

**DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO MEDIANTE ENERGÍAS ALTERNATIVAS  
PARA UNA VIVIENDA UBICADA EN UNA PARCELA EN LA MESA DE LOS  
SANTOS / SANTANDER**

**ANDRÉS FERNANDO RODRÍGUEZ ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

**DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO MEDIANTE ENERGÍAS ALTERNATIVAS  
PARA UNA VIVIENDA UBICADA EN UNA PARCELA EN LA MESA DE LOS  
SANTOS/SANTANDER**

**ANDRÉS FERNANDO RODRÍGUEZ ORTIZ**

**Trabajo de grado para optar el título de  
Ingeniero Mecánico**

**Director**

**JORGE LUIS CHACÓN VELASCO**

**Ingeniero Mecánico, Ph.D**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  
BUCARAMANGA**

**2017**

## **DEDICATORIA**

A Dios, por brindarme sabiduría, salud y bienestar en todos los momentos que necesitaba.

A mis padres, que los amo con el alma, Rosita Ortiz y Elías Rodríguez, son mi más grande motivación, mil gracias por su gran apoyo y comprensión incondicional, esta meta es de ustedes.

A mis hermanos, Jorge Luis Rodríguez e Iván René Rodríguez que siempre estuvieron ahí, para ayudarme y fueron una motivación más para seguir adelante.

A mi novia, Anghye Roxanna Plata, por su gran amor, comprensión, cariño y sobre todo, por su inmensa ayuda en el transcurso de esta fase final de mi carrera; agradezco a la vida por cruzarte en mi camino y a ti mil gracias.

A mi abuelo Felix Arturo Rodríguez, que siempre fue un ejemplo de superación académica y espero que desde donde esté, se sienta orgulloso.

A mis familiares, que me alentaban para seguir y alcanzar la meta.

A mis compañeros, por los grandes momentos compartidos y por la sincera amistad brindada.

Y a muchas otras personas que pusieron una parte de su vida en hacer mejor la mía en el transcurso de mi carrera universitaria.

A todos muchas gracias.

**ANDRÉS FERNANDO RODRÍGUEZ ORTIZ**

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis más sinceros agradecimientos al profesor Jorge Luis Chacón Velasco director del proyecto por su colaboración y asesoría durante el desarrollo del trabajo de grado.

Mis agradecimientos a la Universidad industrial de Santander principalmente a la Escuela de Ingeniería Mecánica, a todos sus docentes, personal administrativo y demás, que fueron guías en mi etapa de formación académica,

**ANDRÉS FERNANDO RODRÍGUEZ ORTIZ**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	18
CAPITULO 1.....	19
1. ENERGÍA RENOVABLE .....	19
1.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE .....	19
1.1.1 Energía eólica .....	19
1.1.2 Energía hidráulica. ....	20
1.1.3 Energía geotérmica.....	21
1.1.4 Energía de biomasa .....	21
1.1.5 Energía mareomotriz. ....	22
1.1.7 Energía solar.....	23
1.1.7.1 Generalidades de la energía solar. ....	24
1.1.7.2 Ángulos de incidencia de la radiación solar respecto a una superficie .....	25
1.1.7.3 Tipos de radiación solar, .....	32
1.1.7.5 Radiación solar en el mundo.....	41
1.1.7.5. Radiación solar en Colombia .....	42
CAPITULO 2.....	44
2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO .....	44
2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	44
2.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA .....	44
2.3. OBJETIVOS.....	45
2.3.1. Objetivo general.....	45

2.3.2. Objetivos específicos .....	45
2.4 ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES A LA VIVIENDA .....	47
2.5 RADIACIÓN SOLAR REGIÓN ANDINA CENTRO .....	47
2.6 NORMATIVIDAD DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA ...	48
2.6.1 Código eléctrico colombiano NTC 2050.....	48
2.6.2 Normatividad de sistemas solares fotovoltaicos. ....	49
2.6.2.1 NTC 2883. Módulos fotovoltaicos de silicio cristalino para aplicación terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo.....	49
2.6.2.2 NTC 5464. Módulos fotovoltaicos de lámina delgada para uso terrestre. Calificación del diseño y homologación. ....	49
2.6.2.3 NTC 5549. Sistemas fotovoltaicos terrestres. Generadores de potencia. Generalidades y guía.....	50
2.6.2.4 NTC 5287. Celdas y baterías secundarias para sistemas de energía solar fotovoltaica. Requisitos generales y métodos de ensayo .....	50
2.6.2.5 NTC 5433. Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos.....	50
2.6.2.6 NTC 5627. Componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Calificación del diseño y ensayos ambientales. ....	50
2.6.3 Nueva ley 1715 de 2104. Regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional .....	51
2.6.3.1 Algunos conceptos, para efectos de interpretar y aplicar la presente ley: .	52
CAPITULO 3 .....	53
3. ENERGÍA FOTOVOLTAICA .....	53
3.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA .....	53
3.1.1 Definición .....	53

3.1.2 Celdas fotovoltaicas.....	55
3.1.2.1 Características de los módulos o paneles fotovoltaicos.....	57
3.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	61
3.2.1 Generador fotovoltaico.....	62
3.2.2 Regulador o controlador de carga,.....	63
3.2.3 Acumuladores o baterías, .....	64
3.2.3.1 Factores importantes para tener en cuenta en la selección de las baterías: .....	64
3.2.4 Inversor o convertidor DC/AC. ....	67
3.2.5 Diodos.....	68
3.2.6 Cables eléctricos.....	69
3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS .....	71
3.4 ALTERNATIVAS A ANALIZAR: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	72
3.4.1 Sistema aislado (off grid). ....	72
3.4.2 Sistemas conectados a red (GRID TIE).....	73
3.4.2.1 Generación unidireccional.....	73
3.4.2.2 Generación bidireccional.....	74
3.4.3 Sistema híbrido.....	74
3.4.3.1 Generador eléctrico de gas propano.....	75
3.5 APLICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA .....	76
3.6 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA.....	79
CAPITULO 4 .....	80
4. DISEÑO Y CÁLCULO DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS .....	80
4.1. CANTIDAD Y DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA.....	80

4.1.1. Radiación solar promedio anual y horas sol en la Mesa de los Santos .....	81
4.2 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN.....	82
4.2.1 Orientación.....	82
4.2.2 Inclinación .....	83
4.3 CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA .....	83
4.4 CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO: ..	85
4.4.1 Cálculo de los módulos solares necesarios: .....	86
4.4.2. Cálculo del número de baterías .....	87
4.4.3. Cálculo del regulador/controlador de carga .....	88
4.4.4. Cálculo del inversor .....	89
4.5 RESUMEN DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DEL SISTEMA. ....	90
4.6 CONDUCTOR ELECTRICO .....	92
4.6.1 Determinar la corriente nominal de la carga. ....	92
4.6.2 Corrección de la capacidad de conducción de corriente.....	92
4.6.3 Determinar la caída de tensión .....	92
4.6.4 Selección del calibre del conductor.....	93
4.6.5 Análisis cada sección de conductores .....	94
4.7 RESUMEN DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	98
4.7.1 Subsistema de generación fotovoltaica .....	99
4.7.2 Subsistema de conmutación .....	101
4.7.3 Subsistema de consumo de energía.....	101
4.7.4 Subsistema de energía auxiliar .....	102
CAPITULO 5 .....	103
5. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	103

5.1 PRESUPUESTO SISTEMA FOTOVOLTAICO .....	104
5.2 PRESUPUESTO SISTEMA ELECTRÓGENO .....	105
5.3 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS.....	107
5.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CON RESPECTO AL PRECIO DE LA ENERGÍA CONVENCIONAL.....	108
5.5 ANÁLISIS DE UN SISTEMA ELECTRÓGENO ACCIONADO POR GAS PROPANO CON RESPECTO AL PRECIO DE LA ENERGÍA CONVENCIONAL. ....	110
CAPITULO 6.....	113
6.1 CONCLUSIONES .....	113
6.2 RECOMENDACIONES.....	115
BIBLIOGRAFÍA.....	116

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Energías renovables .....	18
Figura 2. Energía Eólica .....	20
Figura 3. Central Hidroeléctrica .....	20
Figura 4. Central Geotérmica.....	21
Figura 5. Procesos de transformación de la biomasa .....	22
Figura 6. Central mareomotriz .....	23
Figura 7. Espectro solar .....	25
Figura 8. Movimiento de rotación.....	26
Figura 9. Movimiento de traslación .....	26
Figura 10. Movimiento de precesión .....	27
Figura 11. Movimiento de nutación .....	27
Figura 12. Ángulo de declinación.....	28
Figura 13. Ángulo de inclinación horaria .....	29
Figura 14. Factores dependientes de la ubicación de la tierra.....	30
Figura 15. Latitud terrestre.....	30
Figura 16. Ángulo de inclinación superficie captadora.....	32
Figura 17. Tipos de radiación solar.....	33
Figura 18. Piranómetro .....	35
Figura 19. Pirheliómetro.....	36
Figura 20. Actinógrafo.....	37
Figura 21. Heliógrafo .....	37
Figura 22. Correlaciones radiación global y difusa .....	40
Figura 23. Radiación solar en el mundo .....	42
Figura 24. Promedio radiación solar en Colombia .....	43
Figura 25. Descripción de la vivienda .....	46
Figura 26. Efecto fotoeléctrico .....	54
Figura 27. Representación del potencial eléctrico .....	55
Figura 28. Funcionamiento de las celdas .....	55
Figura 29. Tipos de módulos fotovoltaicos.....	57

Figura 30a. Curvas I-V para distintos valores de irradiancia solar. Temperatura constante de la celda (25° C).....	58
Figura 30b. Curvas I-V para distintos valores de temperatura de la celda. Valor de irradiancia solar constante de la celda (1000 [W/m <sup>2</sup> ]).....	58
Figura 31. Curva I-V y de potencia .....	59
Figura 32. Elementos de un sistema fotovoltaico.....	62
Figura 33a. Conexión paralelo .....	62
Figura 33a. Conexión serie .....	63
Figura 34. Regulador de carga .....	64
Figura 35. Tipos de baterías .....	67
Figura 36. Inversor o convertidor DC/AC .....	68
Figura 37. Esquema conexión de diodos.....	69
Figura 38. Resistividad de diferentes materiales .....	70
Figura 39. Esquema sistema fotovoltaico .....	72
Figura 40. Sistema aislado (off grid) .....	73
Figura 41. Generación unidireccional .....	73
Figura 42. Generación bidireccional - generación llevada a la red .....	74
Figura 43. Sistema híbrido .....	75
Figura 44. Generador eléctrico de gas propano.....	76
En la figura 45, se puede observar un sistema de bombeo accionado por energía fotovoltaica.....	77
Figura 45. Sistema de bombeo con energía fotovoltaica. ....	77
Figura 46. Ubicación geográfica municipio de La Mesa de los Santos .....	81
Figura 47. Radiación y Horas-sol promedio anual en la Mesa de los Santos .....	81
Figura 48. Orientación de los módulos solares .....	82
Figura 49. Distribución paneles solares fotovoltaicos .....	87
Figura 50. Distribución conductores eléctricos del sistema .....	94
Figura 51. Subsistemas del montaje total .....	99
Figura 52. Subsistema de generación fotovoltaica .....	99
Figura 53. Esquema detallado .....	101

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Diferencias entre celdas fotovoltaicas.....	56
Tabla 2. Diferencias entre tecnologías de silicio en los módulos fotovoltaicos. ....	56
Tabla 3. Ventajas y desventajas de la Energía Solar.....	71
Tabla 4. Ventajas y desventajas de los sistemas fotovoltaicos.....	78
Tabla 5. Consumo de energía.....	84
Tabla 6. Ficha técnica de la instalación. ....	91
Tabla 7. Conductores eléctricos del sistema .....	98
Tabla 8. Subsistema de generación fotovoltaica.....	100
Tabla 9. Presupuesto sistema fotovoltaico .....	104
Tabla 10. Presupuesto sistema electrógeno.....	106
Tabla 11. VPN, TIR Sistema fotovoltaico.....	109
Tabla 12. VPN, TIR Sistema electrógeno .....	111

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Características técnicas de los equipos seleccionados

Anexo B. Tablas conductores eléctricos.

Anexo C. Planos del sistema fotovoltaico

**NOTA: LOS ANEXOS DE ESTE PROYECTO PUEDEN CONSULTARSE EN  
BIBLIOTECA UIS: SALA BASE DE DATOS.**

## RESUMEN

**TITULO:**

DISEÑO DE UN SISTEMA HÍBRIDO MEDIANTE ENERGÍAS ALTERNATIVAS PARA UNA VIVIENDA UBICADA EN UNA PARCELA EN LA MESA DE LOS SANTOS / SANTANDER\*

**AUTOR:**

ANDRÉS FERNANDO RODRÍGUEZ ORTIZ \*\*

**PALABRAS CLAVE:**

Energía fotovoltaica, sistema solar, módulos solares, paneles.

**DESCRIPCIÓN:**

En este trabajo de grado se realiza un diseño de un sistema híbrido para una vivienda ubicada en la Mesa de los Santos al sur de Santander-Colombia; se implementa la energía fotovoltaica como alternativa de alimentación eléctrica para la vivienda.

El sistema está compuesto de módulos fotovoltaicos que son los encargados de producir la energía, de baterías que sirven como medio de almacenamiento y un inversor que posee unas características de: carga de las baterías, conversión de corriente continua a corriente alterna y la conmutación automática entre la energía de los módulos y la energía de la red eléctrica.

Para la el diseño del sistema fotovoltaico se analizaron diferentes factores, como la energía consumida por la vivienda, la radiación promedio del lugar, la intensidad lumínica del sector, la potencia suministrada por los módulos fotovoltaicos, el voltaje del trabajo del sistema, la capacidad de las baterías, la potencia del inversor entre otros.

Finalmente para el estudio de factibilidad económica del proyecto se realiza el análisis financiero al sistema fotovoltaico con respecto a la energía convencional y a un sistema electrógeno accionado con gas propano, ambos análisis se hacen por medio del valor presente neto y la tasa interna de retorno.

---

\*Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco.

## ABSTRACT

**TITULO:**

DESIGN OF A HYBRID SYSTEM USING ALTERNATIVE ENERGIES FOR A HOUSE LOCATED IN "MESA DE LOS SANTOS / SANTANDER"\*

**AUTHOR:**

ANDRÉS FERNANDO RODRÍGUEZ ORTIZ \*\*

**KEYWORDS:**

Photovoltaic energy, solar system, solar modules, alternative energy.

**DESCRIPTION:**

This project consists of a design of a hybrid system for a house in Mesa de los Santos to the south of Santander-Colombia; the photovoltaic energy is implemented as alternative of electric power for the house.

The system consists of photovoltaic modules that are responsible for producing energy, from batteries that serve as storage medium, an inverter that has features such as: battery charging, direct current conversion to alternating current and automatic switching between the energy of the modules and the power of the electrical network.

For the design of the photovoltaic system different factors are analyzed, such as the energy consumed by the house, the average radiation of the place, the light intensity of the sector, the power supplied by the photovoltaic modules, the working voltage of the system, the capacity of the batteries, the power of the inverter among others.

Finally, for the economic feasibility study of the project, the financial analysis is done to the photovoltaic system with respect to the conventional energy and to a propane gas powered generator, both analyzes are elaborated by the net present value and the internal rate of return.

---

\*Graduation Project

\*\* Faculty of Physical-Mechanical Engineering's, School of Mechanical Engineering. Director: Jorge Luis Chacón Velasco.

## INTRODUCCIÓN

En los últimos años la contaminación y el cambio climático ha sido un factor de preocupación en la población mundial, por tal motivo, se ha venido trabajando en fuentes de energías limpias y renovables que no afecten el medio ambiente. La demanda de energía mundial está en crecimiento y la dependencia energética de fuentes no renovables como los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural), da motivo para avanzar rápidamente en el desarrollo tecnológico de algunas fuentes de energías renovables, como la energía del sol (por medio de paneles fotovoltaicos, suministrando electricidad o paneles solares suministrando agua sanitaria caliente) , la energía del viento (energía cinética del viento que hace girar aspas o hélices de una turbina eólica y produce electricidad), la energía de la corriente del agua (energía hidráulica, es la más utilizada en Colombia para producir electricidad, centrales hidroeléctricas) la energía geotérmica (es el calor y el vapor que proviene de la tierra), son algunas de las energías renovables que están en estudio para su óptimo aprovechamiento<sup>1</sup>. (Véase figura 1).

Figura 1. Energías renovables



Fuente: <http://www.renovablesverdes.com/6-razones-para-elegir-energias-renovable>

---

<sup>1</sup> Fuente: GREUS SOLÉ, Antonio. Energías renovables / 2ª.edición. Colombia: Ediciones de la U, 2014. 440 p.

## CAPITULO 1.

En este capítulo se hace una breve descripción de las energías renovables enfocándose en la energía solar.

### 1. ENERGÍA RENOVABLE

Los principales conceptos en los que se basa el estudio de fuentes de energía son la definición de energía, tipos de energía y principios básicos de termodinámica. Existe una gran probabilidad que en un futuro las energías renovables y limpias puedan dar abastecimiento total a la demanda energética, por eso es importante conocer las diferentes fuentes de energías que se pueden utilizar<sup>2</sup>.

#### 1.1 FUENTES DE ENERGÍA RENOVABLE

Las principales fuentes de energía renovable son:

- Energía eólica
- Energía hidráulica
- Energía geotérmica
- Energía mareomotriz
- Energía de Biomasa
- Energía solar

**1.1.1 Energía eólica.** La energía obtenida del viento. La energía cinética que genera el viento por efecto de las corrientes de aire es utilizada por equipos llamados aerogeneradores que se encargan de convertir dicha energía del viento en energía eléctrica, el movimiento de vientos hace girar las aspas del rotor y éste por arrastre acciona el generador produciendo energía eléctrica. (Véase figura 2).

---

<sup>2</sup> Fuente: GONZÁLEZ VELASCO, Jaime. Energía renovable. España: Editorial Reverté, 2009. 656p.

Figura 2. Energía Eólica



Fuente <http://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com.co/2012/07/la-energia-eolica-como-suministro.html>

**1.1.2 Energía hidráulica.** Energía hidráulica o energía hídrica se obtiene del aprovechamiento de las energías cinética y potencial de la corriente del agua o los saltos de agua naturales, es decir, se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura para mover una turbina y así producir energía eléctrica, su proceso se basa en retener grandes cantidades de agua a un gran altura y así conseguir una gran energía potencial, al dejar caer el fluido, esta energía cinética mueve las paletas de la turbina hidráulica, logrando producir energía eléctrica (centrales eléctricas).<sup>3</sup> (Véase figura 3).

Figura 3. Central Hidroeléctrica



Fuente: <http://andoni.mx/project/energia-hidraulica-2/>

---

<sup>3</sup> Fuente: ORTEGA RODRIGUEZ, Mario. Energías renovables. España: Thomson Editores Spain, 2003. 327p

**1.1.3 Energía geotérmica.** Es la energía producida por el calor interno de la tierra. Parte del calor interno de la tierra que está aproximadamente a una temperatura (6000°C)<sup>4</sup> llega a la superficie terrestre; éste es aprovechado por medio del agua que se calienta o se evapora para mover las aspas de una turbina y producir electricidad.

La temperatura aumenta 30°C cada kilómetro que se desciende bajo tierra. Este gradiente térmico, generado por el flujo de calor del interior de la Tierra, produce energía geotérmica. Cerca de 500 centrales en todo el mundo ya la utilizan para generar electricidad. Se considera a la energía geotérmica habitualmente respetuosa con el medioambiente, sostenible y estable como fuente de energía. En algunos lugares del mundo es habitual su aprovechamiento, mientras que en otros los grandes costos de inversión impiden su plena explotación. (Véase figura 4).

Figura 4. Central Geotérmica



Fuente: <http://www.agenciasinc.es/Noticias/La-energia-geotermica-de-la-peninsula-iberica-puede-generar-cinco-veces-la-capacidad-electrica-actua>

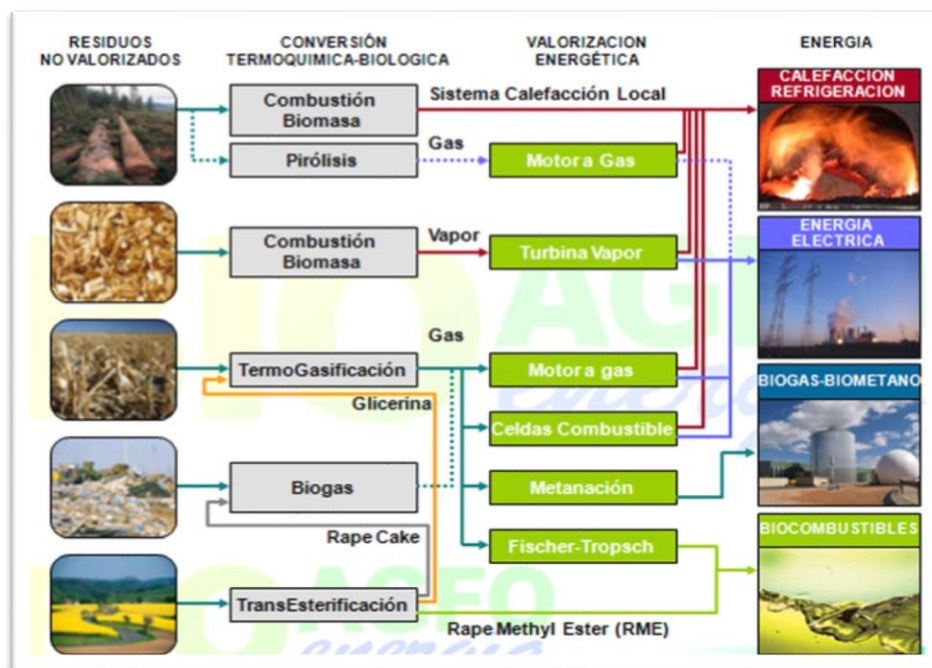
**1.1.4 Energía de biomasa.** La energía de biomasa, surge a partir de los seres vivos o sus desechos, pueden ser plantas, seres humanos y animales. El aprovechamiento de la energía de la biomasa se hace directamente a través de la

---

<sup>4</sup> Fuente: CASTELLS, Xavier; BORDAS, Santiago. Energías, agua, medioambiente territorial Y sostenibilidad. España: Ediciones Díaz de Satos, 2011. 975p.

combustión, o por transformación en otras sustancias que pueden ser aprovechadas más tarde como combustibles o alimentos. La transformación de la biomasa se puede dar por medio de la combustión, la pirólisis (se basa en la descomposición de materia orgánica y todo tipo de materiales excepto metales y vidrios, causada por el calentamiento a altas temperaturas en ausencia de oxígeno), métodos biológicos (Se trata de una fermentación alcohólica que transforma la biomasa en etanol (biocombustible), este alcohol se produce por la fermentación de azúcares y el metanol que es la destilación destructiva de la madera) y gasificación (biomasa humedecida por bacterias en un ambiente sin oxígeno, produce biogás)<sup>5</sup> (Véase figura 5).

Figura 5. Procesos de transformación de la biomasa



Fuente: <http://www.arbolesymedioambiente.es/Fotos5/Biomasa.jpg>

**1.1.5 Energía mareomotriz.** Es la energía producida a partir de las mareas. Aprovecha el movimiento que se produce en el agua debida al viento y a las fuerzas

<sup>5</sup> Fuente: ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Tecnologías de generación de energía eléctrica. México: Editorial limusa, 2009. 386p.

gravitacionales que ejercen el Sol y la Luna y que provoca las mareas. El funcionamiento de la energía mareomotriz o energía de las mareas es muy básico, ya que la energía se obtiene mediante el acoplamiento de una turbina que genera electricidad proveniente de este movimiento natural, lo que se hace es que se construyen embalses cerca de las costas para permitir el almacenamiento del agua cuando sube la marea, para cuando la marea baje, liberarla al mar haciéndola pasar por una turbina que produce electricidad con este movimiento del agua<sup>6</sup>. (Véase figura 6).

Figura 6. Central mareomotriz



Fuente: <http://www.proyectopv.org/2-verdad/energiamarem.htm>

**1.1.7 Energía solar.** Es energía que llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética (luz, calor y rayos ultravioleta principalmente) procedente del Sol, donde ha sido generada por un proceso de fusión nuclear a una temperatura en su superficie de aproximadamente 6000 [K]. La energía solar que se disipa en el espacio es  $3,87 * 10^{26}$  vatios ( $3,87 * 10^{14}$  TW)<sup>7</sup> y la que llega a la capa de la tierra es muy inferior, porque se encuentra a gran distancia y es de un tamaño muy inferior

<sup>6</sup> Fuente: GONZÁLEZ VELASCO, Jaime. Energía renovable. España: Editorial Reverté, 2009. 656p.

<sup>7</sup> Fuente: GREUS SOLÉ, Antonio. Energías renovables / 2ª.edición. Colombia: Ediciones de la U de la U, 2014. 440 p.

al Sol. Esta energía es del orden de 173000 TW, lo que equivale a 4500 veces la energía que el hombre consume. Siendo la distancia aproximada entre el sol y la tierra de  $1,5 * 10^{11}$  metros, el flujo de energía solar que alcanza la tierra, denominada constante solar es:

$$\frac{3,87 * 10^{26}}{4 \cdot \pi \cdot 1,5 * 10^{11}} = 1370 \text{ W/m}^2 \text{Ecuación (1)}$$

A continuación se describen aspectos importantes de la energía solar como lo son:

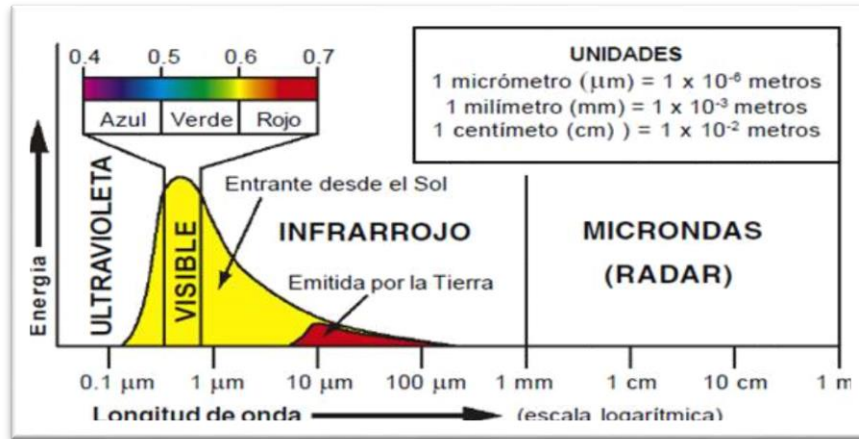
- Generalidades de la energía solar
- Ángulos de incidencia de la radiación solar respecto a una superficie
- Tipos de radiación solar
- Radiación en el mundo
- Radiación en Colombia
- Ventajas y desventajas de la energía solar

**1.1.7.1 Generalidades de la energía solar.** La energía consumida en casi todos los procesos atmosféricos proviene del sol. Esta energía se transfiere a través de la radiación del calor en forma de ondas electromagnéticas. La radiación del sol tiene su pico de transmisión en el rango visible de longitudes de onda entre 0,4 y 0,7 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) del espectro electromagnético (figura 7). Sin embargo, el sol también descarga una cantidad considerable de energía en las regiones ultravioletas e infrarrojas en un rango de onda de 0,29 y 0,4 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) para ultravioleta y de 0,7 y 3,5 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) para infrarrojo. Por consiguiente, la radiación solar que cae sobre la Tierra generalmente tiene una longitud de onda que oscila entre 0,29 y 3,5  $\mu\text{m}$ <sup>8</sup>.

---

<sup>8</sup> Fuente: VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p.

Figura 7. Espectro solar



Fuente: [http://carlosdavid.mex.tl/1180793\\_espectro-electromagnetico.html](http://carlosdavid.mex.tl/1180793_espectro-electromagnetico.html)

### 1.1.7.2 Ángulos de incidencia de la radiación solar respecto a una superficie

Estos ángulos están relacionados a muchos parámetros dependientes del movimiento de la tierra y dependientes de la ubicación sobre la tierra. Aquí se tendrá en cuenta tres factores:

- Factores dependientes del movimiento de la tierra
- Ángulo de declinación e inclinación horaria
- Factores dependientes de la ubicación de la tierra

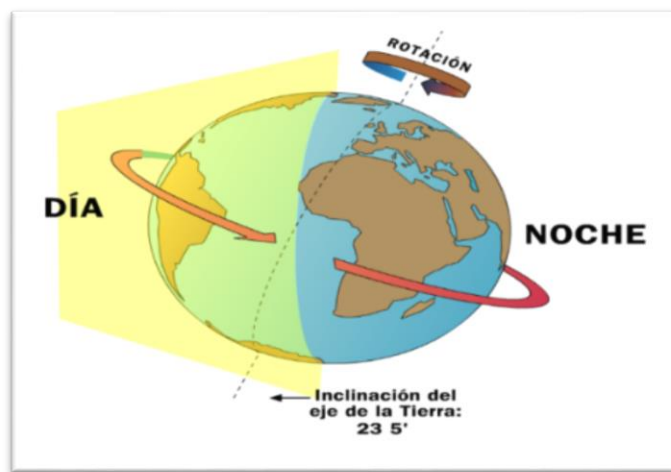
**Factores dependientes del movimiento de la tierra.** La tierra está sometida a diversos movimientos, de los cuales cuatro son los principales y están referenciados al sol:

- **Movimiento de rotación:** Este movimiento es el que realiza el planeta sobre su propio eje, determinando así el día y la noche. La Tierra rota sobre un eje imaginario denominado eje terrestre el cual pasa a través de sus polos. (Véase figura 8).
- **Movimiento de traslación:** El movimiento de traslación es el que realiza el planeta Tierra en relación al Sol girando alrededor de él. (Véase figura 9).
- **Movimiento de precesión:** La precesión o movimiento de trompo es el cambio lento y gradual de la orientación del eje de rotación de la tierra. El eje terrestre

cuenta con una inclinación de 23,46 grados con respecto a un eje perfecto que se traza en dirección al Sol. (Véase figura 10).

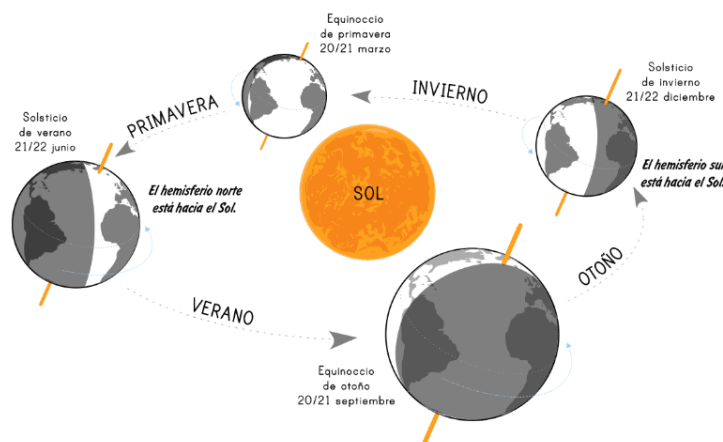
- **Movimiento de nutación:** La nutación es la oscilación periódica del polo de la Tierra alrededor de su posición media en la esfera celeste, debido a las fuerzas externas de atracción gravitatoria entre la Luna y el Sol con la Tierra. Esta oscilación es similar al movimiento de un trompo cuando pierde fuerza y está a punto de caerse. (Véase figura 11).

Figura 8. Movimiento de rotación



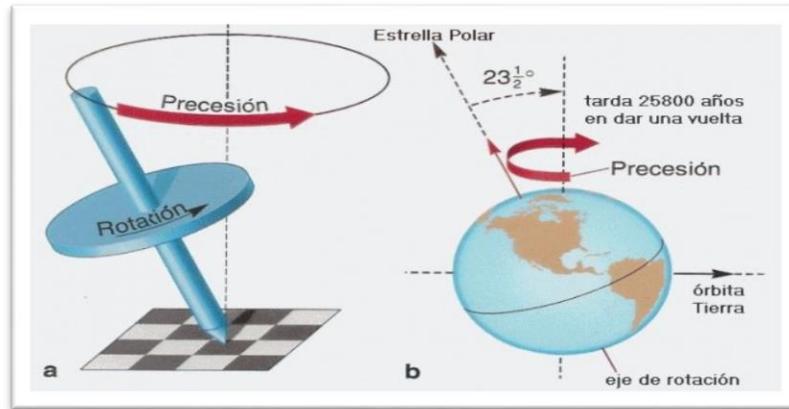
Fuente: <https://astronomiachile.wordpress.com/observando-el-cielo/>

Figura 9. Movimiento de traslación



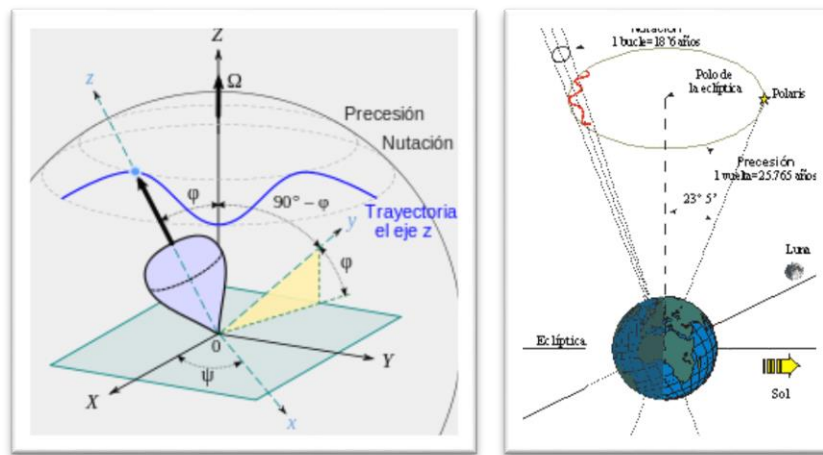
Fuente: <https://matiasscorsetti.wordpress.com/tag/traslacion/>

Figura 10. Movimiento de precesión



Fuente: <https://astronomiachile.wordpress.com/observando-el-cielo/>

Figura 11. Movimiento de nutación



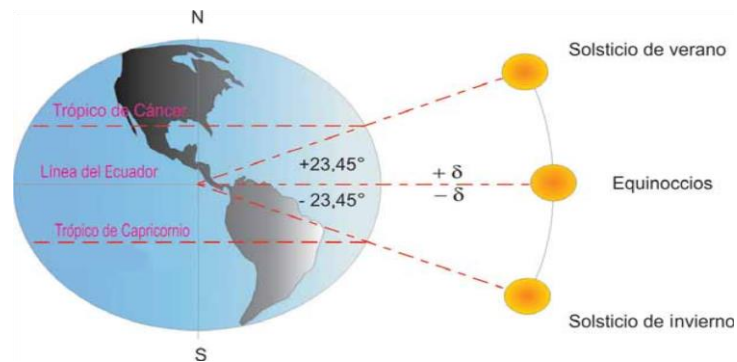
Fuente: <https://astronomiachile.wordpress.com/observando-el-cielo/>

**Ángulo de declinación  $[\delta]$  e inclinación horaria  $[\omega]$ .** En el estudio de la radiación solar respecto a una superficie se tienen en cuenta con mayor importancia, los movimientos de rotación y traslación de la tierra ya que permiten determinar el ángulo de declinación  $[\delta]$  y el ángulo de inclinación horaria  $[\omega]$ . (Véase figura 12).

- **Ángulo de declinación  $[\delta]$ .** Cuando se analiza el movimiento de rotación y traslación de la Tierra, se encuentra que su eje de rotación, con respecto al plano de traslación alrededor del Sol, tiene una inclinación fija de aproximadamente  $23,45^\circ$ . El ángulo formado entre el plano ecuatorial de la tierra

y la línea Tierra-Sol se denomina declinación solar ( $\delta$ ). Debido al movimiento de la Tierra alrededor del Sol el valor de este ángulo varía durante el año. El signo de la declinación es positivo (+) cuando el Sol incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio norte, entre el 21 de marzo (equinoccio de primavera) y el 23 de septiembre (equinoccio de otoño), y negativo (-) cuando incide perpendicularmente sobre algún lugar en el hemisferio sur, entre el 23 de septiembre (equinoccio de otoño) y el 21 de marzo (equinoccio de primavera), y varía entre  $-23,45^\circ$ , cuando el Sol se encuentra en la parte más baja del hemisferio sur (solsticio de invierno 21/22 de diciembre), y  $+23,45^\circ$ , cuando se halla en la parte más alta del hemisferio norte (solsticio de verano 21/22 de junio). Dos veces durante el año toma valor de  $0^\circ$  cuando pasa por la línea del Ecuador.

Figura 12. Ángulo de declinación



Fuente: [http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/leccin\\_5\\_radiacin\\_solar.html](http://datateca.unad.edu.co/contenidos/358026/358026/leccin_5_radiacin_solar.html)

Para calcular el ángulo de declinación en cualquier momento del año se utiliza la siguiente expresión:

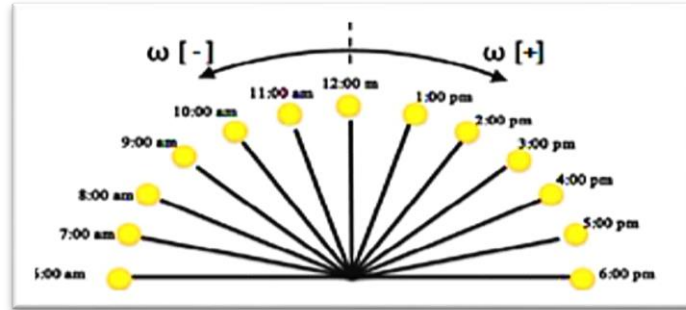
$$\delta = 23.45 * \sin\left(360 * \frac{284+n}{365}\right) \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde  $n$  representa el día del año siendo el primero (1) de Enero el día 1.

- **Ángulo de inclinación horaria [ $\omega$ ].** Este ángulo depende de la rotación terrestre y mide el desplazamiento angular del sol respecto al medio día solar, tomando

valores negativos en las horas de la mañana y valores positivos en las horas de la tarde. Una hora solar equivale a  $15^\circ$  ( $360^\circ/24$  horas) (Véase figura 13).

Figura 13. Ángulo de inclinación horaria



Fuente: Modificada por autor

Para determinar el ángulo de inclinación horaria se puede usar la siguiente ecuación que nos da el ángulo en grados  $[\circ]$ . Esta ecuación está en función de la hora, minutos y segundos para ser más exacta.

$$\omega = 15 * \left( \left( hora + \frac{min}{60} + \frac{seg}{3600} \right) - 12 \right) \quad \text{Ecuación (3)}$$

**Factores dependientes de la ubicación de la tierra (Coordenadas solares).** Para localizar correctamente la posición del sol con respecto de un observador situado en la tierra, se supone, para facilitar la comprensión del sistema, que el sol es el que se mueve alrededor de la tierra. (Ver figura 14).

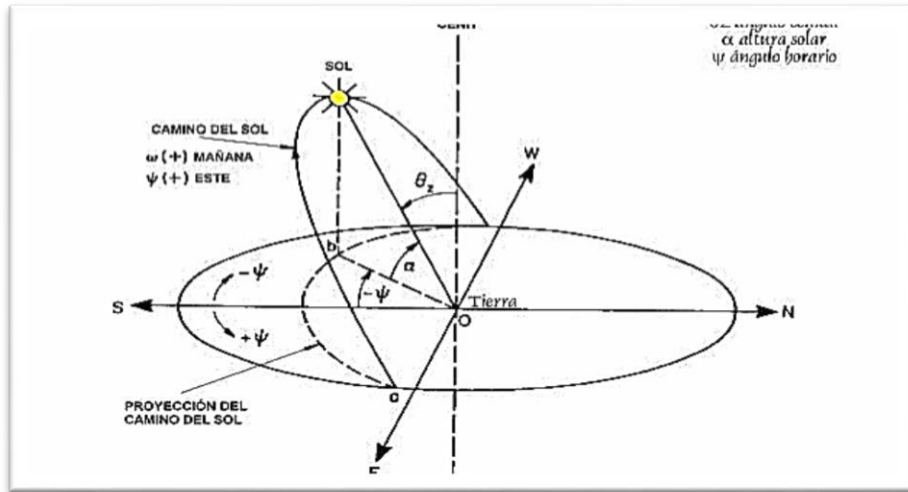
Para situar una instalación solar correctamente es necesario conocer los ángulos más importantes de la posición del sol y de los captadores solares, estos ángulos se mencionan a continuación<sup>9</sup>:

1. Latitud terrestre ( $\phi$ ).
2. Ángulo de inclinación superficie captadora ( $\beta$ ).
3. Ángulo acimutal o acimut ( $\psi, A$ )

<sup>9</sup> Fuente: VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p.

4. Altura solar ( $\alpha, h$ )
5. Ángulo cenital o distancia cenital ( $\theta_z, \theta$ )

Figura 14. Factores dependientes de la ubicación de la tierra



Fuente: <http://www.laenergíadelcambio.com/sol-de-invierno-y-la-energía-solar>

**Latitud terrestre ( $\phi$ ).** La latitud es la distancia angular entre la línea ecuatorial (el ecuador), y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. La latitud proporciona la localización de un lugar, en dirección Norte o Sur desde el ecuador y se expresa en medidas angulares que varían desde los  $0^\circ$  del ecuador hasta los  $90^\circ\text{N}$  del polo Norte o los  $90^\circ\text{S}$  del polo Sur, donde el signo  $[-]$  significa latitud sur, y el signo  $[+]$  significa latitud norte (Véase Figura 15).

Figura 15. Latitud terrestre



Fuente: <https://socialesdigital.files.wordpress.com/2013/10/paralelos.gif/>

**Ángulo acimutal o acimut ( $\psi, A$ ):** Es el ángulo formado por la proyección sobre la superficie horizontal del lugar, de la recta Sol-Tierra, con respecto a la recta Norte-Sur terrestre. En el hemisferio norte se mide hacia el Sur u es positivo hacia el Oeste, siendo todo lo contrario para el hemisferio sur.

**Ángulo del cenit ( $\theta_z, \theta$ ).** Es el ángulo formado entre la línea del Cenit y la dirección de la radiación solar, su complemento es la altura solar ( $\alpha, h$ ).

Se puede calcular el ángulo de incidencia de la radiación solar directa mediante la expresión [Duffie y Beckman, 1996; Bértiz, 1977]:

$$\cos \theta = \cos (L - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin (L - \beta) \sin \delta \quad \text{Ecuación (4)}$$

Dónde:

$\theta$ , es el ángulo de incidencia formado por la normal a la superficie y el rayo incidencia de ella.

$L$ , es la latitud del punto de la superficie terrestre.

$\beta$ , es el ángulo de inclinación

$\omega$ , es el ángulo horario

$\delta$ , es la declinación

Cuando la hora marca las 12 de medio día se podrá reducir a la siguiente ecuación:

$$\theta = \delta - L \quad \text{Ecuación (5)}$$

**Altura solar ( $\alpha, h$ ):** Es el ángulo formado por la recta Sol-Tierra respecto al plano que sostiene a la superficie de lugar. (Ver figura 16).

**Ángulo de inclinación de la superficie captadora ( $\beta$ ).** Definido como el ángulo que forma el plano que contiene a la superficie captadora con el plano horizontal. En la figura 19, se pueden ver con facilidad algunos de los términos que definen la posición de la superficie captadora<sup>10</sup>.(Ver figura 16).

---

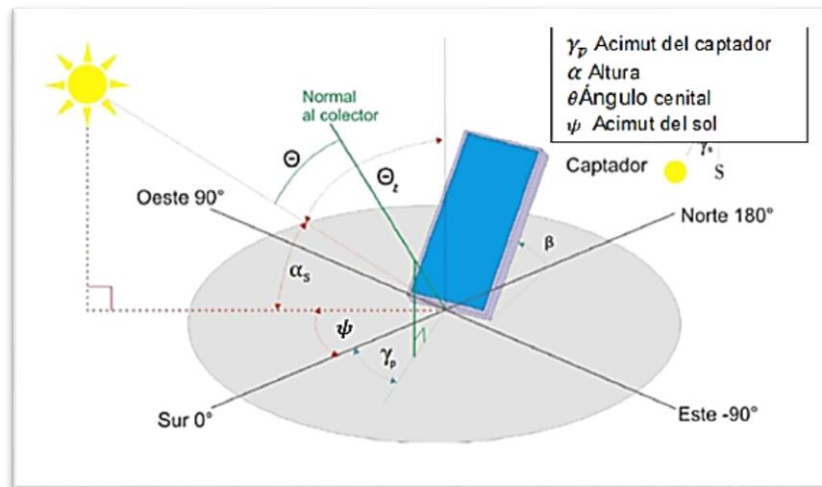
<sup>10</sup> Fuente: CARTA GONZÁLES, José Antonio; CALERO PÉREZ, Roque. Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables. España: Pearson Educación, 2009. 683p.

**Acimut de la pared ( $\gamma$ ):** Es el ángulo formado entre la línea Norte-Sur y la proyección horizontal de la normal de la superficie colectora. Se toma como positivo desde el sur hacia el oeste y como negativo desde el sur hacia el este.

**Cénit:** El zenit, cenit o cénit es la intersección de la vertical de un lugar y la esfera celeste (La esfera celeste es una construcción mental que creamos cuando miramos al cielo, es una esfera ideal, sin radio definido, concéntrica con el globo terrestre), o es el punto más alto en el cielo con relación al observador y se encuentra justo sobre la cabeza de este ( $90^\circ$ ). El punto diametralmente opuesto al zenit es el nadir.

**Nadir:** Es el punto opuesto de la esfera celeste al cénit.

Figura 16. Ángulo de inclinación superficie captadora



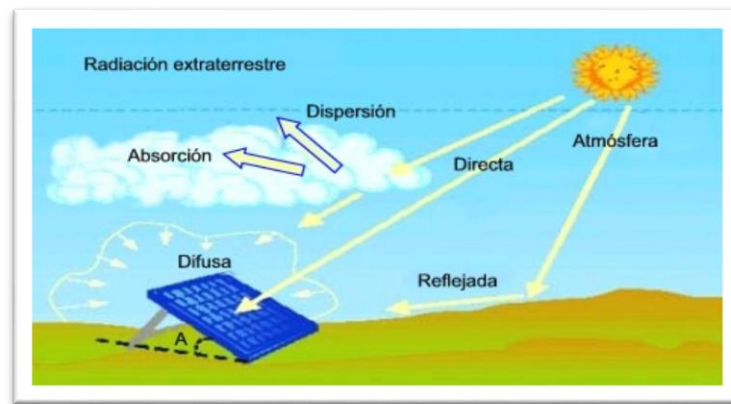
Fuente: Modificada por autor.

**1.1.7.3 Tipos de radiación solar,** (Ver figura 17). La energía del Sol se desplaza a través del espacio en forma de radiación electromagnética. La cantidad de radiación extraterrestre que llega procedente del sol a la tierra es bastante estable, no toda la radiación alcanza la superficie de la Tierra, porque una parte es absorbida por la atmósfera y por el suelo, y otra parte es reflejada directamente al espacio desde el suelo. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la potencia que por unidad de superficie alcanza a la Tierra. Su unidad es el  $W/m^2$ .

En función de cómo reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir estos tipos de radiaciones:

- Radiación directa
- Radiación reflejada
- Radiación global

Figura 17. Tipos de radiación solar



Fuente: <http://www.ecopotencia.com/incidencia.html>

**Radiación reflejada o albedo:** Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

**Radiación directa ( $H_b$ ):** Llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

$$H_b = I * \cos \theta_z \quad \text{Ecuación (6)}$$

Dónde:  $I$ , es la irradiancia directa sobre el lugar ( $W/m^2$ );  $\theta_z$ , es el ángulo del cenit.

**Radiación difusa ( $H_d$ ):** Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación se denomina difusa, va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc.

Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

**Radiación global( $H$ ):** Es la radiación total. Es la suma de la radiación directa y difusa.

$$H = H_b + H_d \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$H = I * \cos \theta_z + H_d \quad \text{Ecuación (8)}$$

Dentro del estudio de los factores de atenuación de la radiación se debe tener en cuenta el índice de claridad o constante de claridad ( $K_T$ ) que indica la transparencia de la atmosfera. Dicha constante se define como la relación entre la radiación medida en la superficie terrestre y la radiación extraterrestre.

$$K_T = \frac{h}{h_0} \quad \text{Ecuación (9)}$$

Debido a la dificultad para medir la constante de claridad de forma directa, se han desarrollado procedimiento e instrumentos que nos permiten determinar un valor para la radiación directa y difusa. Estas dos componentes pueden obtenerse de dos formas, midiéndolas o estimándolas.

**Instrumentos para medir la radiación solar.** Son equipos que nos permiten medir la radiación solar global, la irradiancia directa más la difusa, entre estos tenemos<sup>11</sup>:

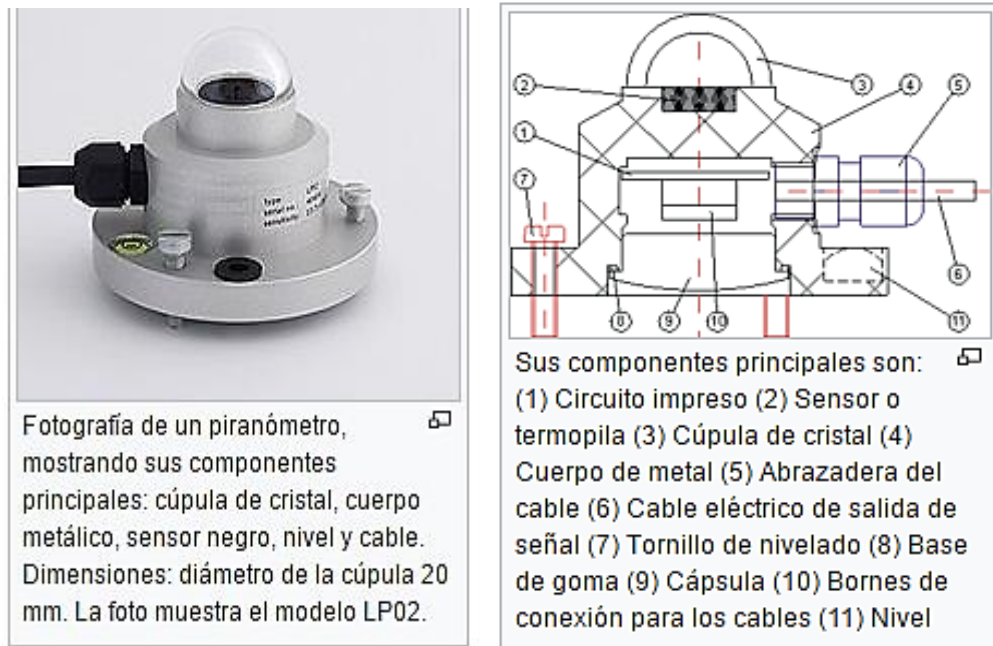
- **Piranómetro:** Instrumento para medir de manera muy precisa la irradiancia incidente sobre una superficie horizontal en la tierra. Funciona por medio de un sensor diseñado para medir la densidad de flujo de radiación solar en un campo de 180°. Dicho instrumento permite determinar la radiación total ( $H$ ). Por medio del piranómetro también se puede medir la radiación difusa, sólo basta con

---

<sup>11</sup> Fuente: PERALES BENITO, Tomás. Guía del instalador de energías renovables. Energía fotovoltaica, energía térmica, energía eólica y climatización. España: Editorial copyright, 2005. 254p.

colocar una cinta de tal forma que haga sombra sobre el sensor, de esta manera no deja pasar la radiación solar directa. (Véase figura 18).

Figura 18. Piranómetro



Fuente: <http://volker-quaschnig.de/fotos/messung/index.php>

- **Pirheliómetro:** Es un instrumento utilizado para la medición de la radiación directa, se diferencia al piranómetro en que este instrumento no mide la radiación en un ángulo de  $180^\circ$ , sino que se encarga de medir la radiación a través de un ducto, de esta manera la radiación difusa y reflejada no influye en su medida. (Véase figura 19).

Figura 19. Pirheliómetro



Fuente: <https://www.darrera.com/detalle-producto.php?d=1&id=315>

- **Actinógrafo:** Registra la radiación solar total, que llega a una superficie negra de 3 por 10 cm. El principio es que el calentamiento de una placa metálica pintada de negro, por efecto de la radiación solar incidente, produce un cambio de temperatura, que es proporcional a la energía de la radiación que se ha convertido en calor en la placa originando el aumento de la temperatura. Estos cambios de temperatura, se miden con un termocupla y cuya señal eléctrica activa una punta indicadora que grafica los cambios sobre una banda de papel, que ha sido dispuesta en un tambor que gira a razón de una vuelta por semana. (Véase figura 20).

Figura 20. Actinógrafo



Fuente: <http://meteorologia.pucp.edu.pe/estacion/bgradiacione.html>

- **Heliógrafo:** Es un instrumento utilizado para la medición del brillo solar, y su objetivo es medir la duración de la insolación diaria, registrando los periodos de tiempo en los que la radiación solar supero un valor mínimo. (Ver figura 21).

Figura 21. Heliógrafo



Fuente: <http://www.rumtor.com/heliografo.html>

### **Estimación de la radiación solar global sobre superficies horizontales.**

Angström (1994)<sup>12</sup> relaciona la radiación solar promedio diaria mensual para los días claros y la radiación solar para un lugar dado con el promedio de la fracción de las horas de brillo solar medidas y la duración teórica del día; esta es:

$$\frac{\bar{H}}{H_c} = a' + b' \frac{\bar{n}}{N} \quad \text{Ecuación (10)}$$

Donde para un periodo de toma de datos:

$H$ , es la radiación promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal  $W/m^2$

$H_c$ , es la radiación promedio diaria para días claros para el lugar y la fecha dados

$a'$  y  $b'$ , son constantes empíricas

$n$ , es el número de horas de brillo solar promedio diario mensual

$N$ , es el promedio diario mensual del máximo de horas posible de brillo solar (Duración del día promedio)

La dificultad básica de esta ecuación está en la incertidumbre con que se determine  $H_c$  para un día claro.

Page (1964) y otros autores citados en el IDEAM y UPME, modifican la ecuación para reemplazar la radiación de un día claro por la radiación incidente sobre una superficie y proponen la siguiente ecuación:

$$\frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} = \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Dónde:

$H$ , es la radiación promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal  $W/m^2$

$\bar{H}_0$ , es la radiación solar extraterrestre promedio diaria mensual sobre una superficie horizontal

$n$ , es el número de horas de brillo solar promedio diario mensual

---

<sup>12</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Apéndice C. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005. 148 p.

$N$ , es el promedio diario mensual del máximo de horas posible de brillo solar (Duración del día promedio)

$a'$  y  $b'$ , son constantes empíricas

En 1966 Swartam y Ogulande introdujeron la humedad relativa ( $R$ ) en tres diferentes ecuaciones:

$$H = 490 D^{0,357} R^{0,262} \quad \text{Ecuación (12)}$$

$$H = 460 e^{0,607(D-R)} \quad \text{Ecuación (13)}$$

$$H = 464 + 265 D - 248 R \quad \text{Ecuación (14)}$$

Donde  $D$ , es el número de horas de brillo solar dividido entre 12.

Masson (1966) encontró una relación entre la radiación solar sobre una superficie horizontal (en langleys por día) y el número de horas de brillo solar ( $n$ ). El resultado fue expresado como:

$$H = 60 + (1406,2 n^2 + 7426,6 n)^{1/2}$$

$1 \text{ langleys} = 1 \text{ cal/cm}^2$  **Ecuación (15)**

**2.3.3.4 Estimación de la radiación solar difusa sobre superficies horizontales.** Los estudios de los datos de radiación solar disponible han mostrado que el promedio de la fracción ( $H_d/H$ ) es una función, del índice de claridad o nubosidad promedio mensual ( $K_t$ ). Muchos investigadores, entre los que se destacan las correlaciones de Collares-Pereira y Rabl, llegaron a correlaciones con comportamientos similares:

$$\frac{H}{H_d} = \begin{cases} = 0,99 \rightarrow & k_t < 0,17 \\ = 1,188 - 2,272 k_t + 9,473 k_t^2 - 21,865 k_t^3 + 14,1648 k_t^4 \rightarrow & 0,35 < k_t < 0,75 \\ = -0,54 k_t + 0,632 \rightarrow & 0,75 < k_t < 0,8 \\ = 0,2 \rightarrow & k_t > 0,8 \end{cases}$$

**Ecuación (16)**

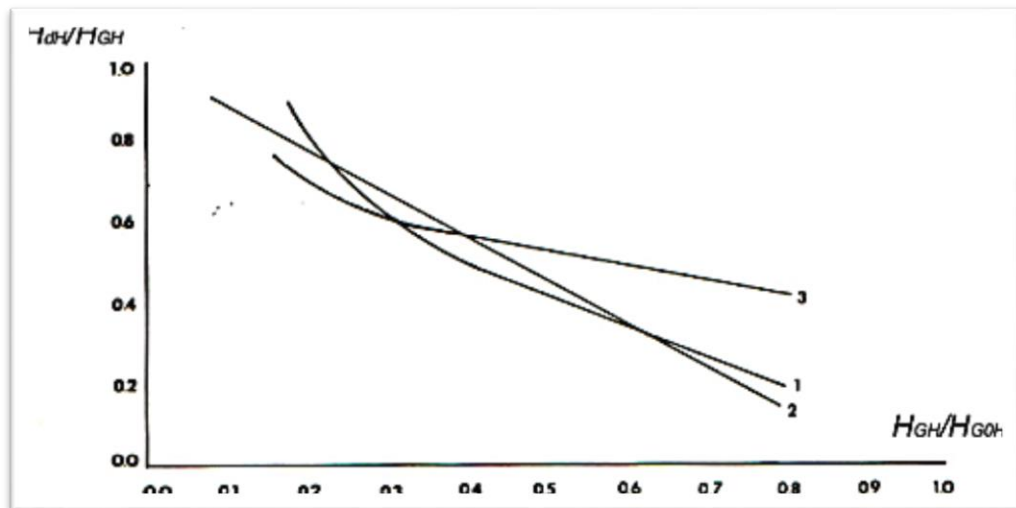
En 1991 M. A. Elhadidy y Abdel-Nabi<sup>13</sup> encontraron una relación entre la radiación difusa, la radiación global y el índice de claridad:

$$\frac{H_d}{H} = 1,039 - 1,741 k_t^2$$

**Ecuación (17)**

Se comparan las correlaciones de Collares-Pereira y Elhadidy; y se observa buena concordancia entre los dos modelos, excepto para algunos valores de  $k_t > 0,65$ . (Véase figura 32).

Figura 22. Correlaciones radiación global y difusa



Fuente: <http://www.phinet.cl/ds/teoria/>

<sup>13</sup> INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Apéndice C. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005. 149 p.

**Irradiancia solar ( $q_s$ )** Es la magnitud que se utiliza para determinar la cantidad de energía que se capta en un área por unidad tiempo, no hay un valor único de Irradiancia debido a que la distancia Tierra-Sol no es constante, además que la radiación solar disminuye o aumenta con la distancia a través de la ley del universo y la trayectoria elíptica Tierra-Sol. Por lo tanto la podemos calcular a partir de:

$$q_s \beta = H_b * \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)} + H_d * \cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + H * \rho * \sin^2\left(\frac{\beta}{2}\right) \quad \text{Ecuación (18)}$$

Donde:

$q_s \beta$ , es la irradiancia sobre una superficie inclinada.

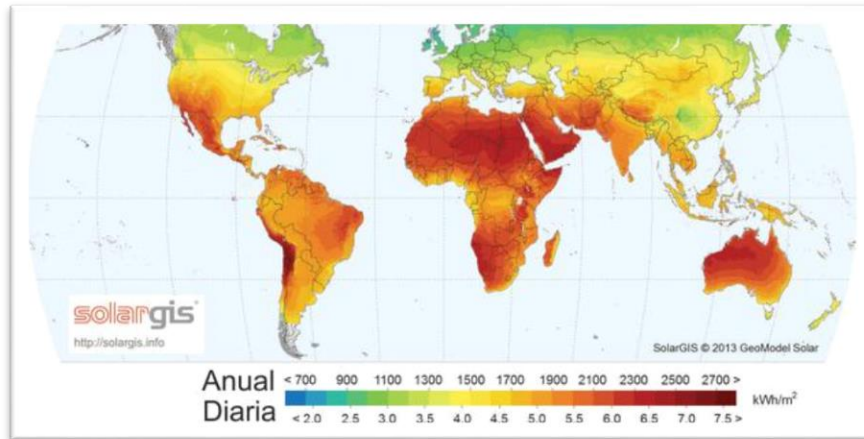
H, es la radiación global.

$H_d$ , es la radiación difusa.

$\beta$ , es el ángulo de inclinación superficial.

**1.1.7.5 Radiación solar en el mundo.** Por medio del estudio global de la energía solar se establecen zonas con mayor irradiancia promedio en el año. La energía solar es un recurso disponible en casi todo el planeta tierra, aunque se debe tener en cuenta que la irradiancia no es una constante en nuestro planeta, ya que varía a lo largo de la tierra. Esto permite tener zonas con algunas ventajas para la implementación y aprovechamiento de la radiación solar como un recurso energético alternativo. (Véase figura 23).

Figura 23. Radiación solar en el mundo



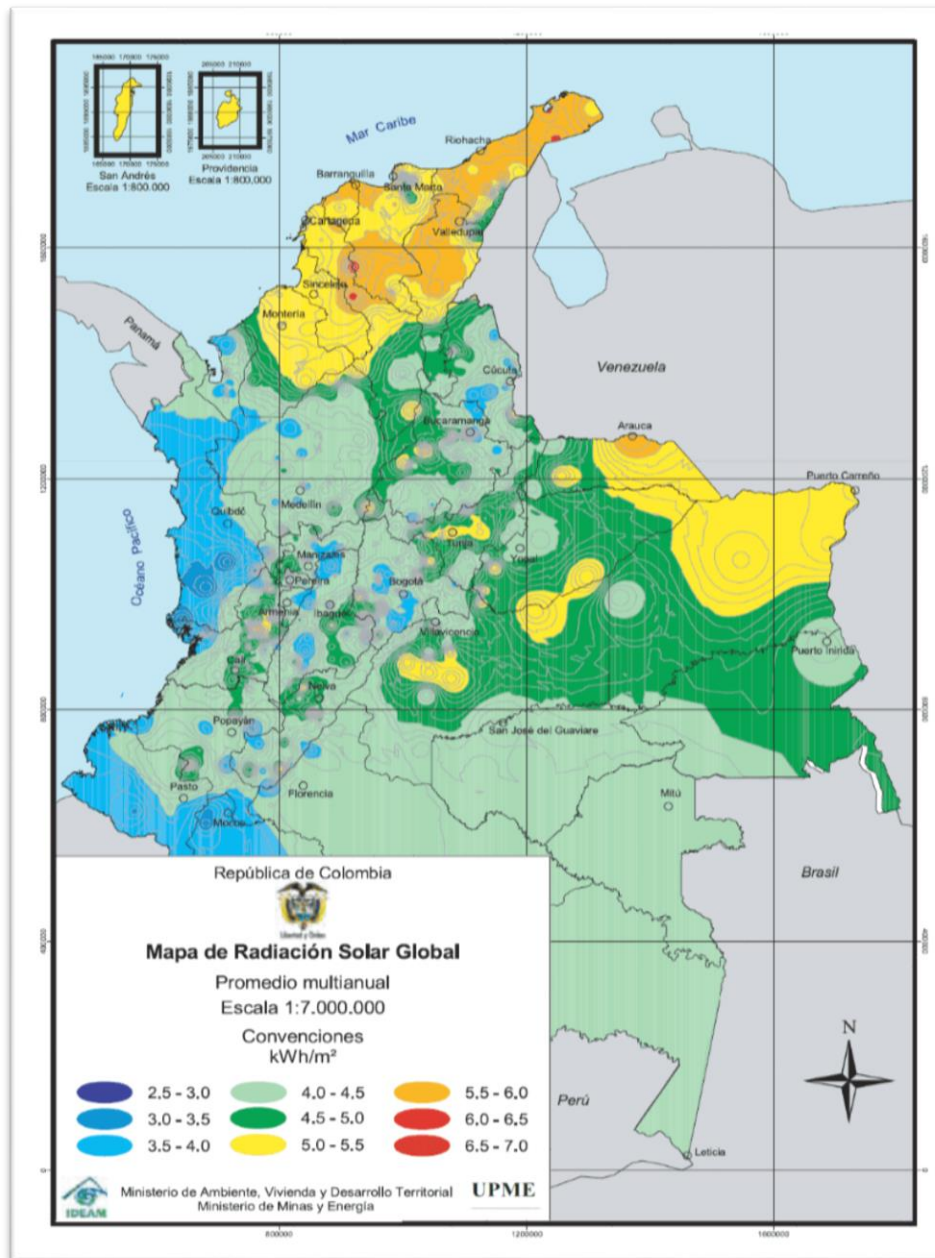
Fuente: <http://www.agenciancla.com/single-post/2016/1/11/M%C3%A1ximos-de-radiaci%C3%B3n-solar-en-Latinoam%C3%A9rica>

**1.1.7.5. Radiación solar en Colombia.** En Colombia por su posición geográfica en el planeta (cerca de la línea del ecuador), presenta cierta ventaja en su potencial solar, aunque puede verse afectado por ciertas condiciones climáticas variadas. El hecho de tener un buen potencial solar, impulsa proyectos para la obtención de energía por medios no convencionales como colectores solares y celdas fotovoltaicas lo cual nos genera un avance en investigación y tecnología.

El atlas de radiación solar en Colombia proporcionado por el IDEAM (Instituto De Hidrología, Meteorología y Estudio Ambiental y Unidad De Planeación Minero Energética) es un documento de gran ayuda en el estudio de la radiación solar en nuestro país, ya que cuenta con mapas de radiación solar, brillo solar, radiación ultravioleta y columna de ozono.

Según dichos mapas la radiación solar anual promedio se encuentra en 4.5 kWh/m<sup>2</sup>/día, destacándose la península de La Guajira con un valor promedio de 6 kWh/m<sup>2</sup>/día. (Ver figura 24).

Figura 24. Promedio radiación solar en Colombia



Fuente: INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIO AMBIENTAL Y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Escala 1:7.000.000. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005. 149 p.

## **CAPITULO 2.**

En este capítulo se hace una breve descripción de los objetivos y la justificación general del proyecto.

### **2. JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO**

#### **2.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente las energías renovables y limpias están a la vanguardia en el desarrollo tecnológico, dando una oportunidad a la eficiente implementación de estos procesos en nuestra vida cotidiana, Sabemos que nuestro consumo de energía, en este caso eléctrico, cada día crece más, ya sea por los avances en dispositivos electrónicos y por el desarrollo de la construcción (Urbanismo); así mismo se necesitan de otras fuentes de energía que no dependan sólo de combustibles fósiles, carbón o la vía que muchos países emergentes piensan, nuclear. Hay que buscar implementar fuentes energéticas para la producción de energía limpia; para este proyecto se necesita realizar un suministro de energía eléctrica a una vivienda, enfocados en no depender de las centrales eléctricas (centrales hidroeléctricas o centrales térmicas) que destruyen el medio ambiente. Por tal motivo se realizará un diseño de un sistema híbrido mediante energías alternativas para la vivienda, la cual se encuentra ubicada en una parcela en la Mesa de los Santos en Santander.

#### **2.2. JUSTIFICACIÓN PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA**

A lo largo de los años se ha generado fuentes de energía alternativa para la producción de electricidad sin depender únicamente de los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural), una de esas fuentes de energía alternativa se denomina: la energía solar fotovoltaica, que produce electricidad, obtenida directamente a partir de la radiación solar.

En este proyecto se quiere realizar una generación para una vivienda de energía solar fotovoltaica, siendo ésta considerada como una energía que tiene una fuente prácticamente inagotable (El Sol) y cuyo aprovechamiento es técnicamente viable.

Se desea realizar un estudio de viabilidad técnica y factibilidad económica del proyecto para consiguiente llevarlo a cabo, contribuyendo al cuidado del medio ambiente con fuentes energéticas limpias y en desarrollo.

### **2.3. OBJETIVOS**

**2.3.1. Objetivo general** Cumplir con la misión de la Universidad Industrial de Santander participando en la generación de procesos de cambio por el progreso, y a la vez cumplir con la misión de la Escuela de Ingeniería Mecánica promoviendo la investigación, el desarrollo, y la interrelación, por medio de un diseño de sistema híbrido mediante energías alternativas para una vivienda ubicada en una parcela en la Mesa de los Santos en Santander, aplicando los principios y enseñanzas adquiridas durante nuestra formación universitaria.

#### **2.3.2. Objetivos específicos**

1. Hacer el cálculo de la carga de energía necesaria para alimentar la vivienda.
2. Diseñar un sistema de alimentación eléctrica para la vivienda y el suministro de una moto bomba.
3. Diseñar el sistema fotovoltaico, con la selección de sus componentes
4. Seleccionar un generador que utilice gas propano como medio alternativo para la alimentación del sistema (vivienda y bomba).
5. Hacer las respectivas memorias con recopilación de cálculos, planos eléctricos, civiles, etc.

## 2.4 DESCRIPCIÓN DE LA VIVIENDA

La vivienda unifamiliar está construida en una parcela en la vereda Navarra del municipio de la Mesa de los Santos en Santander del sur. La construcción consta de un cuerpo de edificio de dos plantas, cuya superficie construida en la primera planta es de 81 m<sup>2</sup> y de una segunda planta de 64 m<sup>2</sup> en los que se incluyen la construcción auxiliar de una cocina externa. La distribución de la vivienda es la siguiente: en la primera planta se sitúan la sala comedor, cocina con barra americana, dos habitaciones y un baño. La escalera de caracol al lado del baño conduce al segundo piso, donde se hallan dos dormitorios un hall y una sala.

La vivienda estará para nuestro estudio ocupada todo el año normalmente por 4 personas y parcialmente 10 personas. La vivienda está construida con unas determinadas características que le confieren grandes posibilidades para su estudio y partimos de la idea que no se realizará, modificaciones ni reformas. (Ver figura 25).

Figura 25. Descripción de la vivienda



Fuente: Autor

Al comenzar cualquier proyecto de aprovechamiento de energía solar lo primero que hay que saber es la cantidad disponible de ésta. Según las aplicaciones, puede que nos interese más la intensidad, mientras en otros, lo sea el número de horas

sol, es decir, la regularidad de la radiación. En nuestro estudio nos interesa la observación de ambas, aunque en mayor proporción de la segunda.

## **2.4 ALTERNATIVAS EN LA APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES A LA VIVIENDA**

Las alternativas de energía renovables más viables para el diseño híbrido para la vivienda ubicada en la Mesa de los Santos es la solar, la biomasa y la eólica, pero al ser la solar una fuente de energía con más madurez nos enfocaremos en ella y principalmente en la fotovoltaica que es la que nos interesa en este proyecto.

En el 2014, la Gobernación de Santander recibió de la consultora española Global Energy & Trading los estudios de factibilidad que avalan la construcción de un parque eólico y solar en el municipio de la Mesa de los Santos, y de esta manera poder generar energía limpia, éste es un incentivo que nos permite apreciar que es posible la generación de energía renovable en este sector.<sup>14</sup>

Se realiza un estudio detallado y cálculos para las alternativas de sistemas solares fotovoltaicos. De allí se hace una elección final entre las diferentes hipótesis, la que mejor se ajuste a las necesidades. Se realiza la selección de un generador como medio alternativo para la alimentación del sistema en caso de falla de las energías alternativas.

## **2.5 RADIACIÓN SOLAR REGIÓN ANDINA CENTRO**

La región andina abarca la región santandereana, el altiplano Cundiboyacence y la zona cafetera del país. Al constituirse de dos cordilleras, un desierto, mesetas y diferentes planicies, hace que esta región posea la mayor variedad de estados meteorológicos y, a su vez, la mayor variación de niveles de luminiscencia solar en el país. Existen zonas como la sabana bogotana donde existe una alta probabilidad

---

<sup>14</sup>: CONTEXTO GANADERO: Santander, Futuro referente en energías renovables. [en línea] [Citado el 20 de Febrero de 2014] Disponible en: <http://www.contextoganadero.com/regiones/santander-futuro-referente-en-generacion-de-energia-renovable>

de precipitaciones y una baja cantidad de horas de intensidad solar y zonas como la ciudad de Tunja donde la radiación es comparable como la percibida en la región caribe, lo que la hace una de las zonas con más horas de luz solar en Colombia. A pesar de que en gran parte de este territorio se percibe una baja magnitud de irradiancia solar, la región andina es la zona con la mayor densificación de la población en el país y por lo tanto la demanda de sistemas solares independientes o conectados a la red supera la demanda de las otras cuatro regiones (Región Caribe Norte, Región pacífico Occidente, Región Amazonía Sur y Región Orinoquía central).<sup>15</sup>

## **2.6 NORMATIVIDAD DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN COLOMBIA**

Todo sistema fotovoltaico que funcione en Colombia debe cumplir con las características técnicas exigidas en el Código Eléctrico Colombiano NTC 2050, con los requerimientos de las normas técnicas colombianas publicadas por el ICONTEC y Nueva Ley 1715 de 2014 promueve el aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía.

**2.6.1 Código eléctrico colombiano NTC 2050** Las disposiciones de la sección 690 de la NTC 2050, se aplican a los sistemas fotovoltaicos de generación de energía eléctrica, incluidos los circuitos eléctricos, unidad o unidades de regulación y controladores de dichos sistemas. Los sistemas solares fotovoltaicos a los que se refiere esta sección pueden estar interconectados con otras fuentes de generación de energía eléctrica o ser autónomos y tener o no acumuladores. La salida de estos sistemas puede ser de corriente continua o de corriente alterna<sup>16</sup>. Los ítems que se tratan en esta sección son los siguientes:

---

<sup>15</sup> RESTREPO, Hernando. Globalem energizamos vidas: Energía solar Colombia. . [en línea] [Citado el 19 de Mayo de 2016] Disponible en: <http://globalem.co/energia-solar-colombia/>

<sup>16</sup> Fuente: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Código Eléctrico Colombiano. Primera Actualización. Bogotá: ICONTEC, 1998. 797p. NTC 2050.

- A. Generalidades: Artículos 690-1 a 690-5
- B. Requisitos de los Circuitos: Artículos 690-7 a 690-9
- C. Medios de Desconexión: Art. 690-13 a 690-18
- D. Métodos de Alambrado: Art. 690-31 a 690-34
- E. Puesta a Tierra: Art. 690-41 a 690-47
- F. Rotulado: Art. 690-51 a 690-52
- G. Conexión a Otras Fuentes de Energía: Art. 690-61 a 690-64
- H. Baterías de Acumuladores: Art. 690-71 a 690-74

**2.6.2 Normatividad de sistemas solares fotovoltaicos.** Se presenta un resumen de la normatividad vigente en Colombia para sistemas de energía solar, según las normas técnicas colombianas publicadas por el ICONTEC. Haciendo énfasis en los sistemas fotovoltaicos.<sup>17</sup>

**2.6.2.1 NTC 2883. Módulos fotovoltaicos de silicio cristalino para aplicación terrestre. Calificación del diseño y aprobación de tipo.** Hace referencia a los requisitos establecidos para la calificación del diseño y la aprobación del tipo de módulos fotovoltaicos para aplicación terrestre y para la operación en largos periodos de tiempo en climas moderados (al aire libre), según lo define la norma IEC 60721-2-1. Y su uso principal es en módulos fotovoltaicos que utilicen tecnologías en silicio cristalino.

**2.6.2.2 NTC 5464. Módulos fotovoltaicos de lámina delgada para uso terrestre. Calificación del diseño y homologación.** Indica los requisitos, según la norma IEC 721-2-1, para la clasificación del diseño de los sistemas de módulos fotovoltaicos de lámina delgada, que son diseñados principalmente para operar en largos periodos de tiempo y en climas moderados (al aire libre). La tecnología en la cual se basa es la de silicio

---

<sup>17</sup> Fuente: UNIDAD DE INTELIGENCIA ESTRATÉGICA TECNOLÓGICA UIET. Normatividad sobre Energía Solar Térmica y Fotovoltaica. Medellín. ICONTEC, 2012. 17p.

amorfo pero también puede ser aplicable a otros módulos fotovoltaicos de lámina delgada.

**2.6.2.3 NTC 5549. Sistemas fotovoltaicos terrestres. Generadores de potencia. Generalidades y guía.** Esta norma brinda una visión general de los sistemas fotovoltaicos (fv) terrestres generadores de potencia y de los elementos funcionales que los constituye.

**2.6.2.4 NTC 5287. Celdas y baterías secundarias para sistemas de energía solar fotovoltaica. Requisitos generales y métodos de ensayo.** Esta norma 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. No se incluye información acerca del tamaño de las baterías, el método de carga o al diseño en sí de los sistemas solares fotovoltaicos.

**2.6.2.5 NTC 5433. Informaciones de las hojas de datos y de las placas de características para los módulos fotovoltaicos.** La norma contiene información acerca de la configuración de sistemas con módulos fotovoltaicos para garantizar que estén constituidos de una manera óptima y segura.

Para esto se requiere información de los materiales por los que está constituido el modulo fotovoltaico, como es el funcionamiento eléctrico, características térmicas, clasificación de potencia y tolerancias de producción y algunos valores característicos para la integración de sistemas (tensión de circuito abierto y corriente inversa).

**2.6.2.6 NTC 5627. Componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Calificación del diseño y ensayos ambientales.** La actual norma establece algunos requisitos para la clasificación del diseño, de los componentes de acumulación, conversión y gestión de energía de sistemas fotovoltaicos. Se centra principalmente en

componentes solares específicos tales como baterías, inversores(onduladores), controladores de carga, conjuntos de diodos, radiadores, limitadores de tensión, cajas de conexiones y dispositivos de rastreo del punto de máxima potencia, pero puede aplicarse a otros componentes complementarios del sistema.

**2.6.3 Nueva ley 1715 de 2104. Regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional.** La presente ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico, su participación en las zonas no interconectadas y en otros usos energéticos como medio necesario para el desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético.<sup>18</sup>

La finalidad de la presente ley es establecer el marco legal y los instrumentos para la promoción del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, lo mismo que para el fomento de la inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta de la demanda, en el marco de la política energética nacional. Igualmente, tiene por objeto establecer líneas de acción para el cumplimiento de compromisos asumidos por Colombia en materia de energías renovables, gestión eficiente de la energía y reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, tales como aquellos adquiridos a través de la aprobación del estatuto de la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA) mediante la ley 1665 de 2013.

---

<sup>18</sup> Fuente: GOBIERNO NACIONAL. Nueva ley 1715 de 2014 Regula la integración de las energías renovables no convencionales al Sistema Energético Nacional. Colombia. Congreso de Colombia. 25p.

Sin embargo, la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) se encuentra en el proceso de reglamentar los términos para pequeños generadores de energía.

#### **2.6.3.1 Algunos conceptos, para efectos de interpretar y aplicar la presente ley:**

**Autogeneración.** Aquella actividad realizada por personas naturales o jurídicas que producen energía eléctrica principalmente, para atender sus propias necesidades. En el evento en que se generen excedentes de energía eléctrica a partir de tal actividad, estos podrán entregarse a la red, en los términos que establezca la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) para tal fin.

**Autogeneración a gran escala.** Autogeneración cuya potencia máxima supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero- Energética (UPME).

**Autogeneración a pequeña escala.** Autogeneración cuya potencia máxima no supera el límite establecido por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).

**Cogeneración.** Producción combinada de energía eléctrica y energía térmica que hace parte integrante de una actividad productiva.

**Contador Bidireccional.** Contador que acumula la diferencia entre los pulsos recibidos por sus entradas de cuenta ascendente y cuenta descendente.

**Promoción de la autogeneración a pequeña y gran escala y la generación distribuida.** El Gobierno Nacional promoverá la autogeneración a pequeña y gran escala y la generación distribuida por medio de los siguientes mecanismos:

Entrega de excedentes. Se autoriza a los autogeneradores a pequeña y gran escala a entregar sus excedentes a la red de distribución y/o transporte. Lo anterior aplicará una vez la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG expida la regulación correspondiente. Para el caso de los autogeneradores a pequeña escala que utilicen FNCER (Fuentes No Convencionales de Energía Renovable), los excedentes que entreguen a la red de distribución se reconocerán, mediante un esquema de medición bidireccional, como créditos de energía, según las normas que la CREG defina para tal fin.

## CAPITULO 3

En este capítulo se hace una descripción de la energía fotovoltaica además de la aplicación en sistemas fotovoltaicos.

### 3. ENERGÍA FOTOVOLTAICA

Los conceptos básicos para el conocimiento y la óptima aplicación de la energía fotovoltaica son los siguientes:

- Energía solar fotovoltaica
- Elementos de un sistema fotovoltaico
- Ventajas y desventajas un sistema fotovoltaico
- Alternativas a analizar en los sistemas fotovoltaicos
- Aplicaciones de la energía solar fotovoltaica a sistemas de bombeo de agua

#### 3.1 ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA

**3.1.1 Definición** Se define como efecto fotoeléctrico a la generación de una corriente en ciertos materiales cuando estos se ven iluminados por radiación electromagnética, sin que sea necesario que aparezca ningún efecto mecánico o físico<sup>19</sup> (Ver figura 26).

Heinrich Hertz descubre y describe experimentalmente la fotoelectricidad en 1887, a pesar de ello el efecto fotoeléctrico o fotovoltaico es explicado por Albert Einstein en 1905, basando su formulación de la fotoelectricidad en una extensión del trabajo sobre los cuantos de Max Planck.

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

Energía de un fotón absorbido = Energía necesaria para liberar 1 electrón + energía cinética del electrón emitido.

---

<sup>19</sup> FERNÁNDEZ SALGADO, José. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica, termoeléctrica. España: Editorial AMV Ediciones, 2010. 542p.

$$hf = hf_0 + \frac{1}{2}mv_m^2 \quad \text{Ecuación (19)}$$

Que puede también escribirse como

$$hf = \phi + E_k \quad \text{Ecuación (20)}.$$

Donde:

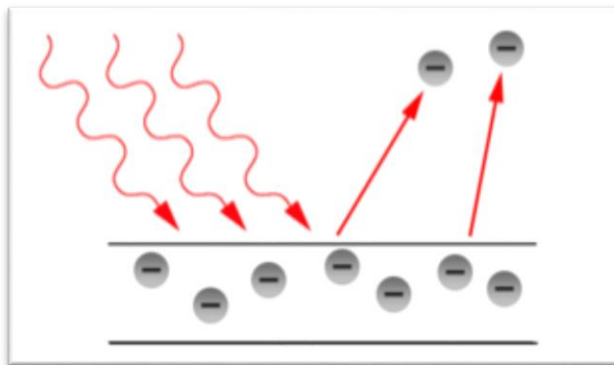
$h$ , es la constante de Planck.

$f_0$ , es la frecuencia de corte o frecuencia mínima de los fotones para que tenga lugar el efecto fotoeléctrico.

$\phi$ , es la función de trabajo, o mínima energía necesaria para llevar un electrón del nivel de Fermi al exterior del material.

$E_k$ , es la máxima energía cinética de los electrones que se observa experimentalmente.

Figura 26. Efecto fotoeléctrico



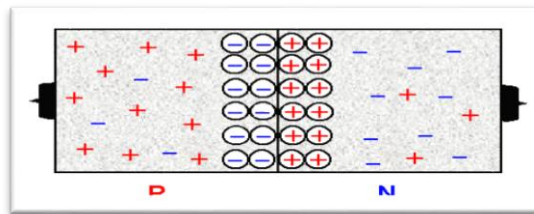
Fuente: FERNÁNDEZ SALGADO, José. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica, termoeléctrica. España: Editorial AMV Ediciones, 2010. 542p.

Un factor crucial para que pueda generarse el efecto fotovoltaico es que las celdas de los paneles solares estén compuestas por materiales llamados semiconductores que ofrecen la propiedad de desprenderse de sus electrones, cuando se aumenta la energía que incide sobre ellos.

Además, estos materiales semiconductores son tratados de forma que se crean dos capas dopadas, una tipo P, es decir un material con exceso de huecos o ausencia

de electrones, y una tipo N, es decir con exceso de electrones, con el objetivo que cuando la luz solar incida sobre la celda, se crea una pareja electrón hueco; el efecto de la creación de esta pareja será el flujo de electrones y huecos entre el material tipo PN para formar un campo eléctrico permanente. Como podemos ver en la figura 27.

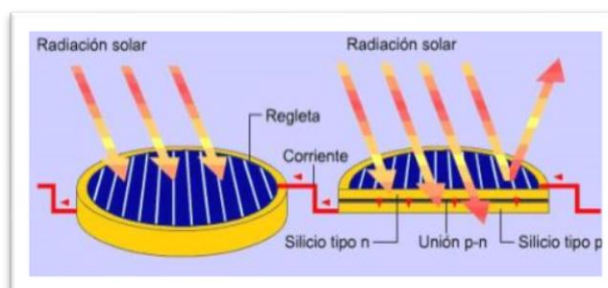
Figura 27. Representación del potencial eléctrico



Fuente: Modificada por autor.

**3.1.2 Celdas fotovoltaicas.** La tecnología fotovoltaica se basa principalmente en el uso de alguna variación del silicio. Una celda fotovoltaica de silicio está compuesta de dos discos tipo P y tipo N, el disco superior es más delgado que el inferior (tan delgado que es casi translucido), el disco superior tiene unos contactos metálicos en forma de rejilla (muy delgadas con el fin de que dejen pasar la luz) que se encargan de recoger la corriente eléctrica, el disco inferior también se encuentra situado sobre un contacto metálico, estos contactos son los encargados de llevar y traer la corriente eléctrica a una carga o a un acumulador cuando incide radiación solar sobre la celda. (Ver figura 28).


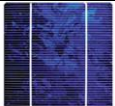

Figura 28. Funcionamiento de las celdas



Fuente: Modificada por autor.

En la tabla 1 se establece las principales características y los métodos de fabricación de cada una de las celdas.

Tabla 1. Diferencias entre celdas fotovoltaicas

CELIDAS	CARACTERÍSTICAS	FABRICACIÓN
 <p>Monocrystalino</p>	Las celdas solares de silicio monocristalino (mono-Si), son fáciles de reconocer por su coloración y aspecto uniforme, que indica una alta pureza en silicio.	Se fabrican a partir de secciones cortadas o extraídas de una barra de silicio perfectamente cristalizado de una sola pieza.
 <p>Policristalino</p>	Su color no es uniforme, ya que presenta diferentes tonos de azules, se ha estructurado desordenadamente en forma de pequeños cristales.	En su fabricación el silicio en bruto se funde y se vierte en un molde cuadrado, a continuación se enfría y se corta en láminas perfectamente cuadradas
 <p>Capa fina</p>	Tienen un color homogéneo (marrón), pero no existe conexión visible entre las celdas.	El silicio amorfo se puede depositar como una capa fina en diversos tipos de soportes, fabricando así módulos fotovoltaicos

Fuente: Autor.

En la tabla 2 se establece la eficiencia, ventajas y desventajas de las diferentes tecnologías de módulos fotovoltaicos.

Tabla 2. Diferencias entre tecnologías de silicio en los módulos fotovoltaicos.

TIPO DE CELDA	EFICIENCIA (%)		VENTAJAS	DESVENTAJAS
	Laboratorio	Producción		
Silicio Monocrystalino (Ver figura 29)	19.1%	12 a 16%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tecnología bien desarrollada y probada.</li> <li>Mayor eficiencia.</li> <li>Se fabrican celdas cuadradas</li> <li>Mayor vida útil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emplea material muy costoso.</li> <li>Demasiado desperdicio (casi la mitad)</li> <li>Manufactura costosa</li> <li>Reducción de la eficiencia a altas temperaturas.</li> </ul>
Silicio Policristalino (Ver figura 29)	18%	11 a 14%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tecnología bien desarrollada y probada.</li> <li>Buena eficiencia</li> <li>Buena vida útil.</li> <li>Menos costoso que el monocristalino.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Material costoso</li> <li>demasiado desperdicio (casi la mitad)</li> <li>Manufactura costosa</li> <li>Menor eficiencia que el policristalino.</li> </ul>
Silicio Amorfo, Película delgada o capa fina (Ver figura 29)	11.5%	4 a 8%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliza poco material</li> <li>rápida producción.</li> <li>Costo bajo, 50% del silicio cristalino.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Degradación pronunciada.</li> <li>Menor eficiencia.</li> <li>Menor durabilidad.</li> </ul>

Fuente: Modificada por autor.

Figura 29. Tipos de módulos fotovoltaicos



Módulo de celda monocristalina



Módulo de celda policristalina



Módulo de celda de capa fina

Fuente: Modificada por autor.

### 3.1.2.1 Características de los módulos o paneles fotovoltaicos

Entre las principales características de los módulos o paneles fotovoltaicos está:

**La eficiencia del módulo fotovoltaica**, Es la relación entre la energía eléctrica generada y la energía incidente, cuando dicha celda forma un circuito eléctrico. Esta proporción se calcula:

$$\mu(\%) = \frac{P_m}{G \cdot A} * 100 \quad \text{Ecuación (21).}$$

Donde:

$P_m$ , es la potencia máxima en [W].

G, es la irradiancia en [W/m<sup>2</sup>]

A, es el área en [m<sup>2</sup>].

En la actualidad las celdas fotovoltaicas producidas en escala industrial tienen una eficiencia que oscila entre 11 y 16%<sup>20</sup>.

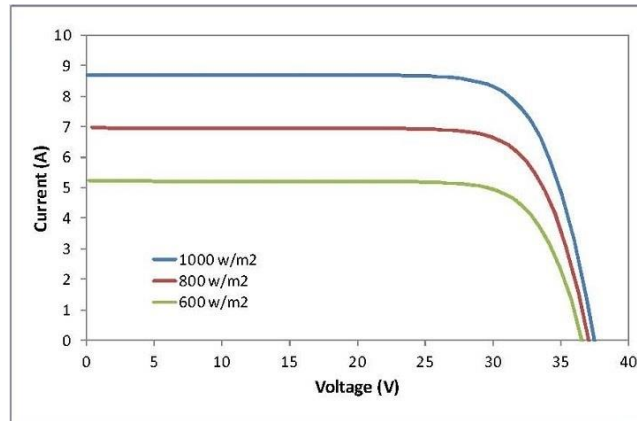
#### Características eléctricas

En la figura 30a se muestra la relación existente entre la corriente y el voltaje de salida para un panel fotovoltaico para condiciones de temperatura constante. En la 30b se muestra la relación entre corriente y voltaje de salida de un panel fotovoltaico con variación de temperatura manteniendo la irradiancia constante. En la figura 31 se representa esquemáticamente en línea continua la curva intensidad-tensión (*I-V*) de un módulo fotovoltaico cualquiera, mientras que en línea discontinua se

<sup>20</sup> VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p.

representa la potencia entregada por el módulo, para dos situaciones de trabajo (A y B) distintas.

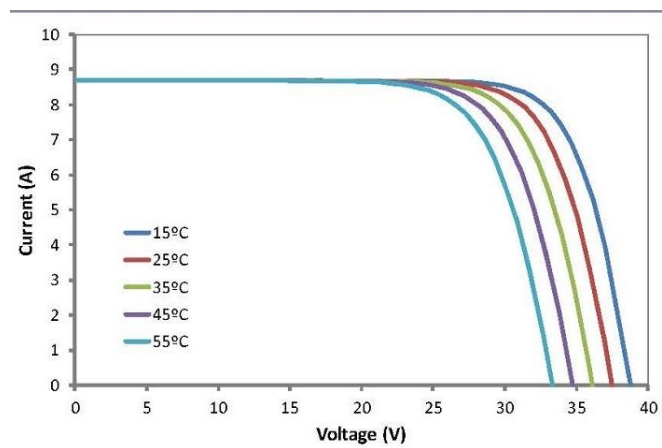
Figura 30a. Curvas I-V para distintos valores de irradiancia solar. Temperatura constante de la celda (25° C)



Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>

En la figura 30a, se puede observar que la intensidad de corriente que genera el panel aumenta con la radiación, permaneciendo el voltaje aproximadamente constante.

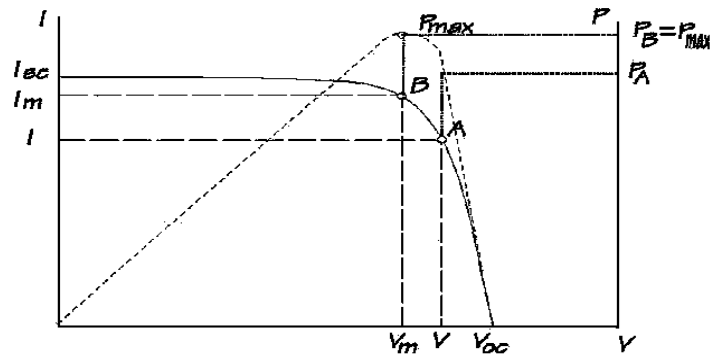
Figura 30b. Curvas I-V para distintos valores de temperatura de la celda. Valor de irradiancia solar constante de la celda (1000 [W/m²])



Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>

En la gráfica anterior se puede observar que la tensión que genera el panel disminuye cuando aumenta la temperatura, permaneciendo la corriente aproximadamente constante.

Figura 31. Curva I-V y de potencia



Fuente: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>

De la anterior figura se observa que se debe hacer trabajar al módulo fotovoltaico en el rango de la tensión de máxima potencia, para así obtener su mejor rendimiento, donde<sup>21</sup>:

$$P_{Mp} = V_{MP} * I_{MP} \quad \text{Ecuación (22)}$$

Potencia nominal o máxima (Pmáx): es también conocida como potencia pico del panel. Es el valor máximo de potencia que se puede obtener del panel, y se obtiene del producto entre la tensión y la corriente de salida del panel.

Tensión de potencia máxima (Vmp): valor de la tensión cuando el panel está suministrando la máxima intensidad de corriente.

Intensidad de corriente máxima (Imp): es el valor de la corriente en el punto de máxima potencia o potencia pico.

<sup>21</sup> PERALES BENITO, Tomás. Guía del instalador de energías renovables. Energía fotovoltaica, energía térmica, energía eólica y climatización. España: Editorial copyright, 2005. 254p.

Intensidad de cortocircuito ( $I_{sc}$ ): es la máxima intensidad que se puede obtener del módulo fotovoltaico (tensión de salida 0 V).

Tensión en circuito abierto ( $V_{oc}$ ): es el valor máximo de voltaje que se mediría en el panel o módulo sin carga.

Coeficiente de temperatura de  $I_{sc}$ : indica, en porcentaje, la alteración de este parámetro con la temperatura. Por ejemplo: 0.005% / °C.

Coeficiente de temperatura de  $V_{oc}$ : indica, en mV / °C, la alteración de la tensión en circuito abierto con la temperatura. Por ejemplo: 70 mV / °C.

Coeficiente de la temperatura de la potencia o factor de degradación: indica el signo y valor de la alteración de la potencia con la temperatura. Por ejemplo: -0.45% / °C.

Los módulos fotovoltaicos se fabrican disponiendo primero las celdas necesarias en serie hasta que se alcance la tensión que se desee a la salida del panel, y a continuación, estos ramales de celdas se asocian en paralelo hasta alcanzar el nivel de corriente deseado.

$$V_{CA \text{ Módulo}} = V_{CA \text{ celda}} * N_{\text{celdas serie}} \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$I_{cc \text{ Módulo}} = I_{cc \text{ celda}} * N_{\text{celdas paralelo}} \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$P_{\text{máx}} = P_{\text{máx celda}} * N_{\text{celdas serie}} * N_{\text{celdas paralelo}} \quad \text{Ecuación (25)}$$

En resumen, en función de la radiación solar, la temperatura de las celdas del módulo (que dependerá a su vez de la temperatura ambiente, humedad, velocidad del viento, material de fabricación del módulo, etc.) y de la carga eléctrica que alimente, el módulo fotovoltaico generará una determinada intensidad de corriente (I) a una determinada tensión (V), y cuyo producto marcará la potencia eléctrica (P) generada por el módulo.

**Temperatura de trabajo del panel**, La temperatura de trabajo que alcanza un panel fotovoltaico obedece una relación dada por la expresión:

$$T_t = T_a + k * R \quad \text{Ecuación (26).}$$

Donde:

$T_t$ , es la temperatura de trabajo del panel

$T_a$ , es la temperatura ambiente

$R$ , es la radiación solar en  $[W/m^2]$

$k$ , es un coeficiente que varía entre 0,02 y 0.04  $[^{\circ}C.m^2/W]$ , dependiendo de la velocidad promedio del viento.

El efecto global es que la potencia del panel disminuye al aumentar la temperatura del trabajo del panel.

**Determinación de la potencia de salida a la temperatura de trabajo**, Una vez conocido el valor de temperatura de trabajo del panel, puede determinarse el valor de la potencia de salida con la siguiente ecuación:

$$P_t = P_p - (P_p * \delta * \Delta T) \quad \text{Ecuación (27)}$$

Donde:

$P_t$ , es la potencia de la salida a la temperatura de trabajo ( $T_t$ )

$P_p$ , es la potencia pico del panel a  $25^{\circ}$ .

$\delta$ , factor de degradación (se tiene en cuenta si  $T > 25^{\circ}$ )

$\Delta T$ , es el incremento de temperatura por sobre los  $25^{\circ}C$ , es decir,  $\Delta T = T_t - 25^{\circ}C$ .

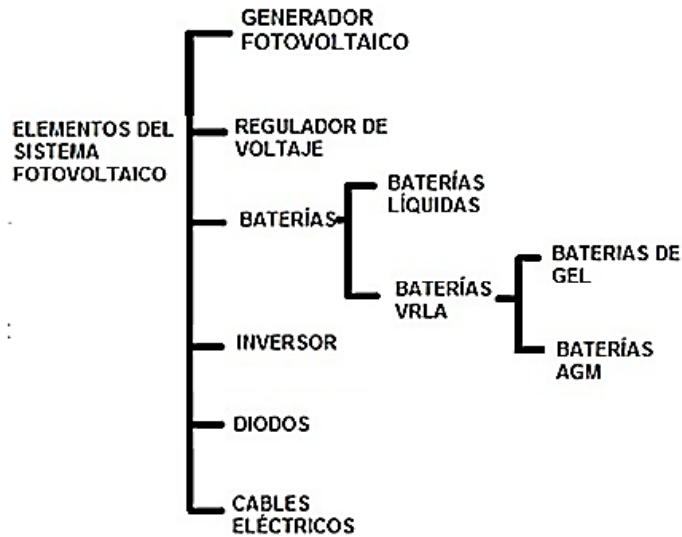
### 3.2 ELEMENTOS DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO

Los principales elementos de un sistema fotovoltaico como se muestra en la figura 32, son:

- Generador Fotovoltaico (Paneles o módulos solares)
- Regulador o controlador de carga
- Acumuladores o baterías
- Inversor o convertidor

- Diodos
- Cables

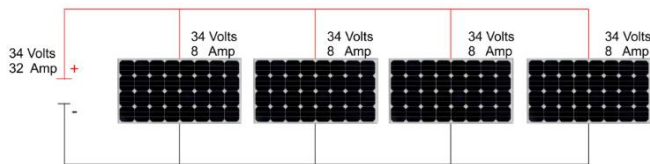
Figura 32. Elementos de un sistema fotovoltaico



Fuente: Modificada por autor

**3.2.1 Generador fotovoltaico**, son los encargados de captar la radiación solar y transformarla en electricidad, generando una corriente continua (CC). El sistema completo formado por el conjunto de módulos o paneles fotovoltaicos se le denomina generador fotovoltaico. Estos a su vez se asocian en serie o en paralelo, con el fin de poder ofrecer la potencia eléctrica deseada, y la tensión e intensidad de corriente a la salida del generador<sup>22</sup>. (Ver figura 33a, 33b)

Figura 33a. Conexión paralelo



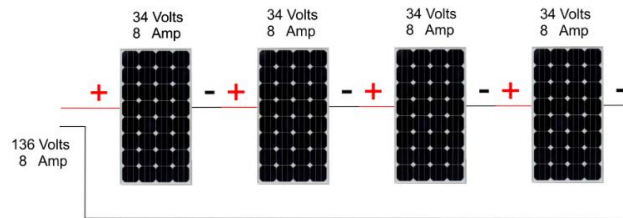
Fuente: SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México: Editorial limusa, 2012. 313p.

<sup>22</sup> ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Energías renovables. El ABC de las energías renovables. México: Editorial limusa, 2014. 321p.

La intensidad de corriente se suma cuando los módulos están en paralelo, como lo indica la siguiente ecuación:

$$I_T = \sum_{i=1}^{N.Módulos} I_i \text{ Ecuación (28)}$$

Figura 33a. Conexión serie



Fuente: SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México: Editorial limusa, 2012. 313p.

La caída de potencial se suma cuando los módulos están en serie, como lo indica la siguiente ecuación:

$$V_T = \sum_{i=1}^{Npaneles} V_i \text{ Ecuación (29)}$$

**3.2.2 Regulador o controlador de carga**, Encargado de controlar la carga de las baterías desde los módulos o paneles generadores, así como de su descarga hacia el circuito de alimentación interior de la vivienda, evitando además que se produzcan cargas o descargas excesivas del conjunto de baterías.

Existen 2 tipos de reguladores, en serie, que se utilizan para corrientes mayores a 20 amperios, y los reguladores en paralelo utilizados para corrientes menores a 20 amperios.

La corriente máxima prevista por la línea de entrada al regulador desde los generadores fotovoltaicos es la correspondiente a la corriente de cortocircuito ( $I_{SC}$ ) del generador fotovoltaico más un margen de seguridad (generalmente un 25%), para tener en cuenta los posibles picos de irradiancia o los cambios de temperatura.

Por otro lado, la corriente máxima prevista por la línea de salida viene dada por el consumo de las cargas del sistema (aparatos eléctricos, electrodomésticos, etc.) también incrementada en un 25% ( $I_{salida}$ ). La elección del regulador será aquel que soporte la mayor de las dos anteriores corrientes eléctricas<sup>23</sup>. ( Ver figura 34).

Figura 34. Regulador de carga



Fuente: Fuente: ORBEGOZO, Carlos; ARIVILCA, Roberto. Energía Solar Fotovoltaica Manual técnico para instalaciones domiciliarias. Costa Rica: Editorial Copyrigh, 2002. 43p

**3.2.3 Acumuladores o baterías,** Las baterías para aplicaciones fotovoltaicas son de ciclo profundo lo cual significa que pueden descargar una cantidad significativa de energía antes de requieran recargarse y así suministrar durante muchas horas corrientes eléctricas moderadas. Además el uso de baterías permite poder inyectar una intensidad de corriente superior a la que los propios paneles solares puedan entregar, si la instalación interior de la vivienda lo requiere.

**3.2.3.1 Factores importantes para tener en cuenta en la selección de las baterías:** Las principales especificaciones eléctricas de una batería son:

- Tensión nominal
- Capacidad de almacenamiento
- Profundidad de descarga.
- Tipos de baterías

**Tensión nominal,** la tensión nominal viene dado por el número de celdas que posee, siendo el voltaje de cada celda de 2V. Las celdas se conectan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios.<sup>24</sup>

<sup>23</sup> VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p.

<sup>24</sup> SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México: Editorial limusa, 2012. 313p.

**Capacidad de almacenamiento.** Se define como la cantidad de electricidad que se obtiene durante una descarga completa de la batería. Se expresa en [Ah]. La capacidad de almacenamiento de una batería depende de la velocidad de descarga, por ejemplo teóricamente una batería de 200 A puede suministrar 200 A durante una hora, o 50 A durante 4 horas, etc. En general si la batería se descarga un nivel más lento su capacidad aumentara ligeramente, por el contrario si el ritmo es más rápido la capacidad se reduce.

$$\text{Capacidad}(A * h) = \text{Consumo} * \text{tiempo de descarga} \quad \text{Ecuación (30)}$$

No se debe cargar baterías a una corriente mayor de un décimo de su capacidad estimada. Por lo tanto, una batería de 200Ah no deberá ser cargada a una corriente de más de 20 amperios.

**Profundidad de descarga.** Se denomina profundidad de descarga al porcentaje de la capacidad total de la batería que es utilizada durante un ciclo de carga o descarga. En función de la profundidad de descarga las baterías se clasifican en: baterías de descarga superficial, entre 10 - 15% de descarga media, puede llegar hasta el 40-50% y baterías de descarga profunda, entre el 20-25% de descarga media, pudiendo llegar hasta el 80%.<sup>25</sup>

La energía extraída para una batería de 12 voltios, 100 A \* h y profundidad de descarga de 70% es:

$$E_{\text{extraida}} = (70 A * h) * (12 V) = 840 W * h = 0,84 kWh \quad \text{Ecuación (31)}$$

---

<sup>25</sup> PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

## **Tipos de Baterías de Plomo para Aplicaciones Solares.**

En sistemas solares las baterías tienen que dar la energía sobre un tiempo considerablemente más largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos. Se usan en la mayoría dos diferentes tipos de baterías de plomo:

- Baterías líquidas
- Baterías VRLA

**Baterías Líquidas:** Sus ventajas aparte de los precios es que son menos problemáticas si se sobrecargan. Las desventajas son el peligro de perder el muy agresivo ácido, un control del nivel del agua es necesario (en las de 'libre mantenimiento' no se pueden sustituir el agua), y su corta vida típica de aproximadamente 400 ciclos de carga y descarga. Una ventilación es muy importante para estos tipos de batería y temperaturas bajo cero pueden destruirlas rápidamente. (Ver Figura 35).

**Baterías tipo VRLA.** Las Batería de ácido-plomo regulada por válvula es un tipo de batería sellada, libre de mantenimiento, con una o varias válvulas en la parte superior que abren cuando se libera presión interna y permiten liberar el exceso de presión dentro de la batería, posteriormente las válvulas se restablecen. Hay dos tipos principales: las AGM y las de Gel.

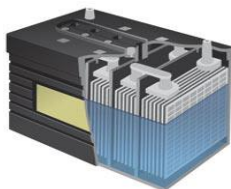
**Baterías tipo AGM.** (Ver Figura 35). AGM significa: Malla de Fibra de Vidrio Absorbente, en estas baterías el ácido está fijado en fibras de vidrio. Sus ventajas adicionalmente a las de las baterías de gel son una alta resistencia en climas fríos, su auto descarga sobre el tiempo es mínimo y tiene la eficiencia más alta de todas las baterías de plomo. Tienen una baja resistencia interna que permiten corrientes altas. Desventaja, aparte del precio más elevado, es su vulnerabilidad más alta a descargas profundas.

**Baterías de Gel.** (Ver Figura 35). Es un tipo de batería que está sellada usando válvulas de presión y que nunca debe estar abierta. En las baterías de gel las

placas de plomo están sumergidas en electrolito que ha sido gelificado. Esto presenta en si varios beneficios entre los cuales podemos señalar los siguientes:

- Las baterías de gel son completamente libres de mantenimiento.
- Al ser gelificado el electrolito se reduce a porcentajes mínimos la evaporación.
- Son baterías selladas.
- Puede existir la posibilidad de variar la posición de la batería según la necesidad pues al ser selladas y estar gelificado el electrolito se limita por completo el derrame de ácido algo común en las baterías convencionales.
- Las baterías de gel soportan mayor número de cargas y descargas, algo que en las baterías convencionales es sinónimo de deterioro prematuro cuando están expuestas a estas condiciones.

Figura 35. Tipos de baterías



Baterías líquidas



Baterías AGM



Baterías de Gel

Fuente: Modificada por el autor.

**3.2.4 Inversor o convertidor DC/AC.** (Ver Figura 36). El convertidor de corriente DC/AC, también llamado inversor u ondulator, es un dispositivo electrónico de potencia encargado de convertir la corriente continua (DC) proveniente de los generadores fotovoltaicos en corriente alterna (AC) para su consumo en la vivienda. Además sincroniza la frecuencia de la corriente inyectada con la de la red, adaptándola a las condiciones requeridas según el tipo de carga, garantizando así la calidad de la energía vertida en la instalación eléctrica de la vivienda.

Los inversores vienen caracterizados principalmente por la tensión de entrada desde las baterías, la potencia máxima que puede proporcionar y su eficiencia o rendimiento de potencia. Este último se define como la relación entre la potencia eléctrica que el inversor entrega para su uso (potencia de salida) y la potencia eléctrica que extrae del sistema de baterías o de los generadores fotovoltaicos (potencia de entrada).

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100[\%] \quad \text{Ecuación (32)}$$

El valor del rendimiento está comprendido entre el 85 y 95%<sup>26</sup>.

Se calcula la suma algebraica de todas las potencias de salida, para así conocer la potencia del inversor, representado en la siguiente ecuación:

$$P_{inversor} \geq \sum P_{equipo} * Cantidad [W] \quad \text{Ecuación (33)}.$$

Figura 36. Inversor o convertidor DC/AC



Fuente: <http://solarmat.es/es/Inversor-solar/Inversor-hibrido-MPPT/>

**3.2.5 Diodos** Los diodos son componentes electrónicos que permiten el flujo de corriente en una única dirección. En los sistemas fotovoltaicos generalmente se utilizan dos: diodos de bloqueo y diodos de bypass.

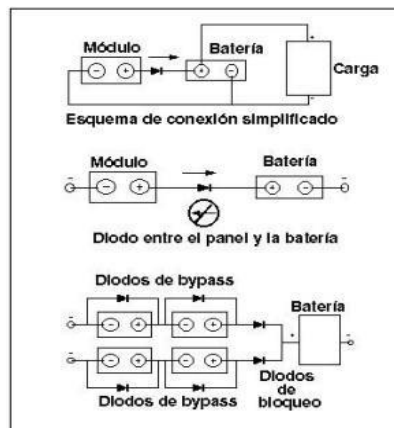
<sup>26</sup> PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

Los diodos de bloqueo impiden que la batería se descargue a través de los módulos fotovoltaicos en ausencia de luz solar, o sea que evita que la corriente retorne, se deben colocar un diodo por cada conexión de paneles en paralelo como se puede ver en la figura 37. Estos deben soportar dos veces la corriente de corto circuito y el voltaje de circuito abierto.

Los diodos de bypass protegen las celdas que están sombreadas, evitando que actúen como receptores, normalmente deben ser utilizados en los módulos conectados en serie, colocándose en paralelo a los mismos como se puede ver en la figura 37. Estos diodos deben soportar una corriente igual al doble de la corriente de corto circuito de la rama<sup>27</sup>.

Los diodos para aplicaciones de bloqueo y paso es para conseguir una mejor eficiencia y una mayor protección de los elementos de los módulos solares.

Figura 37. Esquema conexión de diodos



Fuente: Fuente: ORBEGOZO, Carlos; ARIVILCA, Roberto. Energía Solar Fotovoltaica Manual técnico para instalaciones domiciliarias. Costa Rica: Editorial Copyrigh, 2002. 43p.

**3.2.6 Cables eléctricos** Son materiales conductores, en forma de hilos, a través de los cuales se desplaza con facilidad la corriente eléctrica, por tener un coeficiente de resistividad muy bajo. (Ver figura 38).

<sup>27</sup> SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México: Editorial limusa, 2012. 313p.

La resistencia eléctrica de un material está dada por<sup>28</sup>:

$$r = \frac{\rho * L}{A} \text{ Ecuación (34)}$$

Donde:

$r$ , representa el valor de la resistencia lineal [W.m]

$L$ , es la longitud del cable [m]

$A$ , es el área de la sección transversal del cable [m<sup>2</sup>].

Figura 38. Resistividad de diferentes materiales

Material	Resistividad 20°C O.cm
Plata	$1.645 \times 10^{-6}$
Cobre	$1.723 \times 10^{-6}$
Oro	$2.443 \times 10^{-6}$
Aluminio	$2.825 \times 10^{-6}$
Tungsteno	$5.485 \times 10^{-6}$
Níquel	$7.811 \times 10^{-6}$
Acero	$12.299 \times 10^{-6}$
Tantalio	$15.54 \times 10^{-6}$
Nicromo	$99.72 \times 10^{-6}$
Oxido de estaño	$250 \times 10^{-6}$
Carbono	$3500 \times 10^{-6}$

Fuente: LOPEZ, José Alejandro y PRIETO, Cesar Augusto. Diseño y ejecución de instalaciones eléctricas tipo residencial en un plan de vivienda de interés social. Universidad Distrital Francisco José de Caldas 2004.

Los conductores empleados normalmente son de cobre o aluminio debido a su bajo costo; aunque el material mejor conductor es la plata, no es empleado como conductor eléctrico debido a que esto representaría un elevado valor comercial.

<sup>28</sup> FERNÁNDEZ SALGADO, José. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica, termoeléctrica. España: Editorial AMV Ediciones, 2010. 542p.

### 3.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS

En la tabla 3 se hace una comparación entre las ventajas y las desventajas de la energía solar.

Tabla 3. Ventajas y desventajas de la Energía Solar.

Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Procede de una fuente de energía renovable, sus recursos son ilimitados.</li> <li>• No produce emisiones de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Los costos de operación son muy bajos y el mantenimiento es sencillo y de bajo costo.</li> <li>• Los módulos tienen un periodo de vida de hasta 20 años.</li> <li>• No sólo se puede integrar en las estructuras de construcciones nuevas, sino también en las ya existentes.</li> <li>• Se pueden hacer módulos de todos los tamaños.</li> <li>• El costo disminuye a medida que la tecnología va avanzando.</li> <li>• Es un sistema de aprovechamiento de energía idóneo para zonas donde no llega la electricidad.</li> <li>• Los paneles fotovoltaicos son limpios y silenciosos, de manera que pueden instalarse en casi cualquier parte sin provocar ninguna molestia.</li> <li>• Resistente a condiciones climáticas extremas: granizo, viento, etc.</li> <li>• Se puede aumentar en cualquier momento la capacidad instalada y la autonomía de la instalación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los costos de instalación son altos por lo que requiere de una gran inversión inicial.</li> <li>• Según un estudio hecho por Silicon Valley Toxics Coalition (2009). Durante la fabricación la contaminación no es inexistente pero es reducida y controlable:  En el silicio cristalino, en su proceso de fabricación se produce algunas emisiones de polvo tóxico. Algunos son fabricados a base de telururo de cadmio, un material conocido por su alta toxicidad, y potencialmente cancerígeno. El silicio amorfo, libera algunos gases potencialmente explosivos durante su producción.</li> <li>• Los lugares donde hay mayor radiación solar, son lugares desérticos y alejados de las ciudades generando alto costo en el transporte de la energía.</li> <li>• Para recolectar energía solar a gran escala se requieren grandes extensiones de terreno.</li> <li>• Es una fuente de energía difusa, la luz solar es una energía relativamente de baja densidad.</li> <li>• La potencia que se obtiene está limitada por la capacidad de generación y almacenamiento de los módulos y la batería, y por la disponibilidad del recurso solar.</li> <li>• En algunos sistemas, se necesitan de baterías que aumentan el costo y durante su proceso de carga, se liberan al ambiente cantidades moderadas de hidrógeno; además, derraman solución de ácido sulfúrico peligroso para la piel y el suelo.</li> </ul>

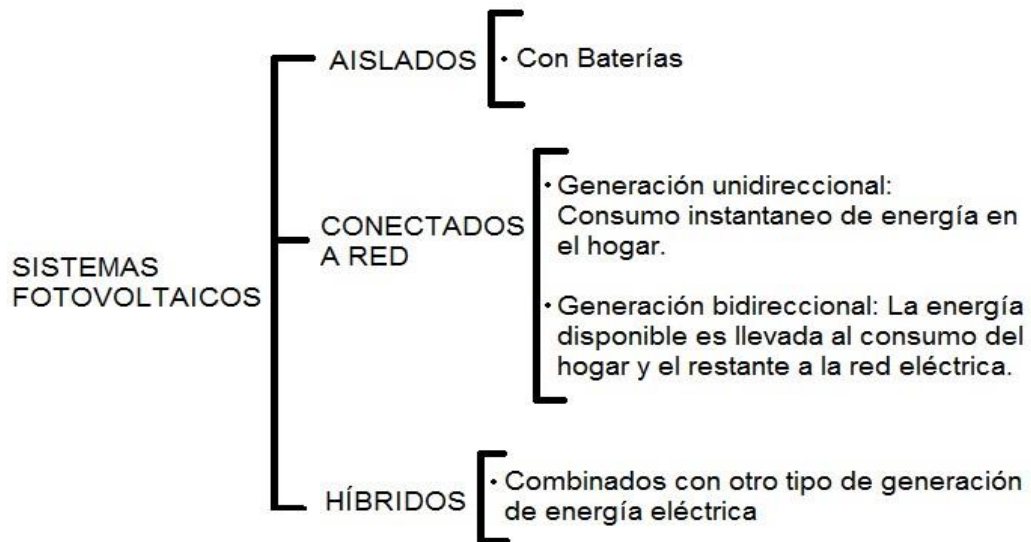
Fuente: Autor

### 3.4 ALTERNATIVAS A ANALIZAR: SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Un sistema fotovoltaico es el conjunto de componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos que concurren para captar la energía solar disponible y transformarla en utilizable como energía eléctrica.

Estos sistemas independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se Pueden clasificar según el siguiente esquema:

Figura 39. Esquema sistema fotovoltaico

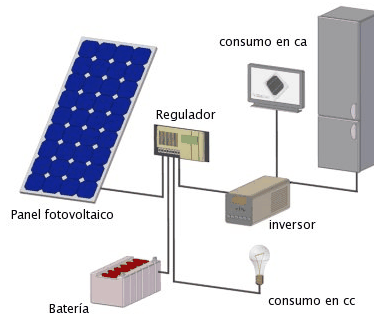


Fuente: Modificada por autor.

**3.4.1 Sistema aislado (off grid).** (Ver Figura 40). Tienen como objeto satisfacer total o parcialmente la demanda de energía eléctrica, estas instalaciones no están conectadas de ninguna forma a la red eléctrica de distribución. La energía eléctrica se genera y se consume en el mismo punto. Puede incluir baterías para almacenar la energía hasta que se produce el consumo. Una vivienda aislada es la instalación más típica de este tipo de sistema con batería.

Los elementos que forman parte de una instalación fotovoltaica son: los paneles o módulos fotovoltaicos, las baterías, el regulador y el inversor (DC/AC).

Figura 40. Sistema aislado (off grid)



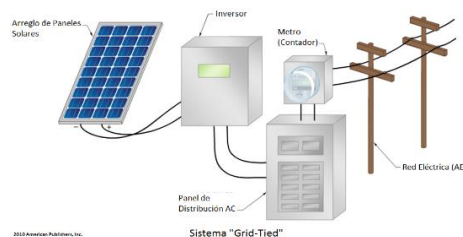
Fuente: <http://www.adformacion.com/cursos/solarfoto/leccion1/tutorial4.html>

**3.4.2 Sistemas conectados a red (GRID TIE).** Los sistemas interconectados a la red o sistemas GRID-TIE requieren necesariamente interconexión con la red eléctrica nacional para operar, sin embargo, una ventaja de estos sistemas es el de no requerir el uso de baterías (o acumuladores) para funcionar, lo cual los vuelve la alternativa más económica y con los requerimientos de mantenimiento más bajos de todos los sistemas. Éstos se dividen en:

- Con generación unidireccional
- Con generación bidireccional

**3.4.2.1 Generación unidireccional.** (Ver Figura 41). En este tipo de instalaciones el sistema fotovoltaico y la red eléctrica se unen para suministrar el consumo requerido. La energía solar producida, se prioriza para suministrar el consumo de la instalación. En caso de ser insuficiente, la red eléctrica proporciona la energía necesaria.

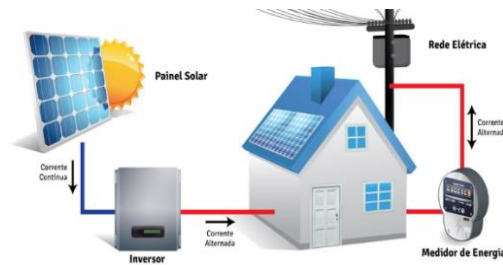
Figura 41. Generación unidireccional



Fuente: <http://panelessolarespr.com/solar101.html>

**3.4.2.2 Generación bidireccional.** (Ver Figura 42). El sistema fotovoltaico inyecta energía a la red eléctrica cuando su producción supera el consumo y a su vez se extrae energía de ella cuando se necesita. Este tipo de sistemas genera múltiples beneficios económicos, ya que son sistemas más baratos, porque no necesitan baterías ni reguladores de carga, solamente un inversor quien convierte el voltaje producido por los paneles solares en voltaje con la cual trabaja nuestra red y un medidor bidireccional encargado de hacer el balance de la energía suministrada y consumida de la red convencional.

Figura 42. Generación bidireccional - generación llevada a la red

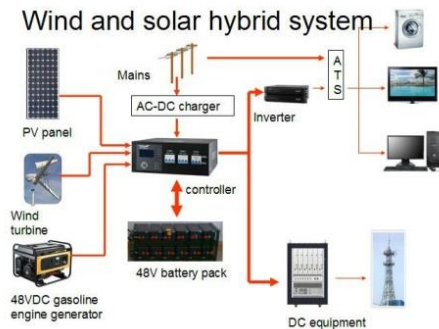


Fuente: <http://t8energiasolar.com.br/sistemas-conectados-a-rede-grid-tie/>

**3.4.3 Sistema híbrido.** (Ver Figura 43). El tercer tipo de sistema es una combinación de los dos anteriores, de ahí su nombre. Se trata de sistemas interconectados a la red que cuentan además con un sistema de respaldo de energía con el fin de garantizar el suministro continuo del fluido eléctrico aún en caso de falla de la red.

Un sistema híbrido es un sistema compuesto por dos o más sistemas, ejemplo: Sistema Híbrido Gas propano-Fotovoltaico, Sistema Eólico-Fotovoltaico, Sistema Diesel-Fotovoltaico.

Figura 43. Sistema híbrido



Fuente: [http://www.geesysindia.com/complete\\_hybrid\\_power\\_solutions.php](http://www.geesysindia.com/complete_hybrid_power_solutions.php).

### Funcionamiento de los sistemas híbridos fotovoltaicos

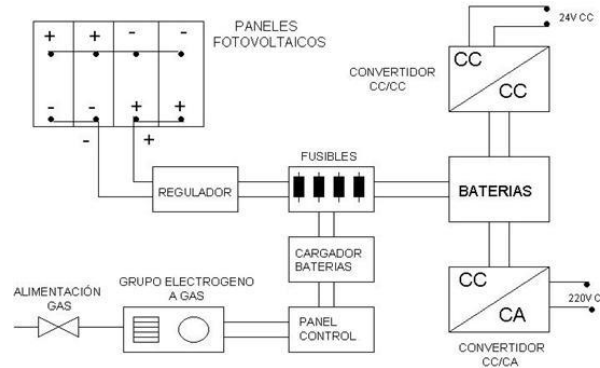
El sistema híbrido fotovoltaico funciona de la siguiente manera:

- En primer lugar, se consume la energía producida por los módulos fotovoltaicos.
- Cuando la energía producida por módulos fotovoltaicos no es suficiente o son horas nocturnas, se obtiene la energía almacenada en las baterías.
- En caso que la energía producida por módulos y almacenada en las baterías no es suficiente, se consume la energía de la red.
- El sistema cuando detecta escasez de energía en todas las opciones anteriores y además hay corte de luz en la red, el lugar consume la energía desde el generador diesel.

**3.4.3.1 Generador eléctrico de gas propano.** Los generadores de propano representan una ventaja en lo económico, ya que es uno de los combustibles más baratos del mercado y están diseñados para darles poco mantenimiento<sup>29</sup>. En cuanto al daño que causan los combustibles al medio ambiente, el uso gas propano es uno de los materiales que causan menos inconvenientes al medio ambiente. (Véase figura 44).

<sup>29</sup> Fuente: ARQHYS ARQUITECTURA. Generadores eléctricos. [Internet] [Citado el 30 de noviembre de 2016] Disponible en: <http://www.arqhys.com/construcciones/gasolina-diesel-propano.html>

Figura 44. Generador eléctrico de gas propano



Fuente: <https://shop.pricessmart.com/pa/sp/product/312542997/generadorel%C3%A9ctrico-dual-para-propano-o-gasolina--4400-watts#page=1>

### 3.5 APLICACIÓN DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A SISTEMAS DE BOMBEO DE AGUA

Una de las aplicaciones de la energía solar fotovoltaica aislada es el uso de las instalaciones de bombeo de agua.

Para ello, el cálculo de la energía necesaria, o consumo, vendrá determinado por el equipo necesario para desplazar un volumen ( $V$ ) diario de agua a cierta altura ( $h$ ), utilizando la siguiente ecuación<sup>30</sup>. (Ver figura 45).

$$E = \frac{\rho \cdot g \cdot h \cdot V}{3600} [Whd] \quad \text{Ecuación (35)}$$

Donde:

$\rho$ , es la densidad del agua en kilogramos por litro [Kg/l].

$g$ , es la gravedad,  $g=9,8$  [m/s<sup>2</sup>].

$h$ , es la altura del volumen de agua en [m].

Conociendo las horas diarias de funcionamiento de la bomba ( $t$  en horas), se podría calcular la potencia necesaria en vatios ( $W$ ):

$$P = \frac{E}{t} = \frac{2,725 \cdot h \cdot V}{t} [W] \quad \text{Ecuación (36)}$$

<sup>30</sup> PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

Habrá que incluir la eficiencia de la bomba, para calcular la potencia eléctrica de la bomba ( $P_e$ ):

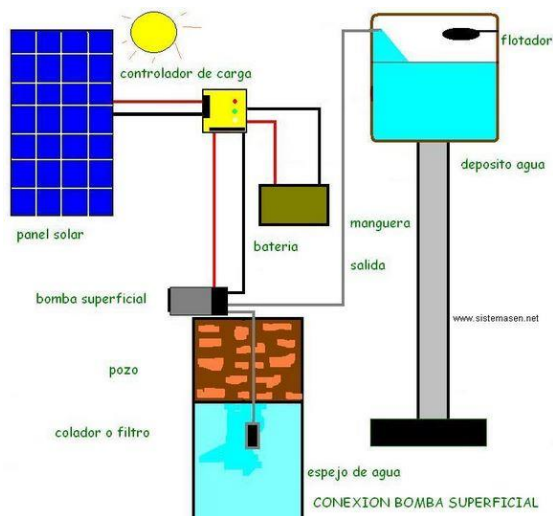
$$P_e = \frac{2,725 \cdot h \cdot V}{\eta \cdot t} [W] \text{ Ecuaci3n (37)}$$

Donde:

$\eta$ , es la eficiencia de la bomba, que oscila entre 0.25 y 0.6.

En la figura 45, se puede observar un sistema de bombeo accionado por energía fotovoltaica.

Figura 45. Sistema de bombeo con energía fotovoltaica.



Fuente: Modificada por autor.

En la tabla 4, se establecen las ventajas y desventajas de los sistemas fotovoltaicos

Tabla 4. Ventajas y desventajas de los sistemas fotovoltaicos.

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS		VENTAJAS	DESVENTAJAS
<b>Sistema Aislado</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema no dependiente de la red eléctrica</li> <li>• Autonomía en su consumo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Configuración costosa si se tienen varios días de autonomía.</li> <li>• Las baterías son críticas, tienen poca vida útil.</li> </ul>
<b>Sistemas conectados a la red</b>	<b>Generación unidireccional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede utilizar sin restricción porque no se depende de la compañía eléctrica.</li> <li>• No son necesarias las baterías ni contador inteligente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Como no tiene un sistema de almacenamiento se pierden grandes cantidades de energía, cuando se produzca más de lo que el sistema necesita.</li> <li>• Solo se estará aprovechando la energía cuando haya un día soleado.</li> <li>• El inversor es especial, y esto conlleva a que sea un poco costoso.</li> </ul>
	<b>Generación bidireccional</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sistema simple y eficaz en el aprovechamiento de la energía generada.</li> <li>• El sistema más económico para implementar.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En Colombia, no hay regulación para los pequeños generadores.</li> </ul>
<b>Sistemas híbridos</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede utilizar sin restricción porque se utiliza como un sistema aislado y es opcional la energía de la red eléctrica.</li> <li>• El sistema asegura el suministro de energía en todo momento.</li> <li>• Se aprovechara al máximo la energía aportada de los paneles solares.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El inversor es híbrido, posee internamente un regulador y un cargador de baterías y esto aumenta su costo.</li> <li>• Por ser un sistema híbrido aumenta el costo por tener otro sistema de generación de energía</li> </ul>

Fuente: Autor.

### **3.6 SELECCIÓN DE ALTERNATIVA**

En Colombia a pesar de la nueva ley 1715 que fomenta el aprovechamiento de energías renovables, entre éstas, la energía fotovoltaica, la Comisión Reguladora de Energía y Gas (CREG) aún no ha estipulado los términos de regulación para los pequeños autogeneradores que entreguen a la red los excedentes de energía que generen, por tal motivo, se descarta la idea de un sistema bidireccional hasta que no se definan claramente los sistemas de conexión a la red y las tarifas, cabe rescatar, que el intercambio de energía entre el sistema fotovoltaico y la red se proyecta como un método económico y eficiente de aprovechamiento de energía solar, ya que en este caso se no se necesita de baterías, ni de sobredimensionar el generador fotovoltaico para evitar pérdidas de carga, debido a que se dispone de la energía aportada por la red, para suplir el sistema cuando sea necesario.

Por otro lado el sistema aislado necesita de una autonomía total del mismo, al ser la energía fotovoltaica dependiente de muchos factores (la intensidad y regularidad de la radiación, temperatura ambiente, humedad, velocidad del viento, material de fabricación del módulo), lo hace poco confiable en días de poca insolación, si se diseña para varios días de autonomía su precio aumenta, disminuyendo la capacidad del retorno de la inversión, descartándolo por altos costos.

Por lo anterior, lo más conveniente es plantear un sistema híbrido conectado a la red con un solo día de autonomía y que la red se encargue de suministrar energía cuando el sistema fotovoltaico no posea la capacidad.

## **CAPITULO 4**

En este capítulo del proyecto se analiza el diseño y el modelo matemático para establecer el comportamiento del sistema fotovoltaico, además de la selección más viable de cada elemento.

### **4. DISEÑO Y CÁLCULO DE LOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS**

Un sistema puede diseñarse exactamente para satisfacer las necesidades del usuario a los más bajos costos.

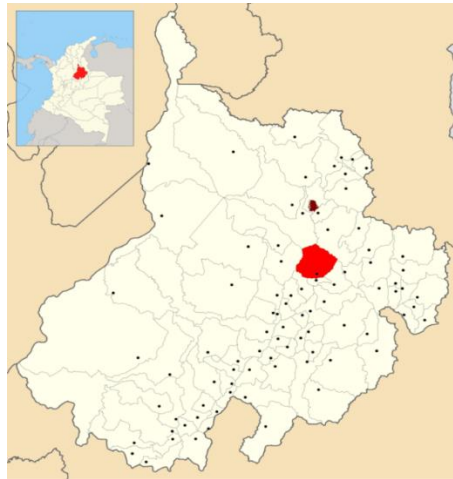
Los factores a evaluar en el diseño y cálculos serán los siguientes:

- Cantidad y disponibilidad de energía
- Inclinación y orientación
- Cálculo del consumo de energía
- Cálculo del generador fotovoltaico

#### **4.1. CANTIDAD Y DISPONIBILIDAD DE ENERGÍA**

La parcela se encuentra ubicada en la parte rural de la mesa de los Santos. Este es un municipio que tiene una extensión de 242 km<sup>2</sup>, y está ubicado a 62 km de distancia de la capital del departamento de Santander (Bucaramanga), y a 33 km de la población de Los Curos. Limita por el norte con Girón (Santander) y Piedecuesta, por el sur con Jordán Sube y Villanueva, por el oriente con Aratoca, y por el occidente con Zapatoca. En esta zona está ubicada la parcela dónde se realiza la instalación solar fotovoltaica a una latitud 6°56'10,6' Norte y longitud 73°05'20,4' Oeste, sobre los 1.650 msnm y una temperatura promedio de 21° Celsius. En la figura 46 se puede ver la ubicación geográfica de la Mesa de los Santos.

Figura 46. Ubicación geográfica municipio de La Mesa de los Santos.

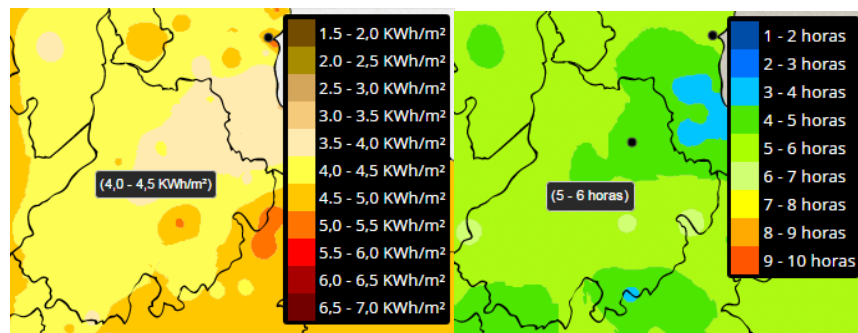


Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Los\\_Santos\\_\(Santander\)#/media/File:Colombia\\_-\\_Santander\\_-\\_Los\\_Santos.svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Los_Santos_(Santander)#/media/File:Colombia_-_Santander_-_Los_Santos.svg)

#### 4.1.1. Radiación solar promedio anual y horas sol en la Mesa de los Santos

Para este proyecto de aprovechamiento solar lo primero que hay que saber es la cantidad de energía disponible y el número de horas sol, es decir, la intensidad y regularidad de la radiación. (Ver figura 47)

Figura 47. Radiación y Horas-sol promedio anual en la Mesa de los Santos



Fuente: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>

Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales IDEAM, existe para el sector de la Mesa de los Santos un promedio anual de radiación solar comprendidos entre los rangos 4,0 – 4,5 KWh/m<sup>2</sup> y un promedio anual de horas-sol entre 5 y 6 horas. Se toma el menor valor para los cálculos de este estudio.

## 4.2 ORIENTACIÓN E INCLINACIÓN

**4.2.1 Orientación.** La parcela se encuentra ubicada en el hemisferio norte, por este motivo, la regla general es que los módulos fotovoltaicos se orienten hacia el sur (si se encontrara en el hemisferio sur se orientaría hacia el norte)<sup>31</sup>. La orientación es el ángulo de desviación respecto al sur geográfico de una superficie, también llamado azimut, que para este caso corresponde a un valor de  $30^\circ$ . Las desviaciones hacia el oriente o hacia el occidente medidos a partir del sur, en un ángulo no mayor a  $36^\circ$  hacen que el valor de irradiación diaria disminuya en un valor inferior al 5%; si la desviación es mayor a  $36^\circ$  las pérdidas de irradiación pueden ser considerables. La parcela cuenta con una superficie adecuada para la instalación del generador fotovoltaico de  $32 \text{ m}^2$  ( $8\text{m} \times 4\text{m}$ ), esta superficie se encuentra en la cara sur del techo principal de la vivienda como se muestra en la figura 48.

Figura 48. Orientación de los módulos solares



Fuente: Autor

<sup>31</sup> PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

**4.2.2 Inclinación:** En función de la inclinación, la captación de energía solar puede variar a lo largo de un año; para obtener la mayor cantidad de energía posible se recurre a sistemas de seguimiento del sol para hacer que la superficie de los módulos siempre esté perpendicular a la radiación solar, pero es un sistema que presenta un costo adicional de mantenimiento continuo, en su lugar aunque no con la misma eficiencia se puede optar por sistemas estáticos, en los cuales se puede fijar la inclinación de los paneles solares para cada época del año o una sola inclinación óptima para todo el año y de este modo la potencia media anual recibida sea la máxima posible.

En países donde la latitud sea de 0 a 15° se acostumbra a utilizar una inclinación fija para módulos solares durante todo el año tanto en verano como en invierno igual a la latitud del lugar, pero no menor a 15°;<sup>32</sup> esto con el fin de que no se acumule polvo y agua sobre la superficie del panel. En Colombia donde la latitud varía entre 4° 12' 19" Sur en Leticia y 12° 26' 46" Norte en Punta Gallina en la península de la Guajira, se inclinan los paneles no menos de 15° con respecto a la horizontal, con lo que se puede fijar una sola inclinación para todo el año ya que el sol no se aparta mucho del zenit, en el medio día solar.

Además existe la ecuación que permite el cálculo del valor de inclinación óptima ( $\beta_{opt}$ ) en función de la latitud del lugar ( $\varphi^\circ$ ), descrita a continuación:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 * \varphi^\circ \quad \text{Ecuación (38)}$$

En este proyecto se tiene una inclinación promedio de 16° para todo el año, que coincide con la inclinación que posee el techo principal de la vivienda ubicado en la cara sur.

### 4.3 CÁLCULO DEL CONSUMO DE ENERGÍA

En la siguiente tabla se estipula la carga de cada elemento y el número de horas de funcionamiento, para calcular el consumo diario de energía en Wh. El

---

<sup>32</sup> PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

consumo de energía resulta difícil de predecir, (debido a muchos factores, como el número de usuarios, las actividades, costumbres, la época del año, etc) pero se hace una estimación en base a la experiencia y los datos que se disponen.

Tabla 5. Consumo de energía.

Dispositivos	Cantidad	Potencia	Potencia total	Diario		Consumo día (Wh) con margen de 20%
		(W)	(W)	Uso día (h)	Consumo día (Wh)	
Nevera	1	235	235	24	1920	2304
Lavadora	1	350	350	0,5	175	210
Televisor	3	75	225	2	450	540
Equipo de sonido	1	60	60	2	120	144
Plancha	1	900	900	0,28	252	302,4
Licuada	1	350	350	0,15	52,5	63
Iluminación	24	20	480	11	1100	1320
Portátil	2	65	130	3	600	720
DVD	1	60	60	0,5	30	36
Cargador de celular	4	6	24	2	48	57,6
Moto-Bomba 1	1	1500	1500	0,35	525	630
Moto-Bomba 2	1	750	750	0,25	187,5	225
<b>Total</b>					<b>5460</b>	<b>6552</b>

Fuente: Autor

Con los datos de la tabla consumo de energía, se obtiene el consumo medio diario de la instalación al que se le aplica un 20% como margen de seguridad recomendado. También se tiene en cuenta que en la instalación hay pérdidas por rendimiento de la batería y del inversor y esto influye en la energía necesaria final. Entonces, para el buen dimensionamiento, se toma un rendimiento de la batería de un 95%, del inversor un 90% y de los conductores un 100%<sup>33</sup>.

Para el cálculo de los consumos medios diarios ( $L_{md}$ ) se considera la siguiente ecuación:

$$L_{md} = \frac{L_{md,DC} + \frac{L_{md,AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} \cdot \eta_{con}} = \frac{0 + \frac{6552}{0.90}}{0.95 \cdot 1} = 7633 \text{ Wh/día Ecuación (39)}$$

<sup>33</sup> Fuente: VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p.

Siendo ( $L_{md}$ ) el consumo medio de energía diario, ( $L_{md,DC}$ ) el consumo medio de energía diario de las cargas en continua y ( $L_{md,AC}$ ) el de las cargas en alterna.

El consumo medio de energía diario ( $Q_{Ah}$ ) se puede expresar en términos de intensidad de corriente por hora (A.h/día)

$$Q_{Ah} = \frac{L_{md}}{V_{BAT}} = \frac{7633}{48} = 159 \text{ Ah/día Ecuación (40)}$$

Siendo ( $L_{md}$ ) el consumo medio de energía diario, ( $V_{BAT}$ ) es la tensión de trabajo en este caso se trabaja a 48 Voltios por tener un consumo mayor de 5000 Wh/día.<sup>34</sup>

El consumo medio diario real es ligeramente superior al nominal, pues se ha tenido en cuenta las pérdidas que se producen en algunos de los elementos de la instalación y el margen de seguridad del 20%.

Como dato adicional, se puede calcular el consumo total anual ( $L_T$ ) y medio anual ( $L_{ma}$ ):

$$L_T = L_{md} * 365 \text{ días} = 2.786.045 \text{ Wh/año}$$

$L_{ma} = L_T/365 = 7.633 \text{ Wh/día}$  (En este caso coincide con el medio diario, pues el consumo que se ha estimado es constante todo el año).

#### **4.4 CÁLCULO DE LOS COMPONENTES DE UN SISTEMA FOTOVOLTAICO:**

La guía de cálculo para este apartado se basa en el libro de: "VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p." Se calcula el número de módulos, la cantidad de batería, el tipo de regulador e inversor y el cableado.

---

<sup>34</sup> PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

#### 4.4.1 Cálculo de los módulos solares necesarios:

Para el cálculo de los módulos necesarios para satisfacer la necesidad de energía de la vivienda, aplicamos la siguiente ecuación:

$$N_T = \frac{L_{md}}{P_{mpp} \cdot HPS_{min} \cdot PR} = \frac{7633}{250 \cdot 5 \cdot 0,80} = 7,63 \sim 8 \text{ Ecuación (41)}$$

Por seguridad se considera el número entero superior, esto significa que son necesarios 8 módulos para satisfacer la demanda requerida.

Siendo,

$N_T$ , es el número de módulos fotovoltaicos necesarios.

$L_{md}$ , el consumo medio diario, "Ecuación 38", (en este caso, es siempre el mismo [7,633 wh/día]) pues el consumo diario es constante todo el año).

$P_{MPP}$ , la potencia pico del módulo en condiciones estándar de medida STC, en este caso, se utiliza el modelo policristalino ATERSA ULTA, con 250 wattios de potencia pico en STC.

$HPS_{min}$  son las horas de sol pico mínima, obtenidas a partir de la "Gráfica 47", en este caso 5 horas sol.

PR, el factor global de funcionamiento que varía entre 0.65 y 0.90. Se usa 0.80 por defecto.

Para obtener la conexión de los módulos en serie o paralelo, se tiene en cuenta que el panel solar de 250W policristalino ReneSola tiene una  $V_{mp}=30,1$  V, y  $I_{mp}= 8,31$  A y se utilizan las siguientes ecuaciones para el cálculo:

$$N_{serie} = \frac{V_{Bat}}{V_{mp}} = \frac{48}{30,1} = 1,60 \sim 2 \text{ Ecuación (42)}$$

$$N_{paralelo} = \frac{N_T}{N_{serie}} = \frac{8}{2} = 4 \text{ Ecuación (43)}$$

Se comprueba con la siguiente ecuación el número de módulos en paralelo

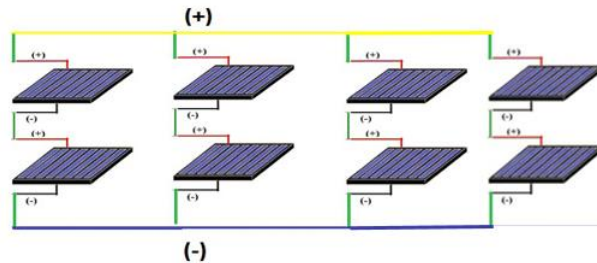
$$N_{paralelo} = \frac{Q_T}{HPS_{min} \cdot I_{mp}} = \frac{159}{5 \cdot 8.31} = 3,82 \sim 4 \quad \text{Ecuación (44)}$$

Siendo ( $Q_T$ ) el consumo medio de energía diario Ah/día obtenida de la ecuación 39.

Por lo tanto, se conectan 4 ramas en paralelo, con 2 módulos por rama. (Ver figura 49).

En concreto el de módulo que se escoge es el policristalino marca ReneSola con 250 wattios de potencia, debido a que son económicos y se pueden comprar directamente con los distribuidores que hay en Colombia y Latinoamérica, por un valor de COP\$ 699.900. Las características técnicas del módulo seleccionado se muestran en el Anexo A Ficha 1.

Figura 49. Distribución paneles solares fotovoltaicos



Fuente: Modificada por autor

#### 4.4.2. Cálculo del número de baterías

Para el cálculo de la batería, los dos parámetros más importantes para el dimensionado de la batería son la máxima profundidad de descarga y el número de días de autonomía. Como norma general, se hace una estimación de estos parámetros:

Profundidad de Descarga Máxima ( $P_{Dmax}$ ) = 80% = 0,8

Número de días de Autonomía ( $N$ ) = 1 (Se asume un solo día de autonomía por motivos de economía, ya que entre más días será más costoso el sistema.)

Se calcula la capacidad nominal necesaria de las baterías en función de la profundidad de descarga Capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima.

$$C_n (Wh) = \frac{L_{md} \cdot N}{P_{Dmax} \cdot F_{CT}} = \frac{7633 \cdot 1}{0,8 \cdot 1} = 9541,25 \text{ Wh} \text{ Ecuación (45).}$$

Donde:  $C_n$  (Wh), es la capacidad nominal diario de la batería;  $L_{md}$ , es el consumo medio de energía diario;  $P_{Dmax,d}$ , es la profundidad de descarga;  $F_{CT}$ , es el factor de corrección de temperatura=1.

La capacidad nominal diaria en amperios hora se calcula con la ecuación:

$$C_n (Ah) = \frac{C_{nd} (Wh)}{V_{BAT}} = \frac{9541,25}{48} = 198,77 \text{ Ah} \text{ Ecuación (46)}$$

Donde:  $V_{BAT}$ , en la tensión de trabajo= 48V, de modo que la capacidad mínima que necesita el sistema de acumulación en estudio es  $C_n$  (Ah)= 198,77 Ah.

Finalmente, por economía y facilidad de adquisición se selecciona la batería de marca CSB y referencia GLP 121000, que tiene una capacidad de 100 Ah y tensión de 12V, se necesitan 2 ramas en paralelo de 4 baterías en serie cada uno, para que suministren un amperaje de 200 Ah y una tensión de 48V y así cumplir con la demanda del sistema. Se obtiene por un valor de COP\$ 405.300. Las características técnicas de la batería se muestran en el Anexo A Ficha 2.

#### 4.4.3. Cálculo del regulador/controlador de carga

Para el cálculo del regulador, se debe calcular cual es la máxima corriente que debe soportar el regulador, a su entrada.

Para calcular la corriente de entrada al regulador hacemos el producto corriente de cortocircuito de un módulo, en este caso la del Panel Solar 250W Policristalino ATERSA es de  $I_{sc} = 8,91$  Amp., y multiplicamos por el número de ramas en paralelo,  $N_p=4$ . Además le aplicamos un factor de seguridad para evitar daños en el regulador,  $F_{seg}=1,25$ .

$$I_{entrada} = 1,25 \cdot I_{sc} \cdot N_p = 1,25 * 8,91 * 4 = 44,55 \text{ A} \text{ Ecuación (47)}$$

Se usa la corriente de cortocircuito para el cálculo de la corriente de entrada al regulador por que será la máxima corriente que podría ser generada por el módulo fotovoltaico y ha de ser esa la que tengamos en cuenta para evitar pérdidas de rendimiento.

El regulador de carga debe soportar una corriente, como mínimo de 44,55A a su entrada.

#### **4.4.4. Cálculo del inversor**

Para no sobredimensionar el inversor, a causa de algunos dispositivos que poseen picos de arranque elevados, se toma como alternativa, adaptar un variador de velocidad al equipo más crítico, en este caso la motobomba (Pot= 1500 W), que requiere una potencia 4 ó 5 veces superior a su consumo nominal y con esto eliminar la energía reactiva de arranque.

El variador permite variar la velocidad rotacional del motor de la bomba, actuando sobre la frecuencia de la corriente eléctrica. Con él, se regula el caudal de agua necesario y se adapta a la demanda de energía existente en cada momento, con lo que protege la vida útil del equipo y disminuye el consumo considerablemente.

En concreto, se selecciona un variador de velocidad de la línea CFW-10 (WEG) de 2 HP / 220V / 7,3 A / Monofásico, por un valor de COP\$ 443.200. Las características técnicas del variador seleccionado se muestran en el Anexo A Ficha 3.

Para el dimensionamiento del inversor se debe sumar todas las potencias nominales de las cargas que puedan funcionar al mismo tiempo y después multiplicar esa potencia por un factor de seguridad de 1,25 para situaciones no previstas como aumento de la demanda; se debe tener en cuenta que un inversor sobredimensionado presenta un bajo rendimiento en la conversión de potencia.

Si se tiene una potencia máxima instantánea de  $Carga_{inst} = 3 \text{ kW}$  la potencia de régimen del inversor se calcula como:

$$P_{in} = 1,25 * Carga_{inst} = 1,25 * 3 = 3,75 \text{ kW} \quad \text{Ecuación (48)}$$

Esto indica que el inversor debe soportar por lo menos una potencia 3.75 kW.

Se. Además tener en cuenta el tiempo en el que el inversor puede funcionar a su capacidad máxima, la tensión de entrada y de salida, frecuencia y rendimiento, así como la capacidad de sobre potencia transitoria.

En este caso se emplea un inversor para sistemas híbridos que tiene transferencia automática entre la energía fotovoltaica y la energía de la red eléctrica. El equipo elegido es un inversor modelo I-P-XDC-6000VA de marca I-Panda, con una potencia nominal de 4 kW y onda senoidal pura que representa un mejor comportamiento para electrodomésticos con motor de picos de arranque elevados, es económico y trae incorporado un regulador de carga y un cargador de baterías. Se obtiene por un valor de COP\$ 2.734.400. Las características técnicas del inversor seleccionado se muestran en el (Anexo A Ficha 4).

#### **4.5 RESUMEN DE LOS ASPECTOS TÉCNICOS DEL SISTEMA.**

En la tabla 6, está el resumen de los principales aspectos técnicos de la instalación. Los módulos fotovoltaicos están ubicados sobre el techo con la inclinación y orientación de éste, soportado por una estructura de acero adecuada para instalaciones fotovoltaicas.

Tabla 6. Ficha técnica de la instalación.

<b>Resumen Técnico del sistema</b>	
<b>Campo Fotovoltaico (STC)</b>	
Módulos Fotovoltaicos	ReneSola 250 Wp policristalino
Inclinación	16°
Acimut	30°
Cantidad	8
Nps Número de paneles en serie	2
Npp Número de paneles en paralelo	4
Potencia máxima Campo (Pmax)	2000 Wp
Tensión Nominal	48 V
Corriente punto máxima Potencia (Imp)	33,24 A
Tensión punto máxima Potencia (Vmp)	60,2 V
Corriente de Corto Circuito (Icc)	35,32 A
Tensión a Circuito Abierto	74,8 V
<b>Acumulador</b>	
Baterías	CSB GPL121000, 12V, 100Ah (C20)
Cantidad de Baterías	8
Nbs Número de baterías en serie	4
Nbp Número de baterías en paralelo	2
Tensión del Acumulador	48 V
Capacidad del Acumulador	200 Ah
<b>Inversor- Regulador</b>	
<b>Inversor con regulador híbrido</b>	I-Panda modelo: I-P-XDC-6000VA
<b>Regulador</b>	
Tensión Nominal	48V/96V
Corriente Máxima	60A
Eficiencia Máxima	98%
<b>Inversor</b>	
Potencia Nominal	4.000 W Onda pura
Tensión (Vac)	100V/110V/220V
Frecuencia	60Hz
<b>Ubicación</b>	Latitud: 5°56'10,6" N
	Longitud: 73°05'20,4" W
	Altitud: 1536 msnm

Fuente: Autor

## 4.6 CONDUCTOR ELECTRICO

Para la determinación del cable adecuado en la instalación se consideran los siguientes pasos:

- Determinar la corriente nominal de la carga.
- Determinar la caída de tensión
- Seleccionar el calibre del conductor
- Corrección de la capacidad de conducción de corriente.
- Analizar cada sección de conductores.

**4.6.1 Determinar la corriente nominal de la carga.** De acuerdo con los datos de tensión y potencia de la tabla 6 de los componentes del sistema y utilizando las fórmulas indicadas en el Anexo B tabla 1, se determina la corriente nominal de la carga. Dónde:

CP (HP) = Caballos de fuerza o potencia del motor

kW = Potencia en kilowatt

V = Tensión nominal del sistema en Volts

$\eta$  = Eficiencia del motor (Valor típico 0,8), si no existen motores valor=1

$f_p$  = Factor de potencia (Valor típico 0,9).

**4.6.2 Corrección de la capacidad de conducción de corriente.** Para elegir el posible calibre del conductor, se tiene en cuenta la capacidad de conducción de corriente con el factor de corrección de temperatura en función de la temperatura ambiente del lugar de instalación, para ello se multiplica por el factor de corrección que se indica en el (Anexo B tabla 3).

**4.6.3 Determinar la caída de tensión.** Se calcula la caída de tensión de la instalación utilizando las fórmulas siguientes:

Circuitos Monofásicos

$$\% \Delta V = \frac{2 * Z * L * I * 100}{V_0} \quad \text{Ecuación (49)}$$

### Circuitos Trifásicos

$$\% \Delta V = \frac{\sqrt{3} * Z * L * 100}{V_{ff}} \quad \text{Ecuación (50)}$$

Dónde:

$\Delta V$ , es la caída de tensión en el cable, en %

I, es la corriente eléctrica que circula a través del conductor, en A

L, es la longitud total del circuito, en km

$V_o$ , es la tensión de fase a neutro, en V

$V_{ff}$ , es la tensión entre fases, en V

Z = Impedancia eléctrica del cable, en  $\frac{\Omega}{km}$

La impedancia eléctrica del cable Z, expresada en ohm/km, está dada por la siguiente fórmula:

$$Z = R * \cos \Phi + X * \sin \Phi \quad \text{Ecuación (51)}$$

En forma aproximada sin considerar el factor de potencia (fp) la impedancia (Z) puede ser calculada con la fórmula siguiente:

$$Z = \sqrt{(R^2 + X^2)} \quad \text{Ecuación (52)}$$

Dónde:

R, es la resistencia del conductor a la c.a. y a la temperatura de operación, en  $\frac{\Omega}{km}$  X,

es la reactancia inductiva del conductor, en  $\frac{\Omega}{km}$  fp = Cos  $\Phi$

$\Phi$ , es el ángulo del factor de potencia (fp).

**4.6.4 Selección del calibre del conductor** Calculando la sección del conductor con las siguientes formulas:

$$\Delta V = \% \Delta V * V \quad \text{Ecuación (53)}$$

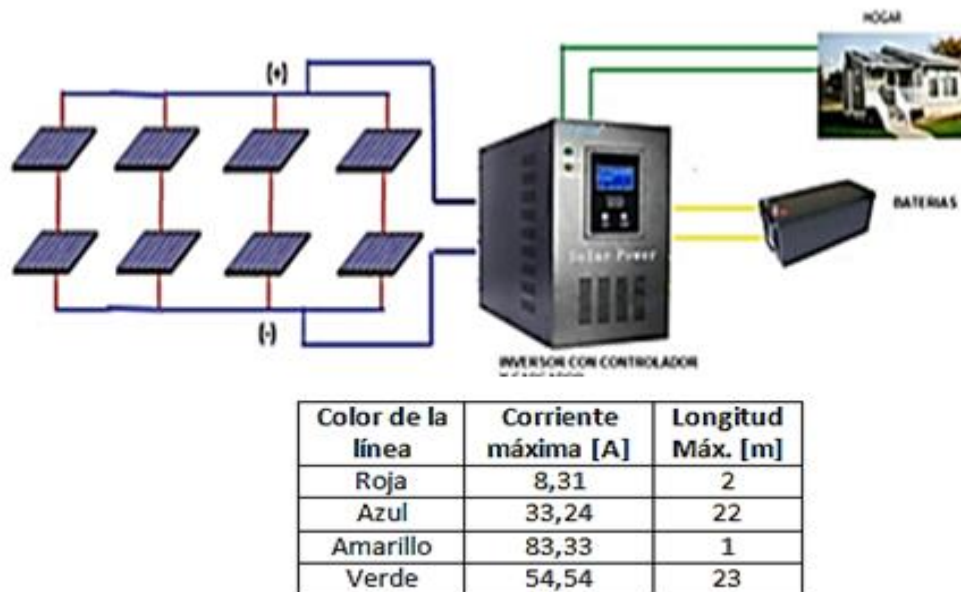
$$S(mm^2) = 4.4 * 10^{-2} * I / \Delta V \quad \text{Ecuación (54)}$$

Y utilizando el anexo B tabla 2, se selecciona el calibre del conductor.

#### 4.6.5 Análisis cada sección de conductores

En la figura 50 se puede ver la distribución de la corriente máxima que pasa por cada conductor además de la longitud aproximada, para poder seleccionar el calibre del cable adecuado, siguiendo los pasos anteriormente mencionados.

Figura 50. Distribución conductores eléctricos del sistema



Fuente: Autor

- **Para la línea roja (Ver figura 50):**

La corriente máxima que conduce es: 8.31 A.

Se tiene en cuenta el factor de corrección por temperatura 0,94 pues está expuesta a una temperatura que puede llegar a los 35°C (ver Anexo B tabla 3).

Se escoge un calibre AWG 14, su corriente máxima es 14.1 A.

Tomando este calibre se calcula el porcentaje de caída de tensión con la ecuación 50 y se tiene en cuenta que en esta sección la reactancia inductiva es

cero pues aquí sólo se maneja corriente continua; los datos de resistencia se toman del Anexo B Tabla 4.

$$R = 10.2 \frac{\Omega}{Km}$$

$$\% \Delta V = \frac{2 * 10.2 \frac{\Omega}{Km} * 0.002 Km * 8.31 A * 100}{30.1} = 1.12\%$$

Con el porcentaje de caída de tensión hallada se puede corroborar la sección transversal del cable con la ecuación 53 y ecuación 54.

$$\Delta V = 30.1 * 1.12\% = 0.333712 V$$

$$S(mm^2) = \frac{4.4 * 10^{-2} * 2 * 8.31}{0.333712} = 2.16 mm^2$$

Comercialmente el cable con la sección más cercana a este valor, es el AWG 14 al cual le corresponde una sección  $S = 2.08 mm^2$ . Ver Anexo B Tabla 2.

- **Para la línea azul (Ver figura 50):**

La corriente máxima que conduce es: 33.24 A.

Se tiene en cuenta el factor de corrección por temperatura 0,94 pues está expuesta a una temperatura que puede llegar a los 35°C (ver Anexo B Tabla 3). Se escoge un calibre AWG 4, su corriente máxima es 65.8 A.

Tomando este calibre se calcula el porcentaje de caída de tensión con la ecuación 50 y se tiene en cuenta que en esta sección la reactancia inductiva es cero pues aquí sólo se maneja corriente continua; los datos de resistencia se toman del Anexo B tabla 4.

$$R = 1.02 \frac{\Omega}{Km}$$

$$\% \Delta V = \frac{2 * 1.02 \frac{\Omega}{Km} * 0.022 Km * 33.24 A * 100}{60.2} = 1.47\%$$

Con el porcentaje de caída de tensión hallada se puede corroborar la sección transversal del cable con la ecuación 53 y ecuación 54.

$$\Delta V = 60.2 * 1.47\% = 1.486 V$$

$$S(mm^2) = \frac{4.4 \times 10^{-2} * 22 * 33.24}{1.486} = 21.61 mm^2$$

Comercialmente el cable con la sección más cercana a este valor, es el AWG 4 al cual le corresponde una sección  $S = 21.61 mm^2$ . Ver Anexo B Tabla 2.

- **Para la línea amarilla (Ver figura 50):**

La corriente máxima que conduce es: 83.33 A.

Se tiene en cuenta el factor de corrección por temperatura 0,94 pues está expuesta a una temperatura que puede llegar a los 35°C (ver Anexo B Tabla 2). Por se escoge un calibre AWG 2, su corriente máxima es 89.3 A.

Tomando este calibre se calcula el porcentaje de caída de tensión con la ecuación 50 y se tiene en cuenta que en esta sección la reactancia inductiva es cero pues aquí sólo se maneja corriente continua; los datos de resistencia se toman del Anexo B tabla 4.

$$R = 0.62 \frac{\Omega}{Km}$$

$$\% \Delta V = \frac{2 * 0.62 \frac{\Omega}{Km} * 0.001 Km * 83.33 A * 100}{48} = 0.2152\%$$

Con el porcentaje de caída de tensión hallada se puede corroborar la sección transversal del cable con la ecuación 53 y ecuación 54.

$$\Delta V = 48 * 0.2152\% = 0.103584 V$$

$$S(mm^2) = \frac{4.4 \times 10^{-2} * 1 * 83.33}{0.103584} = 35.39 mm^2$$

Comercialmente el cable con la sección más cercana a este valor, es el AWG 2 al cual le corresponde una sección  $S = 33.6 \text{ mm}^2$ . Ver Anexo B Tabla 2.

- **Para la línea verde (Ver figura 50):**

La corriente máxima que conduce es: 54.54 A.

Se tiene en cuenta el factor de corrección por temperatura 0,94 pues está expuesta a una temperatura que puede llegar a los 35°C (ver Anexo B Tabla 3). Por se escoge un calibre AWG 4, su corriente máxima es 89.3 A.

Tomando este calibre se calcula el porcentaje de caída de tensión, se tiene en cuenta los datos de impedancia, se toman del Anexo B Tabla 4).

$$R = 0.62 \frac{\Omega}{Km}$$

$$\% \Delta V = \frac{2 * 0.62 \frac{\Omega}{Km} * 0.023 Km * 54.54 A * 100}{110} = 1.414\%$$

Con el porcentaje de caída de tensión hallada se puede corroborar la sección transversal del cable con la ecuación 53 y ecuación 54.

$$\Delta V = 110 * 1.414\% = 1.555 V$$

$$S(\text{mm}^2) = \frac{4.4 \times 10^{-2} * 23 * 54.54}{1.555} = 35.48 \text{ mm}^2$$

Comercialmente el cable con la sección más cercana a este valor, es el AWG 2 al cual le corresponde una sección  $S = 33.6 \text{ mm}^2$ . Ver Anexo B Tabla 2.

En la tabla 6 se muestra los diferentes calibres de conductores escogidos además de sus características.

Tabla 7. Conductores eléctricos del sistema

Tramo del sistema		Conductor	Características
Línea roja	De panel a panel	AWG 14	Corriente máxima: 14.1 A Sección transversal: 2.08 mm <sup>2</sup>
Línea azul	Del campo de paneles al inversor-regulador	AWG 4	Corriente máxima: 65.8 A Sección transversal: 21.2 mm <sup>2</sup>
Línea amarilla	Del inversor-regulador a las baterías	AWG 2	Corriente máxima: 89.2 A Sección transversal: 33.6 mm <sup>2</sup>
Línea verde	Del inversor-regulador a la casa	AWG 2	Corriente máxima: 89.2 A Sección transversal: 33.6 mm <sup>2</sup>

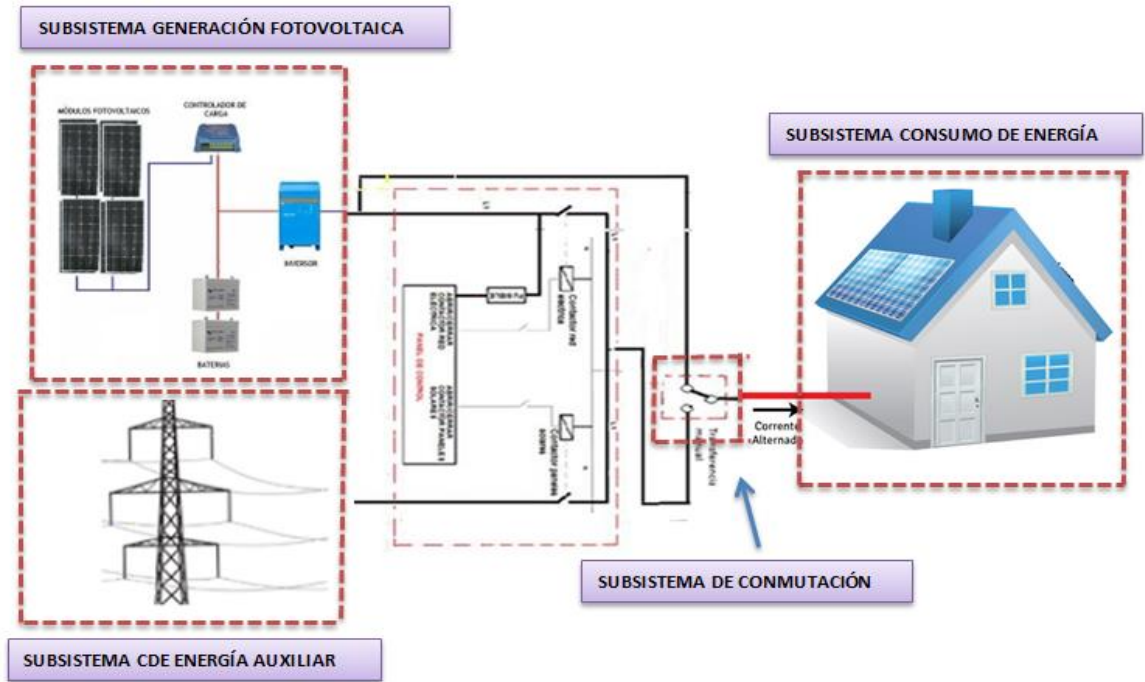
Fuente: Autor.

#### 4.7 RESUMEN DISEÑO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO

Se separa el sistema fotovoltaico en diferentes subsistemas para una mejor comprensión de la instalación y su funcionalidad. (Ver figura 51).

- Subsistema de generación fotovoltaica
- Subsistema de conmutación
- Subsistema de consumo de energía
- Subsistema de energía auxiliar.

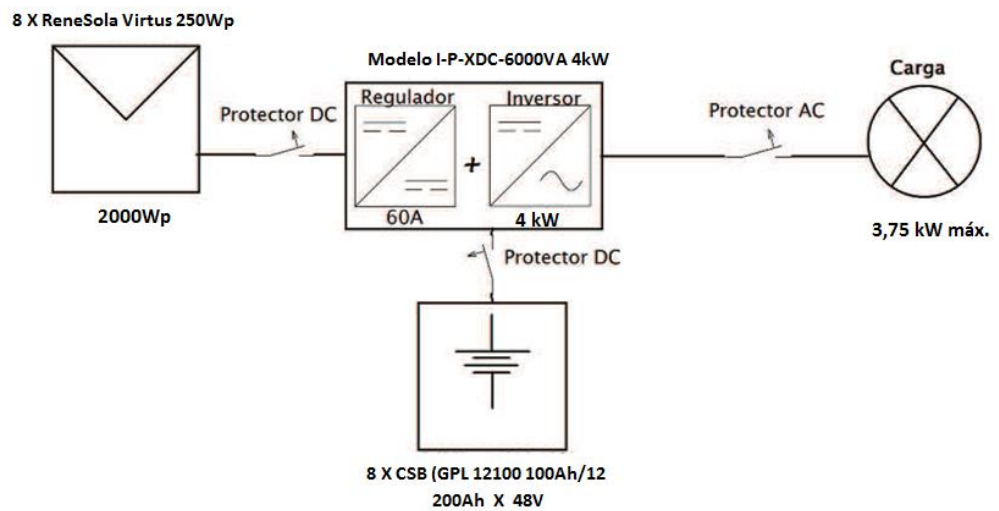
Figura 51. Subsistemas del montaje total



Fuente: autor

**4.7.1 Subsistema de generación fotovoltaica.** En la siguiente figura 52 se muestra el esquema unifilar los componentes que forman al sistema fotovoltaico

Figura 52. Subsistema de generación fotovoltaica



Fuente: Autor

En la siguiente tabla 7 se realiza un resumen del diseño, la selección e instalación de los componentes que conforman el subsistema.

Tabla 8. Subsistema de generación fotovoltaica

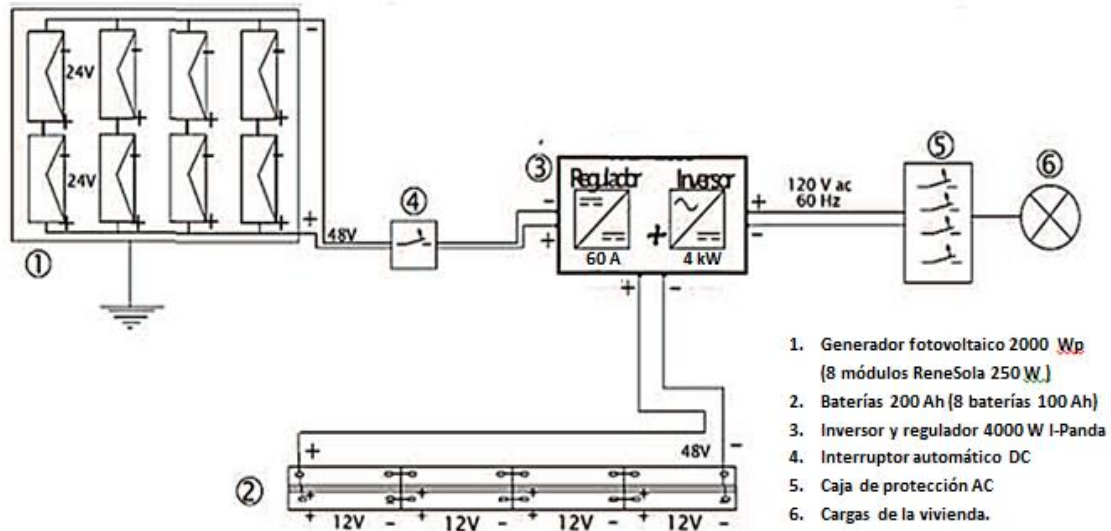
ELEMENTOS	DISEÑO Y SELECCIÓN	INSTALACIÓN
<b>Módulo Fotovoltaico</b>	Se escoge módulo fotovoltaico policristalino marca ReneSola de 250 W. En total 8 módulos para satisfacer la demanda de 7.633 Wh/día.	Los módulos fotovoltaicos se conectan: 4 ramas en paralelo, con 2 módulos por rama en serie para lograr una tensión nominal DC de 48V aproximados. Cada grupo de 4 paneles tiene su estructura de soporte metálica, y están orientados hacia el sur con una inclinación 16° y un azimut de 30°
<b>Estructura de soporte para los módulos fotovoltaicos</b>	La estructura se hace para que soporte el peso de los módulos de 150,4 Kg y a una persona de 100 kilos con un total 251 kilos aproximados. El material es en ángulo de acero estructural y aluminio.	Se instalan en techo principal de la vivienda ubicado en la cara sur con la misma inclinación del tejado
<b>Baterías</b>	Se seleccionada la batería de marca CSB y referencia GLP 121000, tiene una capacidad de 100 Ah y tensión de 12V.	se necesitan 2 ramas en paralelo de 4 baterías en serie cada uno, para que suministren un amperaje de 200 Ah y una tensión de 48V
<b>Inversor</b>	El equipo elegido es un Inversor modelo I-P-XDC-6000VA de la marca I-Panda, el cual tiene una potencia nominal de 4 kW, trae incorporado ser regulador de carga, cargador de baterías, tener transferencia automática e invertir la corriente en DC a AC	Las conexiones al inversor son: las baterías, el voltaje entregado en corriente alterna a la casa, y la energía recibida por parte de los módulos fotovoltaicos.
<b>Estructura de la baterías</b>	La estructura se hace para que soporte el peso del inversor de 52 kg y de la 8 baterías de 272 kg con un total 324 kilos aproximados el material es ángulo, varilla y platina estructural, además con base de madera para poder aislar cualquier fuga de corriente	Se instala en un lugar de buena ventilación, a la estructura se le realiza un techo en teja para protegerla del clima

Fuente: Autor

## Esquema detallado

En la siguiente figura 53 se observa el plano del esquema detallado de la instalación.

Figura 53. Esquema detallado



Fuente: Autor

**4.7.2 Subsistema de conmutación.** El conmutador está formado por un interruptor directo y otro inverso, que actúan conjuntamente, de modo que con una sola actuación se aísla un circuito y se conecta otro, conmutando los dos circuitos. En este caso se utiliza para conmutar la energía suministrada por el sistema de generación fotovoltaica y la red eléctrica convencional que llega a la vivienda. Existen dos tipos de conmutación que se implementan en el sistema, la conmutación automática que va incorporada en el inversor y la conmutación manual, que utiliza un interruptor conmutable de 3 posiciones.

**4.7.3 Subsistema de consumo de energía.** Este subsistema está basado en la carga que se debe suministrar a la vivienda en corriente alterna desde el inversor del sistema fotovoltaico a una potencia máxima marcada de 4000 W y una tensión de 110 V

**4.7.4 Subsistema de energía auxiliar.** Este subsistema es la energía de la red eléctrica que está conectada para habilitarse y hacer con éxito la transferencia conmutable con la energía fotovoltaica cuando sea necesario, esta energía llega con un voltaje nominal de 110v, frecuencia 60hz.

## **CAPITULO 5**

En este capítulo del proyecto se analiza el factor financiero del sistema fotovoltaico.

### **5. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA.**

Para evaluar el proyecto se tienen en cuenta los siguientes ítems

- Valor inicial del sistema fotovoltaico: Presupuesto.
- Valor inicial del sistema electrógeno: Presupuesto
- Análisis del sistema fotovoltaico con respecto al precio de la energía convencional
- Análisis de un sistema electrógeno accionado por gas propano con respecto al precio de la energía convencional.
- Costos de mantenimiento y de operación.

## 5.1 PRESUPUESTO SISTEMA FOTOVOLTAICO

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto de la implementación del sistema fotovoltaico para la vivienda.

Tabla 9. Presupuesto sistema fotovoltaico

ITEM	UNIDAD	CANT.	V. UNITARIO	VALOR TOTAL
<b>1 EQUIPOS</b>				
Módulo Fotovoltaico ReneSola 250Wp	uni	8	\$ 699.900	\$ 5.599.200
Batería CSB GLP 121000 12V 100Ah	uni	8	\$ 405.300	\$ 3.242.400
Inversor-regulador I-Panda híbrido 4000W	uni	1	\$ 2.734.400	\$ 2.734.400
Variador de velocidad CFW-10 WEG de 2 HP	uni	1	\$ 443.200	\$ 443.200
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 12.019.200</b>
<b>2. CONDUCTORES</b>				
14 AWG THHN/THWN-2 , de tres hilos	m	2	\$ 910	\$ 1.820
4 AWG THHN/THWN-2, de tres hilos	m	22	\$ 6.480	\$ 142.560
2AWG THHN/THWN-2, de tres hilos	m	6	\$ 10.050	\$ 60.300
2AWG THHN/THWN-2, de tres hilos	m	23	\$ 10.050	\$ 231.150
Conmutador 3 posiciones	uni	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Otros accesorios (Protecciones, diodos, fusibles.)	glo	1	\$ 150.000	\$ 150.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 625.830</b>
<b>3. ESTRUCTURA DE SOPORTE</b>				
Estructura de soporte de los módulos	glo	1	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
Estructura de soporte baterías e inversor	glo	1	\$ 600.000	\$ 600.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 1.800.000</b>
<b>4. INSTALACIÓN MANO DE OBRA Y TRANSPORTE</b>				
Mano de obra, dos técnicos, un día de instalación	glo	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Alquiler andamios	glo	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Transporte de quipos y materiales	glo	1	\$ 60.000	\$ 60.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 200.000</b>
<b>5. OTROS</b>				
Papelería y bibliografía	glo	1	\$ 120.000	\$ 120.000
Asesorías externas	glo	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Producción intelectual	glo	1	\$ 1.500.000	\$ 1.500.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 1.720.000</b>
<b>TOTAL</b>				<b>\$ 16.365.030</b>
<b>AIU (3%)</b>				<b>\$ 490.951</b>
<b>TOTAL + AIU</b>				<b>\$ 16.855.981</b>

El valor total de la implementación de sistema fotovoltaico es de dieciséis millones ochocientos cincuenta y cinco mil novecientos ochenta y uno pesos.

## **5.2 PRESUPUESTO SISTEMA ELECTRÓGENO**

Se realiza un análisis para la elección del sistema electrógeno, para los diferentes tipos de generadores eléctricos con consumo de combustible a gasolina, diesel y gas:

Generador eléctrico-Diesel COP\$ 3.330.000, consume un tanque de 12 litros por 4 horas, gasta en promedio 3Lts/h

Generador eléctrico-Gasolina COP\$ 2.900.000, consume tanque de 12 litros por 3horas, gasta en promedio 4Lts/h.

Generador eléctrico-Gas COP\$ 3.550.000, consume una pipeta de 20 libras por 10 horas, gasta en promedio 2Lbs/h.

Según GlobalPetrolPrice, para Colombia:

Precio actual del litro de diesel COP\$ 1.995,70

Precio actual del litro de gasolina COP\$ 2.098,44

Según la empresa Gasán SA empresa distribuidora de gas propano:

Precio actual de la libra de gas propano: COP\$ 1.212/lbs

Entonces:

Valor de consumo de diesel por hora: COP\$ 5.987/hora

Valor de consumo de gasolina por hora: COP\$ 8.393/hora

Valor de consumo de gas por hora: COP\$ 2.424/hora

La diferencia del precio de compra de los equipos es mínima, el factor relevante para la selección del generador se basa en el valor de consumo de combustible por hora, por lo anterior, se opta por utilizar un generador eléctrico a base de gas propano, quien tiene un valor de consumo de gas por hora de COP\$ 2.424/hora.

En la siguiente tabla se muestra el presupuesto del sistema electrógeno para la vivienda.

Tabla 10. Presupuesto sistema electrógeno

PRESUPUESTO SISTEMA ELECTRÓGENO VIVIENDA-PARCELA MESA DE LOS SANTOS				
ITEM	UNIDAD	CANT.	V. UNITARIO	VALOR TOTAL
<b>1 EQUIPOS</b>				
Planta Eléctrica Gas Propano 4000 W	uni	1	\$ 3.550.000	\$ 3.550.000
Batería CSB GLP 121000 12V 100Ah	uni	8	\$ 405.300	\$ 3.242.400
Variador de velocidad CFW-10 WEG de 2 HP	uni	1	\$ 443.200	\$ 443.200
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 7.235.600</b>
<b>2. CONDUCTORES</b>				
4 AWG THHN/THWN-2, de tres hilos	m	1	\$ 6.480	\$ 6.480
2AWG THHN/THWN-2, de tres hilos	m	7	\$ 10.050	\$ 70.350
Conmutador 3 posiciones	uni	1	\$ 40.000	\$ 40.000
Otros accesorios (Protecciones, diodos, fusibles.)	glo	1	\$ 150.000	\$ 150.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 266.830</b>
<b>3. ESTRUCTURA DE SOPORTE</b>				
Estructura de soporte de la planta eléctrica	glo	1	\$ 1.200.000	\$ 1.200.000
Estructura de soporte baterías	glo	1	\$ 600.000	\$ 600.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 1.800.000</b>
<b>4. INSTALACIÓN MANO DE OBRA Y TRANSPORTE</b>				
Mano de obra, dos técnicos, un día de trabajo	glo	1	\$ 100.000	\$ 100.000
Transporte de quipos y materiales	glo	1	\$ 60.000	\$ 60.000
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>\$ 160.000</b>
			<b>TOTAL</b>	<b>\$ 9.462.430</b>
			<b>AIU (3%)</b>	<b>\$ 283.873</b>
			<b>TOTAL + AIU</b>	<b>\$ 9.746.303</b>

Fuente: Autor

El valor total de la implementación de sistema electrógeno es de nueve millones setecientos cuarenta y seis mil trescientos tres pesos.

El equipo que se escoge es una planta eléctrica a gas 4000 Watts marca Sportsmans, se opta por utilizar este generador a gas por el bajo valor de consumo de combustible con respecto al de gasolina y al diesel, adquirido por un valor de COP\$3'550.000. Las características técnicas del generador se muestran en el Anexo A Ficha 4.

### 5.3 ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS

Para hacer el análisis de los sistemas se tiene que hallar el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna De Retorno (TIR) que son factores que definen si un proyecto es viable y rentable económicamente<sup>35</sup>.

El Valor Presente Neto (VPN), es el flujo de caja que resulta de comparar el valor de los ingresos con el valor de los egresos y calcular el valor presente de un determinado número de flujos netos de efectivo, originados por una inversión. Se hace un análisis del VPN, para ver la viabilidad del proyecto, la ecuación del VPN se plantea de la siguiente forma:

$$VPN(i) = -P + \frac{A_1}{(1+i)^1} + \frac{A_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{A_N}{(1+i)^N} \quad \text{Ecuación (55)}$$

Se estiman los flujos netos de efectivo(A), la inversión (P), y la tasa de interés (i).

Si el valor del VPN > 0, se considera que el proyecto es económicamente viable.

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa de interés producida por un proyecto de inversión, se calcula estimando el promedio geométrico de los rendimientos futuros esperados de dicha inversión. La TIR se da en porcentaje y se usa como indicador de rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR mayor rentabilidad.

---

<sup>35</sup> COSS, Raúl. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. México: Editorial limusa, 1998. 375p.

#### 5.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO CON RESPECTO AL PRECIO DE LA ENERGÍA CONVENCIONAL

Para el análisis se tiene en cuenta los flujos de caja, es decir las entradas y salidas del dinero, en este proyecto la entrada de dinero es el ahorro aparente que se realiza durante los años de uso del sistema fotovoltaico y las salida del dinero es la inversión inicial y las inversiones al transcurso del tiempo, como por ejemplo el cambio de un equipo, en este caso las baterías que se cambian o tienen un tiempo de uso promedio de 5 años. Para un mejor estudio se definen los siguientes parámetros. Transcurso

- Precio actual de la energía: 474,36/kWh
- Energía anual consumida: 2.786 kWh.
- Tipo de interés: 3.3<sup>36</sup>%.
- Reinversión en baterías: COP\$ 3'242.400, cada 5 años.
- Mantenimiento de módulos: COP\$ 100.000, cada año.
- Años de vida del proyecto: 25 (vida de los paneles).

La entrada de dinero, es el ingreso que se ahorra anualmente gracias al sistema fotovoltaico, se calcula haciendo el producto de la energía consumida en un año  $LT = (2.786 \text{ kWh})$ , por el valor actual de la energía convencional en \$ 474,36/kWh.

$$V_{ca} = 2.786 * 474,36 = 1'321.566 \text{ Ecuación (56)}$$

El valor anual de la energía consumida ( $V_{ca}$ ) es de COP\$1'321.566

---

<sup>36</sup>TRADING ECONOMICS. Colombia-Tasa de interés (online) New York City- Lisboa.Ene.2014. Disponibilidad y acceso en la web: <<http://es.tradingeconomics.com/colombia/inflation-cpi>>

En la siguiente tabla se calcula el Valor Presente Neto (VPN), y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para el sistema fotovoltaico:

Tabla 11. VPN, TIR Sistema fotovoltaico

<b>VPN y TIR SISTEMA FOTOVOLTAICO</b>			
<b>Inversión.= 16.855.981</b>		<b>tasa de interés= 3,3 %</b>	
<b>Año</b>	<b>Entradas</b>	<b>Salidas</b>	<b>Flujo de caja</b>
0	\$ -	\$ (16.885.981)	\$ (16.885.981)
1	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
2	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
3	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
4	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
5	\$ 1.321.566	\$ (3.242.400)	\$ (1.920.834)
6	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
7	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
8	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
9	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
10	\$ 1.321.566	\$ (3.242.399)	\$ (1.920.833)
11	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
12	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
13	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
14	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
15	\$ 1.321.566	\$ (3.242.398)	\$ (1.920.832)
16	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
17	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
18	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
19	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
20	\$ 1.321.566	\$ (3.242.397)	\$ (1.920.831)
21	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
22	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
23	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
24	\$ 1.321.566	\$ (100.000)	\$ 1.221.566
25	\$ 1.321.566	\$ (3.242.396)	\$ (1.920.830)
		VPN	\$ (6.056.287)
		TIR	(-%)

Fuente: Autor

Se observa en la tabla 11, que el VPN y el TIR para el tiempo de vida de los módulos (25 años) son negativos para este proyecto, lo que indica que no es viable ni rentable económicamente y por ahora es recomendable mantenerse conectado a la red eléctrica.

### **5.5 ANÁLISIS DE UN SISTEMA ELECTRÓGENO ACCIONADO POR GAS PROPANO CON RESPECTO AL PRECIO DE LA ENERGÍA CONVENCIONAL.**

Para el análisis se tiene en cuenta los flujos de caja, es decir las entradas y salidas del dinero. Para el sistema electrógeno, la entrada de dinero es el ahorro aparente que se realiza durante los años de su uso y las salidas es la inversión inicial y las inversiones al transcurso del tiempo, como el consumo de combustible y el mantenimiento.

Según la empresa Gasán SA empresa distribuidora de gas propano de Bucaramanga, el precio de la recarga de una pipeta de 100 Lbs de gas propano es aproximadamente COP\$121.200, con un valor por libra de COP\$1212/Lbs

El tiempo de uso del generador diariamente es de 5 horas con un promedio anual 1825 horas, y un valor de consumo de gas anual de COP 4'423.800.

Haciendo un resumen los parámetros son los siguientes.

- Precio actual de la libra de gas propano: COP\$ 1.212/lbs
- Consumo de gas por hora del generador: 2lbs/Hora
- Valor de consumo de gas por hora: COP\$ 2.424/hora
- Valor del consumo anual de gas: COP\$ 4'423.800.
- Inversión en el generador de gas propano: COP\$3'550.000
- Energía anual consumida: 2.786 kWh.
- Tipo de interés: 3.3%.

- Reversión en baterías: COP\$ 3'242.400, cada 5 años.
- Años de vida del proyecto: 25 (vida de los paneles).

En la siguiente tabla se calcula el Valor Presente Neto (VPN), y la Tasa Interna de Retorno (TIR) para el sistema electrógeno

Tabla 12. VPN, TIR Sistema electrógeno

VPN y TIR SISTEMA FOTOVOLTAICO			
Inversión.= 9.746.303		tasa de interés= 3,3 %	
Año	Entradas	Salidas	Flujo de caja
0	\$ -	\$ (9.746.303)	\$ (9.746.303)
1	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
2	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
3	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
4	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
5	\$ 1.321.566	\$ (3.242.400)	\$ (1.920.834)
6	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
7	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
8	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
9	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
10	\$ 1.321.566	\$ (3.242.399)	\$ (1.920.833)
11	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
12	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
13	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
14	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
15	\$ 1.321.566	\$ (3.242.398)	\$ (1.920.832)
16	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
17	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
18	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
19	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
20	\$ 1.321.566	\$ (3.242.397)	\$ (1.920.831)
21	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
22	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
23	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
24	\$ 1.321.566	\$ (4.423.800)	\$ (3.102.234)
25	\$ 1.321.566	\$ (3.242.396)	\$ (1.920.830)
		VPN	\$ (58.277.768)
		TIR	(-%)

Fuente: Autor

Se puede observar en la tabla 12, que el VPN y el TIR son negativos para el sistema electrógeno, se obtiene un resultado desfavorable debido principalmente al alto costo del consumo de gas anual, lo anterior, nos indica que no es viable la implementación de este sistema

## CAPITULO 6

En este capítulo se realiza una breve descripción de las conclusiones y recomendaciones del proyecto.

### 6.1 CONCLUSIONES

- Se diseñó un sistema híbrido de energía fotovoltaica para suministro eléctrico a una vivienda ubicada en la parte rural del municipio de la Mesa de los Santos, habitada por un promedio de seis a diez personas, para la cual:
- Se calculó la carga de energía diaria promedio para alimentar la vivienda de 7,63 kWh/día, esta potencia incluye todos los electrodomésticos y las dos motobombas de 1 y 2 caballos de fuerza.
- Se escogió la energía fotovoltaica como alternativa de alimentación eléctrica para la vivienda, aunque hay otras fuentes de energía, ésta es la energía más óptima para la ubicación, pues presenta un promedio de radiación de 4Kw/m<sup>2</sup> y de intensidad lumínica de 5 horas.
- Actualmente Colombia, no ha estipulado los términos de regulación para los pequeños autogeneradores, esta situación no permitió hacer una libre elección del sistema de generación más conveniente, es este caso, un sistema bidireccional de intercambio de energía entre el sistema fotovoltaico y la red. Al descartarse este sistema, se seleccionó un sistema fotovoltaico híbrido conectado a la red, con un solo día de autonomía y que la red se encargue de suministrar energía cuando el sistema fotovoltaico no posea la capacidad.
- Se tomó para el diseño fotovoltaico solamente un día de autonomía, las baterías dan confiabilidad, pero no es viable económicamente aumentarlas

para darle más días de autonomía al sistema, si se piensa en un futuro convertir este sistema híbrido en un sistema bidireccional más rentable.

- Para el sistema fotovoltaico híbrido, la selección de sus componentes fue:
  - ✓ Se escogió en total ocho (8) módulos fotovoltaicos policristalino marca ReneSola de 250W, para satisfacer la demanda de 7.633 Wh/día.
  - ✓ Se seleccionó ocho (8) baterías de marca CSB y referencia GLP 121000, con una capacidad de 100 Ah y tensión de 12V.
  - ✓ Se eligió un inversor híbrido modelo I-P-XDC-6000VA de la marca I-Panda, el cual tiene una potencia nominal de 4 kW, trae incorporado las funciones de regulador de carga, cargador de baterías, tener transferencia automática e invertir la corriente en DC a AC.
  - ✓ Se optó por un variador de velocidad de la línea CFW-10 (WEG) para disminuir los pico de arranque la bomba de con potencia 2HP.
- Si se analiza financieramente el sistema fotovoltaico con respecto a la energía convencional, el valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR) son negativos, lo que indica, que no es viable económicamente, ya que en los 25 años se tendrá que hacer un pago de COP\$6.056.287 adicional al valor inicial, recibos de la compañía eléctrica y mantenimiento. Sin embargo, si aumenta el valor del kWh de la red eléctrica por encima del valor del kWh producido por el sistema fotovoltaico, en esa condición es viable implementarlo.

- El análisis financiero con el sistema electrógeno arroja un valor desfavorable con VPN Y TIR negativos, dando como resultado un costo adicional aparte de la inversión y sin tener en cuenta el manteniendo de COP\$58.277.768 en los 25 años de vida del proyecto, debido principalmente, al alto costo del consumo de gas anual que es aproximadamente de COP 4'423.800. Lo anterior, nos indica que no es viable la implementación de este sistema.
- En resumen, el sistema de energía fotovoltaica trae mejores beneficios económicos y ambientales a futuro que el sistema electrógeno y por el momento, para este caso, se recomienda seguir conectado a la red hasta que los incentivos de ley y los estatutos para pequeños generadores convergen positivamente a un punto en que la inversión hecha se recupere a un corto tiempo y sea productivo implementar este tipo de tecnología.

## **6.2 RECOMENDACIONES**

- Realizar un estudio para optimizar el sistema de bombeo y así minimizar el costo de energía utilizado para su uso.
- Se le recomienda realizar un estudio de factibilidad con otra energía alternativa, por ejemplo la biomasa, utilizar los residuos orgánicos caseros para producir gas natural.
- La energía solar es un recurso muy variable y el sistema puede fallar, por esto se le recomienda al usuario hacer un control y uso eficientes de los consumos, para que así, sea también más eficiente el sistema.

## BIBLIOGRAFÍA

ARENAS SANTAMARÍA, Oscar Antonio; OVIEDO PINZÓN, Andrés Mauricio. Estudio técnico y financiero de implementación de paneles solares enfocado a centros comerciales, 2009, 133p. Trabajo de grado (Ingeniero electricista). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas.

CARTA GONZÁLES, José Antonio; CALERO PÉREZ, Roque. Centrales de energías renovables: generación eléctrica con energías renovables. España: Pearson Educación, 2009. 683p.

CASTELLS, Xavier; BORDAS, Santiago. Energías, agua, medioambiente territorial Y sostenibilidad. España: Ediciones Díaz de Satos, 2011. 975p.

COSS BU, Raúl. Análisis y evaluación de proyectos de inversión. México: Editorial limusa, 1998. 375p.

DOMINGUEZ, Pedro; Energía de la Biomasa. 2010, 130p. Trabajo de grado Maestría en (Ingeniería Eléctrica). Universidad Nacional Experimental Politécnica “Antonio José de Sucre”.

ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Energías renovables. El ABC de las energías renovables. México: Editorial limusa, 2014. 321p.

ENRIQUEZ HARPER, Gilberto. Tecnología de las energías renovables. México: Editorial limusa, 2009. 388p.

FERNÁNDEZ SALGADO, José. Compendio de energía solar: fotovoltaica, térmica, termoeléctrica. España: Editorial AMV Ediciones, 2010. 542p.

GONZÁLEZ VELASCO, Jaime. Energía renovable. España: Editorial Reverté, 2009. 656 p

GREUS SOLÉ, Antonio. Energías renovables / 2ª.edición. Colombia: Ediciones de la U de la U, 2014. 440 p.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGIA Y ESTUDIO AMBIENTAL y UNIDAD DE PLANEACIÓN MINERO ENERGÉTICA. Atlas de radiación solar de Colombia promedio multianual. Escala 1:7.000.000. Bogotá: IDEAM y UPME, 2005.

MÉNDEZ MUÑIZ, Javier María; CUERVO GARCÍA, Rafael. Energía solar fotovoltaica / 2ª.edición. España: Editorial fundación confemetal, 2007. 345p.

ORTEGA RODRIGUEZ, Mario. Energías renovables. España: Thomson Editores Spain, 2003. 327p.

PAREJA APARICIO, Miguel. Energía solar fotovoltaica. Cálculo de una instalación aislada. España: Editorial marcombo, 2010. 197p.

PARRA SILVA, Evert Fabián; OSORIO SANTOS, Jesús Enrique, Diseño y construcción de un sistema hibrido "grid tie" fotovoltaico casero con un consumo instantáneo máximo de 2000watt, 2014,183p. Trabajo de grado (Ingeniero mecánico). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías físico mecánicas.

PERALES BENITO, Tomás. Guía del instalador de energías renovables. Energía fotovoltaica, energía térmica, energía eólica y climatización. España: Editorial copyright, 2005. 254p.

RODRÍGUEZ, Hermenegildo. Ingeniería mecánica: Manual técnico para Instalación solar fotovoltaica para vivienda. [Internet] [Citado el 30 de Noviembre de 2016] Disponible en: <http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn192.html>

SÁNCHEZ MAZA, Miguel Ángel. Energía solar fotovoltaica. México: Editorial limusa, 2012. 313p.

SANTA GARCÍA, Sergio Andrés. Diseño de una instalación fotovoltaica autónoma para la finca Mis Delirios en Pereira-Colombia, 2014, 88p. Trabajo de grado Maestría en (Máster en Energías Renovables). Universidad Pública de Navarra.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. Energy information administration. [Citado el 20 de Enero de 2007]

VEGA DE KUYPER, Juan Carlos; RAMÍREZ MORALES, Santiago. Fuentes de energía, renovables y no renovables. México: Alfaomega Grupo Editor, 2014. 633p.

# **ANEXOS**