIWEI
	
Características Eléctricas:	Características Eléctricas:
Potencia Nominal: 300 W	Potencia Nominal: 300 W
Eficiencia del modulo: 15,42%	Eficiencia del modulo: 15,12%
Corriente Punto de Máxima Potencia: 8,21 A	Corriente Punto de Máxima Potencia: 8,29 A
Tensión Punto de Máxima Potencia: 36,52 V	Tensión Punto de Máxima Potencia: 36,2 V
Corriente en Cortocircuito: 8,89 A	Corriente en Cortocircuito: 8,8 A
Tensión de Circuito Abierto: 44,97 V	Tensión de Circuito Abierto: 44,3 V
Garantía: 10 años.	Garantía: 5 años.
Costo: \$934.078,00	Costo: \$726.802,00

Se selecciona los módulos fotovoltaicos policristalinos A-300P de ATERSA por mayor eficiencia y garantía. A pesar de tener un costo más elevado, ofrecen mayor calidad y respaldo por ser una empresa de larga trayectoria en el mercado solar fotovoltaico.

10.2. Selección del Inversor

Inversor de Conexión a Red FRONIUS Symo 10-3-M 10kW	On Grid Solar Inverter Solis-10KW Triphase Grid Tied Inverter for Poly and Mono Panel
	
Datos de Entrada	Datos de Entrada
Máxima corriente de entrada ($I_{dc\ máx\ 1} / I_{dc\ máx\ 2}$): 27 A / 16,5 A	Máxima corriente de entrada ($I_{dc\ máx\ 1} / I_{dc\ máx\ 2}$): 18 A / 18 A
Máxima corriente de cortocircuito por serie FV (MPP_1 / MPP_2): 40,5 A / 24,8 A	Máxima corriente de cortocircuito por serie FV (MPP_1 / MPP_2): 30 A / 26 A
Tensión de entrada nominal: 600 V	Tensión de entrada nominal: 330 V
Máxima tensión de entrada: 1000 V	Máxima tensión de entrada: 1000 V
Rango de tensión MPP ($U_{mpp\ mín} - U_{mpp\ máx}$): 270 – 800V	Rango de tensión MPP ($U_{mpp\ mín} - U_{mpp\ máx}$): 200 – 800V
Número de seguidores MPP: 2	Número de seguidores MPP: 2
Datos de Salida	Datos de Salida
Potencia nominal CA: 10.000 W	Potencia nominal CA: 10.000 W
Máxima potencia de salida: 10.000 VA	Máxima potencia de salida: 10.000 VA
Máxima corriente de salida ($I_{ac\ máx}$): 20 A	Máxima corriente de salida ($I_{ac\ máx}$): 18 A
Máxima tensión de salida ($U_{ac\ máx}$): 280 V	Máxima tensión de salida ($U_{ac\ máx}$): 270 V – 330 V
Frecuencia: 50 Hz / 60 Hz	Frecuencia: 50 Hz / 60 Hz
Garantía: 5 años.	Garantía: 3 años.
Precio: \$7.458.020,00	Precio: 7.126.399,00

Se selecciona el Inversor de Conexión a Red FRONIUS Symo 10Kw, ya que por su diseño flexible, es ideal para instalaciones en superficies irregulares y para tejados con diferentes orientaciones. Adicionalmente, ofrece mayor garantía que el modelo Solis-10K.

La etapa de potencia de este inversor presenta una configuración en puente monofásico, utilizando como semiconductores de potencia transistores MOSFET. La tensión generada por el inversor es senoidal y se obtiene mediante la técnica de modulación de ancho de pulsos. Un microcontrolador determina el tipo de onda que se genera a partir de una tabla de valores disponibles en la memoria auxiliar del sistema.

De esta forma se hace trabajar a los transistores MOSFET de potencia a una frecuencia de conmutación de 20kHz, con lo que se consigue una forma de onda senoidal de muy baja distorsión, menor del 1% y con un contenido de armónicos bajo.

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

Para conseguir el mejor rendimiento de la instalación, el sistema de control de los inversores trabaja detectando continuamente el punto de máxima potencia (MPP) de la característica tensión-corriente de los paneles fotovoltaicos. La situación de dicho punto de máxima potencia es variable, dependiendo de diversos factores ambientales, como variaciones en la radiación solar recibida o por variaciones de la temperatura de los paneles.

10.3 Selección Estructura Integrada 20 módulos

Se selecciona la estructura KH915 ya que tiene una capacidad de 1 a 20 módulos fotovoltaicos dispuestos en horizontal y está diseñada para ser instalada sobre chapas metálicas, adaptándose a la inclinación de la cubierta existente.

El sistema de fijación de módulos fotovoltaicos se realiza mediante grapas intermedias y finales, de manera que cada pieza omega sujetará como máximo a dos paneles. La tornillería es desmontable, con sistema autoblocante mecánico y con arandela de presión. Además de una fácil instalación ésta estructura es modular, es decir, puede ampliarse en cualquier momento dependiendo de las necesidades.

Gráfica 17. Estructura integrada KH915 SUNFER.



Ficha de Datos:

- Capacidad: De 1 a 20 módulos fotovoltaicos dispuestos en 1 fila.
- Inclinación del modulo: Estándar 20° a 30°.
- Materiales: Estructura – Aluminio EN AW 6005A T6.
- Tornillería: Acero inoxidable.
- Tamaño del modulo: Soporte valido para módulos de hasta 72 células.

10.4. Selección Medidor Bidireccional

Se selecciona el medidor bidireccional Fronius Smart Meter 63A Trifásico 43kW, para registrar el consumo de energía en la instalación.

Gráfica 18. Fronius Smart Meter 63A Trifásico 43kW.



Datos Técnicos:

- Tensión nominal: 400 – 415 V.
- Máxima corriente: 3 x 63 A.
- Cable Transversal de potencia: 1 – 16mm².
- Cable transversal de comunicación: 0.05 – 4mm².
- Interface: Modbus RTU (RS485).

10.5. Selección Conectores

Los juegos de Conectores Weidmuller son útiles para poder unir los cables que salen de las series de paneles al cable que comunicará el campo solar con el inversor de conexión a red.

Gráfica 19. Conectores WEIDMULLER PVStick.



10.6. Cable Recubierto PVC 6mm.

Aproximadamente se requiere de 50 metros de cable para poder realizar las conexiones eléctricas entre el generador solar fotovoltaico y la instalación o recinto donde se proyecta quede ubicado el inversor de conexión a red. Este tipo de cable encaja perfectamente con el conector marca Weidmuller.

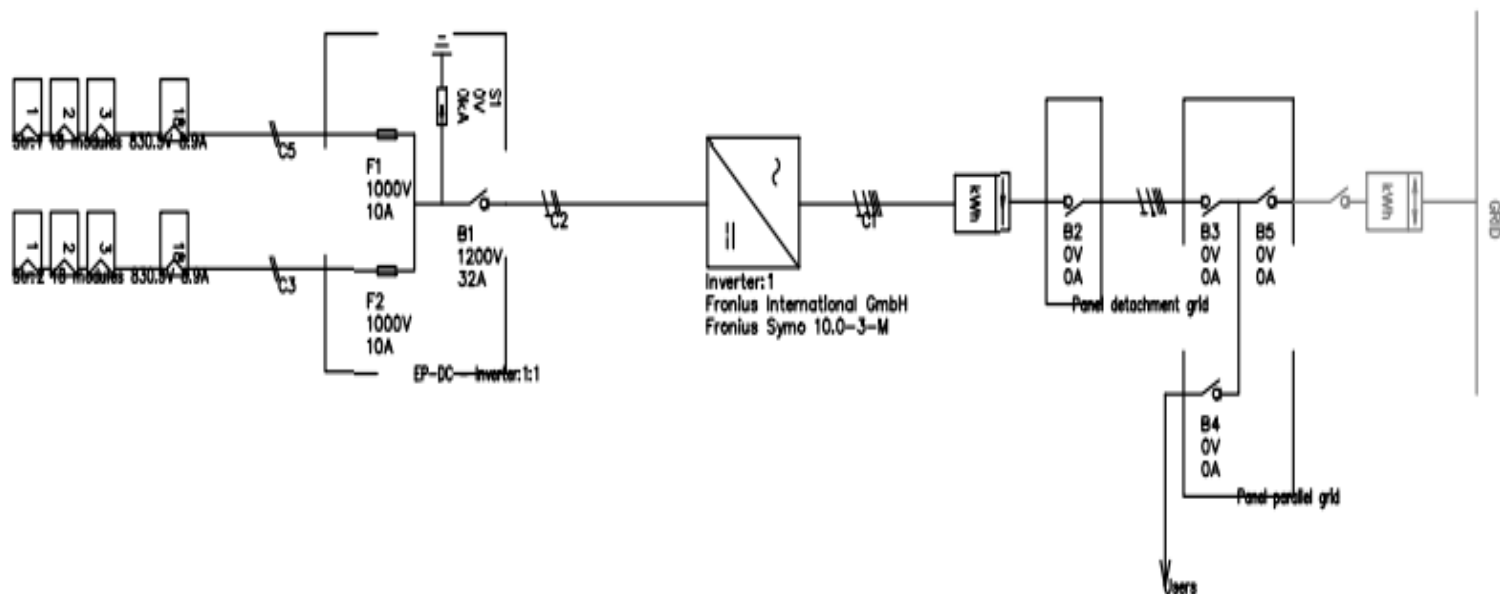
Gráfica 20. Cable Unifilar 6mm RV-K con Recubrimiento de PVC.



Los elementos anteriormente descritos, cumplen con todas las especificaciones técnicas requeridas para la instalación del sistema. Por lo tanto el proyecto para la implementación de un Generador Fotovoltaico de 10kW con Conexión a la Red de Potencia en la planta de trituración y molienda Sermitol es técnicamente viable.

11. DIAGRAMA ELÉCTRICO

A continuación se presenta el diseño propuesto para el sistema generador fotovoltaico de 10kW con conexión a la red.



Legend symbols	
	PV Module
	Electrical panel
	Inverter
	Energy meter
	Disconnecting switch
	Fuse
	Surge arrester
	Unipolar cable
	Unipolar cable with PE
	Tripolar cable with neutral and PE
	Grounding

Electrical single line scheme		
System		Project Code
Generador Fotovoltaico		001
Customer		
SERMITOL		
Designer		
Sandra Milena Madero		
Phone: e-mail: sandramadero@usantotomas.edu.co		
Nominal power	Composition	Date
10.8 KW	1 inverter 2 strings 36 modules	11/01/2017

12. PRODUCCIÓN ANUAL DE ELECTRICIDAD SOLAR

Una vez realizada la configuración de la instalación, se realiza la estimación de la energía producida, aplicando la siguiente ecuación:

$$E_{PX} = \left(\frac{H \cdot K \cdot P_p \cdot PR \cdot n_{\text{días}}}{1000W/m^2} \right)$$

Donde E_{PX} : Energía producida en el mes de cálculo.

H: Radiación solar.

K: Factor de corrección para superficies inclinadas.

P_p : Potencia Pico de la instalación.

PR: Performance Ratio.

$n_{\text{días}}$: Número de días del mes que se está calculando.

Performance Ratio PR, son pérdidas comprendidas entre 0.7 y 0.85 para instalaciones conectadas a red, debido a caída de tensión de los cables, desacople en módulos, sombreados y desconexiones del inversor.

Tabla 8. Estimación de energía solar producida al año.

MES	P_p (kW)	PR	DIAS	H(kWh · m ² /día)	K_{20}	E_{PX} (kWh)
Enero	11,11	0,8	31	4,55	1,06	1.328,87
Febrero	11,11	0,8	29	4,72	1,02	1.240,92
Marzo	11,11	0,8	31	4,77	0,97	1.274,84
Abril	11,11	0,8	30	4,52	0,9	1.084,69
Mayo	11,11	0,8	31	4,52	0,85	1.058,58
Junio	11,11	0,8	30	4,6	0,83	1.018,03
Julio	11,11	0,8	31	4,92	0,85	1.152,26
Agosto	11,11	0,8	31	4,97	0,9	1.232,44
Septiembre	11,11	0,8	30	4,8	0,96	1.228,68
Octubre	11,11	0,8	31	4,56	1,03	1.294,09
Noviembre	11,11	0,8	30	4,44	1,07	1.266,75
Diciembre	11,11	0,8	31	4,37	1,08	1.300,38
TOTAL						15.480,54

13. RENTABILIDAD DE LA INSTALACIÓN

A continuación se analiza la viabilidad económica de la instalación solar fotovoltaica.

Tabla 9. Costo de la instalación.

DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	PRECIO/UNIDAD	TOTAL
PV Módulos	36	\$934.078,00	\$33.626.824,00
Estructura Integrada	2	\$2.374.807,00	\$4.749.614,00
Inversor	1	\$7.458.020,00	\$7.458.020,00
Medidor de Energía	1	\$2.710.028,00	\$2.710.028,00
Conectores	2 juegos	\$24.263,00	\$48.526,00
Protecciones	1 kit	\$2.970.810	\$2.970.810
Conductor	150m	\$3.162,00	\$474.300,00
Mano de Obra Técnica	2 personas	\$900.000,00	\$1.800.000,00
Mano de Obra Profesional	2 personas	\$1.500.000,00	\$3.000.000,00
SUBTOTAL			\$56.846.528,00
IVA			19%
			\$10.800.840,32
TOTAL			\$67.647.368,32

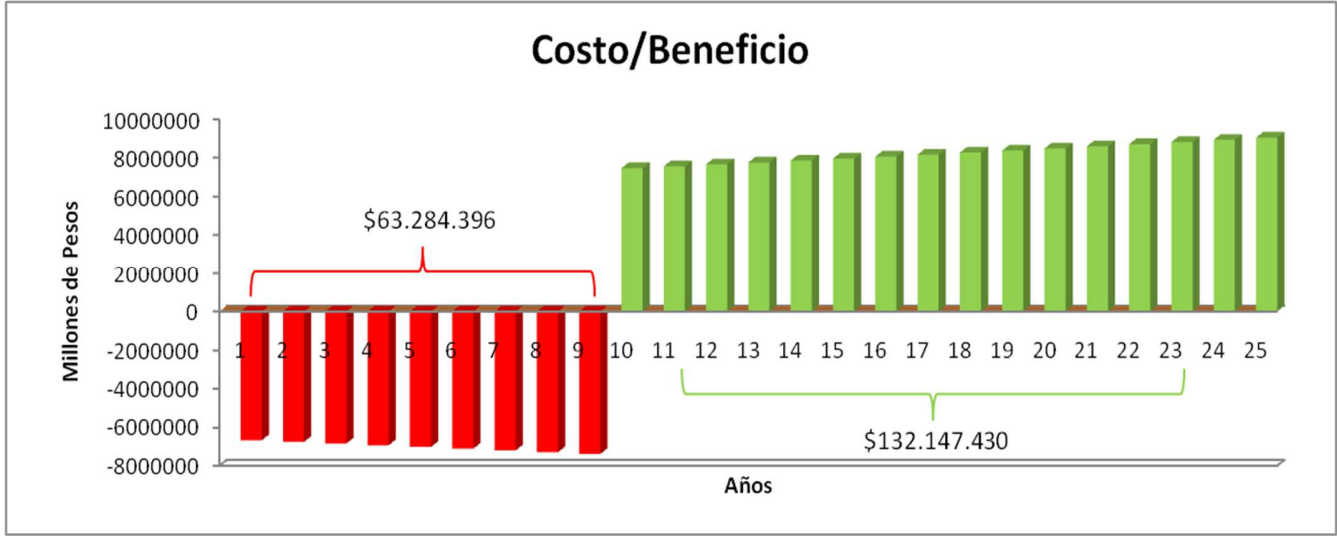
El costo del proyecto será amortizado en la vida útil de la instalación, teniendo en cuenta que al realizar una instalación de este tipo, habrá una reducción importante en el cobro de la factura eléctrica.

Tabla 10. Proyección costo a 25 años de la energía producida por el generador fotovoltaico.

AÑO	PRODUCCIÓN ANUAL (Kwh)	VALOR kWh	TOTAL
1	15766,65	423,5266	\$6.677.595,67
2	15656,28	431,9971	\$6.763.468,06
3	15546,69	440,6371	\$6.850.448,00
4	15437,86	449,4498	\$6.938.543,34
5	15329,8	458,4388	\$7.027.775,31
6	15222,49	467,6076	\$7.118.151,84
7	15115,93	476,9597	\$7.209.690,05
8	15010,12	486,4989	\$7.302.407,40
9	14905,05	496,2289	\$7.396.316,77
10	14800,71	506,1535	\$7.491.431,05
11	14697,11	516,2766	\$7.587.773,42
12	14594,23	526,6021	\$7.685.352,07
13	14492,07	537,1341	\$7.784.185,49
14	14390,63	547,8768	\$7.884.292,57
15	14289,89	558,8344	\$7.985.681,45
16	14189,86	570,0110	\$8.088.376,88
17	14090,53	581,4113	\$8.192.392,83
18	13991,9	593,0395	\$8.297.749,20
19	13893,96	604,9003	\$8.404.460,26
20	13796,7	616,9983	\$8.512.540,21
21	13700,12	629,3382	\$8.622.009,52
22	13604,22	641,9250	\$8.732.889,11
23	13508,99	654,7635	\$8.845.193,76
24	13414,43	667,8588	\$8.958.944,91
25	13320,53	681,2160	\$9.074.157,63
TOTAL			\$195.431.826,79

En la tabla 10, se efectúa la proyección del costo de la energía producida por el generador fotovoltaico a 25 años teniendo en cuenta la tarifa eléctrica actual, con un incremento del 2% anual.

Tabla 11. Proyección Costo/Beneficio a 25 años.



Como se puede apreciar en la tabla 11, del año 1 hasta el año 9 se amortiza el costo del proyecto al mismo precio al que se pagaría el servicio al proveedor de servicios de electricidad. A partir del año 10 el costo del servicio es casi nulo ya que solo se tendría en cuenta los costos de mantenimiento que para estos sistemas es mínimo y sencillo.

CONCLUSIONES

Se realizó estudio de las cargas eléctricas en el área administrativa y en el área de producción, se encontró que la capacidad del generador fotovoltaico puede cubrir la demanda del área administrativa, ya que el consumo total esta cerca a los 10kW. Al ser modular, permite que su instalación se realice aprovechando el espacio en los tejados, de esta manera se puede generar electricidad propia, limpia y eficiente, evitando desconexiones intempestivas, perdida por transporte y asegurando independencia energética de la compañía de distribución externa.

Se seleccionan los paneles, inversor y materiales requeridos para la implementación del proyecto, dimensionándolos de acuerdo a los requerimientos técnicos optando por marcas de larga trayectoria en el sector de la energía solar. Como el sistema fotovoltaico es on grid (con conexión a la red de distribución eléctrica), no se utilizan bancos de baterías, haciendo que el sistema tenga menor costo.

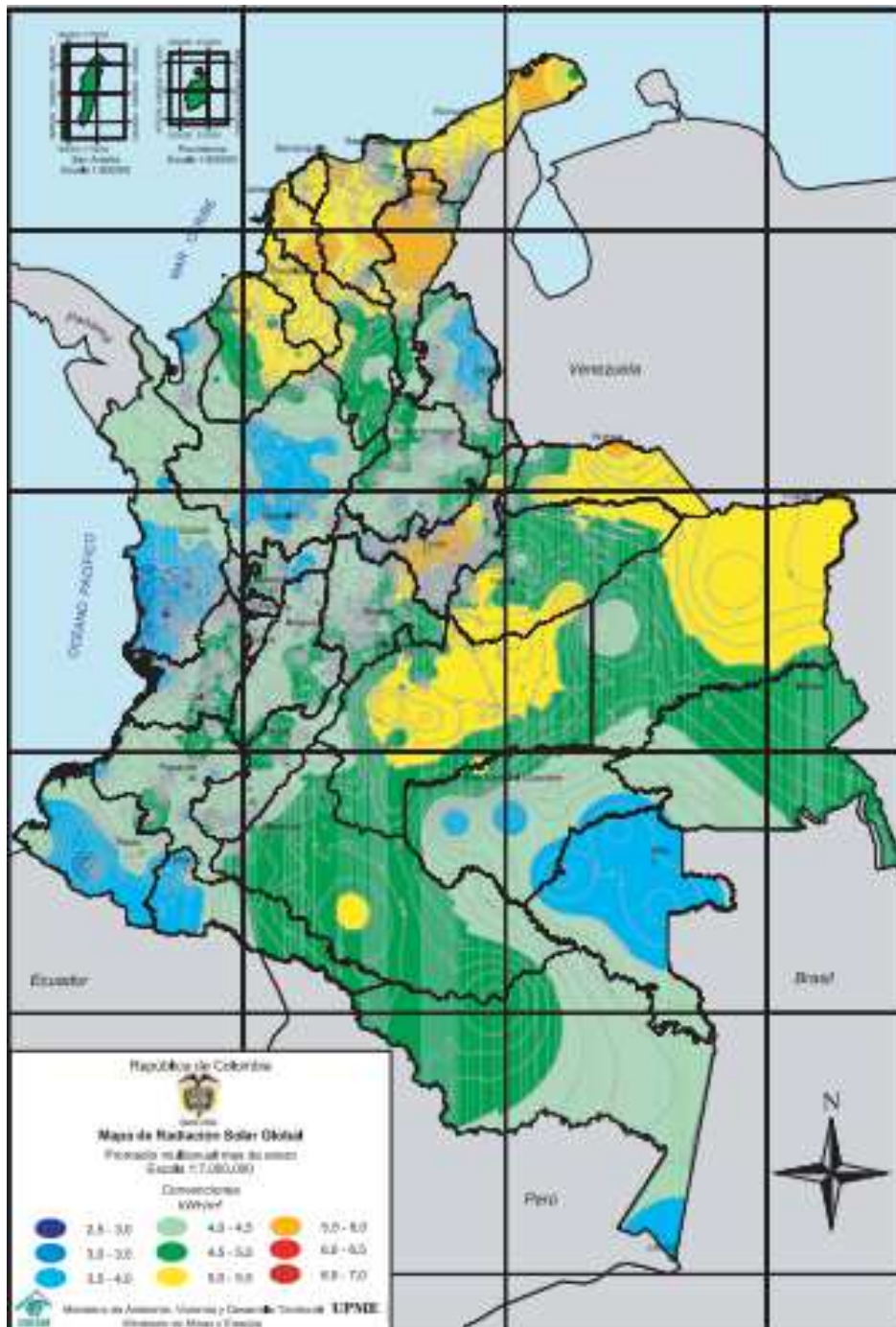
Se estima el valor de cada elemento requerido en la instalación, en Colombia aun no se cuenta con empresas que fabriquen este tipo de tecnologías, por lo tanto se cotizan en el exterior. En el costo total de los componentes se tiene en cuenta los gastos de importación. Hay que aclarar que según el decreto 2143 del 4 de noviembre de 2015 se contempla la exención del gravamen arancelario.

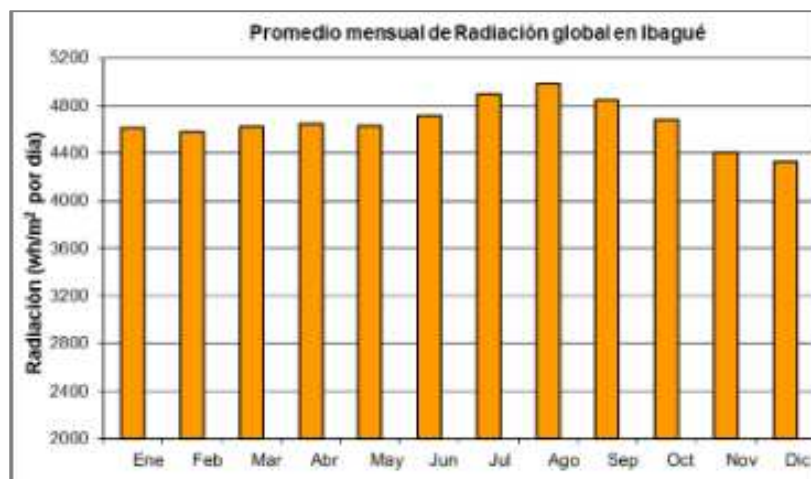
La rentabilidad al acoger este tipo de tecnologías es bastante atractiva, ya que la inversión única e inicial se recupera y se supera durante el tiempo de vida útil de los módulos fotovoltaicos, su capacidad de operación se encuentra alrededor de los 25 años. La energía generada por los paneles se inyecta al consumo, produciendo importantes ahorros que se verán reflejados en la cuenta mensual de electricidad.

Adoptando este tipo de alternativas, se contribuye a frenar el cambio climático ya que se estará generando electricidad de forma limpia, sin contaminar el aire, adaptándose fácilmente a las necesidades del consumidor. Adicionalmente, y no menos importante con la generación de esta electricidad se estaría dejando de emitir aproximadamente 16 toneladas de CO₂ anuales al medio ambiente.

ANEXOS

ANEXO A: Mapa de irradiación solar en Colombia, fuente IDEAM.





Imágenes tomadas de (<http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>)

ANEXO B: Datos de Radiación Solar según coordenadas geográficas, fuente NASA.



ATMOSPHERIC
SCIENCE
DATA CENTER

NASA

NASA Surface meteorology and Solar Energy: [RETScreen](#) Data

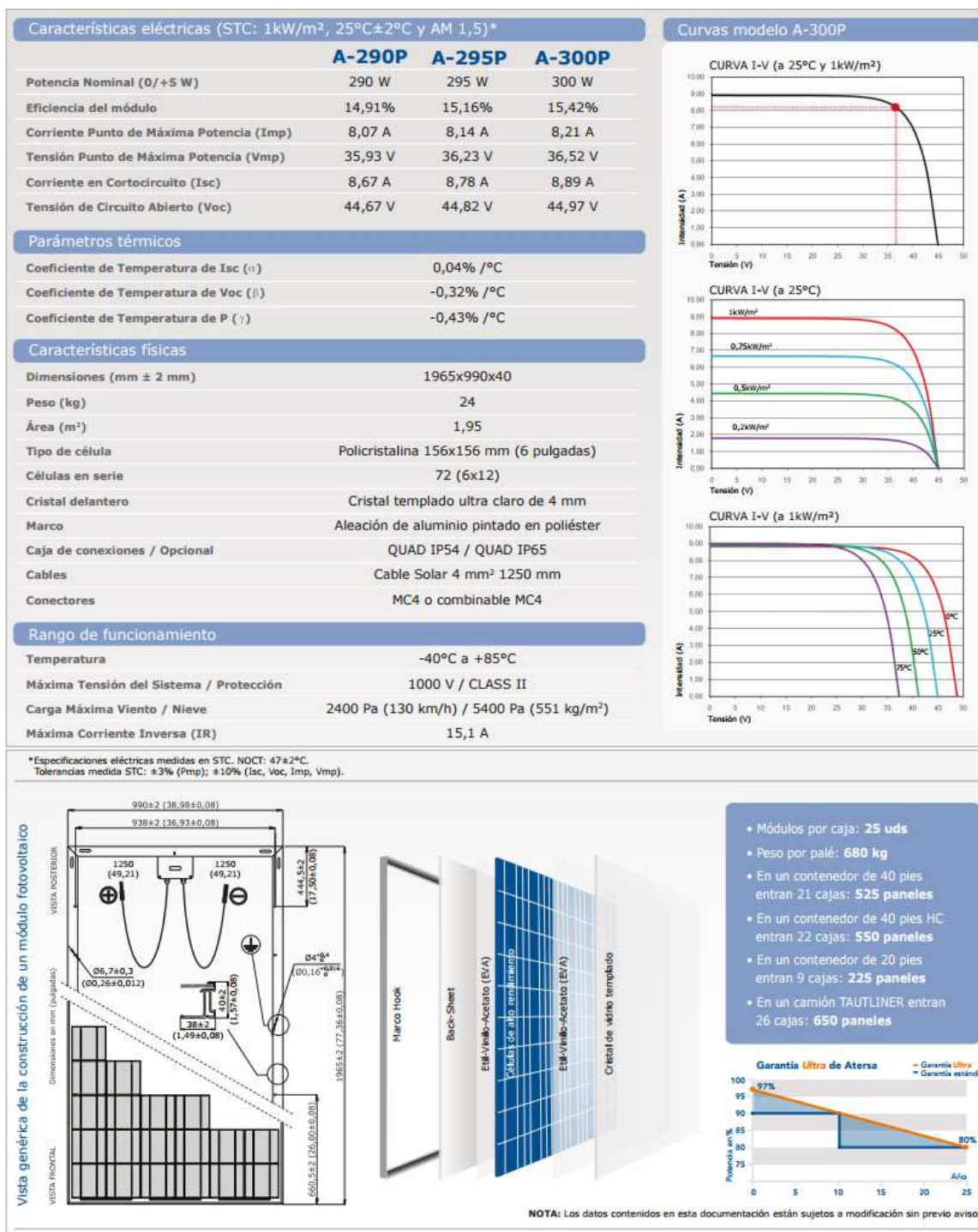
Latitude **4.134** / Longitude **-75.095** was chosen.

	Unit	Climate data location
Latitude	°N	4.134
Longitude	°E	-75.095
Elevation	m	1343
Heating design temperature	°C	15.30
Cooling design temperature	°C	25.26
Earth temperature amplitude	°C	8.02
Frost days at site	day	0

Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days	Cooling degree-days
	°C	%	kWh/m ² /d	kPa	m/s	°C	°C-d	°C-d
January	19.8	77.4%	4.55	86.6	1.4	21.1	0	309
February	20.4	75.2%	4.72	86.6	1.4	21.9	0	297
March	20.3	78.5%	4.77	86.6	1.4	21.9	0	324
April	20.3	79.5%	4.52	86.6	1.3	21.8	0	312
May	20.2	77.4%	4.52	86.7	1.4	21.5	0	319
June	20.0	73.3%	4.60	86.7	1.6	21.4	0	302
July	20.3	64.7%	4.92	86.7	1.6	22.0	0	323
August	21.1	59.6%	4.97	86.7	1.6	23.1	0	348
September	21.0	64.5%	4.80	86.7	1.5	23.1	0	333
October	20.1	75.2%	4.56	86.6	1.5	21.9	0	316
November	19.5	82.0%	4.44	86.6	1.5	20.8	0	286
December	19.5	81.1%	4.37	86.6	1.5	20.7	0	300
Annual	20.2	74.0%	4.64	86.6	1.5	21.8	0	3769
Measured at (m)					10.0	0.0		

Imagen tomada de (<https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>)

ANEXO C: Características eléctricas Panel Solar Atersa 300w 24v.



ANEXO D: Características Eléctricas Inversor de conexión a red Fronius symo 10.0-3-m light 10kw.

DATOS TÉCNICOS FRONIUS SYMO (10.0-3-M, 12.5-3-M, 15.0-3-M, 17.5-3-M, 20.0-3-M) ¹⁾					
DATOS DE ENTRADA	SYMO 10.0-3-M	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
Máxima corriente de entrada ($I_{dc\ max\ 1} / I_{dc\ max\ 2}$)	27 A / 16,5 A		33 A / 27 A		
Máxima corriente de cortocircuito por serie FV (MPP ₁ / MPP ₂)	40,5 A / 24,8 A		49,5 A / 40,5 A		
Mínima tensión de entrada ($U_{dc\ min.}$)			200 V		
Tensión CC mínima de puesta en servicio ($U_{dc\ atempq}$)			200 V		
Tensión de entrada nominal ($U_{dc\ n.}$)			600 V		
Máxima tensión de entrada ($U_{dc\ máx.}$)			1.000 V		
Rango de tensión MPP ($U_{mpp\ min.} - U_{mpp\ máx.}$) ¹⁾	270 - 800 V	320 - 800 V		370 - 800 V	420 - 800 V
Número de seguidores MPP			2		
Número de entradas CC			3+3		
DATOS DE SALIDA	SYMO 10.0-3-M	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
Potencia nominal CA ($P_{ac,n}$)	10.000 W	12.500 W	15.000 W	17.500 W	20.000 W
Máxima potencia de salida	10.000 VA	12.500 VA	15.000 VA	17.500 VA	20.000 VA
Máxima corriente de salida ($I_{ac\ máx.}$)	20 A		32 A		
Acoplamiento a la red ($U_{ac,n}$)	3-NPE 400 V / 230 V o 3-NPE 380 V / 220 V				
Mínima tensión de salida ($U_{ac\ min.}$)	150 V				
Máxima tensión de salida ($U_{ac\ máx.}$)	280 V				
Frecuencia (f_n)	50 Hz / 60 Hz				
Rango de frecuencia ($f_{min.} - f_{máx.}$)	45 - 65 Hz				
Coefficiente de distorsión no lineal	< 2 %				
Factor de potencia ($\cos \varphi_{ac,n}$)	0 - 1 ind. / cap.				
DATOS GENERALES	SYMO 10.0-3-M	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
Dimensiones (altura x anchura x profundidad)	725 x 510 x 225 mm				
Peso	34,8 kg		43,4 kg		
Tipo de protección	IP 66				
Clase de protección	I				
Categoría de sobretensión (CC / CA)	2 / 3				
Consumo nocturno	< 1 W				
Concepto de inversor	Sin Transformador				
Refrigeración	Refrigeración de aire regulada				
Instalación	Instalación interior y exterior				
Margen de temperatura ambiente	-25 - +60 °C				
Humedad de aire admisible	0 - 100 %				
Tecnología de conexión CC	6 x CC+ y 6 x CC bornes roscados 2,5 - 16 mm ²				
Tecnología de conexión principal	5 polos CA bornes roscados 2,5 - 16 mm ²				
Certificados y cumplimiento de normas	VDE 0126-1-1/A1, IEC 62109-1/-2, IEC 62116, IEC 61727, CER 06-190, G83/2, VDE AR-N 4105, UNE 206007-1, SI 4777, CEI 0-21				
RENDIMIENTO	SYMO 10.0-3-M	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
Máximo rendimiento	97,9 %		98,1 %		
Rendimiento europeo (η_{EU})	97,4 %	97,5 %	97,7 %	97,7 %	97,8 %
η con 5 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	87,8 / 92,4 / 89,1 %	88,6 / 93,0 / 90,0 %	91,1 / 94,7 / 92,2 %	91,5 / 94,9 / 92,6 %	91,9 / 95,1 / 93,0 %
η con 10 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	91,2 / 94,8 / 92,7 %	92,8 / 96,0 / 94,5 %	93,3 / 96,0 / 94,4 %	93,9 / 96,3 / 94,9 %	94,8 / 96,8 / 95,8 %
η con 20 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	94,5 / 97,0 / 96,1 %	95,3 / 97,2 / 96,5 %	95,8 / 97,4 / 96,6 %	96,0 / 97,5 / 96,8 %	96,2 / 97,7 / 97,1 %
η con 25 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	95,3 / 97,2 / 96,5 %	95,5 / 97,5 / 96,9 %	96,1 / 97,6 / 96,9 %	96,4 / 97,8 / 97,2 %	96,6 / 97,9 / 97,4 %
η con 30 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	95,5 / 97,5 / 96,9 %	95,8 / 97,6 / 97,1 %	96,4 / 97,8 / 97,2 %	96,6 / 97,9 / 97,4 %	96,7 / 98,0 / 97,5 %
η con 50 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	96,2 / 97,8 / 97,3 %	96,3 / 97,9 / 97,4 %	96,8 / 98,0 / 97,6 %	96,9 / 98,0 / 97,7 %	97,0 / 98,1 / 97,7 %
η con 75 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	96,4 / 97,9 / 97,5 %	96,4 / 97,9 / 97,5 %	97,0 / 98,1 / 97,7 %	96,9 / 98,1 / 97,7 %	96,9 / 98,0 / 97,7 %
η con 100 % $P_{ac,r}$ ¹⁾	96,4 / 97,9 / 97,5 %	96,4 / 97,7 / 97,5 %	96,9 / 98,0 / 97,7 %	96,8 / 98,0 / 97,6 %	96,7 / 97,9 / 97,5 %
Rendimiento de adaptación MPP	> 99,9 %				
EQUIPAMIENTO DE SEGURIDAD	SYMO 10.0-3-M	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
Medición del aislamiento CC	Sí				
Comportamiento de sobrecarga	Desplazamiento del punto de trabajo, limitación de potencia				
Seccionador CC	Sí				
INTERFACES	SYMO 10.0-3-M	SYMO 12.5-3-M	SYMO 15.0-3-M	SYMO 17.5-3-M	SYMO 20.0-3-M
WLAN / Ethernet LAN	Fronius Solarweb / Fronius Solarweb, Modbus TCP, JSON				
6 inputs digitales o 4 inputs/outputs digitales	Interface receptor del control de onda				
USB (Conector A) ²⁾	Para memorias USB				
2 conectores RJ 45 (RS422) ²⁾	Interfaz Fronius Solar Net, Interface Protocol				
Salida de aviso ²⁾	Gestión de la energía (salida de relé libre de potencial)				
Datalogger y Servidor web	Incluido				

BIBLIOGRAFÍA

BAKER & MCKENZIE. Bondades de la Ley 1715 de 2014, Encuentro Anual del Sector Eléctrico Colombiano. (Oct/9/2014). Recuperado de: <http://www.acolgen.org.co/jornadas/2014/Memorias/Juridico/Bondades%20Jaime.pdf>

BERRIO, Luis Humberto y ZULUAGA, Carlos. Smart Grid y la energía solar fotovoltaica para la generación distribuida: Una revisión en el contexto energético mundial. Ingeniería y Desarrollo. Volumen 32, n°. 2. Julio-diciembre 2014. ISSN: 0122-3461 (Impreso) y 2145-9371 (on line).

BLUESOL 3.0. Software de Diseño Fotovoltaico.

CONGRESO DE COLOMBIA. Ley 1715 de 2014. Por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. (Mayo 13/2014). Recuperado de: <http://www.fedebiocombustibles.com/files/1715.pdf>

ERAZO CHECA, Francisco y ERAZO DE LA CRUZ, Olger. Potencial Natural para el Desarrollo Fotovoltaico en Colombia. Universidad Mariana. Recuperado de: <http://www.umariana.edu.co/ojs-editorial/index.php/libroseditorialunimar/article/view/706>

GRUPO IDEA. Curso de Energía Solar Fotovoltaica. Universidad de Jaén. (2004). Recuperado de: https://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/1_ref.htm

HERNÁNDEZ GARCÍA, Luis Manuel. Energía, energía fotovoltaica y celdas solares de alta eficiencia. Revista Digital Universitaria. Volumen 8, n°. 12. 10 de diciembre de 2007. ISSN: 1067-6079.

IDEAM, UPME. Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia. Recuperado de: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

LA GUÍA SOLAR. Sobre la ley 1715 de 2014 y vender la energía solar que le sobra. AméricaFotovoltaica. Recuperado de <http://www.laguiasolar.com/ley-1715-de-2014-vender-la-energia-solar-que-le-sobra/>

NASA, Atmospheric Science Data center. Surface Meteorology and Solar Energy. Recuperado de: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>

ORTEGA LISÓN, Lorenzo y CAÑADAS BELTRÁN, Víctor. Energía Solar Fotovoltaica. Grupo San Valero. Estudios Superiores Abiertos SEAS. Universidad Católica de Ávila (2016).

OSSA VILLANUEVA, Carlos. La energía solar, una solución competitiva. Cámara Colombiana de la Energía. Sun Edison. (Sep/2014). Recuperado de <http://es.slideshare.net/ccenergia/energia-solar-como-una-solucion-competitiva-caso-chileno>

PV MAGAZINE LATINOAMÉRICA. Colombia aprueba incentivos tributarios para las energías renovables. (Nov/2015). Recuperado de http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/colombia-aprueba-incentivos-tributarios-para-las-energias-renovables_100021077/

RODRÍGUEZ BECERRA, Manuel. Ingeniería y medio ambiente. SCIELO Revista de Ingeniería. rev.ing. no.26 Bogotá July./Dec. 2007. Recuperado de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932007000200008

TOLEDO ARIAS, Carlos Alberto. Evaluación de la energía solar fotovoltaica como solución a la dependencia energética de zonas rurales de Colombia. Universidad Politécnica de Cartagena. (Sep/2013). Recuperado de [http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/18-2013-Evaluacin de la energia solar fotovoltaica como solucin a la dependencia energtica de zonas rurales de Colombia.pdf](http://www1.upme.gov.co/sgic/sites/default/files/18-2013-Evaluacin%20de%20la%20energ%C3%ADa%20solar%20fotovoltaica%20como%20solucin%20a%20la%20dependencia%20energ%C3%ADtica%20de%20zonas%20rurales%20de%20Colombia.pdf)

REFERENCIAS

REVISTA VIRTUALPRO. Procesos Industriales. 2014. <http://www.revistavirtualpro.com/noticias/panasonic-y-alkosto-se-unen-para-generar-energia-limpia-a-traves-del-sol-con-un-nuevo-sistema-fotovoltaico-instalado-en-alkosto-ave-68> [Consulta: miércoles 17 de agosto de 2016]

El periódico de la energía. 2016. <http://elperiodicodelaenergia.com/la-capacidad-mundial-de-fotovoltaica-instalada-bate-todos-los-records-y-alcanza-los-227-gw-en-2015/> [Consulta: miércoles 18 de mayo de 2016]

SNAPSHOT OF GLOBAL PHOTOVOLTAIC MARKETS, 2015 [http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS - A Snapshot of Global PV - 1992-2015 - Final.pdf](http://www.iea-pvps.org/fileadmin/dam/public/report/statistics/IEA-PVPS_-_A_Snapshot_of_Global_PV_-_1992-2015_-_Final.pdf) [Consulta: miércoles 18 de mayo de 2016]

PV magazine. 2014. <http://www.pv-magazine-latam.com/noticias/detalles/articulo/bachelet-inaugura-la-central-amanecer-solar-cap-de-100-mw-100015581/> [Consulta: viernes 20 de mayo de 2016]