

DISEÑO DE UN EQUIPO AUTÓNOMO, PARA DETERMINAR ÍNDICES EN LA
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A PARTIR DE VARIABLES
CLIMATOLÓGICAS Y ESPECTROS DE RADIACIÓN

Carlos Alberto Astaiza Ordoñez
Carlos Felipe Gaviria Delgado

Universidad del Cauca
Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación
Ingeniería Física
Popayán
2017

DISEÑO DE UN EQUIPO AUTÓNOMO, PARA DETERMINAR ÍNDICES EN LA
PRODUCCIÓN DE ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA A PARTIR DE VARIABLES
CLIMATOLÓGICAS Y ESPECTROS DE RADIACIÓN

Carlos Alberto Astaiza Ordoñez
Carlos Felipe Gaviria Delgado

Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Físico

Esp. Edgar Leonairo Pencue Fierro
Msc. Rodrigo Alberto Montaña Fuentes

Universidad del Cauca
Facultad de Ciencias Naturales Exactas y de la Educación
Ingeniería Física
Popayán
2017

Nota de Aceptación

Director

Jurado

Jurado

Popayán, Cauca, 19 de septiembre de 2017

Introducción

La energía emitida por el sol, la cual incide en la superficie terrestre, es la fuente de los acontecimientos meteorológicos más importantes (vientos, lluvias, nubosidad, entre otros) que se presentan en el transcurso del año; la emisión de energía solar es un proceso físico, mediante el cual se transmite la energía en forma de ondas electromagnéticas a la superficie de la Tierra.

Esta energía es convertida por diferentes mecanismos para ser aprovechada por el ser humano, ya sea para calefacción o producción de energía eléctrica; actualmente este tipo de energía ha tenido un gran auge en el desarrollo e implementación de diversos sistemas para su aprovechamiento como lo son los sistemas para calentamiento de agua caliente sanitaria, cocción de alimentos y producción de energía eléctrica, este tipo de energías son alternativas ya que provienen de fuentes renovables que contribuyen a mitigar el impacto ambiental al no generan residuos tóxicos y contaminantes durante el proceso de transformación de la energía, actualmente las fuentes convencionales utilizadas para producción energética están generando grandes impactos ambientales ya que contaminan el planeta por los subproductos generados tras la transformación de energía y al ser de carácter no renovables han ido agotando las reservas de su fuente primaria como lo es los combustibles fósiles, el carbón y los afluentes hídricos.

En este trabajo de grado se abordará la transformación de la energía emitida por el sol para la producción de energía eléctrica, este proceso se realiza mediante la implementación de sistemas solares fotovoltaicos, los cuales basan su funcionamiento en los paneles solares y una serie de equipos que integran un sistema de gestión y almacenamiento de la energía producida; de igual manera se dará pie al desarrollo del ámbito investigativo de las variables climatológicas y el sensado del promedio de bandas de radiación solar incidente (infrarrojo, visible y ultravioleta), ya que el territorio colombiano cuenta con la cadena montañosa más importante de Latinoamérica (Cordillera de los Andes), la cual provoca en sus diferentes regiones la formación de microclimas, que modifican la incidencia de radiación solar directa en dichas zonas afectando la producción energética en cada región, de manera particular se dará a conocer el impacto de dichas variables en la ciudad de Popayán departamento del Cauca, donde se realizará este trabajo investigativo.

Se abordará en un primer capítulo las generalidades teóricas necesarias para comprender la temática desarrollada, un segundo capítulo donde se abordará la importancia de implementar un sistema de seguidor solar, seguido de un capítulo donde se dará a conocer la electrónica implementada para sensar y enviar dichos datos de manera remota para posteriormente finalizar desarrollando el capítulo donde se darán a conocer los resultados obtenidos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- ✓ Diseñar un equipo prototipo, de funcionamiento autónomo, para caracterizar la producción de energía Solar Fotovoltaica, a partir del sensado de algunas variables climatológicas y espectro de radiación solar incidente

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diseñar un equipo prototipo, de seguimiento solar, el cual permita observar el efecto producido por variables físicas, climatológicas y espectros de radiación solar en la producción de energía solar fotovoltaica
- Implementar una tarjeta electrónica para el control del seguidor solar, adquisición, almacenamiento y envío remoto de los datos sensados
- Realizar el análisis del comportamiento de las variables sensadas en relación a la producción de energía solar fotovoltaica

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente como consecuencia de la crisis energética generada a nivel mundial por el agotamiento de los recursos naturales utilizados para la producción de energía eléctrica, los países se han visto en la obligación de identificar alternativas que permitan que se siga contando con este recurso. En Colombia, la producción de energía primaria proviene principalmente de la hidroelectricidad debido a la abundancia de agua en la mayoría de zonas del país, (Centro Virtual de Noticias, Ministerio de Educación Nacional) [1]; sin embargo, la reducción del caudal de los ríos y la afectación de la flora y fauna generan un impacto negativo en el medio ambiente donde se desarrollan dichas explotaciones.

Adicionalmente, en segundo lugar se manejan los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón), cuyas reservas ya se están agotando (Centro Virtual de Noticias, Ministerio de Educación Nacional) [1], esto como consecuencia del incremento del mercado automotriz y el crecimiento industrial que ha generado la utilización de derivados de petróleo, cada vez en mayor cantidad, por lo que, según los pronósticos, para el año 2022 los depósitos no podrán abastecer la demanda (El tiempo, 2016)[2], por lo anterior es necesario desarrollar estrategias aprovechando fuentes no convencionales de energía, como la energía solar.

Es de tener en cuenta que el Congreso Colombiano buscando minimizar los efectos a causa de la disminución de recursos manejados actualmente en la producción de energía y buscando generar fuentes para producción de energía amigable con el ambiente, ha dirigido sus esfuerzos hacia el aprovechamiento de las fuentes renovables como medio indispensable para un desarrollo económico sostenible, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la seguridad del abastecimiento energético; aspectos establecidos en la ley 1715 de 2014, en la cual, además, se fomenta inversión, investigación y desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía, la eficiencia energética y la respuesta a la demanda actual del mercado, que se establecen en el marco de la política energética nacional. (Congreso de Colombia, 2014)[3].

Una de las formas de producción de energía implementada y que ha tenido mayor auge a nivel mundial corresponde a la energía fotovoltaica, siendo considerada como energía limpia que permite un desarrollo sostenible; con esta implementación en Colombia, además de realizar aprovechamiento de los recursos naturales, se permitirá la disminución del efecto invernadero, adicionalmente se favorecerá el acceso paulatino a los sectores rurales que actualmente no se encuentran conectados con la red y permitirá la sustitución de las energías no renovables por las amigables con el medio ambiente para ser utilizada como medio efectivo de producción de energía evitando la ausencia del suministro energético.

JUSTIFICACIÓN

Las energías renovables, en la actualidad juegan un papel importante ya que se buscan establecer métodos alternativos de producción de energía eléctrica que puedan suplir la demanda en la actualidad, se evidencia que aún no se han desarrollado las técnicas adecuadas que permitan que las fuentes no convencionales de energía, como la fotovoltaica, sean competitivas frente a las fuentes convencionales de producción energética, debido a que no se cuenta con sistemas que estén encaminados a determinar los diferentes factores que puedan afectar la cantidad de energía producida a partir la radiación solar, así mismo quienes se han inclinado por realizar dichos estudios han relacionado la cantidad de energía producida con sistemas de seguimiento solar como factor primordial, dejando de lado las demás variables climatológicas que pueden impactar positiva o negativamente en el proceso de producción energético.

Actualmente, no existe en Colombia un método de control que permita determinar la producción en SSFV (Sistemas Solares Fotovoltaicos), por lo cual se plantea el diseño de una tarjeta electrónica capaz de realizar el sensado de variables climatológicas y espectro de radiación solar incidente, al mismo tiempo que se realice el sensado de la producción de potencia del módulo fotovoltaico, permitiendo establecer parámetros de diseño para futuras instalaciones fotovoltaicas y seguimiento en la producción de energía solar sobre sistemas que se encuentran ya instalados, dando certeza del recurso disponible, es decir, monitoreando la cantidad de energía que está sobrando o la cantidad de energía faltante para suplir la necesidad energética para la cual se ha implementado dicho sistema. Es un desarrollo en tecnología para el monitoreo en tiempo real que permita gestionar la producción en SSFV, al mismo tiempo que permite registrar pérdida de potencia generada por variables climatológicas.

Tabla de Contenidos

Introducción	iv
OBJETIVOS	v
OBJETIVO GENERAL.....	v
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	v
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	vi
JUSTIFICACIÓN	vii
 Capítulo 1: ENERGIA SOLAR	 1
1.1 Introducción	1
1.2 La Energía del Sol.....	1
1.3 Panel Solar Fotovoltaico	2
1.3.1 Celdas Monocristalinas	3
1.3.2 Celdas Policristalinas	4
1.3.3 Factores de Eficiencia de una Celda Solar.....	4
1.3.3.1 Punto de Máxima Potencia	4
1.3.3.2 Eficiencia en la Conversión de Energía.....	5
1.3.3.3 Factor de Llenado	5
1.3.3.4 Temperatura de Operación Nominal de la Celda (TONC).....	6
1.3.4 Principio de Funcionamiento del Módulo Fotovoltaico	6
1.3.5 Uso de las Celdas Fotovoltaicas Solares.....	7
1.4 Acumulador de Carga o Batería Solar	8
1.4.1 Funcionamiento del Acumulador de Carga o Batería Solar	8
1.4.2 Tipos de Acumuladores de Carga o Baterías Solares	9
1.4.2.1 Baterías Líquidas	9
1.4.2.2 Baterías VRLA.....	9
1.4.2.2.1 Baterías de Gel.....	9
1.4.2.2.2 Baterías Tipo AGM.....	10
1.5 Controlador de Carga o Regulador de Energía Solar.....	10
1.5.1 Fase Bulk	11

1.5.2 Fase Absorción.....	11
1.5.3 Fase Flotación	11
1.5.4 Cargas DC Conectadas al Controlador de Carga o Regulador	12
1.5.5 Tipos de Controladores de Carga o Reguladores de Energía Solar	12
1.5.5.1 Controladores de Carga o Reguladores PWM.....	12
1.5.5.2 Controladores de Carga o Reguladores MPPT	13
1.6 Movimiento Solar	13
1.6.1 Movimiento de Rotación.....	14
1.6.2 Movimiento de Translación	15
1.7 Orientación e Inclinación de Módulos Solares	15
1.7.1 Ángulo de Inclinación (β).....	16
1.7.2 Ángulo de Azimut (α)	16
1.7.3 Declinación (δ).....	17
1.7.4 Ángulo de Elevación Solar (γ_s)	18
1.7.5 Ángulo Acimut Solar (ψ_s)	19
1.7.6 Ángulo Cenital (θ_{zs})	19
1.8 Seguidor Solar.....	20
1.8.1 Seguimiento Ecuatorial.....	20
1.8.2 Seguimiento Acimutal	21
 Capítulo 2: DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR.....	 22
2.1 Introducción	22
2.2 Requerimientos del Sistema.....	22
2.2.1 Movimiento en dos Ejes.....	22
2.2.2 Autonomía del Sistema	23
2.2.3 Ahorro Energético.....	23
2.2.4 Estructura Resistente y Duradera de Bajo Costo	23
2.2.5 Estructura Modular	23
2.3 Selección del Seguidor Solar	23
2.4 Estructura del Seguidor Solar	24

	x
2.4.1 Marco del Panel Fotovoltaico	24
2.4.2 Cuerpo del Seguidor Solar	25
2.4.3 Cajas de Movimiento	26
2.4.4 Base de Apoyo	30
2.5 Limitaciones en el Movimiento de Latitud y Longitud del Seguidor Solar	32
2.5.1 Instrumentación Utilizada para Definir los Ángulos Límites	32
2.5.2 Conexión Acelerómetro MPU6050 - Arduino Mega.....	32
2.5.2.1 Código de Programación en Arduino para el Sensor MPU6050	33
2.6 Definición del Ángulo Limitante para el Seguidor Solar en Dos Ejes	35
2.7 Control Automático del Seguidor Solar.....	36
2.7.1 Tarjeta Arduino Mega 2560.....	36
2.8 Requerimientos del Sistema.....	38
2.8.1 Auto-Posicionamiento Diario	38
2.8.2 Reposicionamiento Diario	38
2.8.3 Referencia de Hora	38
2.8.4 Limitación en la Inclinación del Seguidor	39
2.9 Instrumentación Utilizada.....	39
2.9.1 Modulo DS1302.....	39
2.9.1.1 Conexión Módulo DS1302 – Arduino Mega.....	40
2.9.2 Modulo L298N.....	40
2.9.2.1 Conexión Módulo L298N	40
2.10 Código de Control Automático del Seguidor Solar en Arduino	41
2.10.1 Auto-Posicionamiento del Seguidor Solar por Diferencia de Intensidades de Luz.....	42
2.10.2 Auto-posicionamiento del Seguidor Solar a una Posición Inicial en Arduino	44
 Capítulo 3: SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS	 45
3.1 Introducción	45
3.2 Equipos Utilizados en la Instalación del SSFV	45
3.2.1 Modulo Solar	45
3.2.2 Controlador de Carga.....	46

	xi
3.2.3 Acumulador o Batería.....	47
3.3 Conexión Eléctrica Del SSFV.....	48
3.4 Sensores	50
3.4.1 Sensor de Voltaje	51
3.4.2 Sensor de Corriente ACS712	52
3.4.3 Sensor HTU21D.....	55
3.4.4 Sensor LM35.....	56
3.4.5 Sensor UVM30A	58
3.4.6 Fotodiodo TEFD4300	59
3.4.7 Fotodiodo TEFD4300F.....	60
3.5 Almacenamiento de Datos	61
3.6 Primer Encendido de la Raspberry Pi	63
3.7 Conexión a Internet de la Raspberry Pi	64
3.7.1 Conexión por Cable Ethernet.....	64
3.8 Programación de la Raspberry Pi.....	65
3.8.1 Carga e Instalación de Librerías	65
3.8.2 Descripción del Algoritmo de Programación	66
3.9 Conexión Remota de la Raspberry Pi desde una Red Local.....	67
Capítulo 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	70
4.1 Análisis en la Producción de Potencia en el Módulo Fotovoltaico	70
4.2 Relación entre Potencia y Temperatura	73
4.2.1 Temperatura en Modulo Fotovoltaico	76
4.3 Relación entre Potencia y Humedad Relativa.....	78
4.4 Relación entre Potencia y Espectro de Radiación Solar Incidente	81
4.5 Análisis de Sistema Solar Fotovoltaico Fijo y Móvil	83
CONCLUSIONES	89
REFERENCIA.....	90
ANEXOS	98

Lista de Tablas

Tabla 1. Especificaciones Técnicas Placa Arduino Mega 2560. [26].....	37
Tabla 2. Características Técnicas Modulo Solar SGM-80.....	46
Tabla 3. Características Técnicas Controlador de Carga PRS 1515.....	47
Tabla 4. Características Técnicas Acumulador MA120-12.....	47
Tabla 5. Consumos del SSFV.....	48
Tabla 6. Características Técnicas para Instalación del SSFV.....	49
Tabla 7. Relación entre Temperatura Ambiente y Potencia SSFV Fijo.	76
Tabla 8. Relación entre Temperatura Ambiente y Potencia SSFV Móvil.....	76
Tabla 9. Relación entre Potencia y Humedad Relativa.....	81

Lista de Figuras

Figura 1. Celdas Solares.	3
Figura 2. Movimiento de Rotación.	14
Figura 3. Ángulo de Inclinación (β).	16
Figura 4. Ángulo de Azimut (α).	17
Figura 5. Declinación Solar (δ).	17
Figura 6. Coordenadas Solares.	18
Figura 7. Inclinación y Orientación Solar.	20
Figura 8. Marco del Panel Fotovoltaico Modelado en 3D.	24
Figura 9. Juntura Tipo Cardan Modelado en 3D.	25
Figura 10. Cuerpo del Seguidor Modelado en 3D.	26
Figura 11. Acople Motor- Piñón Modelado en 3D.	27
Figura 12. Acople Piñón- Eje Roscado Modelado en 3D.	28
Figura 13. Vista Interna Acople Motor-Piñón y Piñón-Eje Roscado.	28
Figura 14. Vista Externa Caja de Movimiento Modelada en 3D.	29
Figura 15. Vista Lateral Caja de Movimiento Modelada en 3D.	29
Figura 17. Base de Apoyo Modelada en 3D.	31
Figura 18. Seguidor Solar Modelado en 3D.	31
Figura 19. Sensor MPU6050 6DOF IMU.	32
Figura 20. Ángulos Límites de Inclinación del Seguidor Solar.	35
Figura 21. Puertos y Componentes Electrónicos de la Tarjeta Arduino Mega 2560.	37
Figura 22. Módulo RTC. Módulo De Reloj de Tiempo Real.	39
Figura 23. Módulo L298N. Módulo de controlador de doble puente H.	40
Figura 24. Diagrama de Conexión Del SSFV.	50
Figura 25. Sensor de Voltaje.	51
Figura 26. Calibración Sensor de Voltaje.	52
Figura 27. Sensor de Corriente.	53
Figura 28. Calibración Sensor de Corriente.	53
Figura 29. Sensor HTU21D.	55
Figura 30. Sensor LM35.	56

Figura 31. (a) Sensor LM35 Vidrio (b) Sensor LM35 EVA.....	57
Figura 32. Sensor UVM30A.....	58
Figura 33. Sensores TEFD4300.....	59
Figura 34. Respuesta Fotodiodo TFD4300.....	59
Figura 35. Fotodiodo TFD4300F.....	60
Figura 36. Respuesta Fotodiodo TFD4300F.....	60
Figura 37. Componentes y Puertos de la Tarjeta Raspberry Pi Modelo B.	62
Figura 38. Conexión de la Raspberry Pi al Router Mediante Conexión Ethernet.	64
Figura 39. Datos Registrados Mediante el Programa Implementado.	67
Figura 40. Potencia, Corriente vs Tiempo, Abril 18, a 25°C y 73% HR. SSFV Fijo.....	70
Figura 41. Potencia, Voltaje vs Tiempo, Abril 18, a 25°C y 73% HR. SSFV Fijo.	71
Figura 42. Corriente, Potencia vs Tiempo, Mayo 24, a 28°C y 58% HR. SSFV Móvil.....	71
Figura 43. Voltaje, Potencia vs Tiempo, Mayo 24, a 28°C y 58% HR. SSFV Móvil.....	72
Figura 44. Temperaturas, Potencia vs Tiempo, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.	73
Figura 45. Temperaturas vs Potencia, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.	74
Figura 46. Temperatura, Potencia vs Tiempo, Junio 6, a 29°C y 42% HR. SSFV Móvil.....	74
Figura 47. Temperatura vs Potencia, Junio 6, a 29°C y 42% HR. SSFV Móvil.	75
Figura 48. Temperatura en Panel, Junio 10, 25 °C, 77% HR.	77
Figura 49. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo. ..	79
Figura 50. Potencia vs Humedad Relativa, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.....	79
Figura 51. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Mayo 18, a 26°C y 71% HR. SSFV Móvil.80	
Figura 52. Potencia vs Humedad Relativa, Mayo 18, a 26°C y 71% HR. SSFV Móvil.	80
Figura 53. IR, Visible, UV, Humedad Relativa vs Tiempo, Junio 10, a 25°C y 77% HR. SSFV Móvil.....	82
Figura 54. IR, Visible, UV, Humedad Relativa vs Tiempo, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.	82
Figura 55. Producción de Potencia en Sistema Fijo 23 de Mayo y Sistema Móvil 24 de Mayo..	85
Figura 56. Producción de Potencia en Sistema Fijo 11 de Junio y Sistema Móvil 17 de Junio. ..	85
Figura 57. Producción de Potencia en torno al % de Humedad Relativa.	86
Figura 58. Producción de Potencia en Sistema Fijo y Móvil.....	87

Lista de Códigos

Código 1. Obtención del Valor del Ángulo de Inclinación del Panel Solar.	34
Código 2. Función Acelerómetro.	35
Código 3. Función Redondeo.	35
Código 4. Funciones Principales para el Posicionamiento Automático del Seguidor Solar.....	42
Código 5. Función Motores I.....	44
Código 6. Función Motores II.....	44
Código 7. Función Noche.....	45
Código 8. Función Promedio.....	55

Lista de Anexos

Anexo 1. Potencia, Voltaje vs Tiempo, Mayo 8, a 21°C y 86% HR. SSFV Fijo.....	98
Anexo 2. Potencia, Corriente vs Tiempo, Junio 11, a 26°C y 73% HR. SSFV Fijo.....	99
Anexo 3. Temperatura, Potencia vs Tiempo, Mayo 20, a 24°C y 76% HR. SSFV Fijo.....	99
Anexo 4. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Junio 9, a 24°C y 76% HR. SSFV Fijo.....	100
Anexo 5. Espectro, Potencia vs Tiempo, Junio 7, a 23°C y 82% HR. SSFV Fijo.....	100
Anexo 6. Potencia, Voltaje vs Tiempo, Mayo 16, a 25°C y 74% HR. SSFV Móvil.....	101
Anexo 7. Potencia, Corriente vs Tiempo, Junio 8, a 22°C y 83% HR. SSFV Móvil.....	101
Anexo 8. Temperatura, Potencia vs Tiempo, Mayo 15, a 25°C y 74% HR. SSFV Móvil.....	102
Anexo 9. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Junio 6, a 29°C y 42% HR. SSFV Móvil...	102
Anexo 10. Espectro, Potencia vs Tiempo, Mayo 18, a 25°C y 72% HR. SSFV Móvil.....	103

Capítulo 1: ENERGIA SOLAR

1.1 Introducción

La energía solar es la energía producida por el sol, la cual es convertida a energía útil por el ser humano, ya sea para calentar algo o producir electricidad, de igual manera la energía proveniente del sol es la fuente de los procesos biológicos como la fotosíntesis; en este capítulo se dará a conocer las pautas más importantes para comprender su utilización en sistemas que aprovechan la incidencia de la radiación solar para la producción de energía eléctrica.

1.2 La Energía del Sol

La energía solar resulta del proceso de fusión nuclear que tiene lugar en el sol. Esta energía es transferida al espacio exterior en forma de radiación electromagnética. Por su comportamiento ondulatorio y corpuscular, la radiación se propaga en forma de ondas electromagnéticas, estas ondas no necesitan un medio material para propagarse, pueden atravesar el espacio interplanetario y llegar a la Tierra desde el Sol. La frecuencia de las ondas electromagnéticas, es importantes para determinar su energía, su visibilidad y su poder de penetración. El conjunto de las longitudes de onda emitidas por el Sol se denomina espectro solar, la proporción de la radiación solar en las distintas regiones del espectro es aproximadamente: Ultravioleta: 7%, Luz visible: 43%, Infrarrojo: 49%, y el resto: 1% (MARM, 2015) [4].

El espectro solar, no llega directamente a la superficie terrestre puesto que la atmósfera del planeta Tierra refleja alrededor del 30% de la radiación, absorbe un 20% y tan solo el 50% llega a la superficie de la Tierra [5], aunque relativamente llega "poco" porcentaje de radiación solar, es suficiente cantidad de energía que puede llegar a ser hasta 170 millones [5] de veces mayor que la energía producida por las plantas de producción de energía más grandes del mundo.

En la actualidad, la energía proveniente del sol es aprovechada de diversas formas por la humanidad para suplir sus necesidades básica; actualmente, se pueden encontrar hornos solares, en los cuales la luz proveniente del sol es empleada para la cocción de alimentos,

mediante la implementación de espejos cóncavos y planos que concentran la luz del sol; de la misma manera, la energía solar es aprovechada para la calefacción y el calentamiento de agua caliente sanitaria. Los rayos solares que inciden sobre la superficie terrestre calientan el agua fría, la cual pasa a través de paneles cerrados llamados colectores, estos funcionan como radiadores, absorbiendo el calor de la radiación solar incidente para calentar el agua y dar calefacción al interior de los hogares. En la actualidad la mayor parte de la energía requerida por un hogar es de tipo eléctrica, por tal motivo, la implementación de celdas fotovoltaicas representa una relación costo beneficio favorable a la economía del usuario, al mismo tiempo que contribuye a la conservación del medio ambiente, ya que no genera subproductos tóxicos en la producción de energía eléctrica, estos sistemas utilizan el fenómeno fotoeléctrico para producir energía, donde una fotocelda única genera una tensión débil, es por esto que varias fotoceldas tienen que ser unidas, para formar así un panel solar fotovoltaico. La mayor parte de la energía que requiere un hogar promedio podría ser producida desde paneles solares, donde la corriente eléctrica generada puede ser utilizada para cargar baterías, las cuales posteriormente alimenten las cargas eléctricas que se emplean en el hogar.

1.3 Panel Solar Fotovoltaico

Uno de los mejores inventos, que contribuye a la ecología y conservación del planeta, son módulos que usan la energía que proviene de la radiación solar para la producción de energía eléctrica, lo que los convierte en una fuente alternativa para suplir la demanda energética de la actualidad, ayudando a la conservación del medio ambiente y preservando los recursos naturales. Se componen de celdas que convierten la luz en electricidad, dichas celdas basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico, mediante el cual la energía luminosa produce cargas positivas y negativas en dos semiconductor próximos de distinto tipo, por lo que se produce un campo eléctrico con la capacidad de generar corriente. El parámetro estandarizado para clasificar su potencia se denomina potencia pico, que corresponde a la potencia máxima que el módulo puede entregar bajo unas condiciones estandarizadas, tales como radiación incidente de $1000\text{W}/\text{m}^2$ [6] y temperatura de celda de 25°C [6]; cabe aclarar que esta temperatura no es la temperatura del ambiente, si no la

temperatura a la cual se encuentra la celda. Dependiendo de la naturaleza y pureza del compuesto del cual se encuentren hechas dichas celdas se puede clasificar en dos grupos principalmente, celdas monocristalinas y celdas policristalinas.

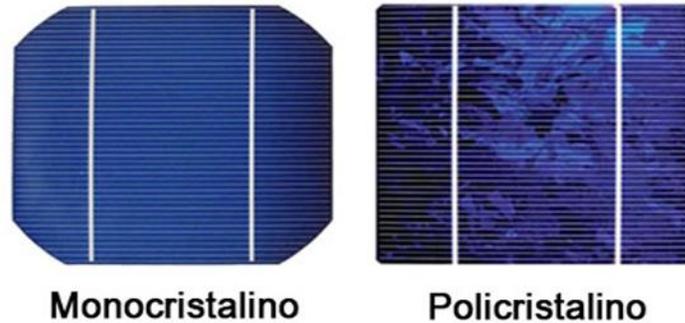


Figura 1. Celdas Solares.

[Imagen] [6].

1.3.1 Celdas Monocristalinas

Las celdas solares de silicio monocristalino (mono-Si), son bastante fáciles de reconocer por su coloración y aspecto uniforme (ver Figura 1), que indica una alta pureza en silicio. Se fabrican de bloques de silicio o lingotes, que en un comienzo son de forma cilíndrica para garantizar que el crecimiento del lingote sea lo más homogéneo posible, con el fin de optimizar el rendimiento y reducir los costes de producción de la celda, se recortan los cuatro lados de los bloques cilíndricos para hacer láminas hexagonales, lo cual les da su apariencia característica; los paneles solares fabricados con este tipo de celdas tienen mayor tasa de eficiencia puesto que se fabrican con silicio de alta pureza, su eficiencia está por encima de 15% [6] y algunas marcas superan el 21% [6]. La vida útil de paneles solares fabricado con este tipo de celdas es mayor, de hecho algunos de sus fabricantes ofrecen garantías hasta de 25 años [6], esto debido a que pueden funcionar de manera óptima, aún bajo condiciones de poca luz. Su coste es mayor que otros paneles fabricados con otro tipo de celdas.

1.3.2 Celdas Policristalinas

A diferencia de los paneles monocristalinos, en su fabricación no se emplea el método Czochralski, el silicio en bruto se funde y se vierte en un molde cuadrado el cual luego es enfriado y posteriormente cortado en láminas cuadradas (ver Figura 1). Debido a su proceso de fabricación, el costo de este tipo de paneles es menor que el de los monocristalinos, y su eficiencia se sitúa típicamente entre el 13% y 16% [6], debido a la pureza del material con el cual son fabricados.

1.3.3 Factores de Eficiencia de una Celda Solar

1.3.3.1 Punto de Máxima Potencia

Una placa o celda solar puede operar en un amplio rango de voltajes e intensidades de corriente, esto puede lograrse variando la resistencia de la carga, en el circuito eléctrico, por una parte, y por la otra variando la impedancia de la célula desde el valor cero (valor de cortocircuito) a valores muy altos (circuito abierto) y se puede determinar el punto de potencia máxima teórica, es decir, el punto que maximiza el voltaje y el tiempo frente a intensidad de corriente producida, o lo que es lo mismo, la carga para la cual la célula puede entregar la máxima potencia eléctrica para un determinado nivel de radiación. El punto de potencia máxima de un dispositivo fotovoltaico varía con la iluminación incidente, para sistemas bastante grandes se puede justificar un incremento en el precio con la inclusión de dispositivos que midan la potencia instantánea por medida continua del voltaje y la intensidad de corriente (y de ahí la potencia transferida), y usar esta información para ajustar, de manera dinámica, y en tiempo real, la carga para que se transfiera siempre la máxima potencia posible, a pesar de las variaciones de luz que se produzcan durante el día.

1.3.3.2 Eficiencia en la Conversión de Energía

La eficiencia de una celda solar (η), es el porcentaje de potencia convertida en energía eléctrica del total de la luz solar absorbida por el modulo fotovoltaico, este término se calcula usando la relación del punto de potencia máxima (P_m , en W), dividido entre la irradiancia (E , en W/m^2), bajo condiciones estándar (STC) y el área superficial de la célula solar (A_c , en m^2).

$$\eta = \frac{P_m}{E * A_c} \quad (1)$$

La STC especifica una temperatura de 25 °C [7] y una irradiancia de 1000 W/m^2 [7] con una masa de aire de 1,5 (AM 1,5) [7], esto corresponde a la irradiación y espectro de la luz solar incidente en un día claro sobre la superficie del módulo solar, la cual se encuentra inclinada con respecto al sol con un ángulo de 41,81° [7] sobre la horizontal; esta condición representa, aproximadamente, la posición del sol de mediodía en los equinoccios de primavera y otoño; de esta manera, bajo estas condiciones una celda solar típica de 100 cm^2 , y de una eficiencia del 12%, aproximadamente, se espera que pueda llegar a producir una potencia de 1,2(W) vatios. [7]

1.3.3.3 Factor de Llenado

Otro término para definir la eficacia de una celda solar es el factor de llenado (FF), mediante el cual se determina la potencia máxima que puede producir una celda solar. Está definido como la relación entre el punto máximo de potencia dividido entre el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) y la corriente en cortocircuito I_{sc} ,

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} * I_{sc}} = \frac{A_c * E * \eta}{V_{oc} * I_{sc}} \quad (2)$$

1.3.3.4 Temperatura de Operación Nominal de la Celda (TONC)

Temperatura de Operación Nominal de la Celda, definida como la temperatura que alcanzan las células solares cuando se somete el módulo a una irradiancia de 800 W/m² [7] con distribución espectral AM 1,5 G [7], temperatura ambiente de 20 °C [7] y velocidad del viento de 1 m/s [7]. Este parámetro es importante para el diseño e implementación de SSFV en lugares donde se alcancen temperaturas ambiente por encima de los 30 grados centígrados, ya que representa la temperatura a partir de la cual la celda entrara en saturación debido al aumento de temperatura, y comenzara a tener pérdidas en la producción de potencia, de acuerdo a las especificaciones manifestadas por el fabricante.

1.3.4 Principio de Funcionamiento del Módulo Fotovoltaico

Los módulos fotovoltaicos funcionan, como se ha dejado entrever en el anterior apartado, por el efecto fotoeléctrico. Cada celda fotovoltaica está compuesta de, al menos, dos delgadas láminas de silicio, una dopada con elementos con menos electrones de valencia que el silicio, denominada P y otra con elementos con más electrones que los átomos de silicio, denominada N; aquellos fotones procedentes de la fuente luminosa que presentan energía adecuada inciden sobre la superficie de la capa P, y al interactuar con el material liberan electrones de los átomos de silicio, los cuales, en movimiento, atraviesan la capa de semiconductor, pero no pueden volver; la capa N adquiere una diferencia de potencial respecto a la P. Si se conectan unos conductores eléctricos a ambas capas y estos, a su vez, se unen a un dispositivo o elemento eléctrico consumidor de energía que, usualmente y de forma genérica se denomina carga, se iniciará una corriente eléctrica continua. Este tipo de paneles producen electricidad en corriente continua y aunque su efectividad depende tanto de su orientación hacia el sol como de su inclinación con respecto a la horizontal de la superficie donde se realiza la instalación. La celda solar más usual está fabricada en silicio y configurada como una gran área de unión P-N una simplificación de este tipo de placas puede considerarse como una capa de silicio de tipo N directamente en contacto con una capa de silicio de tipo P. En la práctica, las uniones P-N, de las células solares no están

hechas de la manera anterior, más bien, se elaboran por difusión de un tipo de dopante en una de las caras de una oblea de tipo P, o viceversa, si la pieza de silicio de tipo P es ubicada en íntimo contacto con una pieza de silicio de tipo N, tiene lugar la difusión de electrones de la región con altas concentraciones de electrones (la cara de tipo N de la unión) hacia la región de bajas concentraciones de electrones (cara tipo P de la unión); cuando los electrones se difunden a través de la unión P-N, se recombinan con los huecos de la cara de tipo P, sin embargo, la difusión de los portadores no continua indefinidamente. Esta separación de cargas, que la propia difusión crea, genera un campo eléctrico provocado por el desequilibrio de las cargas parando, inmediatamente, el flujo posterior de más cargas a través de la unión; el campo eléctrico establecido a través de la creación de la unión P-N crea un diodo que permite el flujo de corriente en un solo sentido a través de dicha unión, los electrones pueden pasar del lado de tipo N hacia el interior del lado P, y los huecos pueden pasar del lado de tipo P hacia el lado de tipo N, esta región donde los electrones se han difundido en la unión se llama región de agotamiento, porque no contiene nada más que algunos portadores de carga móviles; es también conocida como la región de espacio de cargas.

1.3.5 Uso de las Celdas Fotovoltaicas Solares

Su aparición en el mercado se debe principalmente a la industria aeroespacial, y se han convertido en el medio más fiable de suministrar energía eléctrica a un satélite o a una sonda en las órbitas interiores del Sistema Solar, esto es gracias a la mayor irradiación solar sin el impedimento de la atmósfera y a su bajo peso; en tierra, son la fuente solar más popular en instalaciones pequeñas o en edificios, experimentalmente han sido usados para cargar baterías y proporcionar energía a yates y vehículos terrestres; de la misma manera que han sido utilizados para alimentar sistemas en regiones donde no cuentan con acceso a la red eléctrica, como las estaciones repetidoras de microondas y de radio, incluyendo acceso a internet, electrificación de pueblos en áreas remotas (electrificación rural), instalaciones médicas en áreas rurales, sistemas de vigilancia de datos ambientales y de calidad del agua, bombeo para sistemas de riego, señalización ferroviaria, postes SOS (Teléfonos de emergencia de carretera), en fin, múltiples usos que día a día cobran más

importancia en la implementación de este tipo de tecnologías para la generación de energía eléctrica, aunque sin duda alguna aún queda mucho por avanzar en la tecnología de los paneles solares, especialmente en materia de eficiencia, pero esta energía es considerada una de las fuentes energéticas más limpias existentes hoy día, y cada vez se hace más competitiva frente a otros tipos de energías, lo que augura un gran desarrollo en la industria de paneles solares en el futuro.

1.4 Acumulador de Carga o Batería Solar

Gran parte del consumo de energía eléctrica se dan en horas de la noche, es por ello que se debe almacenar la energía producida durante las horas de brillo solar, para poder ser utilizada cuando se requiera. Un componente importante en una instalación aislada de energía fotovoltaica, que se encarga de almacenar la energía solar para que pueda ser utilizada en la noche o durante períodos prolongados de mal tiempo, es la batería solar o también llamado acumulador de carga, los cuales suministran una intensidad de corriente mayor a la que produce el modulo solar, para suplir la necesidad de potencia que requiera la carga que esté conectada al sistema solar fotovoltaico.

1.4.1 Funcionamiento del Acumulador de Carga o Batería Solar

El funcionamiento de un acumulador o batería solar consiste en un “arreglo de celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en energía eléctrica” [8], cada celda consta de un electrodo positivo y un electrodo negativo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente fluya fuera de la batería. Durante el día el panel solar fotovoltaico recibe la radiación proveniente del sol y la convierte en energía eléctrica, que a su vez es suministrada a los equipos electrónicos que estén conectados al sistema solar fotovoltaico, donde el excedente de energía de este consumo es almacenada en la batería de la instalación del sistema; en la noche, como se presenta ausencia de la incidencia de los rayos solares, las cargas no pueden ser alimentadas directamente del arreglo fotovoltaico, por lo cual la batería suministra la electricidad de acuerdo al requerimiento de las cargas. En sistemas solares

fotovoltaicos aislados el almacenamiento de energía solar mediante baterías es importante para garantizar que las cargas funcionen aún si se presentan días de baja incidencia de radiación solar, así, como también en las noches, donde no se genera producción de energía solar fotovoltaica.

1.4.2 Tipos de Acumuladores de Carga o Baterías Solares

En el mercado existen diferentes tipos de acumuladores solares, los más comunes en aplicaciones en sistemas solares fotovoltaicos son los fabricados con plomo, que pueden ser baterías líquidas o de tipo VRLA.

1.4.2.1 Baterías Líquidas

Este tipo de batería tiene una mayor capacidad de almacenamiento, se les conoce con el nombre de baterías líquidas porque están diseñadas para funcionar y resistir altas temperaturas. Para que el electrolito y electrodos cambien a estado líquido es necesario aplicar alrededor de 500 grados centígrados [9], además de ser muy económicas, presentan menos problemas cuando se sobrecargan.

1.4.2.2 Baterías VRLA

La batería VRLA (Valve Regulated Lead Acid battery) regulada por válvula es otro tipo de batería de plomo recargable, no se encuentran completamente selladas pero contienen una tecnología que recombinan el oxígeno e hidrógeno que sale de las placas durante la carga y así eliminan la pérdida de agua si no son sobrecargadas, éstas a su vez se dividen en baterías de Gel y baterías tipo AGM.

1.4.2.2.1 Baterías de Gel

Como su nombre lo indica, el ácido que contiene está en forma de gel, lo que impide que se pierda líquido. Algunas ventajas de este tipo de batería son: funcionan en cualquier

posición, se reduce la corrosión, son resistente a temperaturas bajas y su vida útil es mayor que en las baterías líquidas; entre sus desventajas está que son muy delicadas para cargar y su precio es mucho mayor que los anteriores tipos de baterías mencionados.

1.4.2.2 Baterías Tipo AGM

Cuentan con una malla de fibra de vidrio entre las placas de la batería, que sirve para contener el electrolito, este tipo de batería es muy resistente a bajas temperaturas, su eficiencia es de 95% [9], puede funcionar a alta corriente y en general tiene una buena relación costo por vida útil. En sistemas solares, las baterías tienen que dar la energía sobre un tiempo relativamente largo y frecuentemente se descargan a niveles más bajos, este tipo de baterías de ciclo profundo tienen capas de plomo gruesas que además brindan la ventaja de prolongar su vida significativamente, son relativamente grandes y pesadas por el plomo, compuestas de celdas de 2 voltios [9] que se juntan en serie para lograr baterías de 6, 12 o más voltios.

1.5 Controlador de Carga o Regulador de Energía Solar

Un controlador de carga o regulador de energía solar se encarga de controlar el flujo de energía que circula entre el módulo fotovoltaico y el acumulador o batería, controlando constantemente su estado de carga para hacer el llenado óptimo y así alargar su vida útil. Este control del flujo de energía se realiza mediante los parámetros de intensidad o corriente (I) y Voltaje (V) que se inyecta en la batería. El flujo de energía depende del estado de carga de las baterías y de la energía generada por el módulo fotovoltaico.

Existen tres fases de carga posibles para el llenado de los acumuladores.

1.5.1 Fase Bulk

En esta fase el acumulador está descargado y toda la corriente producida en el panel fotovoltaico es inyectada en el acumulador, incrementándose la tensión a medida que ésta se va llenando.

1.5.2 Fase Absorción

Cuando el acumulador alcanza la tensión de absorción (en los acumuladores de plomo-ácido abiertas 14,4V [10] y en acumuladores AGM y GEL 14,1V [10]), el regulador de carga solar mantiene la tensión ligeramente por debajo de dicho valor y va reduciendo la corriente hasta que la batería esté prácticamente llena.

1.5.3 Fase Flotación

En la fase de flotación, la tensión se reduce generalmente a los 13,5 V [10] y la corriente inyectada se reduce hasta que el acumulador se llena por completo, toda la energía que se genere mayor a la energía que es posible inyectar se pierde por efecto Joule (calor) en el regulador para proteger al acumulador de sobrecargas, llenándola según le resulte más conveniente en cada momento.

Se debe tener en cuenta que algunos reguladores solares necesitan programarse para indicarle el tipo de baterías, la capacidad de las mismas y las tensiones de funcionamiento, esta programación se realiza de manera automática cuando se hace la conexión del regulador solar al acumulador; de igual manera, existen otras funciones secundarias que realiza un regulador solar como es evitar que la batería se pueda descargar por la noche en el panel fotovoltaico por inversión de corriente mediante un diodo tipo D [10] o proporcionar información del estado del sistema, como la tensión del acumulador, corriente generada, históricos, estado de carga, entre otros.

1.5.4 Cargas DC Conectadas al Controlador de Carga o Regulador

Otra función que realiza el regulador de carga solar cuando tiene conectado un consumo en corriente continua, es garantizar la protección del sistema frente a descargas profundas en el acumulador, para ello el controlador cuenta con un interruptor tipo A [10] que corta la corriente entregada por la batería al consumo sólo cuando este se realiza en continua, ya que la corriente pasa por el regulador; en el caso de consumo de cargas que manejan corrientes alternas, que son las más habituales en la actualidad, la descarga de la batería se realiza por un componente electrónico externo al controlador de carga llamado inversor, el cual irá conectado directamente al acumular por lo cual el regulador de carga no podrá controlar la descarga del banco de acumulación de energía del sistema solar fotovoltaico. Algunos reguladores permiten controlar el encendido y apagado automático de cargas de corriente DC mediante una opción de programación que trae incorporado el regulador, esta opción es especialmente utilizada para luminarias donde se quiera encender la luz cuando la radiación solar baja de un cierto umbral (atardecer) y apagarla cuando la radiación solar vuelva (amanecer) [10].

1.5.5 Tipos de Controladores de Carga o Reguladores de Energía Solar

En la actualidad existen dos tipos de reguladores de carga utilizados en instalaciones de energía solar fotovoltaica, un tipo utiliza la modulación por anchura de pulsos, por lo cual se los conoce como reguladores o controladores PWM y el otro tipo utiliza el seguidor del punto máximo de potencia, conocidos como controladores MPPT.

1.5.5.1 Controladores de Carga o Reguladores PWM

Un regulador PWM (Modulación por anchura de pulsos) sólo dispone en su interior de un Diodo, por tanto los paneles solares funcionan a la misma tensión que las baterías solares, la energía a un lado y al otro del regulador es la misma, con los valores de tensión y corriente iguales, esto hace que los módulos no trabajen en su punto de máxima potencia, sino en el que impone la batería según su estado de carga, produciendo una pérdida de

potencia, que puede llegar hasta el 25-30% [11], el regulador PWM es capaz de llenar por completo la batería gracias a que introduce la carga de forma gradual, a pulsos de tensión, en la fase de flotación y la fase de llenado, así, la corriente se va introduciendo poco a poco hasta que la batería se llena de manera óptima y estable.

1.5.5.2 Controladores de Carga o Reguladores MPPT

Un regulador de punto máximo de potencia o MPPT (por sus siglas en inglés) dispone, además del diodo de protección, un convertidor de tensión DC-DC y de un seguidor del punto de máxima potencia, esto le permite convertir altas tensión en el módulo fotovoltaico a bajas tensiones en el acumulador y permite trabajar a tensiones diferentes en el módulo fotovoltaico y en las baterías; el seguidor del punto de máxima potencia adapta la tensión de funcionamiento en el campo fotovoltaico a la que proporcione la máxima potencia, por tanto, en un regulador MPPT la energía que entra y sale del regulador es la misma, al igual que en los reguladores PWM, pero la tensión y la corriente son diferentes a un lado y a otro, con ello se consigue aumentar la tensión del panel solar y aumentar la producción de energía solar en hasta un 30% [11] respecto a los reguladores solares PWM, dependiendo de la climatología. al poder trabajar a tensiones más elevadas en el módulo fotovoltaico, se reducen las pérdidas energéticas ocasionadas por efecto Joule cuando se trabaja con corrientes elevadas, haciendo que los reguladores MPPT sean especialmente indicados para potencias fotovoltaicas elevadas, dónde se busque generar el máximo de energía.

1.6 Movimiento Solar

Inicialmente se debe comprender el movimiento al que se encuentra sometido el planeta Tierra respecto al Sol, para realizar una adecuada instalación de modulo solar, para esto se tendrán en cuenta aquellos movimientos en los que se ve envuelto el planeta Tierra respecto a la estrella más cercana, el Sol; habitualmente se habla del movimiento de rotación y translación, pero cuando se debe precisar las coordenadas celestes en que se encontrará el Sol respecto al plano terrestre en un momento específico del año es necesario recurrir a un análisis más profundo del tema, de manera que se estudiará algunos conceptos

relacionados con la posición e inclinación de superficies planas con respecto a la trayectoria solar durante el transcurso del año, ya que es de interés en esta investigación el estudio de la producción de energía solar fotovoltaica.

1.6.1 Movimiento de Rotación

El planeta Tierra gira alrededor de su propio eje cada 23 h 56 m 4 s [12], tiempo en el cual se puede apreciar un movimiento aparente de los astros y el cielo alrededor de la Tierra, aunque en realidad es el planeta Tierra quien realiza dicho movimiento y no los astros y el cielo, como normalmente suele apreciarse, se le conoce con el nombre de movimiento de rotación al movimiento realizado por el planeta Tierra alrededor de su propio eje, al cual se debe la sucesión del día y la noche, siendo el día el tiempo en que el horizonte aparece iluminado por el Sol, y de noche cuando el horizonte permanece oculto a los rayos solares; de igual manera puede apreciarse que el Sol, sale por el Este y se pone por el Oeste; conocer el movimiento de rotación y el periodo con el que sucede es de vital importancia en la instalación de sistemas solares fotovoltaicos (SSFV), ya sean fijos o móviles, debido a que durante el periodo de tiempo del día es donde el sistema capta la energía necesaria para alimentar las cargas en los periodos de tiempo donde no se observa incidencia de radiación solar (la noche).



Figura 2. Movimiento de Rotación.

[Imagen]. [13]

1.6.2 Movimiento de Translación

La Tierra se mueve de manera periódica alrededor del Sol, impulsada por el efecto gravitacional cada 365 días, 5 horas y 57 minutos [14], equivalente a 365,2422 días [14], lo que normalmente suele durar un año, en este tiempo, el planeta Tierra describe una trayectoria elíptica de 930 millones de kilómetros [14], a una distancia media del Sol de 150 millones de kilómetros [14]. La órbita elíptica de la tierra es completamente plana y el plano que contiene la órbita de la Tierra se le llama plano orbital o también es conocida como eclíptica; la eclíptica es a su vez, la trayectoria que el Sol sigue a lo largo del año a través de la bóveda celeste, este movimiento anual del Sol es muy lento, pues recorre 360° en un año [14], con un promedio de menos de un grado por día, el plano de la eclíptica mantiene un ángulo constante en relación al eje de rotación de la tierra, de aproximadamente 23.45° [14] el cual es el mismo en todo el año, y provoca que al cambiar la posición del planeta a lo largo de la eclíptica sucedan las diferentes estaciones en los hemisferios; la formación de las estaciones trae consigo el considerar que la incidencia de la radiación solar no tendrá la misma intensidad en el transcurso del año, por lo cual conocer el comportamiento del movimiento de translación resulta fundamental al momento de proyectar una instalación de energía solar fotovoltaica, pues el planeta Tierra tendrá periodos en los que se produzca mayor incidencia de radiación de acuerdo a la posición en la trayectoria en la que se encuentre.

1.7 Orientación e Inclinación de Módulos Solares

Como pudo observarse en la sección 1.3 y 1.4 el planeta tierra se encuentra en un constante movimiento alrededor de su propio eje (movimiento de rotación) y alrededor del sol (movimiento de translación); estos movimientos llevan a estudiar la manera de contrarrestar las pérdidas en la producción de energía solar fotovoltaica (ESFV), buscando así la incorporación de sistemas capaces de seguir la trayectoria solar durante el día y contrarrestando los efectos del movimiento de la eclíptica; para ello se han fijado ciertos ángulos con los cuales se busca orientar los módulos de la manera más perpendicular

posible a la incidencia de los rayos solares, el concepto de los ángulos más significativos e importantes en este tipo de instalaciones son:

1.7.1 Ángulo de Inclinación (β)

Es el ángulo formado entre la superficie del módulo solar fotovoltaico y la superficie horizontal del lugar de la instalación, para comprender mejor se ilustra su ubicación en la Figura 3, donde su valor es de 0° para los módulos que se encuentran instalados horizontalmente (instalaciones cerca de la línea ecuatorial) y 90° para aquellos que su instalación se hace verticalmente (por lo general en los polos, debido a la incidencia de los rayos solares).

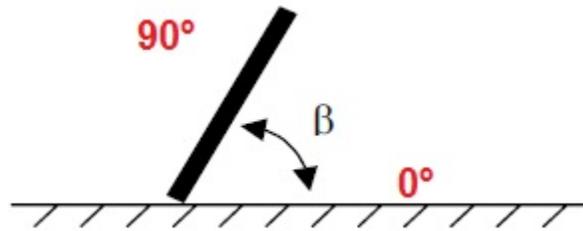


Figura 3. Ángulo de Inclinación (β).

[Imagen]. [15]

1.7.2 Ángulo de Azimut (α)

Es el ángulo formado entre la proyección del plano normal a la superficie horizontal del módulo y el meridiano del lugar de la instalación; los valores típicos que puede llegar a tomar son; 0° para los módulos que se encuentran orientados al sur, -90° para módulos orientados al este y $+90^\circ$ para módulos orientados al oeste. (Ver Figura 4).

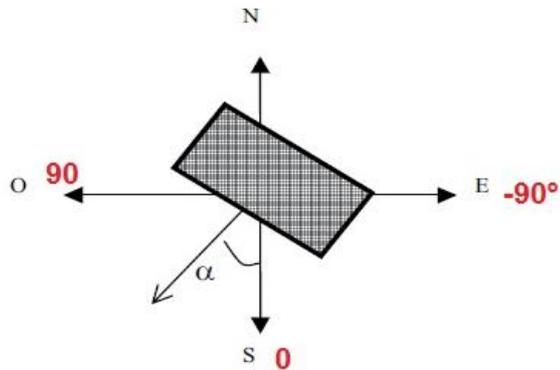


Figura 4. Ángulo de Azimut (α).

[Imagen]. [16].

1.7.3 Declinación (δ)

Es el ángulo formado entre el plano del ecuador de la Tierra y la línea situada en el plano de la eclíptica que une los centros del sol y de la Tierra, como se puede observar en la Figura 5. La variación del ángulo δ se observa a lo largo de la órbita de la Tierra alrededor del Sol, alcanzando valores máximos en los solsticios de verano (declinación máxima positiva, $\delta = 23,45^\circ$) e invierno (declinación máxima negativa, $\delta = -23,45^\circ$) [17] y valores nulos en los equinoccios (declinación nula, $\delta = 0^\circ$) [17]. Aunque se observa variación de la declinación solar a lo largo del año, se puede considerar constante a lo largo del día.

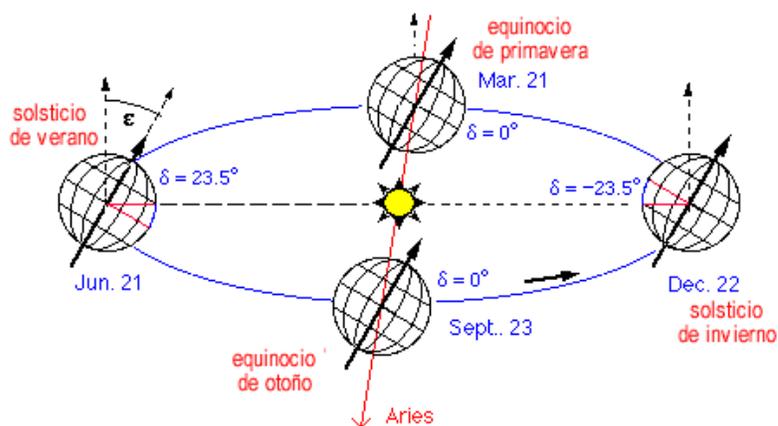


Figura 5. Declinación Solar (δ).

[Imagen]. [17].

Es importante conocer el cambio de la declinación solar y los valores que puede tomar en el transcurso del año, con el fin de realizar una orientación adecuada del módulo fotovoltaico, la expresión matemática utilizada para calcular dicho ángulo es:

$$\delta = 23,45 * \text{sen} \left(360 \frac{284+N}{365} \right) \quad (3)$$

Donde δ , es la declinación en grados ($^{\circ}$) y N es el día del año en el cual se quiere calcular la declinación; cabe aclarar que los días van de 1 (primero de enero) a 365 (31 de diciembre).

1.7.4 Ángulo de Elevación Solar (γ_s)

Es el ángulo que forman los rayos solares con la horizontal, como se indica en la Figura 6, puede tomar valores que van de $(90^{\circ} - \varphi - \delta)$ en el solsticio de invierno a $(90^{\circ} - \varphi + \delta)$ en el solsticio de verano, siendo φ la latitud del lugar y δ la declinación. [18]

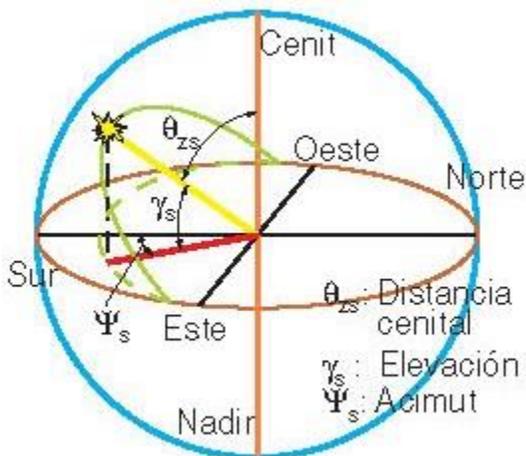


Figura 6. Coordenadas Solares.

[Imagen]. [18].

1.7.5 Ángulo Acimut Solar (ψ_s)

Se conoce como el ángulo formado por el meridiano del sol y el meridiano del lugar donde se realiza la instalación del SSFV, tomando como referencia el Sur en el hemisferio norte y el Norte en el hemisferio sur (Ver Figura 6). Toma valores positivos de 0 a 180° en dirección Oeste y negativos de 0 a -180° en dirección Este.

1.7.6 Ángulo Cenital (θ_{zs})

Es el ángulo formado por la dirección del sol y la vertical, es un ángulo complementario de la elevación solar (Ver Figura 6).

A hora bien, se define la declinación (δ) como el ángulo variable que forma el ecuador con el plano de la eclíptica, por lo cual la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra varía en función de la declinación; la latitud (φ) de un lugar donde se realizará la instalación permite obtener el ángulo que forma la vertical de ese lugar con la línea ecuatorial, por lo tanto, a lo largo del año el ángulo cenital θ_{zs} que forma la vertical del lugar de la instalación con la dirección de la radiación solar varía desde $\theta_{zs} = \varphi - \delta$ en el solsticio de verano a $\theta_{zs} = \varphi + \delta$ en el solsticio de invierno, pasando dos veces por el valor $\theta_{zs} = \varphi$ en los equinoccios del año, por lo tanto, para que la superficie del módulo solar fotovoltaico reciba la radiación solar de la manera más perpendicular posible, se inclinará la superficie a un ángulo β con la horizontal igual al que forma la vertical del lugar con la radiación solar, el cual varía desde $\beta = \varphi - \delta$ en el solsticio de verano a $\beta = \varphi + \delta$ en el solsticio de invierno, pasando por el valor $\beta = \varphi$ en los equinoccios (Ver Figura 7).

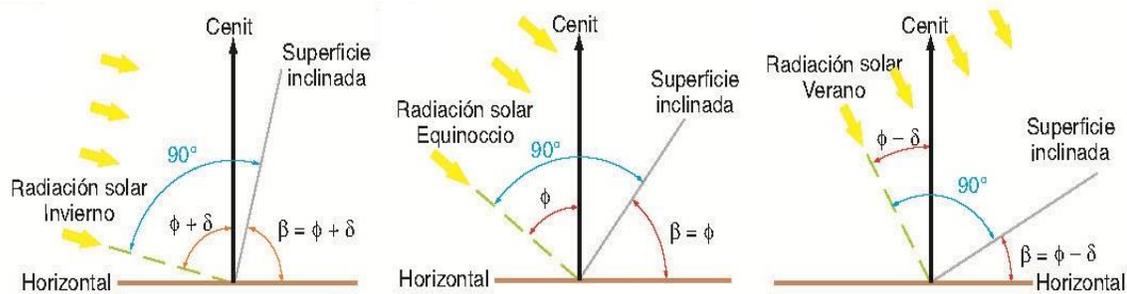


Figura 7. Inclinación y Orientación Solar.

[Imagen]. [18].

1.8 Seguidor Solar

Después de haber estudiado los conceptos sobre el movimiento solar necesarios para posicionar adecuadamente un módulo solar fotovoltaico, se definirán los aspectos más significativos a fin de diseñar y construir un seguidor solar adecuado a las necesidades de este trabajo, el cual tenga integre una serie de sensores, con los cuales se pretende medir variables climatológicas del entorno de la instalación, así como también variables físicas del SSFV a fin de conocer la potencia que este genere en el transcurso del día.

Para aprovechar la mayor cantidad de energía solar posible, que incide sobre el lugar donde se realice la instalación del SSFV, la superficie colectora debe estar lo más perpendicular posible a los rayos solares y, por tanto, una inclinación óptima sólo puede conseguirse si dicha superficie está dotada de un movimiento que siga la trayectoria solar. Existen dos tipos de seguimiento solar habitualmente usados, el seguimiento ecuatorial y el seguimiento acimutal.

1.8.1 Seguimiento Ecuatorial

Este método de seguimiento consiste en disponer el sistema de dos ejes paralelos a los de la tierra, (N-S / E-0), de forma que el eje Norte-Sur proporcione el movimiento a lo largo del día y el eje Este-Oeste oriente el eje del colector solar de manera que el ángulo que forme con el eje polar sea el complementario de la declinación [19], este sistema suele ser implementado en estructuras pequeñas y ligeras, debido a que todo el peso de la estructura

y el módulo gravita sobre un eje inclinado. Aunque este modelo realiza el seguimiento con los dos ejes, bien puede implementarse utilizando únicamente el eje polar, dado que la inclinación se puede ajustar de un día a otro en cada período de tiempo de acuerdo a la declinación.

1.8.2 Seguimiento Acimutal

Este sistema es el más empleado en seguimientos de precisión, sobre todo cuando se trata de estructuras pesadas, uno de los ejes es vertical y proporciona el seguimiento en acimut y el otro eje es horizontal y proporciona el seguimiento de altura solar, este seguimiento se realiza en los dos ejes.

El seguimiento solar puede realizarse por distintos métodos, los más utilizados son: Seguimiento por sensores, seguimiento por reloj solar y seguimiento por coordenadas calculadas, su implementación depende de las condiciones que presente la zona donde se desea implementar el sistema de seguimiento y los parámetros de diseño del fabricante.

Capítulo 2: DISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR

2.1 Introducción

El diseño del seguidor solar es una idea original, que cuenta con movimiento en dos ejes, permitiendo posicionar el panel fotovoltaico de forma perpendicular a los rayos solares durante un periodo de tiempo más extenso. El seguidor solar posee una estructura metálica, debido a que debe soportar un peso aproximado de 7,8 Kg [20] y estará expuesta a fenómenos naturales como temperatura ambiente, lluvias leves y fuertes, corrientes de aire, granizadas, etc.

El sistema de seguimiento solar, se realizó por diferencia de sombras y no por programación astronómica, de esta manera, el seguimiento solar se ejecuta por medio de diodos receptores de luz ambiente, que detectan variaciones en la intensidad de luz y posiciona el seguidor donde haya mayor intensidad.

El movimiento del panel, se efectúa mediante el uso de motores dc. Debido a la disposición que tiene la piñonera utilizada en el diseño, los motores dc no necesitan tener un flujo de corriente continua para mantener su estado, disminuyendo el consumo de corriente en el SSFV haciéndolo más eficiente.

El diseño, está pensado de manera que la estructura sea de tipo modular, de modo que brinde un montaje rápido y permita una cómoda extracción de partes y piezas sometidas a desgaste o susceptibles de averías, como lo son los motores, piñonaría o tornillos de movimiento.

2.2 Requerimientos del Sistema

2.2.1 Movimiento en dos Ejes

Es necesario que el sistema de seguidor cuente con movimiento en dos ejes, para posicionar el panel solar el mayor tiempo posible de cara al sol; aumentando la cantidad de radiación efectiva sobre la superficie colectora y por ende la energía producida.

2.2.2 Autonomía del Sistema

El sistema debe ser capaz de mantener energizado las 24 horas del día, los componentes electrónicos encargados del posicionamiento y la adquisición de datos, al igual que los diferentes sensores utilizados.

2.2.3 Ahorro Energético

La autonomía del sistema es de vital importancia, es por ello que tanto las tarjetas electrónicas utilizadas para realizar el control y la adquisición de datos del sistema, como los componentes electrónicos que realizan el movimiento de seguidor solar, deberán tener un consumo energético reducido que no afecte y ponga en riesgo la autonomía del sistema.

2.2.4 Estructura Resistente y Duradera de Bajo Costo

La estructura mecánica del seguidor solar debe estar construida con materiales capaces de resistir las inclemencias del clima, que tengan una alta resistencia a esfuerzos mecánicos y además que sean de bajo costo.

2.2.5 Estructura Modular

Es necesario contar con una estructura compuesta por módulos que permitan un montaje rápido de la estructura además de la extracción de partes que tengan algún desgaste o se quieran actualizar.

2.3 Selección del Seguidor Solar

Se seleccionó el sistema de seguimiento Ecuatorial, basados en el consumo energético del sistema de monitoreo, que consume en promedio 69,6 Wh/día [19], por lo cual no se requiere de sistemas y equipos robustos para su implementación, además de ser un sistema practico para el desarrollo investigativo, ya que su funcionamiento permite seleccionar diversos criterios de diseño para implementar un modelo no convencional a los ya existentes.

2.4 Estructura del Seguidor Solar

A continuación, se presenta en detalle cada una de las partes que conforman la estructura del seguidor solar y su funcionamiento.

La estructura principal se subdivide en cinco estructuras importantes:

- Marco del panel fotovoltaico.
- Cuerpo del seguidor solar.
- Caja de paso.
- Cajas de movimiento.
- Base de apoyo.

2.4.1 Marco del Panel Fotovoltaico

El marco fotovoltaico es el encargado de soportar el panel y de acoplarlo al cuerpo de la estructura. Se compone de perfiles rectangulares de acero laminado en caliente (Figura8-A) de dimensiones (TxHxD) 2x20x50 mm. La disposición de los perfiles se realiza en forma de cruz con dimensiones de (WxHxD) 940x740x50 mm, esta estructura va taladrada en cuatro (Figura 8-B) puntos de manera que el marco de aluminio que protege al panel pueda ser atornillado, facilitando la sujeción del panel fotovoltaico mediante tornillos de rosca métrica y tuerca de cierre. La unión entre los perfiles de acero se realiza mediante soldadura por arco eléctrico con electrodo metálico (Figura 8-C).

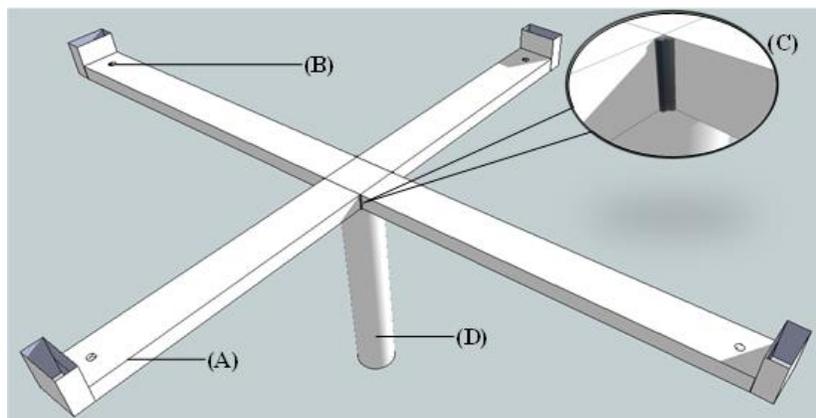


Figura 8. Marco del Panel Fotovoltaico Modelado en 3D.

[Captura de pantalla] [21]

En el punto central de la estructura en forma de cruz viene unido mediante soldadura un tubo galvanizado (Figura8-D), (DxTxL) 50x3x300 mm, que será el encargado de acoplar esta estructura con el cuerpo del seguidor mediante un cardán de carro, que se utiliza generalmente para unir dos ejes no colineales, pero que para este proyecto se utiliza para permitir el movimiento del seguir solar en los ejes X y Y.

2.4.2 Cuerpo del Seguidor Solar

El cuerpo del seguidor es la parte que soporta todo el peso generado por el marco y el panel fotovoltaico y a su vez, también acopla las cajas de movimiento. Se atornilla al marco mediante un acople tipo cardán reutilizado de un automóvil.

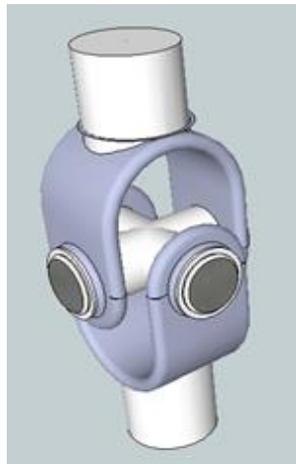


Figura 9. Juntura Tipo Cardan Modelado en 3D.

[Captura de pantalla] [21]

El cuerpo del seguidor está hecho con una base mono-poste de tubo redondo galvanizado por inmersión en caliente con recubrimiento de zinc, de dimensiones (DxTxL) 50x3x1300 mm. Además, tiene dos estructuras laterales hechas de tubo galvanizado ovalado de (TxHxD) 2x30x50 mm, ubicadas perpendicularmente tanto al tubo central como también entre ellas. Se encuentran a una distancia de 430 y 420 mm cada una respecto al cardán y sirven como base para las cajas de movimiento.



Figura 10. Cuerpo del Seguidor Modelado en 3D.

[Captura de pantalla] [21]

Así mismo, el tubo principal que compone el cuerpo del seguidor cuenta con otro tipo de estructuras laterales, hechas con varillas de acero y tubo galvanizado de 19 mm de diámetro, las cuales se utilizan para corregir el movimiento de la barrilla roscada que junto con los motores eléctricos y la piñonearía son los encargados de generar los movimientos de latitud y longitud del seguidor solar.

2.4.3 Cajas de Movimiento

La caja de movimiento es uno de los mecanismos más importantes del seguidor solar debido a que es la encargada de convertir el movimiento circular de los motores eléctricos en movimiento lineal para generar, en el marco del panel, una inclinación que lo ubique lo más perpendicular posible al sol.

La caja de movimiento está compuesta por:

- Un motoreductor.
- Dos piñones de diámetros diferentes.
- Un eje roscado.
- Dos balineras.
- Una varilla roscada.
- Cuatro láminas de acero.
- Una cruceta.
- Una caja metálica.

El motoreductor MG995 (Figura 11-A) utilizado se destaca por su gran torque y engranajes metálicos con gran robustez, cuenta con un voltaje de operación de 4.8 a 7.2 voltios proporcionando un torque desde 8.5 kgf.cm a 15kgf.cm. El motoreductor viene acoplado con un piñón de plástico de 31 mm de diámetro y de 30 dientes (Figura 11-B).

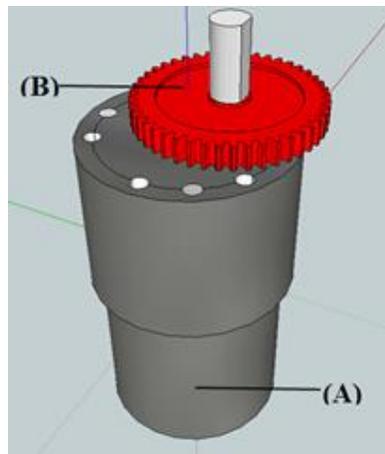


Figura 11. Acople Motor- Piñón Modelado en 3D.

[Captura de pantalla] [21].

Este a su vez, se conecta con un piñón de plástico de 45 mm de diámetro y de 45 dientes (Figura 12-A), que se encarga de transferir el movimiento circular del motor a un eje roscado (Figura 12-B).

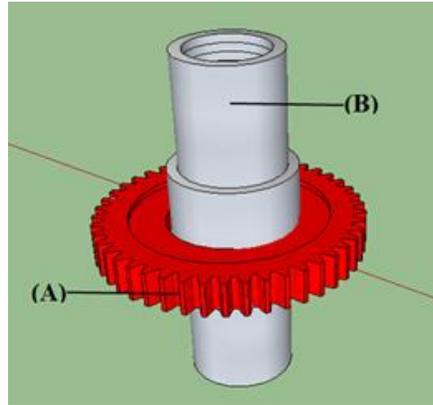


Figura 12. Acople Piñón- Eje Roscado Modelado en 3D.

[Captura de pantalla] [21].

El eje roscado (Figura 12-B) tiene una longitud de 54 mm y un diámetro de 18 mm, sobresale por la parte superior e inferior de la caja metálica y encaja por ambos lados en una balinera de diámetro externo de 39 mm y diámetro interno de 18 mm (Figura 14-A). Estas balineras están sujetas a la caja metálica por medio de tuercas y tornillos y permiten que el eje roscado mantenga un movimiento más fluido y conserve una posición centrada.

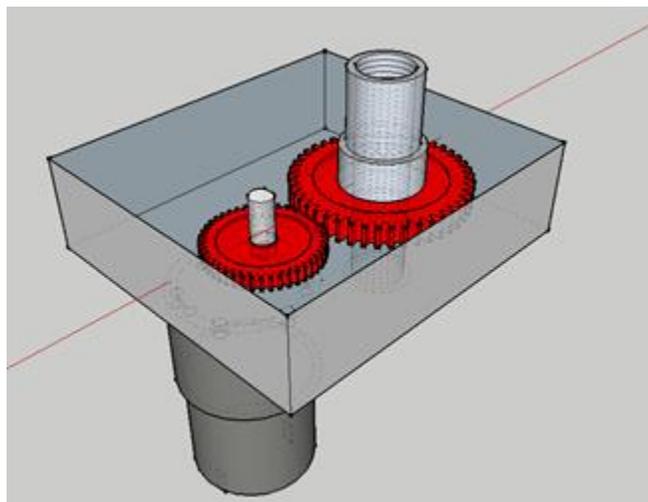


Figura 13. Vista Interna Acople Motor-Piñón y Piñón-Eje Roscado.

[Captura de pantalla] [21].

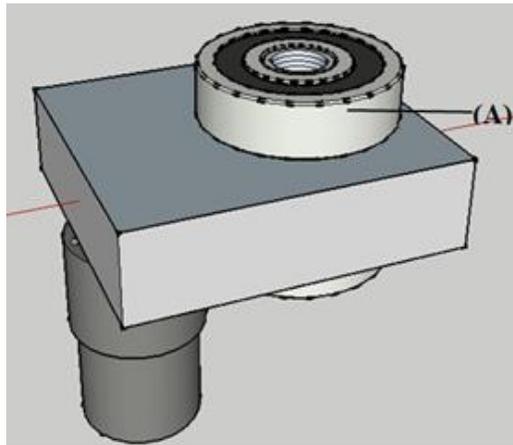


Figura 14. Vista Externa Caja de Movimiento Modelada en 3D.

[Captura de pantalla] [21].

Cuando el motoreductor gira, hace girar ambos piñones y estos a su vez el eje roscado que transfiere el movimiento circular a una varilla roscada de 1 metro de longitud (Figura15-A). A medida que el eje gira, la rosca de este se acopla con la rosca de la varilla y la hace girar haciendo una conversión de movimiento circular a movimiento lineal.

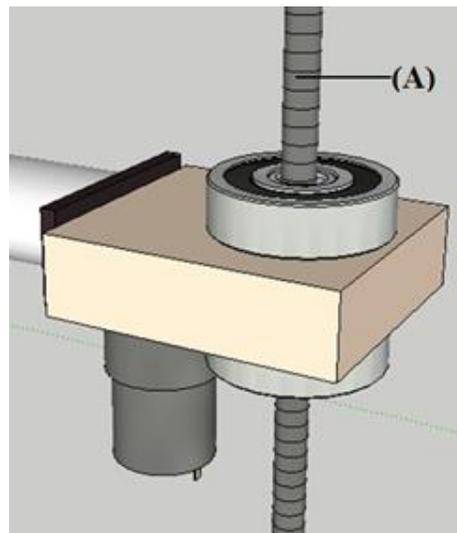


Figura 15. Vista Lateral Caja de Movimiento Modelada en 3D.

[Captura de pantalla] [21].

A continuación, la varilla roscada se conecta con el marco del panel a través de cuatro láminas de acero (Figura 16-A) y una cruceta (Figura 16-B) que están acopladas al marco por tornillos y tuercas. Es necesario el uso de cuatro láminas de acero y la cruceta, para que el movimiento conjunto entre el cardán y la extensión de la varilla, permitan el movimiento en dos ejes de la superficie colectora. De esta manera por extensión de la varilla el panel adquiera ciertas inclinación en función del ángulo cenital y se ubica perpendicularmente al sol.

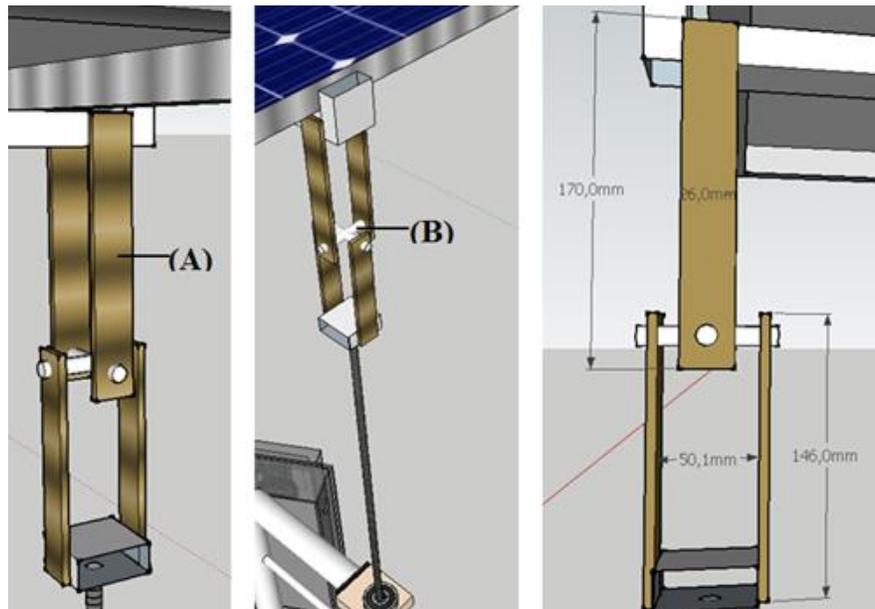


Figura 16. Láminas de Acople entre Marco del Panel y la Varilla Roscada.

[Captura de pantalla] [21]

2.4.4 Base de Apoyo

Para la base de apoyo del seguidor solar, se empleó parte de la estructura de una antena utilizada para recibir la señal de televisión satelital, se optó por esta estructura debido a que proporciona gran estabilidad al cuerpo del seguidor. La estructura de la base está hecha de acero galvanizado y tiene dimensiones de (WxHxD) 64x105x196 mm.

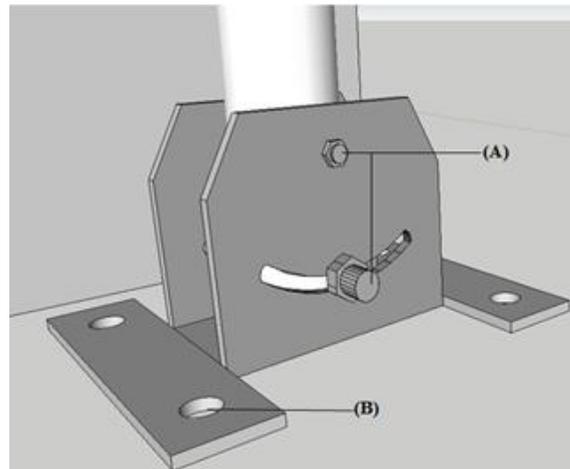


Figura 17. Base de Apoyo Modelada en 3D.

[Captura de pantalla] [21].

Se acopla al cuerpo del seguidor mediante dos tornillos de rosca métrica y tuerca de cierre (Figura 17-A) y se ancla a una columna de concreto por medio de cuatro pernos de expansión de camisa (Figura 17-B). Estos componentes son utilizados en la industria para asegurar un tornillo a un lugar o una estructura, como por ejemplo una pared, concreto, madera, piedra u hormigón. Se utilizaron cuatro tacos de sujeción de tipo metálico, que son empleados para grandes cargas y dos para proporcionar mayor estabilidad con cables tensores, de manera que se eviten cargas que puedan generar un vuelco de la estructura. Sobre el cuerpo del seguidor se instalará la caja de paso, que contiene la tarjeta electrónica que se encarga de recibir los datos de los diferentes sensores operados y controlar el movimiento de los motores que ubicarán el panel solar de manera perpendicular al sol.

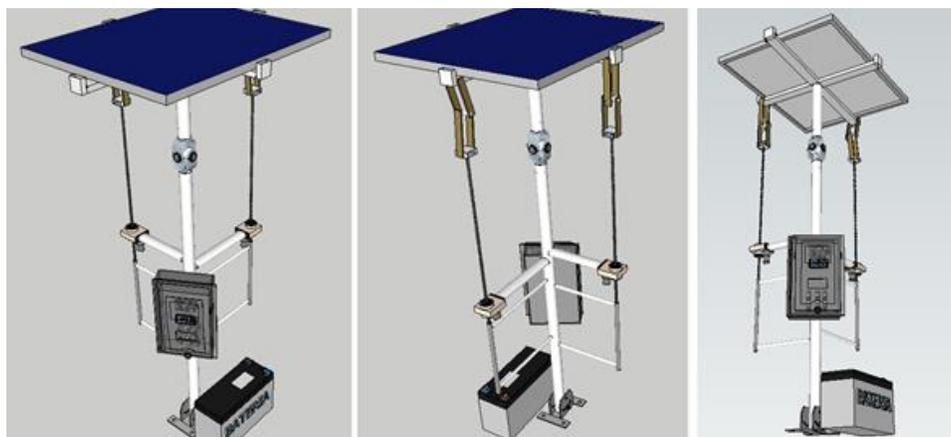


Figura 18. Seguidor Solar Modelado en 3D.

[Captura de pantalla] [21].

2.5 Limitaciones en el Movimiento de Latitud y Longitud del Seguidor Solar

A medida que aumenta el grado de inclinación en la posición del panel por el movimiento circular de los motores, una pequeña parte de su peso se traslada a las varillas roscadas, a partir de cierta inclinación se evidencia una deflexión en las varillas que afecta la estructura del seguidor solar. Por esta razón, es necesario limitar los movimientos que realizaran las varillas durante las horas del día para evitar daños en la estructura mecánica.

2.5.1 Instrumentación Utilizada para Definir los Ángulos Límites

Para definir los ángulos de restricción en la inclinación del panel solar se utilizó el acelerómetro MPU6050. El MPU6050 es un sensor IMU, lo que significa que es capaz de medir fuerza y velocidad. Lleva acoplado un acelerómetro y un giroscopio, ambos de ejes por ende se le conoce como IMU de 6DOF ($3+3=6\text{DOF}$ “Degrees Of Freedom”). Su voltaje de operación va desde 3.3 a 5 voltios.

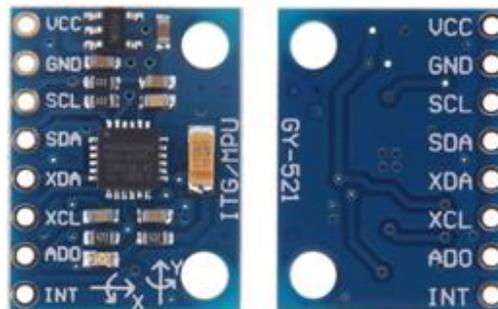


Figura 19. Sensor MPU6050 6DOF IMU.

[Imagen]. [22]

2.5.2 Conexión Acelerómetro MPU6050 - Arduino Mega

La conexión del MPU6050 se realiza mediante una conexión plug and play. El sensor viene con los pines de conexión especificados en la placa. Se polariza con los pines GND y Vcc en el Arduino Mega para energizar el sensor. Para la transmisión de datos es necesario conectar los pines SCA y SCL al pin 20 y 21 de la tarjeta Arduino Mega que corresponde a las entradas SCA y SCL. Esta conexión se hace mediante el protocolo de comunicación

I2C, que utiliza la librería WIRE ya implementada en el IDE de Arduino, el cual permite conectar hasta 128 sensores por los mismos pines de entrada de datos, debido a que en cada sensor se define una dirección, la cual es utilizada por el Arduino para identificar la comunicación con cada uno de los sensores conectados por este puerto.

2.5.2.1 Código de Programación en Arduino para el Sensor MPU6050



```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
final2
//SENSOR ACELERÓMETRO

angx = acelerometro('x'); //11
angulox = redondear(angx);
Serial.print(angulox);
Serial.print("\t");

angy = acelerometro('y'); //12
//anguloy = redondear(angy);
Serial.print(angy);
Serial.println("\t");

```

Código 1. Obtención del Valor del Ángulo de Inclinación del Panel Solar.
[Captura de Pantalla][23].

La primera función que aparece dentro del algoritmo se utiliza para determinar el valor del ángulo que se requiere “x” o “y”. La segunda función utilizada en el código 3, se usa con el fin de redondear a una cifra decimal el valor que se le envía.

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
final2
// _____ FUNCION ACELERÓMETRO _____

float acelerometro(char dato) {
sensor.getAcceleration(&ax, &ay, &az); // Leer las aceleraciones
float angulo;
if (dato == 'x'){
float accel_ang_x=atan(ax/sqrt(pow(ay,2) + pow(az,2)))*(180.0/3.14);
angulo = accel_ang_x;
}else if(dato == 'y'){
float accel_ang_y=atan(ay/sqrt(pow(ax,2) + pow(az,2)))*(180.0/3.14);
angulo = accel_ang_y;
}
return angulo;
}

```

Código 2. Función Acelerómetro.

[Captura de Pantalla][23].

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
final2
// _____ FUNCION REDONDEO _____

float redondear(float num) {
int decimaredondeada;
float suma, salida;
//-----
int valor = num * 100;
int unidad = valor / 100;
int decima = valor % 100;
int modulo = decima % 10;
int resta = decima - modulo;
if (modulo >= 5){
decimaredondeada = resta + 10;
suma = (decimaredondeada + unidad*100);
salida = suma/100;
}else{
suma = (resta + unidad*100);
salida = suma/100;}
return salida;
}

```

Código 3. Función Redondeo.

[Captura de Pantalla]. [23].

2.6 Definición del Ángulo Limitante para el Seguidor Solar en Dos Ejes

A partir de los ángulos obtenidos con el acelerómetro MPU6050 y la observación de la estructura del seguidor solar se concluye que este puede manejar una apertura norte-sur y este-oeste de 60 grados sin afectar su estructura mecánica. Teniendo el ángulo de apertura se hace coincidir con un rango de tiempo entre las 8:00:00 a.m. y las 3:59:59 p.m. en el cual se aproveche mejor la radiación efectiva que llega al panel solar y se obtienen los valores más altos en potencia generada, de esta manera se limita tanto el funcionamiento del seguidor solar, como la recolección de datos que provienen de los sensores de radiación, temperatura y humedad.

Según los mapas de radiación solar de Colombia, presentados mediante la colaboración institucional entre el IDEAM y la UPME, la ciudad de Popayán cuenta con un rango de radiación efectiva promedio de 4 a 5 horas (UPME, 2005) [24].

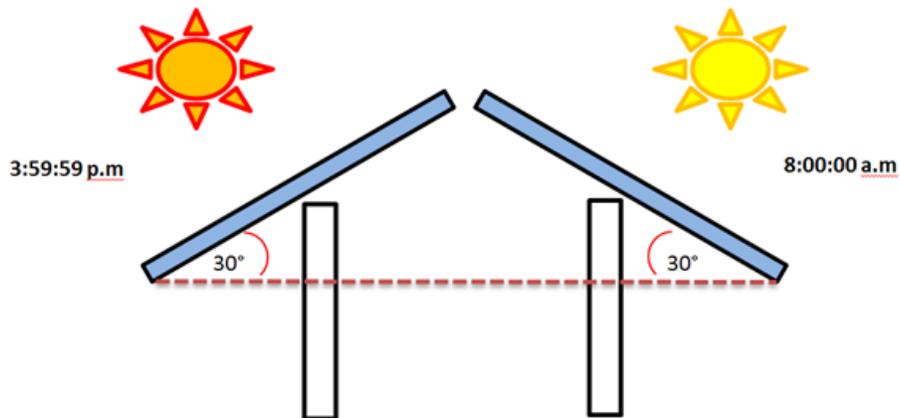


Figura 20. Ángulos Límites de Inclinación del Seguidor Solar.

El diseño del seguidor solar, permite que el tiempo de exposición de la superficie colectora a la radiación sea de 8 horas, generando un aumento en la producción energética, por tanto, las restricciones hechas para evitar daños en la estructura mecánica del dispositivo, no

disminuyen la radiación captada por el panel solar, ni generan lecturas erróneas de los datos registrados por la tarjeta de adquisición desarrollado.

2.7 Control Automático del Seguidor Solar

2.7.1 Tarjeta Arduino Mega 2560

Existen múltiples plataformas físicas computacionales que se utilizan tanto en el entorno académico como en la industria, para desarrollar diferentes investigaciones, crear nuevos dispositivos o aprender entornos de programación. "Arduino es una plataforma física computacional open-source"(Sanclemente & Capilla, 2016) [25], que ofrece algunas ventajas y características con respecto a otros sistemas que resultan ser de gran ayuda cuando se trabaja con microcontroladores.

Entre las ventajas de trabajar con una placa Arduino están: su reducido costo, que las vuelve muy accesibles; su versatilidad al contar con un entorno de programación multi-plataforma disponible para sistemas operativos como Windows, Linux y Macintosh OSX; su ambiente de programación es relativamente sencillo para que el usuario que tenga conocimientos mínimos en programación se familiarice con él; finalmente, el software de programación que maneja Arduino está publicado bajo una licencia libre que facilita desarrollar cualquier algoritmo de programación. Por las ventajas anteriormente mencionadas, se optó por utilizar la placa Arduino Mega para trabajar con los diferentes sensores y componentes electrónicos necesarios para este proyecto, se instala el entorno de programación de Arduino en la Raspberry Pi que se utiliza como computadora personal, se desarrolla el algoritmo que permite el control automático de la parte electrónica del seguidor solar en el entorno de programación de Arduino para posteriormente correrlo en la placa. Arduino Mega está basada en un microcontrolador ATmega2560, Cuenta con 54 pines digitales de entrada / salida (de los cuales 15 se pueden utilizar como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UART (puertos serie de hardware), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión USB, un conector de alimentación, una cabecera ICSP, Y un botón de reset. (Anónimo, S.F) [26]

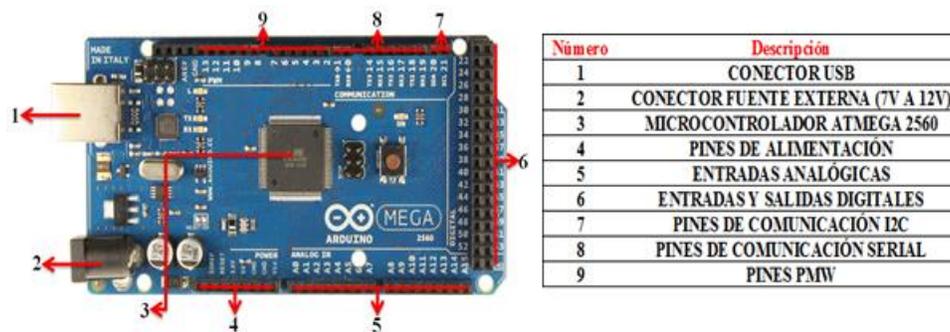


Figura 21. Puertos y Componentes Electrónicos de la Tarjeta Arduino Mega 2560.

[Imagen]. [27]

El IDE de Arduino es un entorno de desarrollo que implementa el lenguaje Processing/Wiring y que puede ser descargado gratuitamente de la página oficial del Arduino <https://www.arduino.cc/en/main/software>, para diferentes sistemas operativos (Windows, Mac OS X, Linux). Este entorno permite programar el microcontrolador de la placa mediante un computador usando la comunicación serial. (Anónimo ,2017)[28].

Tabla 1. Especificaciones Técnicas Placa Arduino Mega 2560. [26]

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Tensión de entrada (recomendado)	7-12V
Tensión de entrada (límite)	6-20V
Digital I / O Pins	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Analog Input Pins	16
Corriente CC por pin de E / S	20 mA
Corriente de CC para el Pin de 3.3V	50 Ma
Memoria flash	256 KB de los cuales 8 KB utilizados por bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad de reloj	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Longitud	101,52 mm
Anchura	53.3 mm

2.8 Requerimientos del Sistema

Para comenzar, se establecerán los requerimientos necesarios para el diseño del control automático del seguidor y posteriormente se presentara el procedimiento utilizado para dar solución a cada uno de ellos.

2.8.1 Auto-Posicionamiento Diario

Todos los días, el SSFV debe posicionarse de tal forma que el panel solar se ubique lo más perpendicularmente posible al sol, para encontrar el punto de máxima insolación.

2.8.2 Reposicionamiento Diario

Todos los días, a las 4 p.m. el sistema terminará orientado hacia el Oeste por donde se oculta el sol; por esta razón, es necesario que el SSFV retome una posición inicial para esperar la salida del sol desde el Este para el próximo día. Esta tarea se hace a partir de una hora establecida por la definición del ángulo limitante en el movimiento del seguidor solar. Los movimientos finales del seguidor están condicionados a la declinación solar, la ubicación geográfica y la época del año.

2.8.3 Referencia de Hora

El sistema requiere tener una referencia con respecto a la hora local del país UTC-5 (INM, S.F) [29], para tener una autonomía que le permita posicionarse de acuerdo a los anteriores requerimientos. Esto se realiza mediante un módulo para Arduino, que permite obtener la hora.

2.8.4 Limitación en la Inclinación del Seguidor

El sistema limita el movimiento de los motores para restringir el ángulo de apertura entre 0 a 60°, con el fin de impedir la deformación en la estructura mecánica del seguidor solar. Teniendo en cuenta las necesidades anteriormente presentadas, se da solución a cada una de ellas mediante algoritmos de programación realizados en la tarjeta Arduino mega y tres módulos diseñados para esta tarjeta que permiten tener características extras para solventar dichas necesidades como la hora, ángulo de inclinación del panel, movimiento y la dirección de giro de los motores utilizados.

2.9 Instrumentación Utilizada

Para efectuar algunas tareas determinadas como el auto-posicionamiento y la referencia horaria, se utilizaron dos módulos para Arduino, los cuales facilitaban la forma de trabajar con los motores y la hora dentro del entorno de programación.

2.9.1 Modulo DS1302

En primer lugar, se trabajó con el módulo DS1302, un circuito integrado que dispone de un contador en tiempo real. Entre sus características están las de tener una memoria RAM de 31 bytes, un voltaje de operación de 2 a 5,5v, transferencia de datos en modo Burst y modo Byte por Byte y una temperatura de operación de -40 a 85°C. Este dispositivo se utilizó dentro del algoritmo de programación para tener una referencia de la hora y minutos del día para controlar la ejecución de las principales funciones de movimiento en el seguidor.



Figura 22. Módulo RTC. Módulo De Reloj de Tiempo Real.

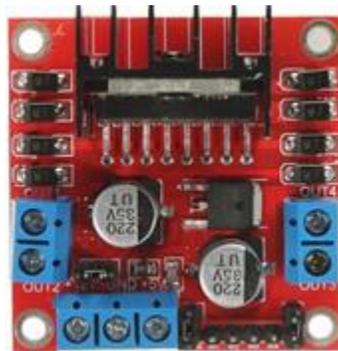
[Imagen]. [30]

2.9.1.1 Conexión Módulo DS1302 – Arduino Mega

Se conectan los pines VCC y GND a las respectivas salidas de 5 voltios y GND que posee la tarjeta Arduino mega, a continuación se puentean los pines CLK, DAT y RST a las salidas digitales 27,29 y 31 respectivamente.

2.9.2 Modulo L298N

Para tener un manejo de los motores DC mediante programación se utilizó el módulo L298N, que permite tener control de un motor paso a paso bipolar o de dos motores de corriente continua. El módulo brinda un control de giro y velocidad mediante el uso de señales TTL (Transistor-Transistor-Logic) obtenidas desde algún microcontrolador o tarjeta de desarrollo; tiene un voltaje de trabajo mínimo de 5 voltios y una corriente máxima de 2 amperios.



*Figura 23.*Modulo L298N. Módulo de controlador de doble puente H.

[Imagen]. [31]

2.9.2.1 Conexión Módulo L298N

Para conectar este módulo, primero se conectan los motores dc que se van a manejar en las salidas OUT1 y OUT2 las cuales controlan la dirección del flujo de corriente que recibe cada motor. A continuación, se conectan las entradas digitales INT 1 y 2 e INT 3 y 4 a los pines digitales 6, 8,10 y 12 respectivamente, que se encargaran de enviar la dirección de

giro y el tiempo de funcionamiento de cada motor. Para finalizar se energiza el modulo con una tensión de 5 voltios y la referencia GND desde la placa Arduino Mega.

2.10 Código de Control Automático del Seguidor Solar en Arduino

Dentro de la función void loop, lo primero que se evidencia es el uso de un condicional encargado de confirmar la hora del día, esto con el fin de poder definir el tipo de movimiento que debe efectuar el seguidor solar. A continuación, se establece la *función sensores*, la cual tiene como tarea solicitar a cada uno de los sensores utilizados su valor en voltaje, efectuar el procesamiento de la señal e imprimir el valor de cada sensor para posteriormente ser analizado. Además de esto, la función sensores también retorna un dato entre 1 y 3 para poder realizar el auto-posicionamiento del seguidor solar limitando su movimiento en caso de que sea requerido.

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
final2$
void loop() {
  if (hora>8 && hora<=15){
    L = funcion_sensores();
    switch (L){
      case 1:
        digitalWrite(Este, 0);
        digitalWrite(Oeste, 0);
        break;

      case 2:
        digitalWrite(Este, 0);
        digitalWrite(Oeste, 0);
        break;

      default:
        funcion_motores();
        break;
    }
    delay(t);
  }else{
    L = funcion_sensores();
    motores_noche();
    delay(t);
  }
}

```

Código 4. Funciones Principales para el Posicionamiento Automático del Seguidor Solar.

[Captura de Pantalla][23].

Al final del algoritmo de programación, se establece que si la hora del día está fuera del rango de trabajo, automáticamente el seguidor retorne a una posición inicial para esperar la salida de sol del siguiente día.

2.10.1 Auto-Posicionamiento del Seguidor Solar por Diferencia de Intensidades de Luz

Debido a que el seguidor solar es por diferencia de radiación solar, se utilizaron cuatro diodos led sensibles a variaciones en luz ambiente, por esta razón, es necesario en primera instancia, hacer un procesamiento de la señal recibida por cada uno de ellos para su posterior uso. La primera parte del código de la función motores, se encarga de procesar la señal enviada por cada led. La segunda parte de la función motores hace uso de condicionales para comparar el valor en voltaje de los leds referentes al Norte y al Sur, según el valor que cada uno de ellos arroja, se modifica el sentido de giro de uno de los motores para que se posicione de tal forma que ambos leds tengan el mismo valor de voltaje. Se efectúa el mismo procedimiento con el valor en voltaje de los leds Este y Oeste para posicionar el segundo motor, de tal forma que el panel solar siempre este de cara a la mayor intensidad de luz ambiente.

```

Archivo  Editar  Programa  Herramientas  Ayuda
final2 $
//_____ FUNCION MOTORES _____
void funcion_motores () {

//SENSOR NORTE

c4= analogRead (pin_Norte);
v4 = ((c4 * 5.00 )/ 1024.00)+0.69;
float N1 = redondear (v4);

//SENSOR SUR

c5= analogRead (pin_Sur);
v5 = ((c5 * 5.00 )/ 1024.00)+0.75;
float S1 = redondear (v5);

//SENSOR ESTE

c6= analogRead (pin_Este);
v6 = ((c6 * 5.00 )/ 1024.00)+0.72;
float E1 = redondear (v6);

//SENSOR OESTE

c7= analogRead (pin_Oeste);
v7 = ((c7 * 5.00 )/ 1024.00)+0.72;
float OE1 = redondear (v7);

```

Código 5. Función Motores parte I.

[Captura de Pantalla][23].

```

Archivo  Editar  Programa  Herramientas  Ayuda
final2 $

if (N1 == S1) {
digitalWrite (Norte, HIGH); //LOW
digitalWrite (Sur, HIGH); //LOW
}
if (N1 > S1) {
digitalWrite (Norte, HIGH);
digitalWrite (Sur, LOW);
}
if (N1 < S1) {
digitalWrite (Norte, LOW);
digitalWrite (Sur, HIGH);
}

if (E1 == OE1) {
digitalWrite (Este, HIGH);
digitalWrite (Oeste, HIGH);
}
if (E1 > OE1) {
digitalWrite (Este, LOW);
digitalWrite (Oeste, HIGH);
}
if (E1 < OE1) {
digitalWrite (Este, HIGH);
digitalWrite (Oeste, LOW);
}

```

Código 6. Función Motores parte II.

[Captura de Pantalla][23].

2.10.2 Auto-posicionamiento del Seguidor Solar a una Posición Inicial en Arduino

Como se presentó en la sección 4.2, es necesario que el seguidor solar retorne a una posición inicial al finalizar el día, esto con el fin de favorecer la recepción de luz solar por los diodos y disminuir el tiempo de auto-posicionamiento diario. Esto se realiza código de programación, que se encarga de posicionar el panel a un ángulo en el eje “x” y “y” anteriormente establecido mediante el uso de comparadores en la función de programación.



```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
final2 $
// _____ FUNCION MOTORES NOCHE
void motores_noche() {

  if (anguloy == vfany) {
    digitalWrite(Este, HIGH);
    digitalWrite(Oeste, HIGH);
  }
  if (anguloy > vfany) {
    digitalWrite(Este, HIGH);
    digitalWrite(Oeste, LOW);
  }
  if (anguloy < vfany) {
    digitalWrite(Este, LOW);
    digitalWrite(Oeste, HIGH);
  }
  if (angulox == vfanx) {
    digitalWrite(Norte, HIGH);
    digitalWrite(Sur, HIGH);
  }
  if (angulox > vfanx) {
    digitalWrite(Norte, HIGH);
    digitalWrite(Sur, LOW);
  }
  if (angulox < vfanx) {
    digitalWrite(Norte, LOW);
    digitalWrite(Sur, HIGH);
  }
}}

```

Código 7. Función Motores Noche.

[Captura de Pantalla][23].

Capítulo 3: SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ALMACENAMIENTO DE DATOS

3.1 Introducción

En el Capítulo anterior se explicó la etapa de control con la que contará este sistema, en este capítulo inicialmente se abordará el funcionamiento eléctrico del SSFV, el cual permitirá alimentar las tarjetas que controlarán el sistema de seguimiento solar, se presenta un diagrama de conexión del SSFV, dando a conocer las características técnicas de los equipos seleccionados y posteriormente se dará a conocer la electrónica implementada para el registro de las variables físicas y climatológicas relevantes en esta investigación, enfatizando en las características técnicas de los sensores, su calibración y conexión con la tarjeta de control, para posteriormente hablar del sistema de adquisición y envío remoto de los mismos.

3.2 Equipos Utilizados en la Instalación del SSFV

Actualmente el mercado ha desarrollado equipos más eficientes para instalaciones de SSFV, la selección depende de las necesidades de cada diseño, por ello es importante conocer su funcionamiento y características técnicas, a fin de seleccionar adecuadamente los equipos que formarán parte del sistema fotovoltaico a instalar; para esta investigación se utilizó el módulo solar fotovoltaico, controlador de carga, acumulador y protecciones externas, los cuales son los utilizados normalmente en la instalación de sistemas solares aislados.

3.2.1 Modulo Solar

El SSFV implementado, cuenta con un módulo solar SGM-80 [32], desarrollado por la empresa Bibísimo Energías Renovables, es un módulo solar fotovoltaico de alta calidad, elaborado con celdas Monocristalinas, cuenta con certificación CE, IEC ROHS y TUV, con una eficiencia en la conversión de energía del 18.3 %; además presenta una reducción del 20% en la conversión de energía a 25 años [32]. En la Tabla 1 se presentan las

características técnicas más importantes de este módulo, las cuales se tendrán en cuenta para realizar una proyección de la energía producida para alimentar el sistema de control y envío de los datos censados.

Tabla 2. Características Técnicas Modulo Solar SGM-80

Potencia máxima (Pmax)	80Wp \pm 3%
Tensión máxima (Vmp)	17,5 V
corriente máxima (Imp)	4.57 A
Tensión de circuito abierto (Voc)	21,6 V
Corriente de corto circuito (Isc)	4.94 A
Eficiencia	18,30%
Certificaciones	CE, ROHS IEC, TUV
Temperatura nominal de funcionamiento de celda (TONC)	45 \pm 2 ° C
Coeficiente de temperatura (Pmax)	-0,403% / ° C
Coeficiente de temperatura (Voc)	-0,330% / ° C
Coeficiente de temperatura (Isc)	0,065% / ° C
Rango de temperatura de funcionamiento:	40 a 85 / ° C
dimensiones de módulo	670 * 795 * 30mm
Peso:	11.00kg

3.2.2 Controlador de Carga

Es el eje central de toda instalación solar fotovoltaica, ya que se encarga de suministrar y gestionar energía que genera el modulo fotovoltaico y la consumida por la carga, realizando un continuo sensado del estado de carga del acumulador. En este trabajo investigativo se optó por un controlador marca Steca Solarix PRS 1515 [33], desarrollado por la empresa Solar Electronics, cuyo funcionamiento se basa en la modulación por anchura de pulsos para controlar la energía que entra y sale del sistema, por esta razón son conocidos habitualmente en el mercado como controladores PWM. A continuación se describen las características técnicas más importantes de este controlador.

Tabla 3. Características Técnicas Controlador de Carga PRS 1515

Tensión de funcionamiento	12 V (24 V)
Autoconsumo	< 4mA
Tensión de circuito abierto del módulo solar	< 47V
Corriente de entrada	15 A
Tensión de la batería	9 V -17 V (17,1 V - 34 V)
Tensión de reconexión (LVR)	12,4 V - 12,7 V (24,8 V - 25,4 V)
Protección contra descarga profunda (LVD)	11,2 V - 11,6 V (22,4 V - 23,2 V)
Grado de protección	IP 31
Dimensiones	187 x 96 x 45 mm
Peso	345 g

3.2.3 Acumulador o Batería

Para efectos de este estudio se optó por un acumulador MAGNA MA120-12 [34], el cual permite alimentar el sistema de control y envío remoto de los datos, consiguiendo así una autonomía energética para la implementación de la tarjeta, la cual podrá operar las 24 horas del día.

En la siguiente tabla se evidencian las características técnicas más relevantes.

Tabla 4. Características Técnicas Acumulador MA120-12

Tensión nominal	12 V
Capacidad nominal (10Horas)	120 Ah
Corriente máxima de descarga	1300A (5s)
Temperatura de operación nominal	25 ± 3 °C
Terminales	T11
Dimensiones	410 x 177 x 225 mm
Peso Aproximado	35 Kg

El sistema cuenta con un sistema de protección externo, formado por tres breaker EATON C16 [35], los cuales realizan una desconexión automática de las líneas de cableado en caso de presentarse sobrecargas en el sistema, brindando protección a los equipos y las cargas conectadas.

3.3 Conexión Eléctrica Del SSFV

Para una adecuada instalación de un SSFV, se debe realizar un dimensionamiento energético de las cargas eléctricas a alimentar teniendo en cuenta los autoconsumos de los equipos descritos anteriormente; por ello se realizará una proyección aparente de la potencia consumida por la carga a lo largo del día. A continuación se presenta la tabla 5, en donde se resumen de las cargas y autoconsumos del SSFV.

Tabla 5. Consumos del SSFV

Equipo	No. Equipos	Horas de Uso [H]	Potencia [W]	Energía Diaria [Wh/día]
Tarjeta electrónica	1	24	2,9	69,6
Regulador solar	1	24	0,048	1,15
Energía Real Necesaria (Factor de protección= 1,3)				91,98

Conociendo la energía real necesaria que consume el sistema durante un periodo de tiempo de un día, se realiza de manera básica el cálculo para conocer de manera aproximada las características técnicas mínimas a tener en cuenta para la instalación del SSFV.

Cabe aclarar que el valor del factor de protección, las horas de radiación solar efectivas y la profundidad de descarga del acumulador son parámetros netamente autónomos del diseñador, estos valores no son seleccionados al azar, se obtienen de una serie de información que puede encontrarse en la Web.

$C_{\text{Acumulador}}$ = Capacidad del acumulador

I_{SSFV} = Corriente máxima del SSFV

P_{Panel} = Potencia de modulo solar

E_{RN} = Energía real necesaria

V_{N} = 12 V (voltaje de diseño para el SSFV)

P_{D} = 70% (Profundidad de descarga del acumulador)

V_{mp} = 17,5 V (voltaje nominal, depende del módulo seleccionado)

H_{RSE} = 5h (horas de radiación solar efectivas para Popayán, Cauca)

$$C_{\text{Acumulador}} = E_{\text{RN}} / (V_{\text{N}} * P_{\text{D}}) \quad (4)$$

$$C_{\text{Acumulador}} = 11,9 \text{ Ah}$$

$$I_{\text{SSFV}} = C_{\text{Acumulador}} / H_{\text{RSE}} \quad (5)$$

$$I_{\text{SSFV}} = 2,4 \text{ A}$$

$$P_{\text{Panel}} = I_{\text{SSFV}} * V_{\text{mp}} \quad (6)$$

$$P_{\text{Panel}} = 41,7 \text{ W}$$

La siguiente tabla, muestra las características técnicas mínimas que debe tener los equipos para poder alimentar el consumo de la tarjeta electrónica, cabe aclarar que cuando se hace referencia al consumo de tarjeta electrónica estamos considerando el consumo eléctrico de los sensores que se usarán en este trabajo, ya que estos se alimentan directamente de la tarjeta electrónica.

Tabla 6. Características Técnicas para Instalación del SSFV

Equipo	Min. Técnico	Selección	Cantidad
Modulo Fotovoltaico	12V / 42W	12V / 80W	1
Regulador	12V / 3A	12V / 15A	1
Acumulador	12V / 12Ah	12V / 120Ah	1
Breaker	3A	15A	3
Cable	Calibre 14	Calibre 14	10 (metros)

Se mostró la manera más sencilla de dimensionar un SSFV, cabe aclarar que la selección de equipos se realiza con esas características para garantizar que la producción exceda siempre el mínimo técnico necesario para alimentar la tarjeta.

En el momento de la selección de los equipos se opta por implementar un sistema que supera las características mínimas técnicas, ya que se contaba con un SSFV previamente, por lo cual fue necesario redimensionar los cálculos para los sistemas de protección del sistema a 15 A, logrando obtener un excedente en la producción de energía, el cual puede ser utilizado para alimentar otro tipo de carga externa. Se recomienda que las conexiones e

instalaciones se realicen con las herramientas apropiadas y bajo las medidas de protección adecuadas para instalaciones eléctricas, ya que se trabaja con valores de corrientes que pueden ocasionar accidentes en el momento de realizar la instalación.

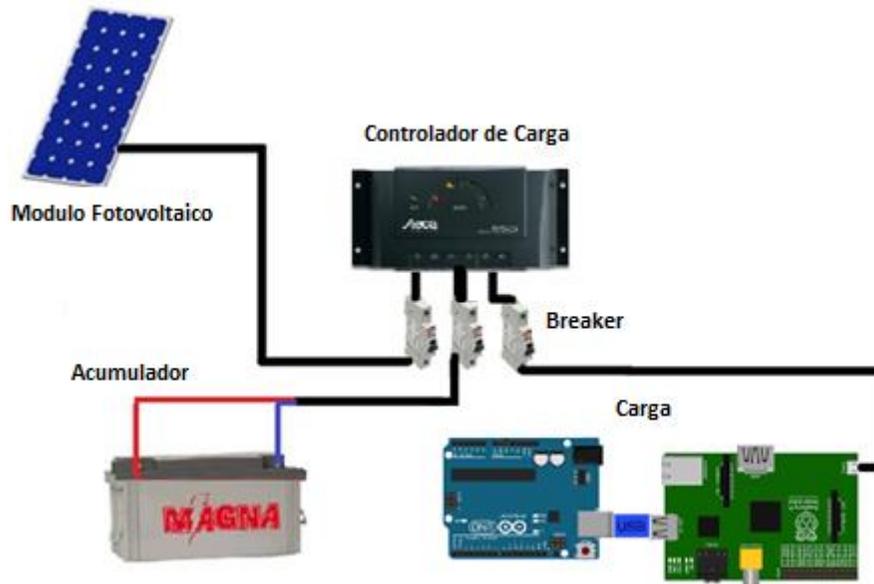


Figura 24. Diagrama de Conexión Del SSFV.

3.4 Sensores

Se miró la manera como estará instalado el SSFV que proporcionará la energía eléctrica requerida para el funcionamiento de los equipos que serán utilizados, ahora bien, se hablará sobre los sensores, los cuales permitirán observar el cambio de las variables físicas, climatológicas y el espectro de radiación, para determinar su influencia en la producción eléctrica del módulo solar fotovoltaico, que es el eje central de este trabajo.

A continuación se explica la manera como se ajustaron los valores que brindaban los sensores, sus características técnicas, así como también su interfaz con la tarjeta electrónica mediante la cual se relacionó la respuesta en tensión del sensor con la variable de interés a sensar, al mismo tiempo que se registra y envía los datos de manera remota para su análisis.

3.4.1 Sensor de Voltaje

Su funcionamiento se basa en un divisor de tensión debido a dos resistencias eléctricas; su rango de funcionamiento, según el fabricante, es de 0V - 25V [36], con una sensibilidad de 0.00489V [36]; es un sensor económico y de fácil acceso. Su elección se realizó basado en los datos técnicos de tensión del módulo fotovoltaico expuestos en la Tabla 2.



Figura 25. Sensor de Voltaje.

[Imagen]. [37].

Este sensor se ajustó implementando el método de comparación directa, para ello se utilizó como instrumento patrón el multímetro FLUKE 289 [38], el cual cuenta con una precisión de 0,03% [38] para tensiones DC. En la figura 26, se presenta los datos obtenidos en este proceso y su correspondiente linealización, la cual permite obtener la función de transferencia requerida para llevar a cabo la medida de la tensión del módulo fotovoltaico.

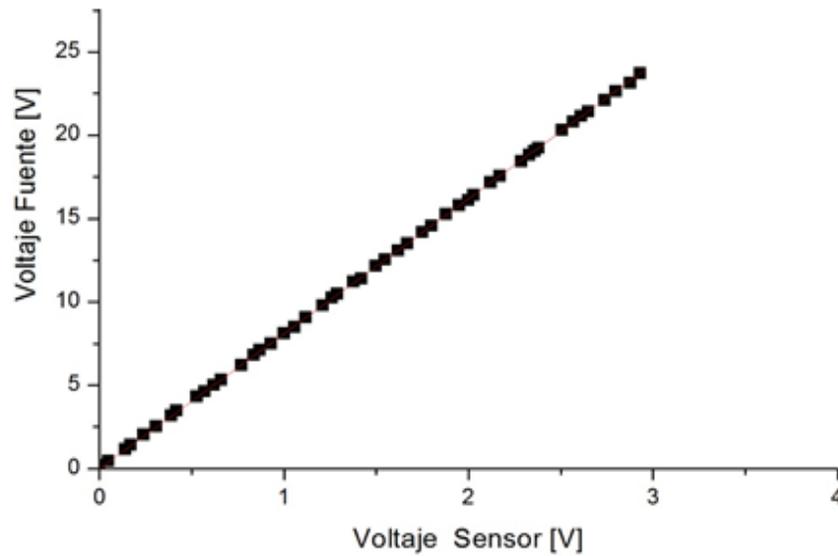


Figura 26. Calibración Sensor de Voltaje.

[Captura de Pantalla]. [39].

El análisis realizado muestra tendencia lineal, como resultado se obtiene la siguiente función de transferencia.

$$V_{\text{Modulo Fotovoltaico}} = 5,04058 * V_{\text{sensor}} \quad [\text{v}] \quad (7)$$

Con la ecuación característica para el sensor de voltaje, se procede a realizar la interfaz con la tarjeta electrónica Arduino Mega. Como la señal de salida es una tensión, se debe utilizar uno de los puertos analógicos para su interfaz, a fin de poder ajustar la lectura mediante software a los valores de Voltaje descritos en la figura 26.

3.4.2 Sensor de Corriente ACS712

Es un sensor que basa su funcionamiento en el efecto Hall, funciona transformando el campo magnético originado por el paso de la corriente a través de un alambre de cobre interno en el sensor convirtiéndolo en un voltaje variable. Su rango de medida es de 0A – 20A [40], presenta una sensibilidad de 100mV/A [40]; es un sensor de fácil acceso y utilización.

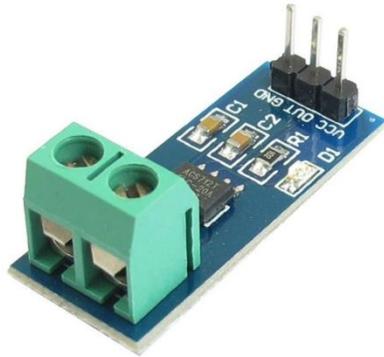


Figura 27. Sensor de Corriente.

[Imagen]. [41].

El ajuste del sensor ACS712, se realizó comparando el voltaje que entregaba el sensor con la pinza amperimétrica FLUKE-381 [42], con una precisión en la medida del 2% [42] y una resolución de 0,1 A [42], los incrementos de corriente se hicieron cada 500mA, comenzando en 0A y finalizando en 4,5 A.

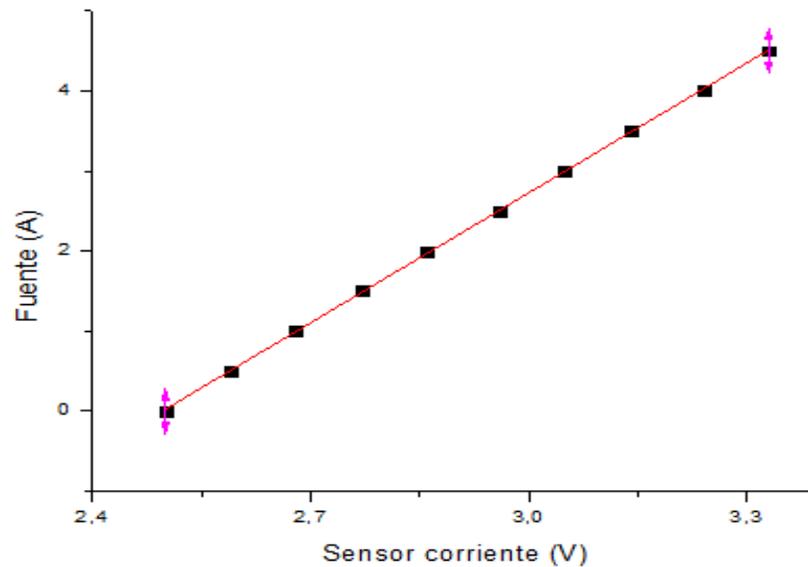


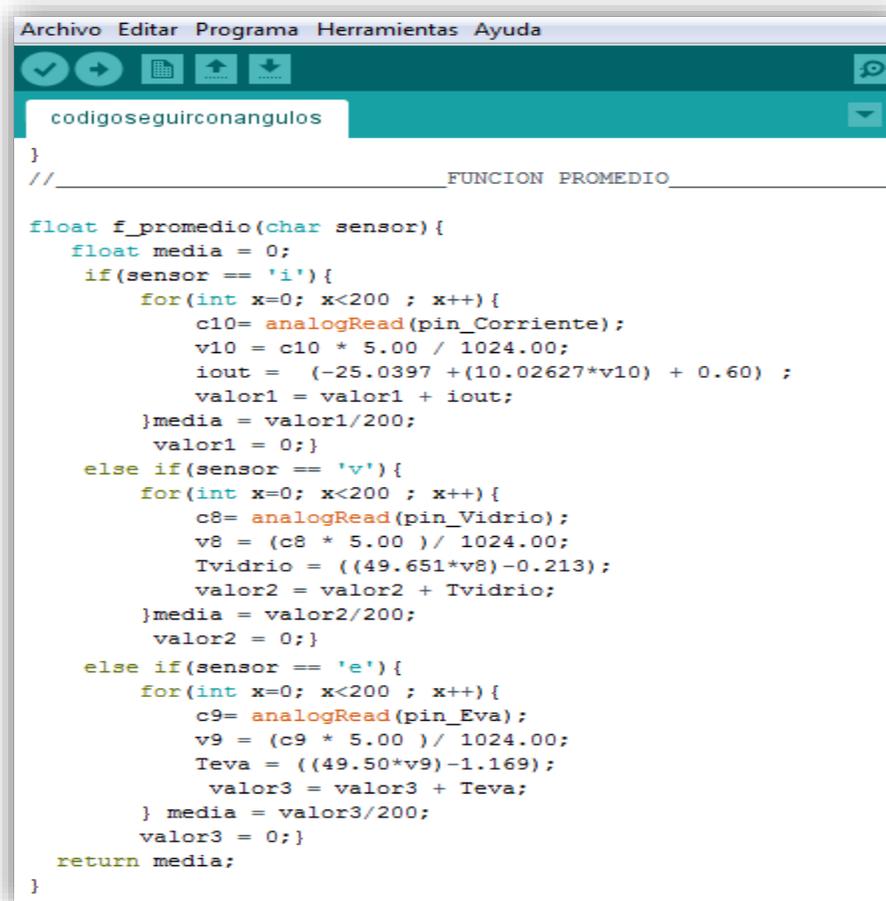
Figura 28. Calibración Sensor de Corriente.

[Captura de Pantalla]. [39].

La tendencia lineal observada en la Figura 28, deja ver que el ajuste del proceso de comparación del valor de salida del sensor con el instrumento patrón, obteniendo la siguiente ecuación característica.

$$\text{Corriente} = (10,02627 * V_{\text{Sensor}}) - 25,0397 \quad [\text{A}] \quad (8)$$

Se observó que el sensor presentaba una fluctuación originada por ruido eléctrico, por lo cual se desarrolló una función adicional en la implementación del código, además se corrigió el error de la medida sumando 0,60 voltios, que corresponde al voltaje de offset presentado por el sensor. (Ver código 9).



```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
codigoseguirconangulos
}
// _____ FUNCION PROMEDIO _____

float f_promedio(char sensor){
    float media = 0;
    if(sensor == 'i'){
        for(int x=0; x<200 ; x++){
            c10= analogRead(pin_Corriente);
            v10 = c10 * 5.00 / 1024.00;
            iout = (-25.0397 +(10.02627*v10) + 0.60) ;
            valor1 = valor1 + iout;
        }media = valor1/200;
        valor1 = 0;}
    else if(sensor == 'v'){
        for(int x=0; x<200 ; x++){
            c8= analogRead(pin_Vidrio);
            v8 = (c8 * 5.00 )/ 1024.00;
            Tvidrio = ((49.651*v8)-0.213);
            valor2 = valor2 + Tvidrio;
        }media = valor2/200;
        valor2 = 0;}
    else if(sensor == 'e'){
        for(int x=0; x<200 ; x++){
            c9= analogRead(pin_Eva);
            v9 = (c9 * 5.00 )/ 1024.00;
            Teva = ((49.50*v9)-1.169);
            valor3 = valor3 + Teva;
        } media = valor3/200;
        valor3 = 0;}
    return media;
}

```

Código 8. Función Promedio.

[Captura de Pantalla]. [23].

3.4.3 Sensor HTU21D

Este módulo permite medir humedad relativa y temperatura al mismo tiempo, cuenta con un regulador de 3.3V [43] y un conversor de nivel analógico que entrega como salida una señal digital I2C. En cuanto a las medidas realizadas por los sensores que lo componen, se pueden registrar valores de humedad relativa con una precisión típica de $\pm 2\%$ [43] y su rango de operación varía de 5% a 95% de HR [43]. Para valores de temperatura presenta una precisión en la medida de $\pm 1^\circ\text{C}$ [43] y su rango varía de $-30 \sim 90^\circ\text{C}$ [43].



Figura 29. Sensor HTU21D.

[Imagen]. [43].

Para obtener la función de transferencia del sensor HTU21D se realiza una revisión de la hoja de datos proporcionada por el fabricante [44], con base a esta información se toman las funciones de transferencia consignadas en él, y se comparan con equipos patrones para observar su precisión. Para el caso de temperatura se utiliza el multímetro FLUKE 289[38], el cual mediante el accesorio de termocupla permite medir temperaturas con una precisión del 1 % [38], por otra parte para la comparación de humedad relativa se utiliza como referencia el equipo Therma-Hygrometer [45]. Las funciones de transferencia se presentan a continuación, haciendo referencia a las condiciones que manifiesta el fabricante para su utilización.

La señal de salida para temperatura S_{Temp} , y la señal de salida para humedad relativa S_{HR} , dependen de la resolución elegida, para este trabajo se opta por una resolución de 16 bits (2^{16}) [43].

fotovoltaico en contacto directo con el vidrio que protege las celdas de silicio y un segundo sensor en contacto con la película de EVA, ubicada en la parte inferior del mismo.

Para el ajuste de la medida se contó con un multímetro FLUKE 289 [38], el cual posee una precisión en la medida del 1% [38], se realizó una serie de toma de datos, donde se consignaban los valores registrados al aumentar en 5°C aproximadamente el fluido calor portador donde se encontraban sumergidos los sensores y el instrumento patrón. Las curvas obtenidas se presentan en la figura 31.

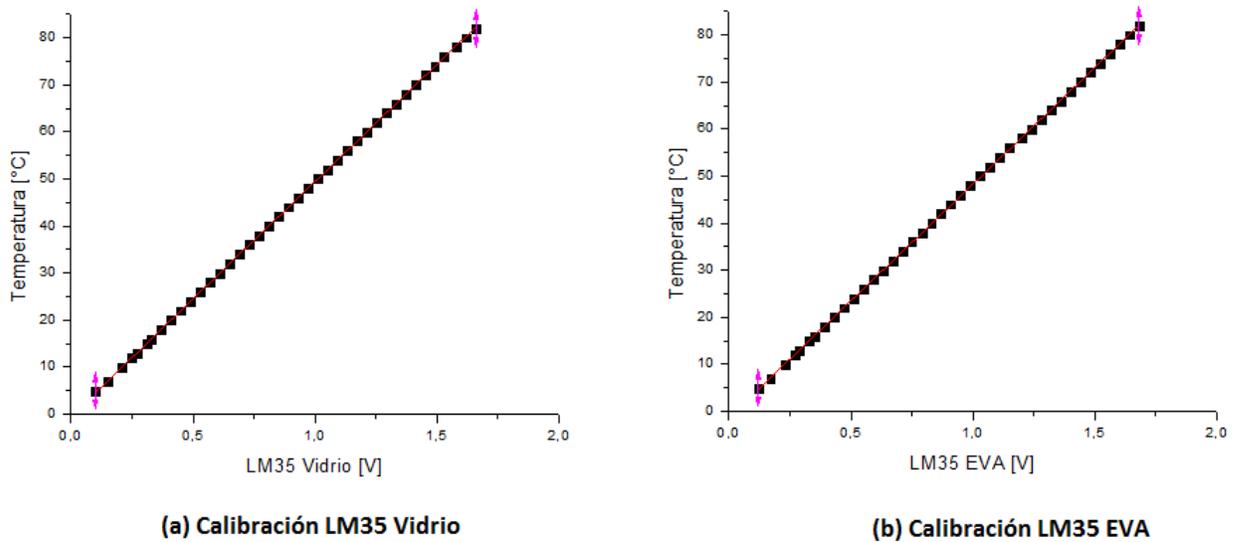


Figura 31. (a) Sensor LM35 Vidrio (b) Sensor LM35 EVA.

[Captura de Pantalla]. [39].

Las Ecuaciones característica tras realizar el proceso de linealización son las siguientes:

$$T_{\text{Vidrio}} = (49,651 * V_{\text{LM35}}) - 0,213 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (11)$$

$$T_{\text{EVA}} = (49,50 * V_{\text{LM35}}) - 1,169 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (12)$$

Al igual que el sensor de corriente, los sensores LM35 presentaron problemas de ruido eléctrico, por lo cual se les aplicó la función de redondeo desarrollada con anterioridad para atenuar este efecto. (Ver Código 8).

3.4.5 Sensor UVM30A

El sensor UVM30A se utiliza para detectar la intensidad de radiación ultravioleta (UV) incidente en la superficie terrestre, este módulo tiene una amplia gama espectral que va desde los 200 nm a los 370 nm [48]; la señal de salida es de tipo analógica, la cual varía la tensión de salida con la intensidad de la radiación UV incidente, posee un tiempo de muestreo menor a los 0,5 s [48].

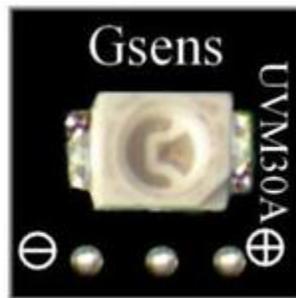


Figura 32. Sensor UVM30A.

[Imagen] [48]

En los anteriores casos se dio a conocer la manera como fueron calibrados cada uno de los sensores y su función de transferencia característica; para la parte del sensado de espectro electromagnético no fue posible realizar un ajuste de calibración, ya que no se contaba con los equipos necesarios para dicho procedimiento, por lo cual se confía en los datos suministrados por el fabricante.

Para realizar la interfaz con la tarjeta electrónica, se descargó la librería del sensor, desarrollada por Víctor Ventura en el artículo “Sensor de radiación ultravioleta con Arduino” [49].

3.4.6 Fotodiodo TEFD4300



Figura 33. Sensores TEFD4300.

[Imagen] [50]

Actualmente los equipos que ofrece el mercado para el censado de radiación electromagnética en el rango del visible son costosos y de difícil acceso, razón por la cual se buscó la manera de observar el comportamiento de la incidencia del espectro visible en la superficie terrestre, siendo el fotodiodo TEFD4300, una solución económica a este problema. El TEFD4300 es un fotodiodo tipo PIN de silicio, con un rango sensible al ancho de banda comprendido entre los 350 nm a 1120 nm [51] (ver Figura 34), centrando su funcionamiento en los 950 nm[51], este fotodiodo al percibir cambios de intensidad genera una corriente foto inversa de 17 μA [51] (Ver Figura 34), con una tensión de salida que va desde los 0v a 1V [51].

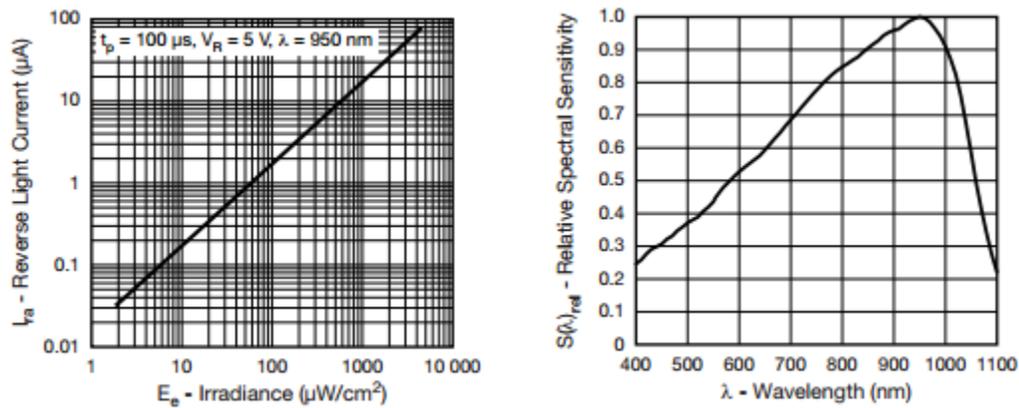


Figura 34. Respuesta Fotodiodo TFD4300.

[Imagen] [52]

3.4.7 Fotodiodo TEFD4300F



Figura 35. Fotodiodo TFD4300F.

[Imagen] [53]

Para observar el comportamiento de la incidencia de radiación electromagnética en el rango del infrarrojo, se utilizó el fotodiodo TEFD4300F, ya que los sensores que actualmente dispone el mercado para este tipo de medidas son costosos. Este sensor, al igual que el TEFD4300, es un fotodiodo tipo PIN de silicio, sensible en el rango de longitud de onda infrarroja comprendido entre los 770 nm a 1070 nm [53], es un dispositivo epoxi negro, el cual cuenta con un filtro de bloqueo de la radiación incidente con longitudes de onda comprendidas entre los 850 nm a 950 nm [53]. El cambio de intensidad genera una corriente foto inversa de 17 μA [53] (Ver Figura 36), y su tensión de salida toma valores entre los 0V y 1V.

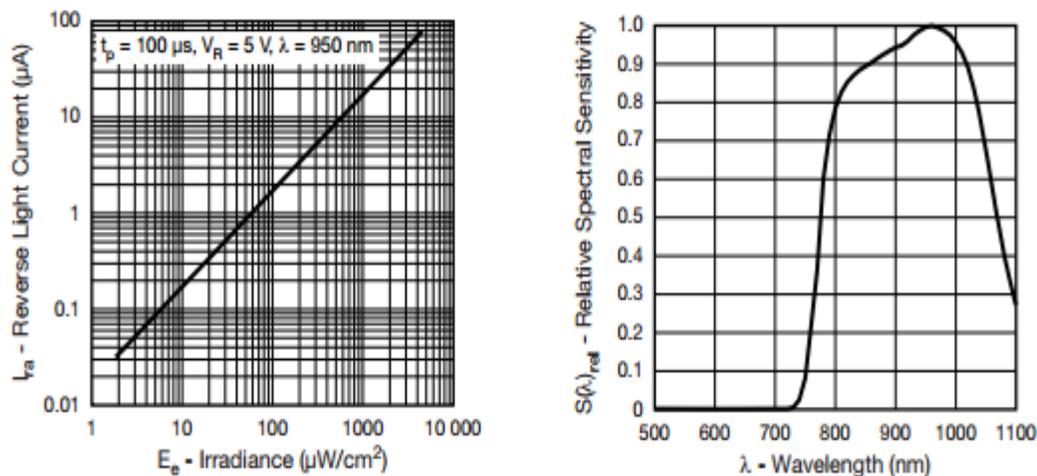


Figura 36. Respuesta Fotodiodo TFD4300F.

[Imagen] [53]

Para el registro de la lectura se toma el valor de tensión que es proporcional a la incidencia de radiación, y se asume como un indicador de la cantidad de intensidad de infrarrojo incidente.

3.5 Almacenamiento de Datos

En la actualidad, cualquier dispositivo electrónico que se encargue de realizar una o varias tareas al mismo tiempo, requiere una unidad de procesamiento, que permita manejar múltiples variables, tanto de entrada como de salida de manera rápida, eficiente y sobretodo que reduzca el tiempo de ejecución y los errores que puedan presentarse. En el mercado existe una gran variedad de dispositivos (PC, microcontrolador, FPGA, etc) que permiten realizar este procesamiento de variables. Una alternativa de fácil acceso por su costo reducido es la tarjeta electrónica Raspberry Pi, "desarrollada en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi, con el objetivo de estimular el gusto por las ciencias de la computación en las escuelas"

Para el almacenamiento remoto de datos obtenidos por la tarjeta Arduino mega y diversos sensores utilizados, se empleó la Tarjeta Raspberry Pi modelo B, ya que se contaba previamente con ella, su tamaño reducido y facilidad de manejo la hacen un complemento electrónico óptimo para la realización de los objetivos de este proyecto.

La Raspberry Pi modelo B, cuenta con un chip integrado Broadcom BCM2835, este contiene un procesador ARM1176JZF que funciona a 700 MHz, memoria RAM de 512 Mbytes, procesador gráfico VideoCore IV y sus dimensiones de 85.60mm × 53.98mm la hacen un dispositivo muy poderoso y compacto que puede realizar muchas de las tareas que hace un PC de escritorio. (Castro, 2014)[54]

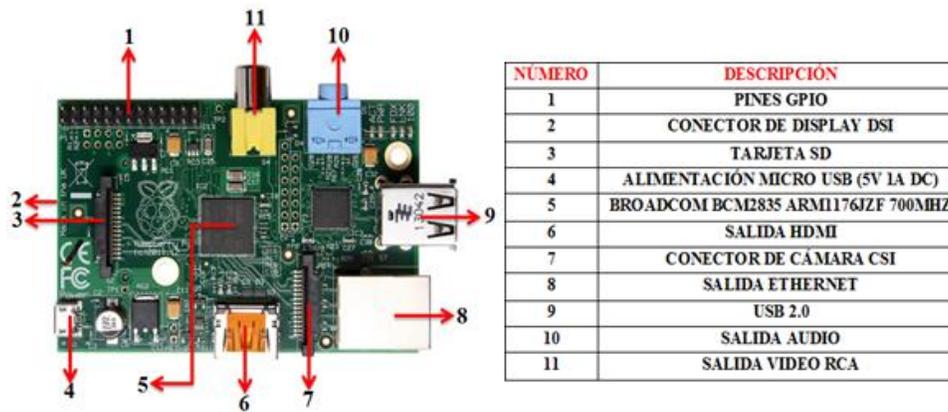


Figura 37. Componentes y Puertos de la Tarjeta Raspberry Pi Modelo B.

[Imagen] [55].

Además, en la placa se encuentran una salida de video y audio a través de un conector HDMI así como también una salida de video compuesto y una salida de audio a través de un minijack[56]. En cuanto a la conexión a la red, la Raspberry Pi cuenta con un puerto Ethernet para conectar un cable RJ-45 directamente al router, también posee 2 puertos USB 2.0 para un teclado o un mouse así como cualquier dispositivo de almacenamiento externo o adaptador inalámbrico si se quiere conectar a la red mediante WIFI.(Anónimo, 2013)[56]. Para el correcto funcionamiento de la tarjeta Raspberry Pi es necesario contar con un medio de almacenamiento, para este proyecto se utilizó una memoria SD de 8Gbites de capacidad, no obstante, en otros modelos se puede utilizar tanto SD como microSD. Para su alimentación se puede utilizar un cargador de teléfono móvil con conexión micro USB y que proporcione una corriente mínima de 750 a "1000 mah para placas antiguas y de al menos 2500 mah para las placas modernas" (López, 2017) [57], sobre todo si se piensan utilizar dispositivos USB que requieran un flujo de corriente considerable

En cuanto al software, la página de Raspberry Pi (www.raspberrypi.org) ofrece una gran variedad de sistemas operativos (NOOBS, BerryBoot, Raspbian, OpenELEC, Windows 10 Pi 2...) para su descarga totalmente gratuita (Cobo, 2015) [58]. Raspberry Pi usa mayoritariamente sistemas operativos basados en el núcleo Linux. Para este trabajo se ha elegido el sistema operativo Raspbian, una distribución derivada de Debian que está optimizada para el hardware de Raspberry Pi. Finalmente, todos los algoritmos requeridos para este proyecto que permitirá la recepción de los datos y su procesamiento, se

desarrollaron en el entorno de programación de Python y la IDE de arduino en sus versiones para el sistema operativo Raspbian.

3.6 Primer Encendido de la Raspberry Pi

Una vez que se cuenta con todo el hardware necesario para colocar en funcionamiento la tarjeta Raspberry pi (mouse, teclado, módulo wifi, pantalla y microSD), se procede a quemar el sistema operativo en la tarjeta microSD (se debe aclarar que si se cuenta con conexión a internet desde la raspberry, se puede omitir el uso del mouse, teclado y pantalla utilizando una serie de comandos para realizar una conexión remota desde un computador). En primer lugar, se debe instalar el sistema operativo en la tarjeta microSD, para este proyecto se escogió el sistema operativo Raspbian, una modificación derivada de Debian que se puede descargar de la página oficial de raspberry (www.raspberrypi.org), en la pestaña de descargas.

Para montar y quemar el sistema operativo en la microSD, se utilizó un software con licencia publica, llamado Win32 Disk Imager Beta, diseñado para escribir una imagen de disco sin procesar en un dispositivo extraíble o hacer una copia de seguridad de un dispositivo extraíble en un archivo de imagen sin procesar (Justin, 2012) [59]. Luego de haber grabado el sistema operativo en la tarjeta microSD, se procede a conectar todo el hardware y se conecta la Raspberry pi a la corriente eléctrica.

A continuación, aparecerán en pantalla los procesos que se están ejecutando para dar inicio a la raspberry. Al iniciar la raspberry pi se pide un nombre de usuario y una contraseña que por defecto son:

1. Nombre de usuario (login): pi
2. Contraseña: raspberry.

Luego de ingresarla se abrirá el entorno grafico del sistema operativo, y se puede comenzar a trabajar en la tarjeta como en cualquier computador de escritorio, modificar su idioma, configurar una nueva red wifi, creando un nuevo documento de texto o escribiendo un algoritmo de programación.

3.7 Conexión a Internet de la Raspberry Pi

La conexión a internet de la raspberry pi se puede realizar de dos formas diferentes:

3. Mediante conexión por cable Ethernet.
4. Mediante un adaptador Wifi.

3.7.1 Conexión por Cable Ethernet

La forma más fácil de conectar la raspberry pi a internet es mediante un cable Ethernet, este se conectara a puerto rj-45 de la raspberry y a este mismo puerto en la parte posterior del router. Tan pronto como se conecta la raspberry al router, los LEDs indicadores de red comenzaran a parpadear.



Figura 38. Conexión de la Raspberry Pi al Router Mediante Conexión Ethernet.

[Imagen] [60]

Para la mayoría de las redes domésticas, la Raspberry Pi debe ser capaz de conectarse a Internet sin ningún tipo de configuración adicional. Para que esto funcione, el router debe estar configurado para DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol). Este servicio se ejecuta en el router, repartiendo direcciones IP a cualquier dispositivo que se conecte a él a través de Wi-Fi o por cable. (Cruz, 2013) [61]

3.8 Programación de la Raspberry Pi

3.8.1 Carga e Instalación de Librerías

Para comenzar a realizar cualquier algoritmo de programación en el lenguaje Python es necesario primero descargar algunas librerías que se utilizarán así, como también, actualizar algunas que ya vienen instaladas en la versión 2.7.9 de Python.

Debido a que la conexión que se realiza entre la Raspberry pi y la Arduino Mega se hace por medio de puerto USB, lo primero a realizar es instalar la librería necesaria para el control del puerto serie desde el entorno de programación de Python, para ello se ejecuta el comando `sudo apt-get install python-serial`, desde consola en la Raspberry pi.

Con esto ya se tiene control del puerto serie desde Python y se puede enviar y transmitir datos hacia el dispositivo que se conecte por este medio.

Continuando con el procedimiento, se ejecutan tres comandos más que permiten descargar cualquier actualización reciente de las librerías que viene pregrabadas para Python (`sudo apt-get install update`, `sudo apt-get install upgrade` y `sudo reboot`)

La instrucción SUDO permite al usuario ejecutar programas con privilegios de seguridad, convirtiéndose temporalmente en superusuario. El código `update` sirve para actualizar los repositorios pregrabados, actualizando todos los paquetes disponibles. Esta operación es recomendable hacerla cada vez que se añade algún nuevo repositorio a la lista. El comando `upgrade` instala todas las actualizaciones que se descargaron con el anterior comando. Finalmente, el comando `reboot` es para que la raspberry se reinicie.

Después de realizar todas las actualizaciones necesarias se puede comenzar a escribir el algoritmo de programación, para ello, lo primero que se debe hacer es cargar las librerías necesarias para el proyecto. Este proceso se realiza mediante, el comando `import`.

Algunas de las librerías utilizadas para el Proyecto ya vienen instaladas en la Raspberry pi, como es el caso de la librería `time` y `datetime` (utilizada para tener una noción del tiempo) y otras como la librería `serial`, es necesario descargarlas e instalarlas para que se pueda hacer uso de ella en cualquier script de python.

3.8.2 Descripción del Algoritmo de Programación

El algoritmo de programación desarrollado para efectuar el almacenamiento remoto de los datos se hizo en Python en su versión 2.7.9. Este se encarga de verificar la comunicación serial con el Arduino mega cada minuto, en ese periodo de tiempo se recibe los datos provenientes del Arduino y se guardan en una variable de tipo string. Asimismo, en otra variable se solicita la fecha y la hora del sistema para posteriormente abrir un documento de texto, ingresar las dos variables anteriores y almacenarlas. Para confirmar los datos que se van guardando en el documento, se realiza una impresión por pantalla de la cantidad de datos guardados y de cada uno de ellos. Cabe resaltar que la impresión de datos por pantalla se lleva a cabo para poder visualizar posibles errores en la lectura de los sensores que se puedan generar por factores inesperados. Esta visualización se hace de forma aleatoria a diferentes horas del día, entrando al entorno gráfico de la Raspberry desde un servidor externo (Table, celular o PC) y no genera un aumento en el consumo de energía de la tarjeta.

06/06 14:49:24	0.62	0.63	555.73	4	28.90	41.45	51.75	45.34	15.32	4.20	14.35	-14.79	-23	-21
06/06 14:50:26	0.61	0.53	557.49	4	29.17	41.62	51.89	45.38	15.32	4.20	14.31	-14.65	-23	-21
06/06 14:51:27	0.62	0.73	556.67	4	29.41	40.95	51.61	45.36	15.23	4.30	14.43	-14.89	-23	-21
06/06 14:52:28	0.61	0.59	554.83	4	29.74	38.90	51.91	45.62	15.25	4.30	14.39	-14.50	-23	-21
06/06 14:53:29	0.61	0.52	549.45	4	29.72	39.64	51.24	44.99	15.08	4.30	14.47	-14.65	-23	-21
06/06 14:54:31	0.61	0.71	552.83	4	29.05	40.08	50.73	44.76	15.13	4.30	14.39	-14.65	-23	-21
06/06 14:55:32	0.62	0.90	548.24	4	28.20	42.46	48.30	43.47	14.98	4.40	14.04	-14.45	-23	-21
06/06 14:56:34	0.61	0.89	542.74	4	28.70	41.37	48.98	43.24	14.98	4.30	14.27	-14.45	-23	-21
06/06 14:57:35	0.61	0.51	542.12	4	29.74	40.13	50.54	44.48	15.23	4.30	14.31	-14.74	-23	-21
06/06 14:58:37	0.60	0.89	552.23	4	30.08	39.25	51.59	45.08	15.45	4.30	14.39	-14.70	-23	-21
06/06 14:59:38	0.57	0.62	351.47	2	30.11	38.04	52.12	45.80	15.08	2.10	14.19	-15.04	-23	-21
06/06 15:00:39	0.61	0.82	548.70	4	29.62	40.32	51.37	45.08	15.27	4.40	14.63	-14.55	-23	-21
06/06 15:01:41	0.61	0.49	555.29	4	29.68	39.68	51.00	44.69	14.93	4.50	14.04	-14.65	-23	-21
06/06 15:02:42	0.55	0.58	306.31	1	28.92	40.33	49.55	44.45	14.46	1.80	13.68	-14.84	-23	-22
06/06 15:03:43	0.61	0.54	542.86	4	29.49	40.07	50.63	44.60	15.15	4.50	14.47	-14.55	-23	-23
06/06 15:04:45	0.59	0.49	422.33	3	31.28	37.01	51.88	45.81	14.98	3.10	14.04	-14.50	-23	-23
06/06 15:05:46	0.57	0.50	412.71	3	31.59	36.36	52.14	46.22	15.03	3.00	14.15	-14.50	-24	-23
06/06 15:06:48	0.61	0.71	511.89	4	30.62	38.04	53.50	46.97	15.08	3.90	14.23	-14.89	-23	-23
06/06 15:07:49	0.61	0.73	512.06	4	30.28	39.21	51.91	46.70	15.20	4.20	14.12	-14.74	-23	-23
06/06 15:08:50	0.52	0.42	195.42	0	29.92	38.73	51.40	46.41	14.93	0.80	14.00	-14.79	-23	-22
06/06 15:09:52	0.53	0.76	204.84	0	29.82	38.38	49.92	44.96	14.66	1.00	13.56	-14.55	-23	-23
06/06 15:10:53	0.53	0.80	230.08	1	28.32	41.53	47.14	43.61	14.66	1.30	13.92	-14.70	-23	-23
06/06 15:11:54	0.60	0.64	489.18	3	28.85	41.72	48.46	43.13	14.95	4.10	14.39	-14.31	-23	-23
06/06 15:12:56	0.60	0.47	484.06	3	30.25	39.12	49.14	43.87	14.93	4.10	14.15	-14.40	-23	-23
06/06 15:13:57	0.60	0.81	478.80	3	30.79	38.02	49.92	44.33	15.05	4.10	14.39	-14.35	-23	-23
06/06 15:14:59	0.60	0.67	478.62	3	30.97	38.27	52.03	45.93	15.40	3.90	14.23	-14.74	-23	-23
06/06 15:16:00	0.58	0.45	474.67	3	31.49	37.54	52.84	46.50	15.18	3.80	14.51	-14.60	-23	-23
06/06 15:17:02	0.59	0.46	472.82	3	31.63	36.51	53.38	47.37	15.27	3.90	14.55	-14.70	-23	-23
06/06 15:18:03	0.58	0.83	471.63	3	31.31	37.19	53.55	47.10	15.25	3.90	14.55	-14.89	-23	-24
06/06 15:19:04	0.59	0.83	465.52	3	30.67	38.63	53.26	46.56	14.93	3.90	14.23	-14.65	-22	-24
06/06 15:20:06	0.59	0.83	459.64	3	31.38	37.00	52.78	46.39	14.44	3.60	14.12	-14.55	-22	-24
06/06 15:21:07	0.59	0.45	449.83	3	31.15	36.73	53.15	47.08	14.83	3.80	14.00	-14.60	-23	-24
06/06 15:22:08	0.58	0.70	448.06	3	30.94	37.74	53.51	47.54	14.93	3.80	14.47	-14.79	-23	-24
06/06 15:23:10	0.58	0.65	449.74	3	30.82	38.00	54.12	48.36	15.27	3.70	14.55	-14.89	-23	-24
06/06 15:24:12	0.59	0.73	445.84	3	31.98	35.96	54.50	48.59	15.32	3.60	14.23	-14.99	-23	-24
06/06 15:25:13	0.58	0.45	439.15	3	31.71	36.19	54.78	48.78	15.18	3.60	14.51	-14.74	-23	-24
06/06 15:26:14	0.58	0.71	435.86	3	31.58	36.88	53.85	47.99	14.93	3.70	14.08	-14.79	-23	-24
06/06 15:27:15	0.57	0.81	430.97	3	31.79	36.39	54.10	48.32	15.25	3.70	14.35	-14.89	-23	-24
06/06 15:28:17	0.57	0.58	428.18	3	32.23	35.44	54.53	48.91	15.00	3.60	14.39	-14.65	-23	-24
06/06 15:29:18	0.57	0.58	424.82	3	31.40	36.83	54.13	48.36	15.08	3.60	14.39	-14.84	-22	-24
06/06 15:30:19	0.58	0.75	419.24	3	30.64	37.80	53.42	47.94	15.03	3.60	14.08	-14.89	-23	-24
06/06 15:31:21	0.57	0.52	419.77	3	31.25	36.98	54.82	49.02	15.35	3.50	14.23	-14.99	-23	-24
06/06 15:32:23	0.57	0.73	418.66	3	31.43	36.50	54.81	49.08	15.27	3.40	14.04	-14.84	-23	-24
06/06 15:33:24	0.57	0.76	417.32	3	31.65	36.25	55.11	49.03	15.13	3.50	14.19	-14.79	-22	-25
06/06 15:34:25	0.57	0.44	416.59	3	31.74	35.94	55.27	49.14	15.03	3.50	14.23	-14.74	-21	-26
06/06 15:35:26	0.58	0.54	417.43	3	31.21	36.93	54.55	48.69	15.15	3.60	14.08	-14.74	-22	-26
06/06 15:36:28	0.59	0.80	410.83	3	30.38	38.94	54.03	48.25	14.93	3.50	14.23	-14.84	-22	-27
06/06 15:37:29	0.57	0.80	409.01	3	30.93	37.19	53.93	48.23	15.10	3.50	14.19	-14.70	-22	-26

Figura 39. Datos Registrados Mediante el Programa Implementado.

[Captura de Pantalla] [62]

3.9 Conexión Remota de la Raspberry Pi desde una Red Local

Para poder acceder a los datos almacenados dentro de la raspberry pi, es necesario primero realizar una configuración al router al cual se está estableciendo la conexión a internet. De esta manera, se pueden abrir los puertos de comunicación que permitirán posteriormente al usuario, acceder a los datos desde cualquier parte del mundo, sin limitarse únicamente a la red local. La apertura de los puertos depende en gran medida de la marca del router con el que se esté trabajando y también de las limitaciones de acceso que la empresa proveedora del servicio de internet haya establecido.

Para este proyecto, la apertura de los puertos no se llevó a cabo debido a que los proveedores del servicio de internet presentaban muchas limitaciones y requerían permisos

para realizar este proceso, por esta razón, se limitó el acceso a la tarjeta exclusivamente desde un dispositivo que estuviera conectado a la red local.

Para poder realizar la conexión a la raspberry pi, es necesario tener la dirección IP que el router le asigna automáticamente a cada dispositivo que se conecta a la red local. Para obtenerla hay diferentes formas de hacerlo, en este caso se utilizó una aplicación para dispositivos móviles con sistema operativo android llamada Fing, que se puede descargar de forma gratuita en la Play Store de Google play. Fing, cuenta con una variedad de herramientas, entre ellas está la posibilidad de escanear cualquier red Wifi a la que esté conectado el dispositivo móvil y hacer un mapeo de los dispositivos conectados a esa red con su respectiva dirección IP.(Domotz Ltd, 2017)[63]

Una vez se cuente con la dirección IP asignada por el router se procede a introducirla en un programa llamado Putty (Tatham, 2017) [64] que es un cliente SSH y telnet, desarrollado originalmente por Simon Tatham para la plataforma Windows. Putty es un software de código abierto disponible con código fuente y desarrollado y soportado por un grupo de voluntarios (Anónimo, 2017) [65]. Este programa permite establecer la conexión con la Raspberry por medio del protocolo SSH, aunque su funcionamiento no se limita únicamente a la raspberry, ya que puede establecer conexión con otras tarjetas y también cuenta con múltiples protocolos de comunicación. Al ingresar la dirección IP dentro del programa y establecer el protocolo de comunicación, se oprime el botón de aceptar y el programa abre una ventana por medio de la cual se puede acceder a la raspberry mediante comandos, al igual que cuando se accede por medio de un monitor, mouse y teclado, la raspberry solicita que se ingrese el usuario y la contraseña que se le han asignado para poder verificar que sea personal autorizado y evitar que personas ajenas al trabajo puedan tener acceso a los datos almacenados.

Mediante el uso de comandos se puede acceder a todo el contenido de la raspberry, crear directorios, abrir programas, etc. Sin embargo, si se quiere ingresar por medio del entorno grafico de la tarjeta es necesario instalarle un servidor que permita tener acceso de esta forma, para esto se utilizó el servidor tightvncserver. Para realizar la conexión por entorno grafico es necesario ingresar al programa Putty anteriormente descrito, loggear el usuario y

contraseña y a continuación escribir el comando `tightvncserver` y oprimir la tecla enter. En ese momento el programa devuelve un mensaje con la información necesaria del monitor asignado para poder acceder a la tarjeta por el entorno gráfico.

El programa `tight vnc` (Kaplinsky, 2017) [66] debe ser instalado en el computador desde el cual se vaya a establecer la conexión con la tarjeta, además de estar conectado a la misma red local donde se ha establecido la conexión a internet de la tarjeta. Luego de la instalación del programa, se procede a ingresar la dirección IP de la raspberry y de igual manera se ingresa la contraseña y usuario. Finalmente, se despliega en el computador una ventana en la que se muestra el escritorio de la tarjeta y por el cual se puede realizar todos los procesos que se requieran hacer.

Para este trabajo de grado fue necesario transferir el documento de texto donde se están almacenando los datos recolectados por el seguidor y los sensores a un computador para tener mayor manejo de estos. Para llevar a cabo esta tarea fue necesario instalar en el computador un software que permitiera realizar esta tarea. Esa conexión se hace mediante un programa utilizado para sistemas operativos Windows.

WinSCP es un software que se encarga de consumir las operaciones primordiales de los archivos; tal como lo son las descargas y subidas de estos. Asimismo es posible a través de él cambiar los nombres de directorios y archivos, crear enlaces simbólicos y accesos directos, crear nuevos directorios, cambiar las propiedades de archivos y carpetas actuales. Este programa permite eliminar, copiar o mover archivos sin inconveniente alguna y de manera rápida. (Noel, 2015) [67]

Capítulo 4: ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1 Análisis en la Producción de Potencia en el Módulo Fotovoltaico

El funcionamiento de la tarjeta desarrollada permite la adquisición de datos en tiempo real del SSFV tanto de voltaje como de corriente, a su vez, también realiza el cálculo de potencia producida por el módulo fotovoltaico a partir de estos datos para las 24 horas del día, sin embargo, para efectos del estudio realizado se limitó la adquisición de los datos al rango de funcionamiento del seguidor solar definido en el capítulo 2.

En las figuras 40 y 41, se presenta el comportamiento obtenido para el sistema fijo durante el 18 de abril de 2017, mientras que en las figuras 42 y 43 se presenta el comportamiento de dichas variables para el sistema móvil para el día 24 de mayo de 2017; se evidencia que el voltaje tiene variaciones de 1 voltios aproximadamente, mientras que para la corriente las variaciones se dan en el rango de los 0 a 6 amperios, estas fluctuaciones generan cambios en las medidas de potencias tanto para el sistema fijo como móvil; sin embargo, al analizar el comportamiento de la corriente, se observa que es ésta la que determina la tendencia en la curva de producción de potencia.

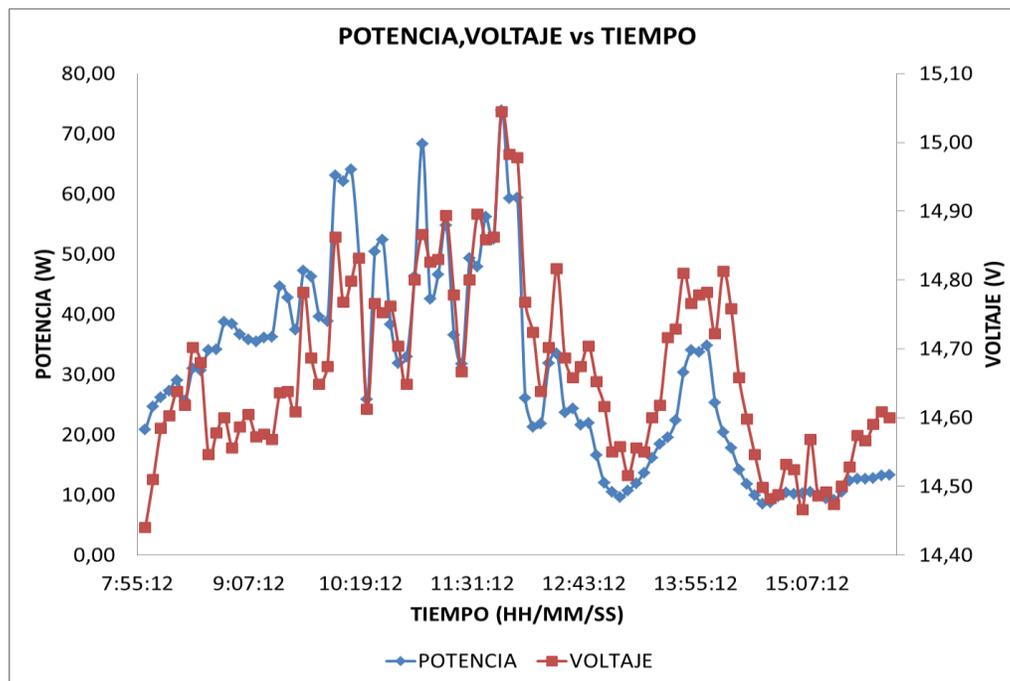


Figura 40. Potencia, Corriente vs Tiempo, Abril 18, a 25°C y 73% HR. SSFV Fijo.

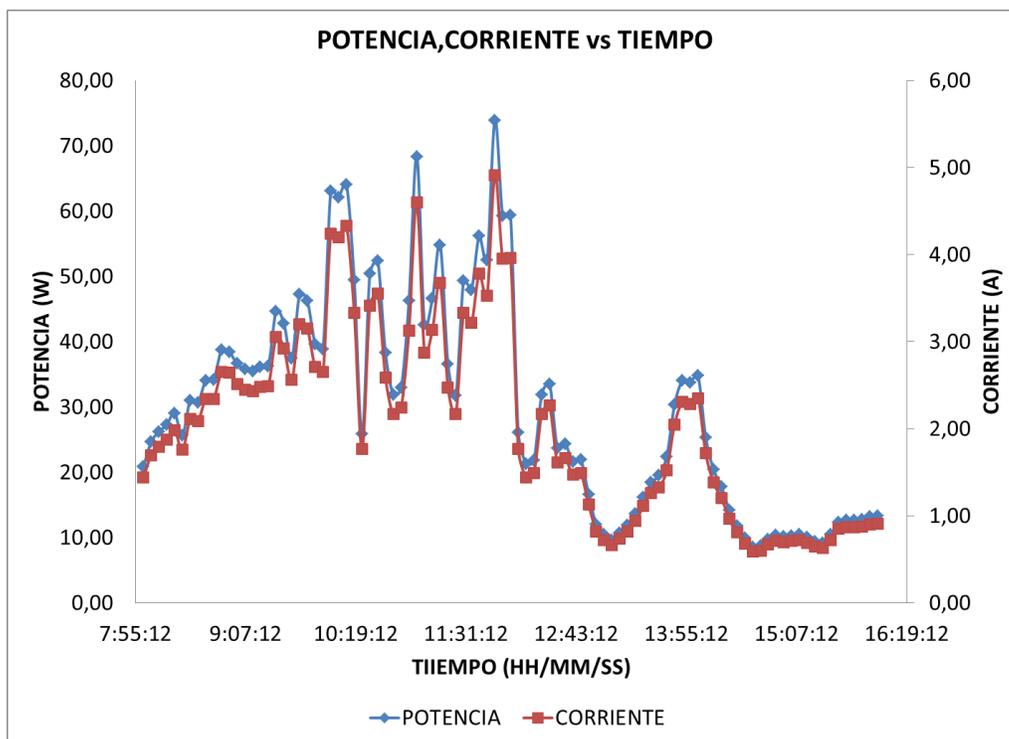


Figura 41. Potencia, Voltaje vs Tiempo, Abril 18, a 25°C y 73% HR. SSFV Fijo.

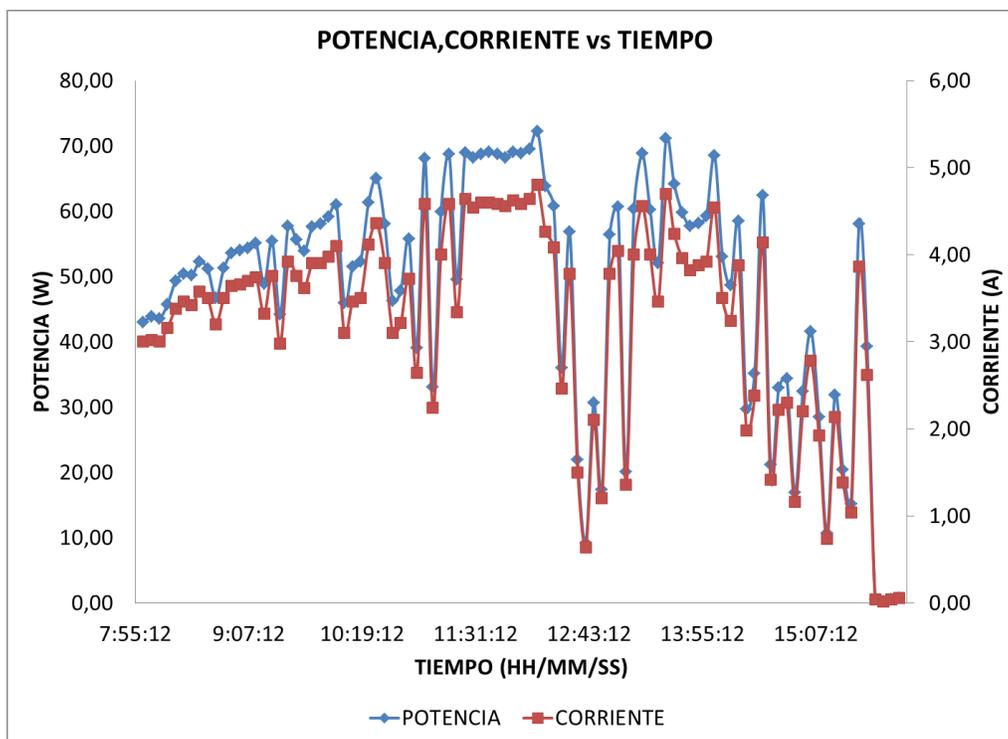


Figura 42. Corriente, Potencia vs Tiempo, Mayo 24, a 28°C y 58% HR. SSFV Móvil.

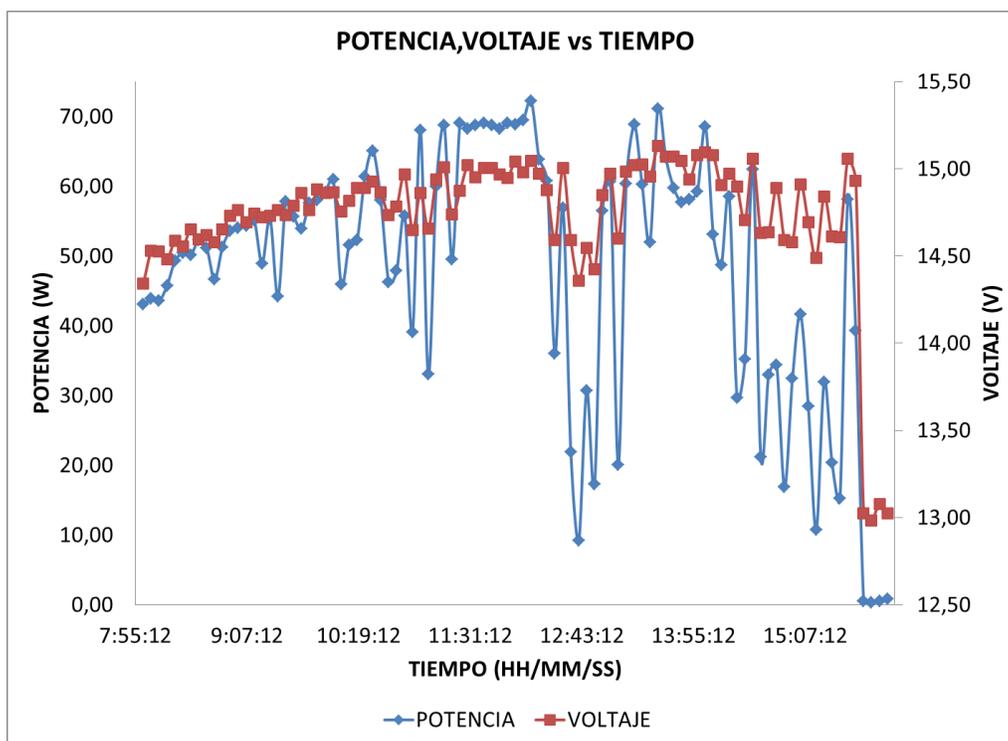


Figura 43. Voltaje, Potencia vs Tiempo, Mayo 24, a 28°C y 58% HR. SSFV Móvil.

A lo largo del día se observa el cambio en la potencia producida por el sistema fotovoltaico, tanto para el sistema fijo como para el móvil evidenciando cambios significativos entre las 8 y las 9 de la mañana, donde se nota un incremento en potencia debido al cambio en el ángulo de inclinación del sol, que repercute en el aumento de la radiación que llega a la superficie del panel solar. A las 12 del medio día se tienen en ambos sistemas (fijo y móvil) valores altos en potencia debido a que el sol se encuentra sobre el módulo fotovoltaico. A las 3 de la tarde, la producción del sistema fotovoltaico decae a los valores más bajos registrados en el día, evidenciando que la incidencia de la radiación presenta fenómenos de refracción debidos al movimiento rotacional de la tierra, ya que el ángulo de incidencia de estos sobre el módulo es mayor cuando el sol comienza a ocultarse en el horizonte.

Del mismo modo es evidente que el comportamiento de la potencia producida por el sistema fotovoltaico no es constante a lo largo del día, su producción se ve influida tanto por variaciones en la radiación captada por la superficie del panel solar como por la hora del día y el mes del año, producto del movimiento de rotación y translación que experimenta el planeta; sin embargo, existen otras variables asociadas a la producción de

potencia como lo son: temperatura ambiente y la humedad relativa del lugar donde se encuentra instalado el sistema fotovoltaico.

4.2 Relación entre Potencia y Temperatura

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos de este trabajo de grado es determinar la influencia que tienen las variables climatológicas en la producción energética para un SSFV, la tarjeta desarrollada esta provista con sensores que permiten adquirir datos de temperatura ambiente, temperatura del módulo fotovoltaico y humedad relativa en tiempo real. En las figuras 44,45,46 y 47 se presentan los datos obtenidos de dichas variables en relación al tiempo, tanto para el sistema fijo como para el sistema móvil, para los días 14 de mayo y 6 de junio de 2017.

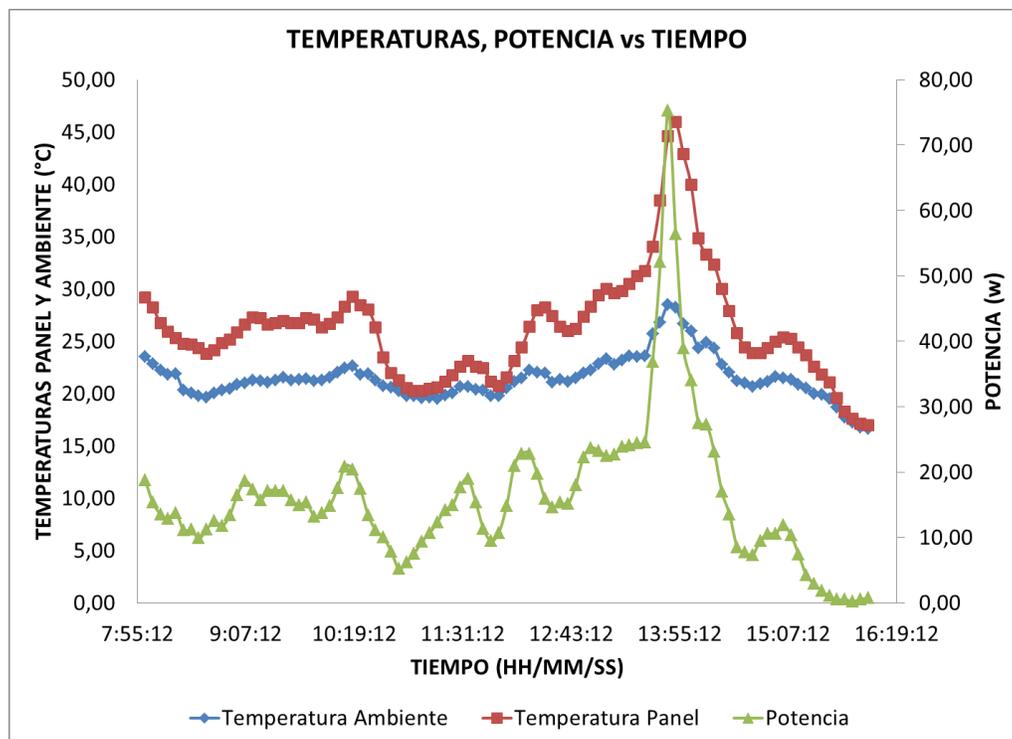


Figura 44. Temperaturas, Potencia vs Tiempo, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.

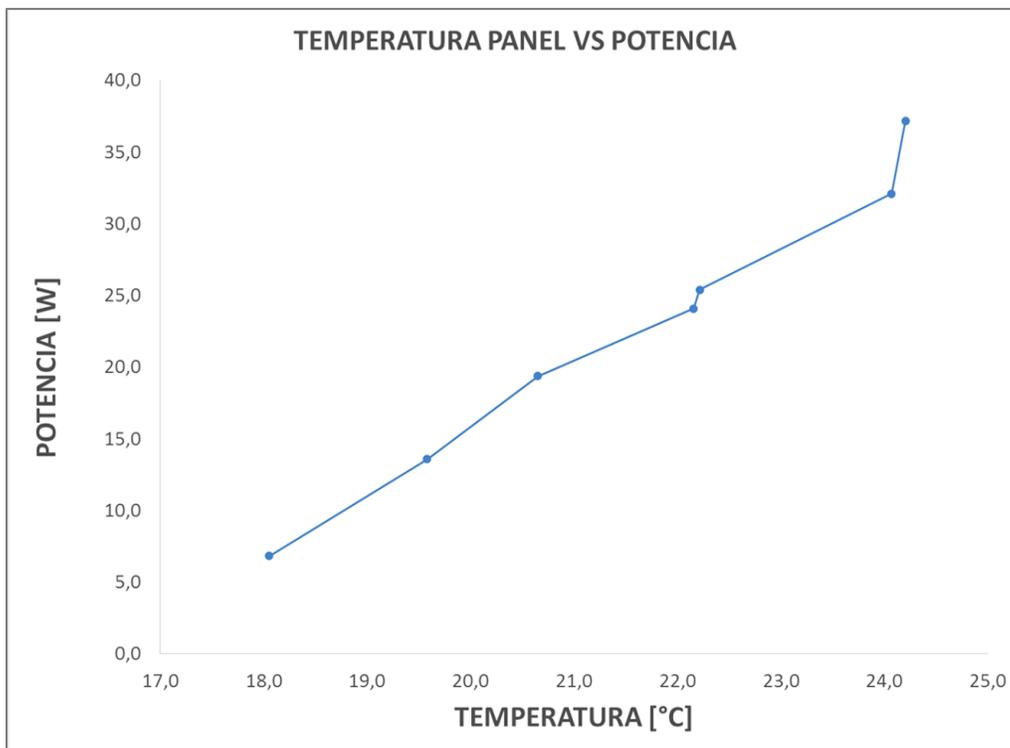


Figura 45. Temperaturas vs Potencia, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.

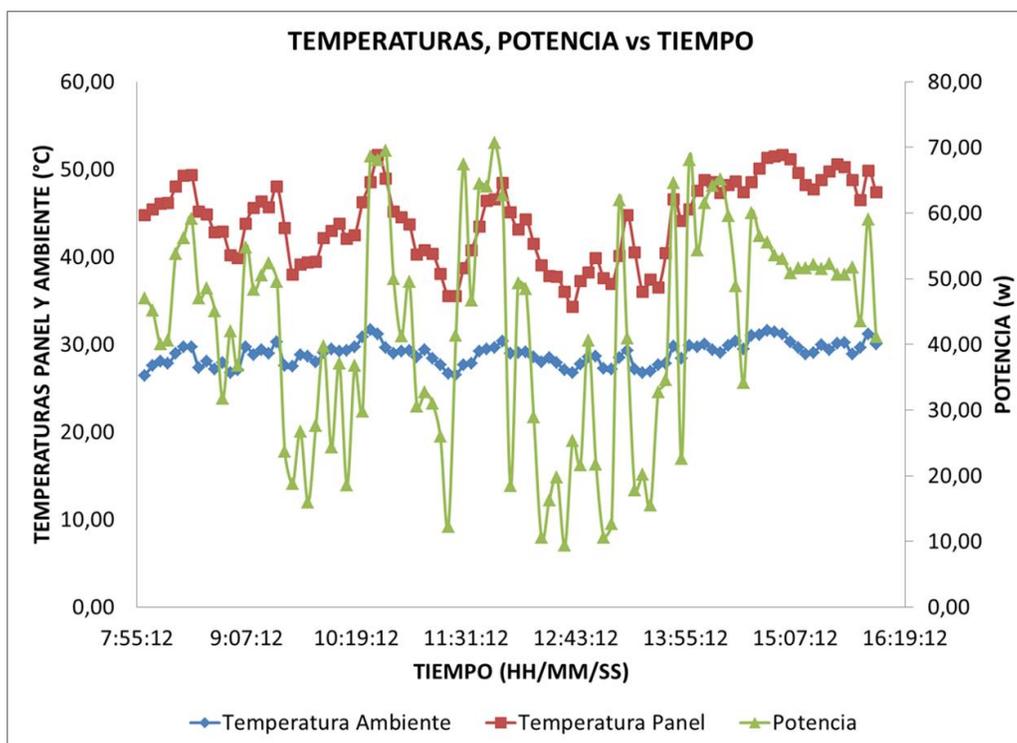


Figura 46. Temperatura, Potencia vs Tiempo, Junio 6, a 29°C y 42% HR. SSFV Móvil.

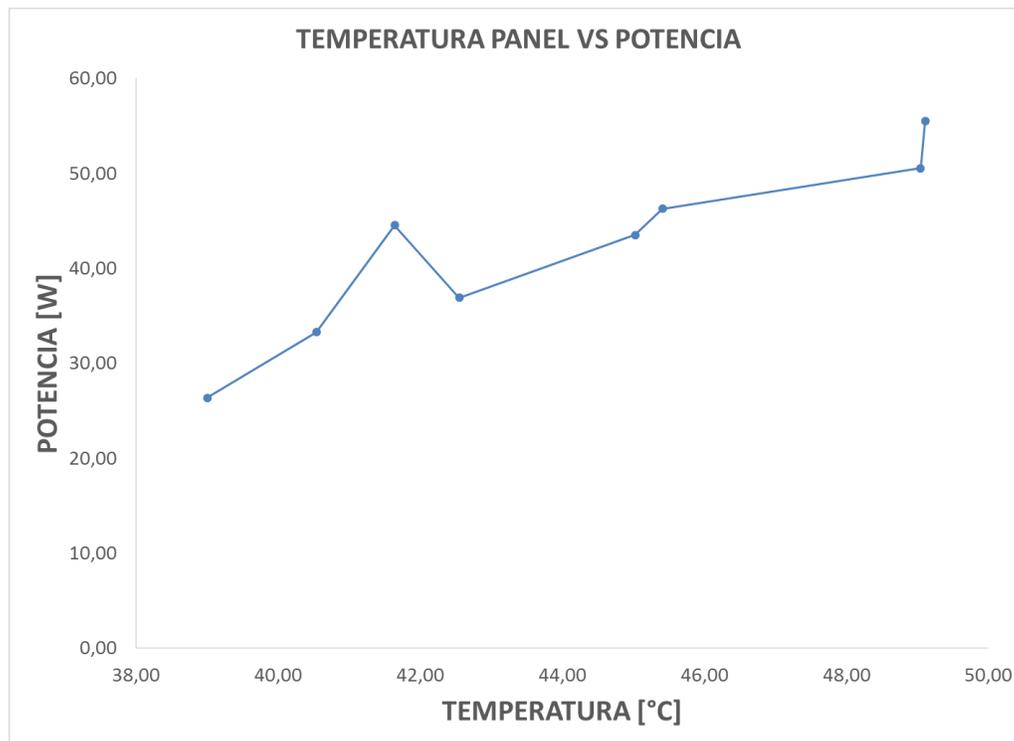


Figura 47. Temperatura vs Potencia, Junio 6, a 29°C y 42% HR. SSFV Móvil.

Las figuras 44 y 45 presentan condiciones de temperatura promedio de 22°C y 29°C y humedad relativa promedio de 89% y 42% respectivamente, a pesar de presentar condiciones climatológicas diferentes, se observa que el aumento de la temperatura en panel genera un incremento en la potencia producida por el sistema fotovoltaico y este se manifiesta tanto para el sistema fijo y móvil. Este comportamiento se debe a la radiación incidente sobre la superficie colectora, entre más fotones incidan sobre el panel solar se crearán más pares electro-hueco y el flujo de corriente será mayor. Sin embargo, no todos los fotones que llegan a la superficie colectora tienen la misma energía, los fotones con menor energía que la función trabajo del material solo provocarán vibraciones en los electrones excitados lo que se traduce en un aumento de la temperatura en panel, al igual que los de mayor energía, que liberarán electrones y además les dan mayor energía cinética a estos, lo que provocará que probablemente colisione con sus vecinos más próximos haciéndolos vibrar y aumentando de esta manera la temperatura del panel fotovoltaico.

En las Tabla 7 y 8, se observa que a diferentes temperaturas se registran valores de potencia diferentes, debido a que existen variaciones en la incidencia de la radiación electromagnética y variables climatológicas, generando modificaciones en la producción de potencia eléctrica.

Tabla 7. Relación entre Temperatura Ambiente y Potencia SSFV Fijo.

Fecha	Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Potencia (W)
14/05/2017	8:00:00	23,52	30,82
	12:00:00	20,50	22,66
	15:00:00	21,50	26,70

Tabla 8. Relación entre Temperatura Ambiente y Potencia SSFV Móvil.

Fecha	Hora	Temperatura Ambiente (°C)	Potencia (W)
6/06/2017	8:00:00	26,45	47,34
	12:00:00	28,98	47,39
	15:00:00	30,30	54,03

En las figuras 45 y 47 se puede observar una relación prácticamente lineal entre la temperatura en panel y la potencia producida, debido al aumento de la radiación captada. Sin embargo, si se analizan las temperaturas que se manejan en ambas figuras, se observa que con temperaturas por debajo de los 42° centígrados la pendiente es más pronunciada que por encima de esta temperatura, esto concuerda con la teoría que dice que con temperaturas superiores a los 42° centígrados en el panel solar se presentará una disminución en su eficiencia.

4.2.1 Temperatura en Modulo Fotovoltaico

El módulo solar al estar compuesto de materiales semiconductores, como el silicio, se encuentra expuesto a fenómenos térmicos como la conducción de calor, por lo cual la temperatura en él será mayor que la temperatura ambiente, como se observa en las Figura 44 y 46. Según estudios realizados (Campo, 2006) [68], la temperatura en celda estará directamente relacionada con la irradiancia y la temperatura ambiente del lugar donde se

encuentre instalado el módulo solar. A continuación, se presenta la figura 48 que relaciona este comportamiento, basado en la siguiente expresión matemática:

$$T_C = T_A + G * \frac{T_{ONC} - 20}{800} \quad (13)$$

T_C = Temperatura en celda (°C)

T_A = Temperatura Ambiente (°C)

G = Irradiancia (W/m^2)

T_{ONC} = Temperatura nominal de funcionamiento de celda (°C)

En la Figura 48, se observa el comportamiento de la temperatura experimental del panel solar, la temperatura ambiente y la temperatura teórica del panel, la cual toma como el valor de irradiancia constante de $676 W/m^2$ para la ciudad de Popayán, Cauca [69].

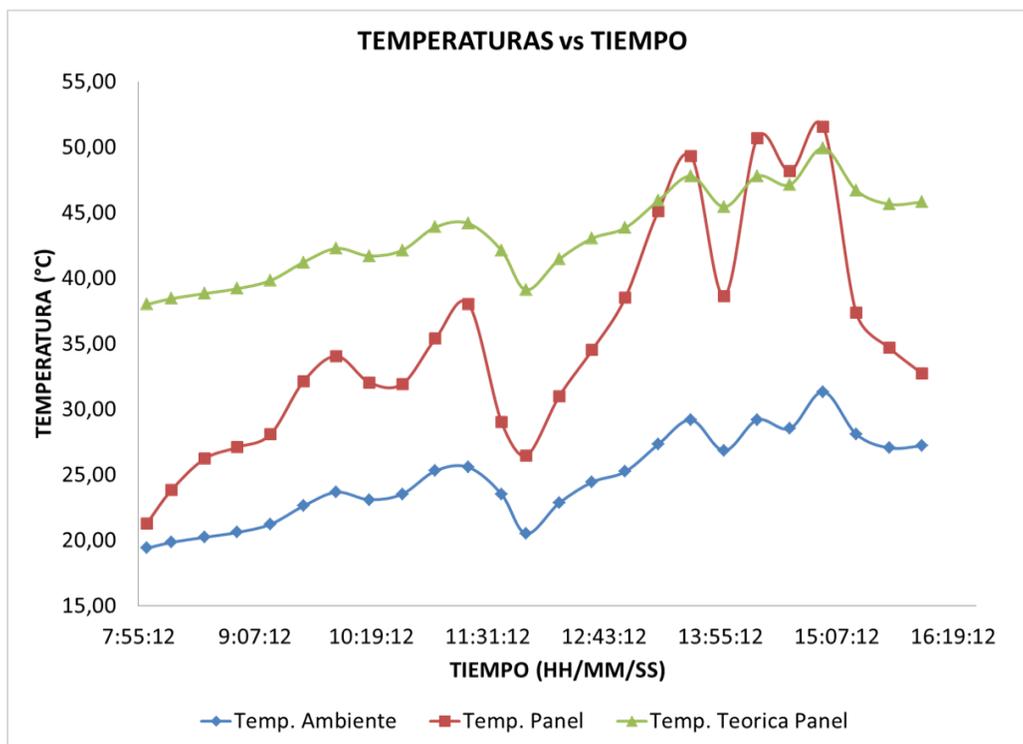


Figura 48. Temperatura en Panel, Junio 10, 25 °C, 77% HR.

La figura 48 se realizó a partir de datos obtenidos durante el día 10 de junio de 2017, en la cual se puede observar que el método propuesto en esta investigación para sensar la

temperatura del módulo solar mediante la implementación de la tarjeta y la disposición de los sensores LM35 presenta relación con el comportamiento teórico. En horas de la mañana se observa que la temperatura teórica en panel y la temperatura sensada se alejan un poco, esto sucede porque la radiación a lo largo del día no se mantiene constante y cambia en relación a otras variables como: el viento, la humedad, la nubosidad, etc. En horas de la tarde, la curva de la temperatura sensada en panel tiene valores próximos a los valores calculados de temperatura teórica, esto se debe a que en ese momento se presentaron condiciones óptimas de cielo despejado y de esta manera la radiación incidente sobre el panel solar tubo valores cercanos a la radiación teórica para la ciudad de Popayán.

4.3 Relación entre Potencia y Humedad Relativa

En las figuras 49 y 51 se presentan las gráficas que relacionan los parámetros de potencia y humedad relativa versus tiempo, para los días 14 y 17 de mayo del año 2017, tanto para el sistema fijo como para móvil. En ellos se evidencia que existe una tendencia en la producción en potencia del sistema fotovoltaico inversamente proporcional a la humedad relativa como se observa en las figuras 50 y 52.

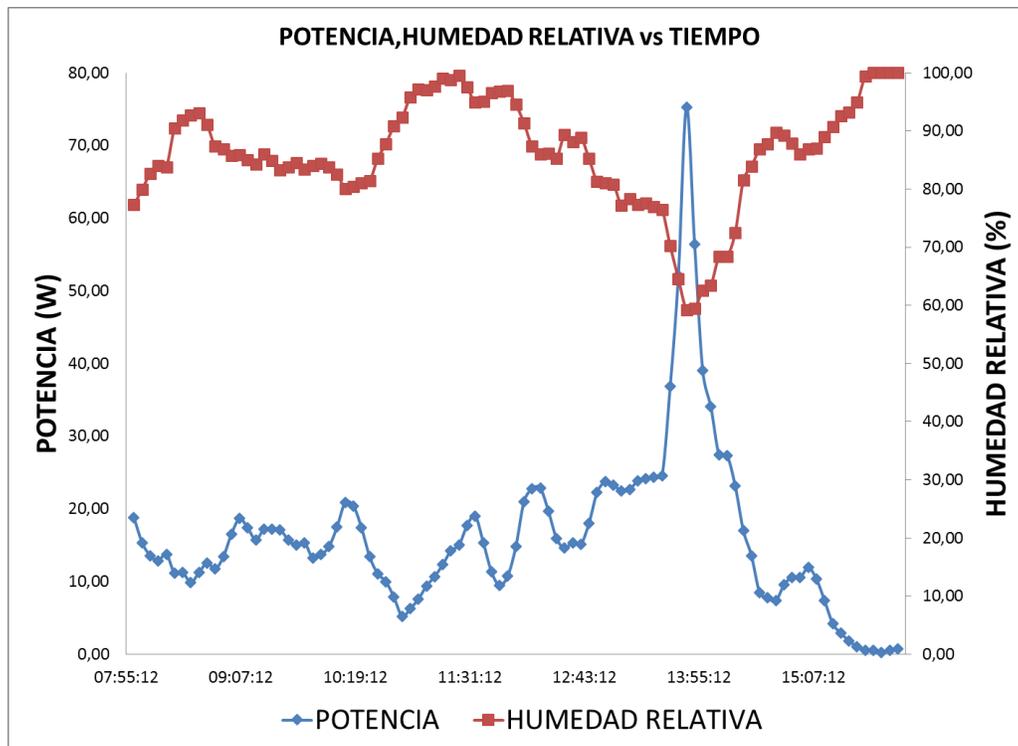


Figura 49. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.

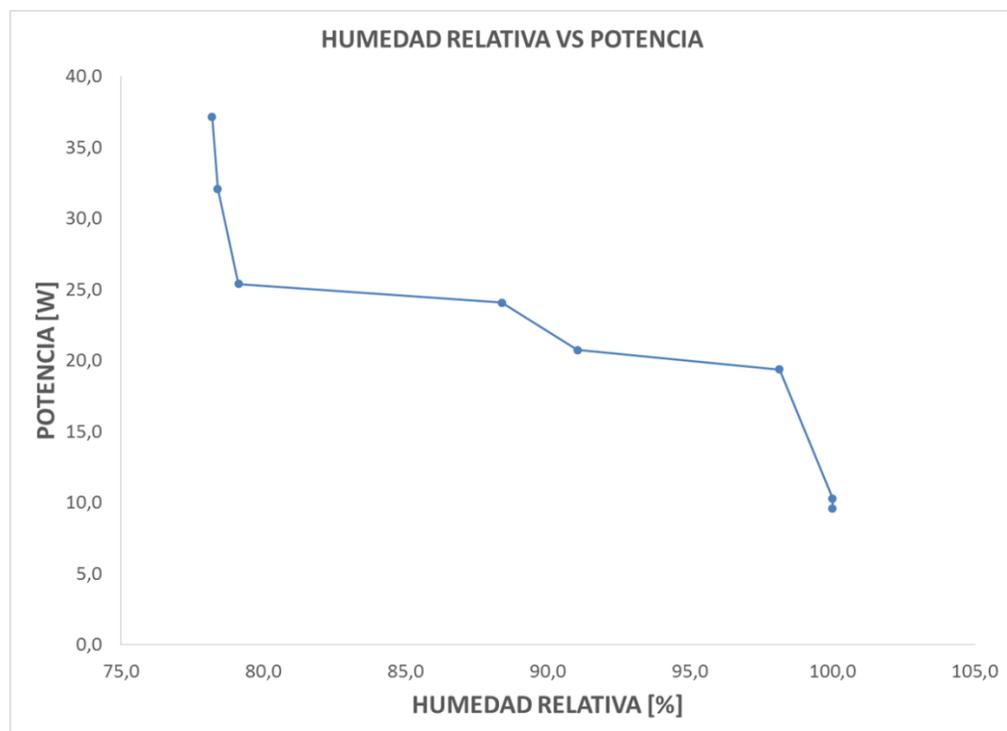


Figura 50. Potencia vs Humedad Relativa, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.

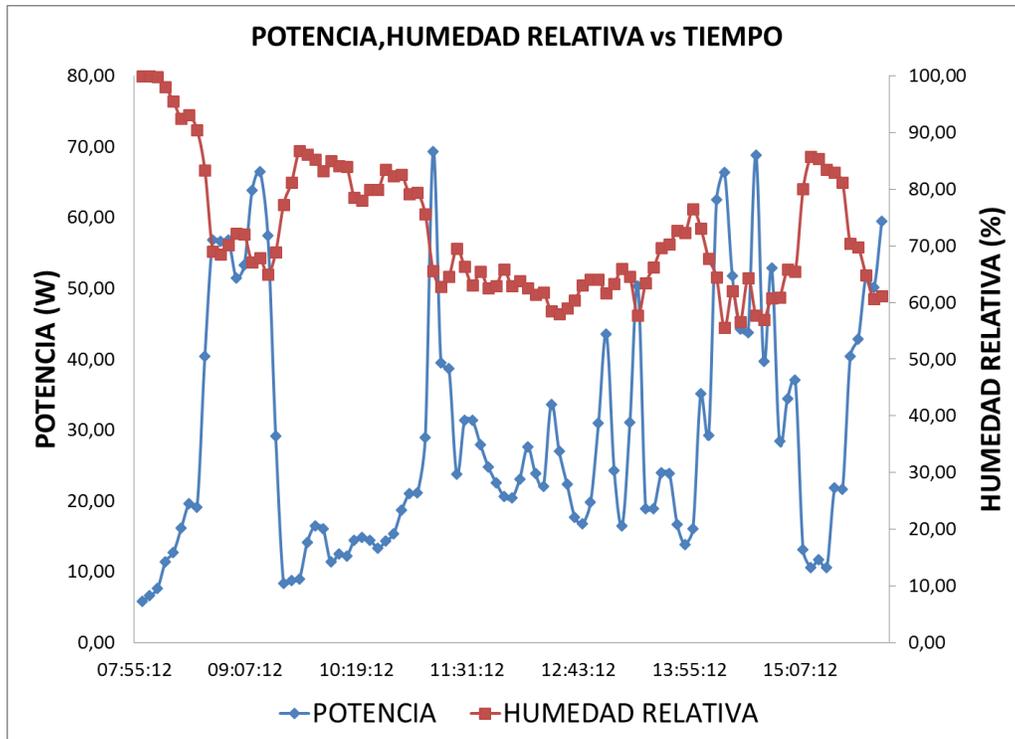


Figura 51. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Mayo 18, a 26°C y 71% HR. SSFV Móvil.

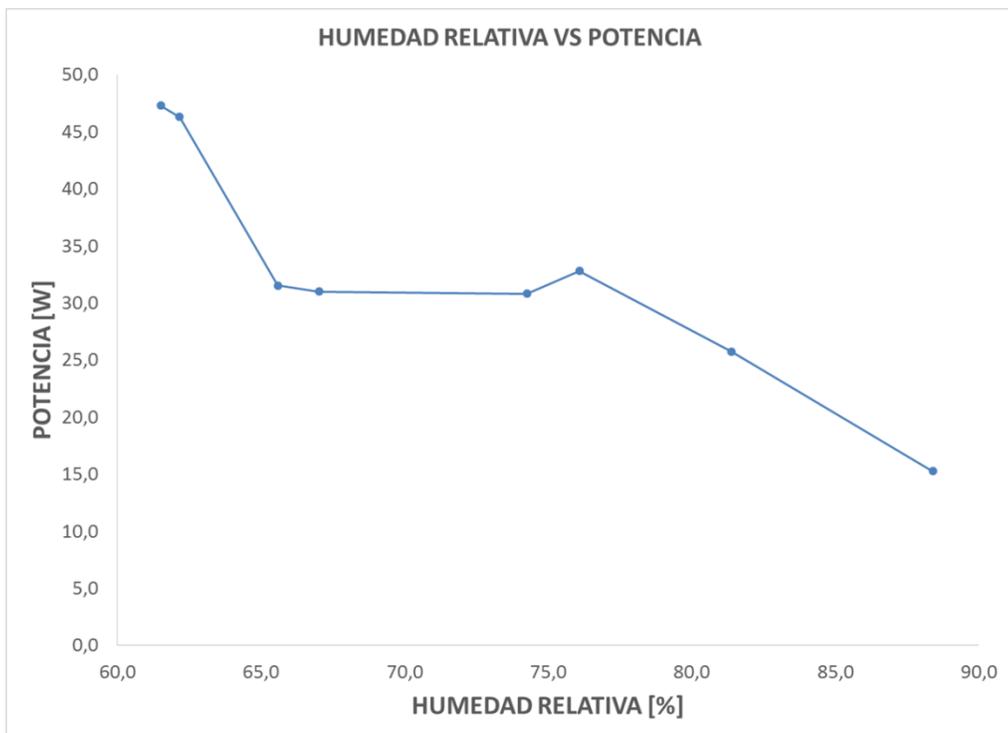


Figura 52. Potencia vs Humedad Relativa, Mayo 18, a 26°C y 71% HR. SSFV Móvil.

El incremento en la humedad está asociado a la cantidad de agua que puede contener una masa de aire; un aumento de la humedad relativa implica un aumento de los efectos ópticos como: dispersión, refracción y absorción, causando una disminución de la radiación efectiva incidente sobre la superficie colectora.

En la Tabla 9 se presentan los valores de humedad relativa y potencia asociada, para las 8 de la mañana, las 12 del mediodía y las 3 de la tarde de los días 14 de mayo y 6 de junio.

Tabla 9. Relación entre Potencia y Humedad Relativa.

Hora	14 Mayo 2017		18 Mayo 2017	
	Humedad Relativa (%)	Potencia (W)	Humedad Relativa (%)	Potencia (W)
8:00:00	77,36	30,82	88,4	25,8
12:00:00	94,56	22,66	61,5	24,1
15:00:00	86,87	26,70	74,3	30,8

Se observa que los valores de potencia registrados para el sistema fotovoltaico dependen directamente de la hora del día y la humedad relativa que se registre a esa hora, la cantidad de radiación efectiva que llega a la superficie fotovoltaica varía debido al ángulo de inclinación que tenga la tierra con respecto al sol y la cantidad de partículas suspendidas en el aire; observando una relación inversamente proporcional que existe entre la humedad relativa y la potencia asociada. Al aumentar la humedad relativa la radiación solar debe interactuar con más partículas de agua suspendidas en el aire causando mayores pérdidas energéticas por efectos ópticos; cuando disminuye la humedad relativa llega mayor radiación solar a la superficie colectora y se tiene un aumento en la potencia generada.

4.4 Relación entre Potencia y Espectro de Radiación Solar Incidente

La implementación del sistema de adquisición y monitoreo desarrollado, permite obtener datos del comportamiento y la evolución de las bandas promedio de radiación solar, independientemente de la zona donde se ubique dicho sistema, brindando una herramienta portable y confiable para el análisis de estas variables.

A continuación, se presentan las gráficas del comportamiento del espectro de radiación solar incidente para los rangos de Infrarrojo, Visible y Ultravioleta en torno a la humedad relativa.

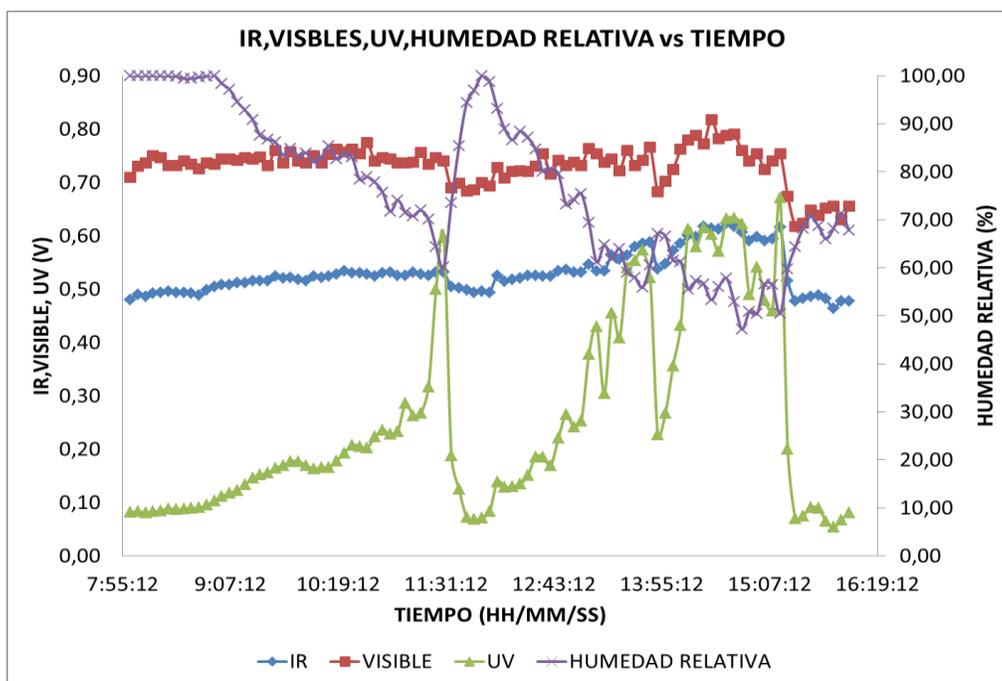


Figura 53. IR, Visible, UV, Humedad Relativa vs Tiempo, Junio 10, a 25°C y 77% HR. SSFV Móvil.

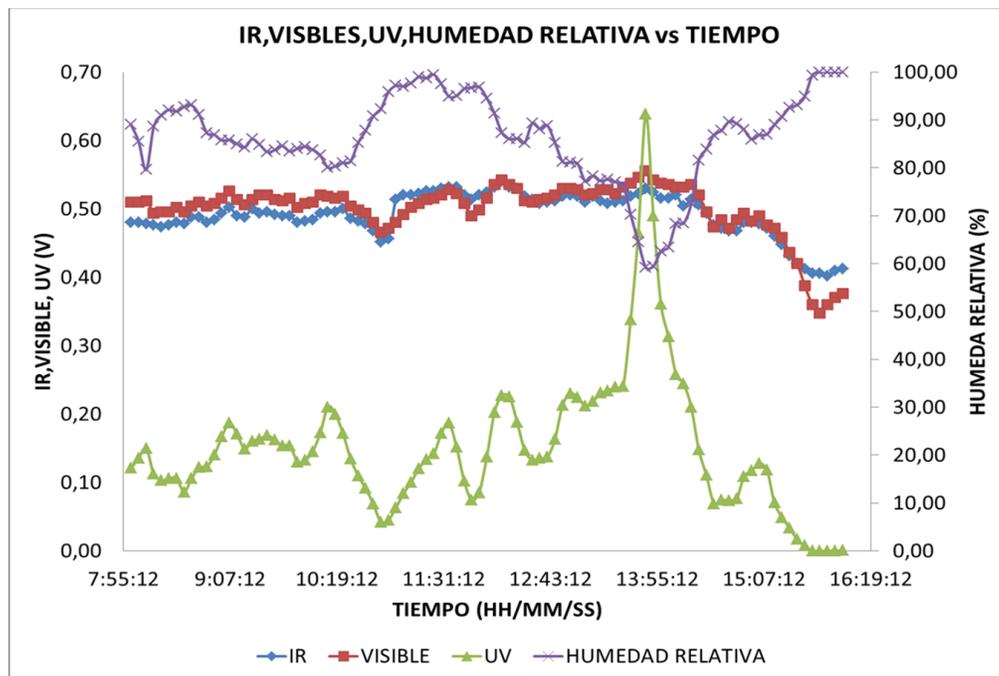


Figura 54. IR, Visible, UV, Humedad Relativa vs Tiempo, Mayo 14, a 22°C y 89% HR. SSFV Fijo.

Las figuras 53 y 54 muestran que existe una relación entre la radiación incidente y el tipo de radiación que llega al sistema fotovoltaico, tanto para el sistema fijo como para el móvil, a medida que las diferentes bandas promedio de radiación (IR, VISBLE, UV) aumentan o disminuyen, se presenta una variación inversa con respecto a la humedad relativa; siendo la banda promedio del ultravioleta quien se ve mayoritariamente afectada por las variaciones en la humedad relativa debido a las longitudes de onda que se encuentra comprendidas entre los 100 nm y los 400 nm (Tamames & Martínez, 1997) [70], al ser tan pequeñas las longitudes de onda de la radiación ultravioleta, las partículas de agua del aire provocan que esta parte del espectro sufra mayores efectos ópticos de absorción y dispersión, incidiendo en menor cantidad sobre la superficie del panel solar. Por lo tanto, al aumentar la humedad relativa, la cantidad de radiación electromagnética que incida sobre la superficie colectora va a ser menor y por ende provocara una caída en la producción en potencia producida por el modulo fotovoltaico.

4.5 Análisis de Sistema Solar Fotovoltaico Fijo y Móvil

Esta investigación, logró desarrollar un sistema de adquisición de datos asociados a la producción de potencia del sistema fotovoltaico en tiempo real, haciendo uso de esta herramienta, se estudió de forma comparativa un sistema fotovoltaico fijo, posicionado a un ángulo de 14° de inclinación, en dirección Sur (Ángulo óptimo para el lugar donde se instaló el sistema solar fotovoltaico) y el sistema de seguimiento solar desarrollado, para lo cual se registraron datos de variables climatológicas (temperatura y humedad relativa) y de bandas promedio del espectro radiación (IR, VISIBLE y UV).

Se observó que los efectos originados por temperatura, humedad relativa y espectro de radiación solar incidente, influyen sobre ambos sistemas sobre la producción en potencia.

Los datos de los anexos 1 y 6 cumplen con condiciones climatológicas similares, en ellas se puede apreciar que el sistema de seguidor solar desarrollado, mantiene la curva de potencia en valores altos sin presentar caídas de potencia durante un largo periodo de tiempo,

mientras que para el sistema fijo lo que se observan son picos de potencia que se mantienen en valores altos por periodos más cortos; esto es debido a que el sistema de seguimiento solar permite que la superficie colectora este expuesta durante más tiempo a la radiación efectiva. Además, se aprecia que las horas de radiación solar efectivas para el sistema móvil se dan a partir de las 11 de la mañana, donde los valores en potencia tienen un aumento debido a que a partir de esa hora el panel solar comienza a quedar posicionado perpendicularmente al sol, aumentando la radiación que llega a este, mientras que para el seguidor solar las horas de radiación efectivas se presentan más temprano alrededor de las 9 de la mañana.

Otro aspecto importante se observa en los anexos 3 y 8, donde se evidencia que la temperatura del sistema fotovoltaico sigue teniendo una influencia en la producción en potencia para ambos sistemas, sin embargo, para el caso del seguidor solar, la separación entre las curvas de potencia y temperatura en panel es menor que en el sistema fijo, esto sucede porque el sistema de seguidor solar mantiene la superficie colectora de cara al sol durante más tiempo provocando que aumente la temperatura en panel por el aumento de radiación que llega a este; También es de apreciar que alrededor de los 35° Centígrados las curvas de temperatura en panel y potencia tienen a unirse para el caso de ambos sistemas. En los anexos 4 y 9 se observa que, tanto para el sistema fijo como para el sistema móvil, se sigue presentando la relación inversa entre la humedad relativa y la potencia, el aumento de la humedad relativa genera pérdidas en potencia por la dispersión de la radiación en ambos sistemas y esto varía los datos en la potencia generada por el sistema fotovoltaico. Las variaciones del espectro visible, infrarrojo y ultravioleta generan un cambio en la potencia generada por el panel, cada uno de estos rangos del espectro influyen en la producción energética del módulo fotovoltaico, sin embargo, la radiación ultravioleta sigue presentando una tendencia similar a la curva de potencia tanto para el sistema fijo como para el sistema móvil como se observa en los anexos 5 y 10.

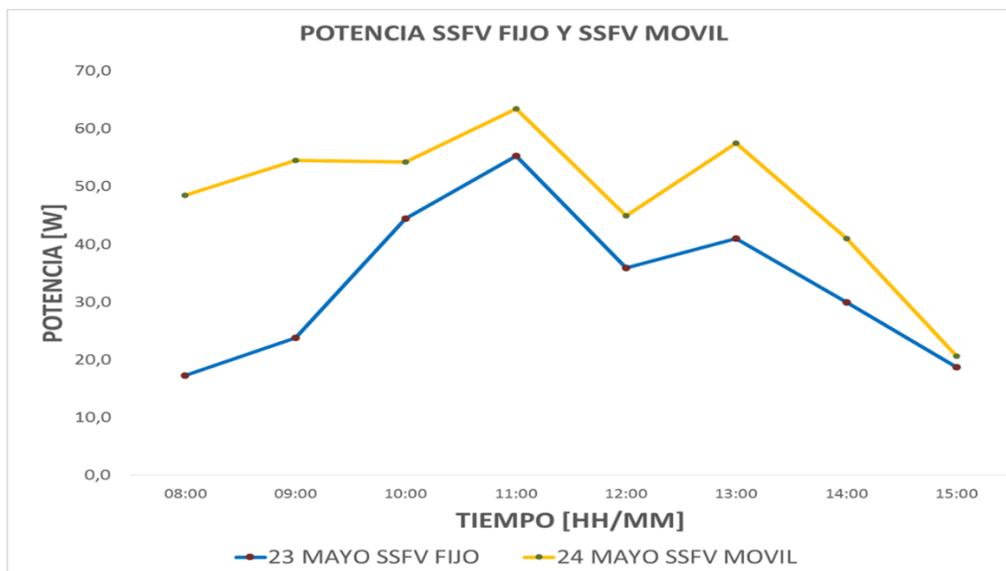


Figura 55. Producción de Potencia en Sistema Fijo 23 de Mayo y Sistema Móvil 24 de Mayo.

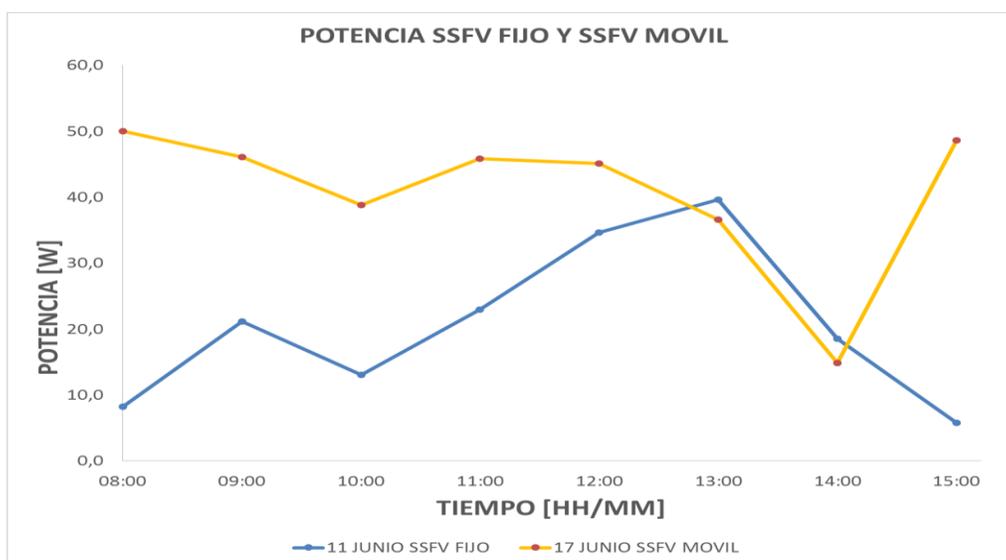


Figura 56. Producción de Potencia en Sistema Fijo 11 de Junio y Sistema Móvil 17 de Junio.

En la figura 55, se puede observar un aumento en la producción de potencia del sistema solar fotovoltaico instalado, comparando la producción para los días 23 y 24 de Mayo de 2017 considerando que en estos días se tuvo condiciones similares de temperatura en celda y humedad relativa del lugar donde se instaló el sistema de seguidor solar.

Para la gráfica mostrada en la figura 56, se observa que durante las horas comprendidas entre la una (1:00:00 pm.) y dos (2:00:00) de la tarde, se evidencia que el sistema fijo produce más potencia que el sistema de seguimiento solar, esto se dio ya que para el día 17 de junio se presentó en estas horas precipitaciones de lluvia, lo cual aumento considerablemente la humedad relativa disminuyendo notablemente la producción de potencia, para el día 11 de junio en estas horas no se presentó precipitaciones lo cual permite que la producción en potencia sea mayor que para el sistema móvil; evidenciando que la influencia de la humedad relativa afecta directamente la producción de potencia por lo cual se debe considera este efecto en el momento de realizar un dimensionamiento de la producción de potencia en regiones donde se presenten porcentajes de humedad relativa superiores al 80%, como se observa en la figura 57; por lo tanto en estas regiones la implementación de sistemas de seguimiento solar como el desarrollado en este trabajo no presenta ganancia en potencia considerables, por lo que se concluye que se debe estudiar a fondo si la relación costo beneficio permite tener ganancia en la implementación de sistemas de seguimiento solar.

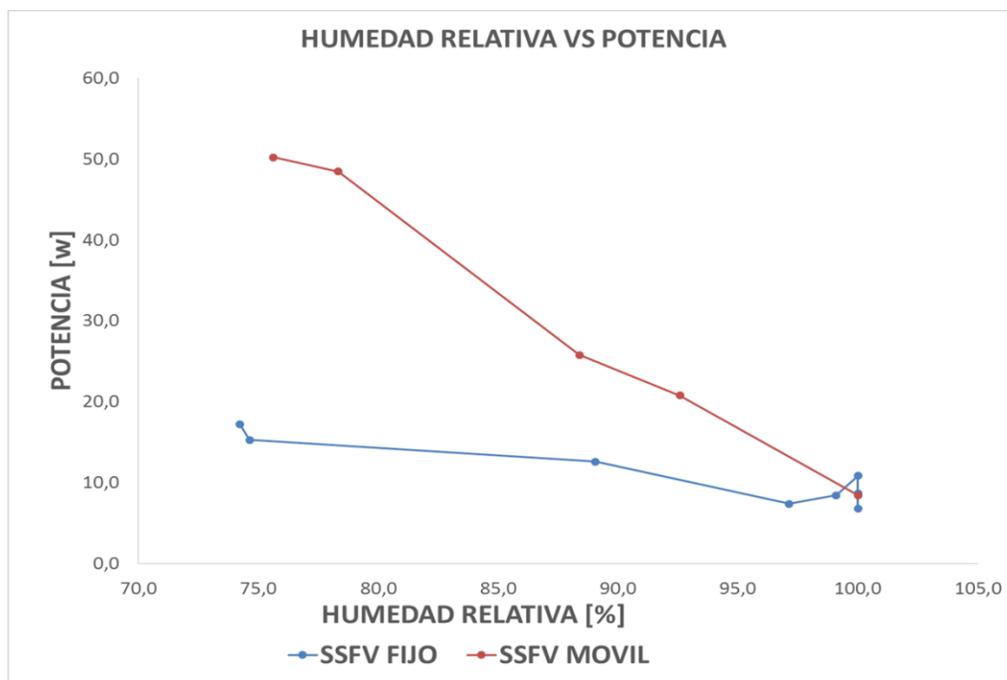


Figura 57. Producción de Potencia en torno al % de Humedad Relativa.

En la figura 58, se evidencia la ganancia en potencia debida al sistema de seguidor solar desarrollado; esta grafica se obtuvo, de una serie de datos tomados durante los meses de mayo de 2017; para el desarrollo de esta grafica se buscaron datos que estuvieran bajo las mismas condiciones de temperatura y humedad relativa en horas iguales, lo cual permite de forma aproximada analizar la producción de energía asociada a condiciones climatológicas similares, comparando la producción de energía entre SSFV fijos y móviles.

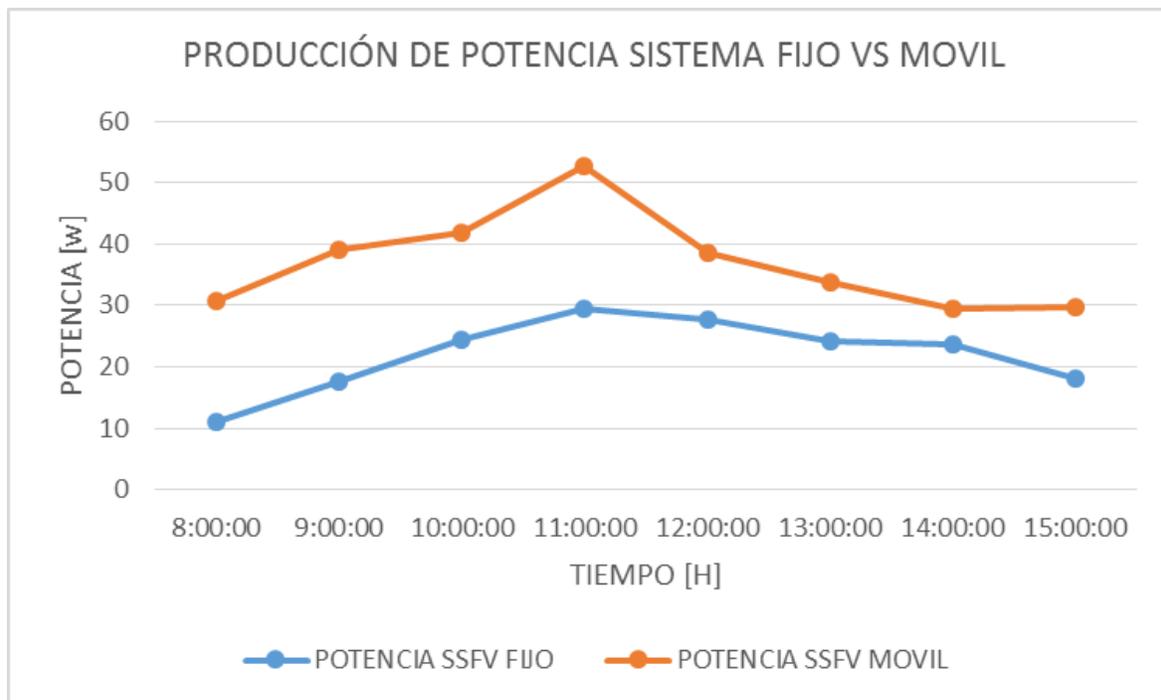


Figura 58. Producción de Potencia en Sistema Fijo y Móvil.

Finalmente, se tiene que la producción en potencia es mayor para el sistema móvil que para el sistema fijo. Observando la figura 58 se evidencia que en horas de la mañana, 8:00:00 a.m. la producción de potencia tiene un incremento de más o menos 20W al implementar el sistema de seguimiento solar, de igual manera se observa que el punto máximo de potencia, para los dos sistemas se encuentra en horas del mediodía, notando un incremento promedio de 20W en la producción de potencia para el sistema móvil; finalmente en horas de la tarde se puede notar una disminución de potencia debida al ángulo con el que dicha radiación incide sobre la superficie del colector, aun así se tiene ganancia de potencia promedio de 10W para el sistema móvil, demostrando así, que el uso del sistema de seguidor

desarrollado permite incrementar la producción de potencia en un 19%, debido a que el sistema posiciona el módulo solar lo más perpendicular posible a la incidencia de radiación, incrementando las horas de radiación solar efectivas sobre la superficie colectora, respecto al mismo sistema en condiciones fijas.

CONCLUSIONES

El desarrollo de la tarjeta de adquisición permite contar con una herramienta de análisis y monitoreo en tiempo real para instalaciones de SSFV.

La producción de potencia generada por el módulo solar está directamente relacionada con la producción de voltaje y corriente, sin embargo, es la corriente quien determina mayoritariamente la tendencia de la curva de producción de potencia.

La temperatura en panel tiene una relación aproximadamente lineal con la potencia producida por el SSFV por debajo de los 42° C, a partir de esta temperatura la producción en potencia se ve afectada, sufriendo una atenuación en la producción.

Existe un comportamiento inversamente proporcional entre la humedad relativa y la potencia generada por el modulo fotovoltaico.

La producción en potencia en módulos fotovoltaicos se ve afectada por la temperatura en celda y la humedad relativa por tal razón, se debe considerar un análisis conjunto de dichas variables para el dimensionamiento e instalación de sistemas solares fotovoltaicos.

La intensidad de radiación solar incidente en las bandas promedio de infrarrojo, visible y ultra violeta, están relacionadas directamente con los cambios de humedad relativa, por lo cual la producción en potencia se ve afectada.

Mediante la implementación del sistema de seguimiento solar, se logra tener un aumento en la producción en potencia del 19% en relación al sistema instalado en condiciones fijas.

REFERENCIA

[1] Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino. (2015). la radiación solar. Julio de 2017, de Agencia Estatal de Meteorología. Recuperado de http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf.

[2] Economía y Negocios. (2016). Si no se invierte, el país podría perder autosuficiencia petrolera. El Tiempo, 1.

[3] Congreso de Colombia. (2014). Ley 1715 13 de mayo de 2014. por medio de la cual se regula la integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional. Junio de 2017, de Upme Recuperado de: http://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf

[4] MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE, MEDIO RURAL Y MARINO. (2015). LA RADIACIÓN SOLAR. Julio de 2017, de Agencia Estatal de Meteorología Recuperado de: http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf

[5] Domínguez M. (2016). ¿Cómo aprovechar la energía solar?. Junio de 2017, de vix Recuperado de: <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/2011/06/05/como-aprovechar-la-energia-solar>

[6] Anónimo. (2014). Tipos de paneles fotovoltaicos. Junio de 2014, de energiasrenovablesinfo Recuperado de: <http://energiasrenovablesinfo.com/solar/tipos-paneles-fotovoltaicos/>

[7] Anónimo. (2015). Que es y cómo funciona un panel fotovoltaico, la energía verde y eficiente. Junio de 2017, de Blogspot Recuperado de: <http://paneles-fotovoltaicos.blogspot.com/>

[8] Anónimo. (2015). Baterías para almacenar energía solar. Junio de 2017, de AméricaFotovoltaica Recuperado de: <http://www.laguiasolar.com/baterias-para-almacenar-energia-solar/>

[9] Anónimo. (2015). Tipos de baterías solares. Junio de 2017, de AméricaFotovoltaica Recuperado de: <http://www.laguiasolar.com/tipos-de-baterias-solares/>

[10] Anónimo. (2016). ¿Qué es y qué hace un regulador de carga solar?. Junio de 2017, de Monsolar Recuperado de: <https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/>

[11] Anónimo. (2016). ¿Cómo funcionan los reguladores de carga solares PWM y MPPT?. Junio de 2017, de Monosolar Recuperado de: <https://www.monsolar.com/blog/como-funcionan-los-reguladores-de-carga-solares-pwm-y-mppt/>

[12] Domingo H. Guardado, Víctor E. Rivera. (2012). Implementación de seguidor solar en dos ejes para el Sistema Fotovoltaico de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la UES. Junio de 2017, de SlideDoc.Es Recuperado de: <https://slidedoc.es/implementacion-de-seguidor-solar-en-dos-ejes-para-el-sistema-fotovoltaico-de-la-escuela-de-ingenieria-electrica-de-la-ues-pdf>

[13] Lageografia.com. (2015). La Tierra. Junio de 2017, de lageografia.com Recuperado de: <http://lageografia.com/geografia-fisica/la-tierra>

[14] astromia.com. (2015). Movimientos de la Tierra. Junio de 2017, de Astronomía Educativa Recuperado de: <http://www.astromia.com/tierraluna/movtierra.htm>

[15] Ingelibre. (2014). Cálculo de la contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica. Junio de 2017, de ingelibreblog Recuperado de: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/01/05/calculo-de-la-contribucion-fotovoltaica-minima-de-energia-electrica/>

[16] Ingelibre. (2014). Comprobación de las pérdidas por orientación e inclinación Junio de 2017, de ingelibreblog Recuperado de: <https://ingelibreblog.wordpress.com/2014/01/05/calculo-de-la-contribucion-fotovoltaica-minima-de-energia-electrica/>

- [17] Miguel A. González. (2008). MOVIMIENTO APARENTE DEL SOL. Junio de 2017, de personales.unican.es/gonzalmi/ssolar/articulos/movapsol.html Recuperado de:
- [18] Francisco Blasco. (2012). Cálculo e instalación fotovoltaica aislada de la red (Off-Grid) Part 2 (Campo fotovoltaico: Orientación e inclinación). Junio de 2017, de Solar Action Recuperado de: <http://solaraction.blogspot.com.co/2012/12/calculo-instalacion-fotovoltaica.html>
- [19] Antonio Quintanilla. (2009). Componentes de instalaciones fotovoltaicas. Junio de 2017, de <http://edii.uclm.es/~arodenas/Solar/componentes.htm> Recuperado de:
- [20] Damia Solar. (2017). Módulo solar Luxor 80w monocristalino. Junio de 2017, de [DamiaSolar.com](https://www.damiasolar.com/productos/placas_solares/modulo-solar-luxor-80w-monocristalino_da0053_15) Recuperado de:
- [21] Trimble Navigation. (2010). Google SketchUp (Versión 8.0.14346.0) [Software]. Descargado de <http://google-sketchup.uptodown.com/windows>.
- [22] Probots. (2015). MPU6050 6DOF IMU Sensor Module Gyroscope & Accelerometer GY521. [Imagen]. Recuperado de http://probots.co.in/index.php?main_page=product_info&products_id=497
- [23] Arduino AG. (2017). Arduino IDE (Versión 1.6.3) [Software]. Descargado para raspbian jessie
- [24] Unidad De Planeación Minero Energética. (2005). Atlas de Radiación Solar de Colombia. Recuperado de http://www.upme.gov.co/atlas_radiacion.htm.
- [25] Sanclemente, O., & Capilla, R. (2016). Casa domótica con Arduino. Universidad politécnica, Escuela técnica superior de ingeniería del diseño. Valencia, España.
- [26] Anónimo. (S.F). Arduino en español- Arduino Mega 2560. [Web log post]. Recuperado de <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com.co/p/arduino-mega-2560.html>.
- [27] Paruro Pe S.A.C.(S.F). Arduino Mega 2560 Rev 3. [Imagen]. Recuperado de <https://paruro.pe/productos/tarjetas-de-desarrollo/tarjetas-de-microcontroladores/arduino-mega-2560-rev-3>.

[28] Arduino. (2017, Junio 8). En Wikipedia. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arduino>

[29] Instituto Nacional de Metrología. (S.F). Hora Legal para Colombia. Recuperado de <http://horalegal.inm.gov.co/>.

[30] kartalomasyon. (S.F). DS1302 Real Time Clock Modul. [Imagen]. Recuperado de <http://www.kartalomasyon.com.tr/DS1302-Real-Time-Clock-Modul,PR-140023.html>.

[31] Banggood Ltd. (2006-2017). L298N Dual H Bridge DC Stepper Motor Driver Module Controller Board For Arduino. [Imagen]. Recuperado de <https://www.banggood.com/L298N-Dual-H-Bridge-DC-Stepper-Motor-Driver-Module-Controller-Board-p-914879.html>.

[32]Shenzhen Sungold Solar Co., Ltd. (2009). 80W Solar Panel (SGM-80W). Junio de 2007, de Made in china.com Recuperado de: <http://sungoldsolar.en.made-in-china.com/product/LeYxgUmTjrRS/China-80W-Solar-Panel-SGM-80W-.html>

[33]Steca Elektronik. (2011). STECA SOLARIX PRS PRS 1010, PRS 1515, PRS 2020, PRS 3030. Junio de 2017, de Steca Elektronik GmbH Recuperado de: <http://www.steca.com/index.php?Steca-Solarix-PRS-es>

[34] General Purpose. (2016). MA12-120 (12V120AH). Junio 2017, de MAGNA, General Purpose Recuperado de: <http://aprotec.com.co/wp-content/uploads/2016/05/MA12-120.pdf>

[35] Anónimo. (2016). Miniature Circuit Breakers and Supplementary Protectors. Junio de 2017, de farnell Recuperado de: http://www.farnell.com/datasheets/2307190.pdf?_ga=2.158208250.1790795035.1499286496-1440769712.1499286496

[36] Vistronica. (2016). Módulo Sensor de Voltaje. Junio de 2017, de Vistronica Tienda Virtual de Electronica Recuperado de: <https://www.vistronica.com/sensores/modulo-sensor-de-voltaje-detail.html>

[37].(2016). سنسور-ولتاژ-و-جریان. sensor de tensión 25 V para Arduino. Junio de 2017, de روسن سنسور-ولتاژ-و-جریان Recuperado de: <http://www.sanatbazar.com/shop/shop-main/جریان-و-ولتاژ>

[38] Fluke Corporation. (2007). Multímetro FLUKE 289. Junio de 2017, de elind.com Recuperado de: <http://elind.com.ar/cont/associatedContent/docsPot/289.pdf>

[39] OriginLab (2017). Graphing & analysis (Version 9.4.1) [Software]. Descargado para Windows (<http://www.originlab.>)

[40] Allegro MicroSystems. (2006). Fully Integrated, Hall Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. Junio de 2017, de ALLEGRO [Allegro MicroSystems] Recuperado de: <http://www.alldatasheet.es/datasheet-pdf/pdf/168326/ALLEGRO/ACS712.html>

[41] Mactronica. (2016). Sensor De Corriente Acs712 30A Arduino. Junio de 2017, de mactronica.com Recuperado de: <http://www.mactronica.com.co/sensor-de-corriente-ac712-30a-arduino-107578899xJM>

[42] Fluke Corporation. (2010). Fluke 381 Pinza amperimétrica de CA/CC de verdadero valor eficaz con pantalla extraíble y tecnología iFlex™. Junio de 2017, de Fluke Corporation Recuperado de: <http://www.fluke.com/fluke/eses/pinzas-amperimetricas/fluke-381.htm?pid=70413>

[43] RobotPark. (2015). SHT21 HUMIDITY SENSOR MODULE. Junio de 2017, de robotpark.com Recuperado de: <http://www.robotpark.com/SHT21-Humidity-Sensor-Module>

[44] Measurement specialties. (2013). Digital Relative Humidity Sensor with Temperature Output. Junio de 2017, de Measurement specialties Recuperado de: https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/1899_HTU21D.pdf

[45] Electronic Temperature Instruments Ltd. (2016). Therma-Hygrometer thermometer & hygrometer ideal for the home, office or factory. Junio de 2017, de Electronic Temperature Instruments Ltd. Recuperado de: <https://thermometer.co.uk/humidity-meters/1034-low-cost-therma-hygrometer-thermometer-hygrometer.html>

[46] Geekbot Electronics. (2017). LM35 Sensor de Temperatura. Junio de 2017, de Geekbot Electronics Recuperado de: <http://www.geekbotelectronics.com/producto/lm35-sensor-de-temperatura/>

[47] Texas Instruments. (2016). LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. Junio de 2017, de Texas Instruments Recuperado de: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>

[48] Billcheapsale. (2017). Módulo sensor de detección de UV UVM-30A inducción de detección de sensores Violeta. Junio de 2017, de ebay.com Recuperado de:

<http://www.ebay.com/itm/UVM-30A-UV-Detection-Sensor-Module-Detection-Induction-Violet-Sensors-/252405950241>

[49] Víctor Ventura. (2016). Sensor de radiación ultravioleta con Arduino. Junio de 2017, de Polaridades.es Recuperado de: <https://polaridad.es/sensor-radiacion-ultravioleta-arduino-indice-uv-uvm30a-guva-s12sd/>

[50] Vishay Intertechnology. (2011). Silicon PIN Photodiode TEFD4300. Junio de 2017, de Vishay Intertechnology Recuperado de: http://www.electronicoscaldas.com/datasheet/TEFD4300_Vishay.pdf

[51] Vishay Intertechnology. (2012). TEFD4300 and TEFD4300F High-Speed PIN Photodiodes. Junio de 2017, de Digi-Key Electronics Recuperado de: <https://www.digikey.com/en/product-highlight/v/vishay-semi-opto/tefd4300-and-tefd4300f-high-speed-pin-photodiodes>

[52] Vishay Intertechnology. (2011). Silicon PIN Photodiode TEFD4300F. Junio de 2017, de Vishay Intertechnology Recuperado de: <http://www.vishay.com/docs/83472/tefd4300f.pdf>

[53] López, J. (2017). Raspberry Shop. Alicante. Recuperado de: <http://www.raspberrystore.es/que-es-raspberry-pi.php>

[54] Castro, A. (2014). ComputerHoy.com. Recuperado de: <http://computerhoy.com/noticias/hardware/que-es-raspberry-pi-donde-comprarla-como-usarla-8614>.

[55] Industrial PC Pro LLC. (2017). Raspberry Pi Model B Rev 2.0 512MB. [Imagen]. Recuperado de <http://www.nexuscyber.com/raspberry-pi-model-b-rev-20-512mb>.

[56] Anónimo. (2013, 18,12), Raspberry pi, Historia de la informática. [Web log post]. Recuperado de: <http://histinf.blogs.upv.es/2013/12/18/raspberry-pi/>.

[57] López, J. (2017). Raspberry pi, Raspberry Shop. Alicante. Recuperado de: <https://www.raspberrystore.es/>.

[58] Cobo, A. (2015). Listado de todos los sistemas operativos para raspberry pi, hardlimit hardware en estado puro. Recuperado de: <https://hardlimit.com/listado-de-todos-los-sistemas-operativos-para-raspberry-pi/>.

[59] Justin, T. (2012). Win32 Disk Imager Beta (Versión 0.9.5) [Software]. Descargado de: <https://sourceforge.net/projects/win32diskimager/?source=navbar>.

[60] Simon Monk. (S.F). Adafruit's raspberry pi lesson 3. Network setup / using a wired network. [Imagen]. Recuperado de <https://learn.adafruit.com/assets/2920>.

[61] Cruz, A. (2013). Tutorial 3 de Raspberry Pi: Configuración de la red y acceso a Internet Electronilab. Recuperado de: <https://electronilab.co/tutoriales/tutorial-3-de-raspberry-pi-configuracion-de-la-red-y-acceso-a-internet/> HYPERLINK

[62] Python Software Foundation License. (1991).Python (Versión 2.7.9) [Software]. Descargado para raspbian jessie.

[63] Domotz Ltd. (2017). Fing-Escáner de red (Versión 5.0.4) [Aplicación Móvil]. Descargado de: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.overlook.android.fing&hl=es_419.

[64] Tatham, S. (1997-2017). PuTTY (Versión 0.65.0.0) [Software]. Descargado de: <https://www.chiark.greenend.org.uk/~sgtatham/putty/latest.html>.

[65] PuTTY. (2017, Febrero 23). En Wikipedia. Recuperado de: <https://es.wikipedia.org/wiki/PuTTY>.

[66] Kaplinsky, C. (2011-2017). TightVNC viewer (Versión 2.8.5.0) [Software]. Descargado de: <http://www.tightvnc.com/download.php>.

[67] Noel. (2015). WinSCP, accede desde Windows por medio de SSH o SFTP. (2015, Diciembre 29). Lignux - Asociación educativa. Recuperado de: <https://lignux.com/winscp-accede-desde-windows-por-medio-de-ssh-o-sftp/>.

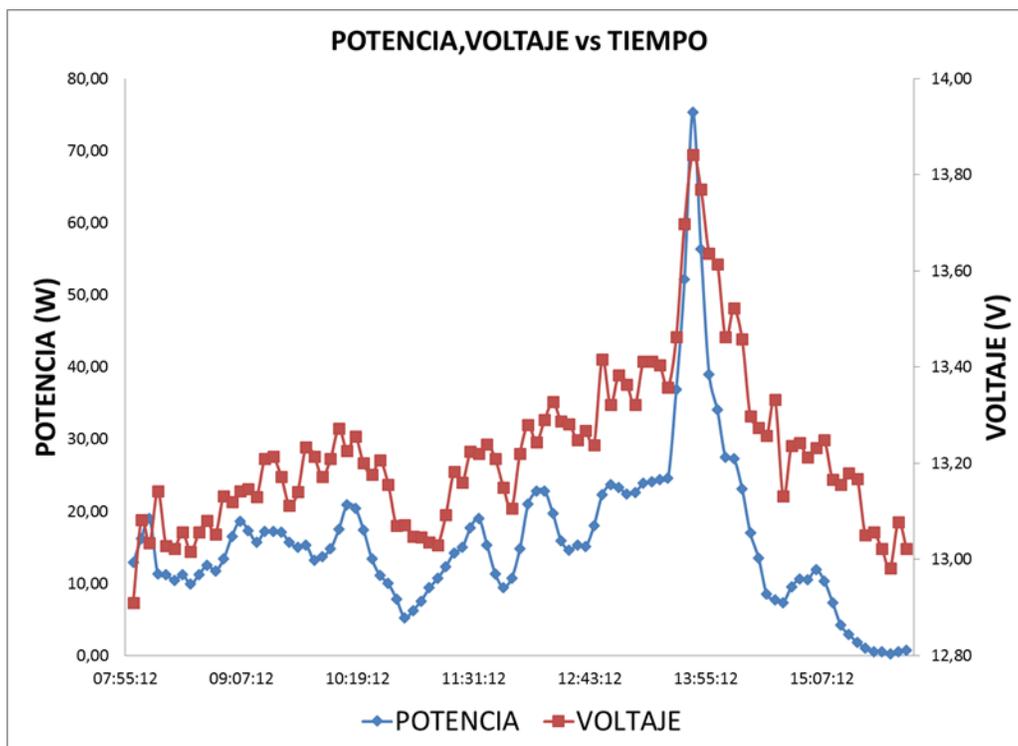
[68] Antonio Campos Marín . (2006). Influencia de la Temperatura en una Instalación Fotovoltaica con Baja Concentración. Julio de 2017, de Universidad de Sevilla Recuperado de: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4138/fichero/Memoria%252FMemoria.pdf>

[69] Rodrigo Montaña. (2017). Seminario Unicomfauca 2017. Julio 2017, de unicomfauca Recuperado de: <https://onedrive.live.com/?cid=6D9C19E599285FD8&id=6D9C19E599285FD8%2110282&parId=6D9C19E599285FD8%211068&o=One>

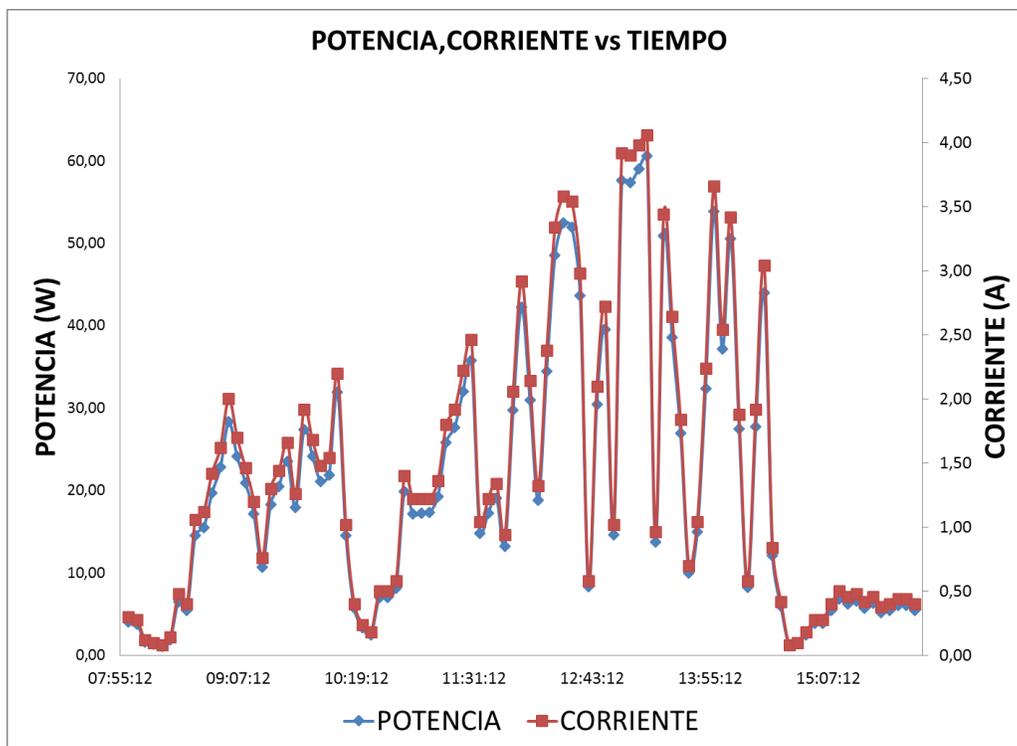
[70] Tamames S. Martínez C. (1997). Cirugía. Madrid. Editorial médica panamericana s.a.

[71] Electricidad-gratuita. (2015). Dimensionamiento de los Cables Eléctricos para Paneles Solares. Junio de 2017, de electricidad-gratuita Recuperado de: <http://www.electricidad-gratuita.com/cables-electricos-d5.ht>

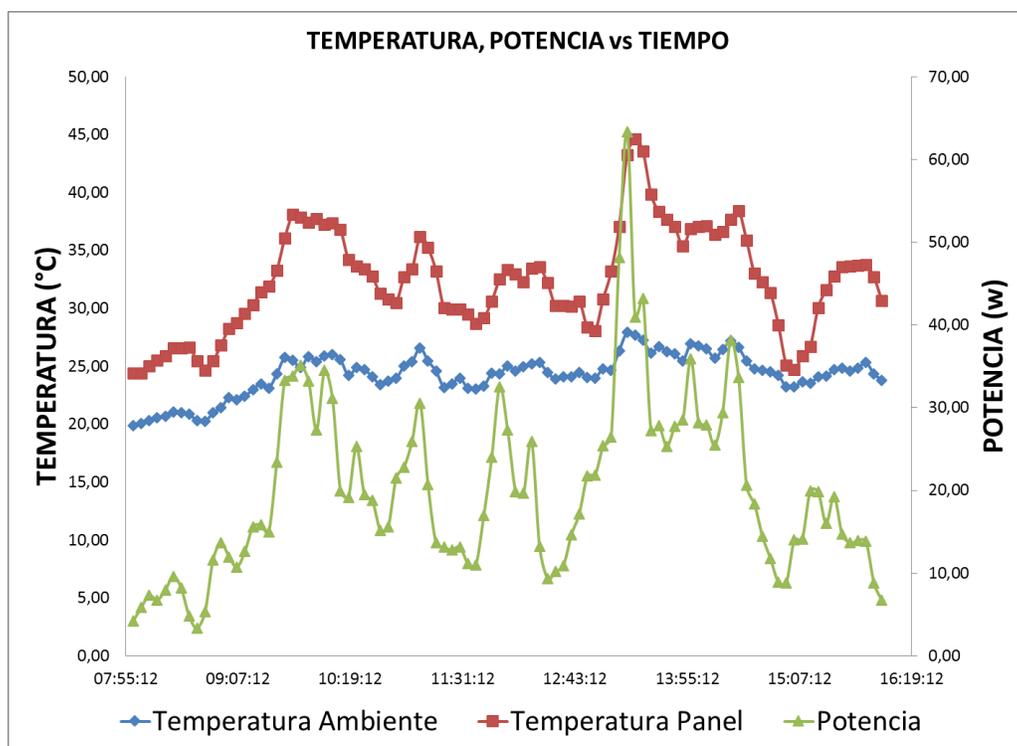
ANEXOS



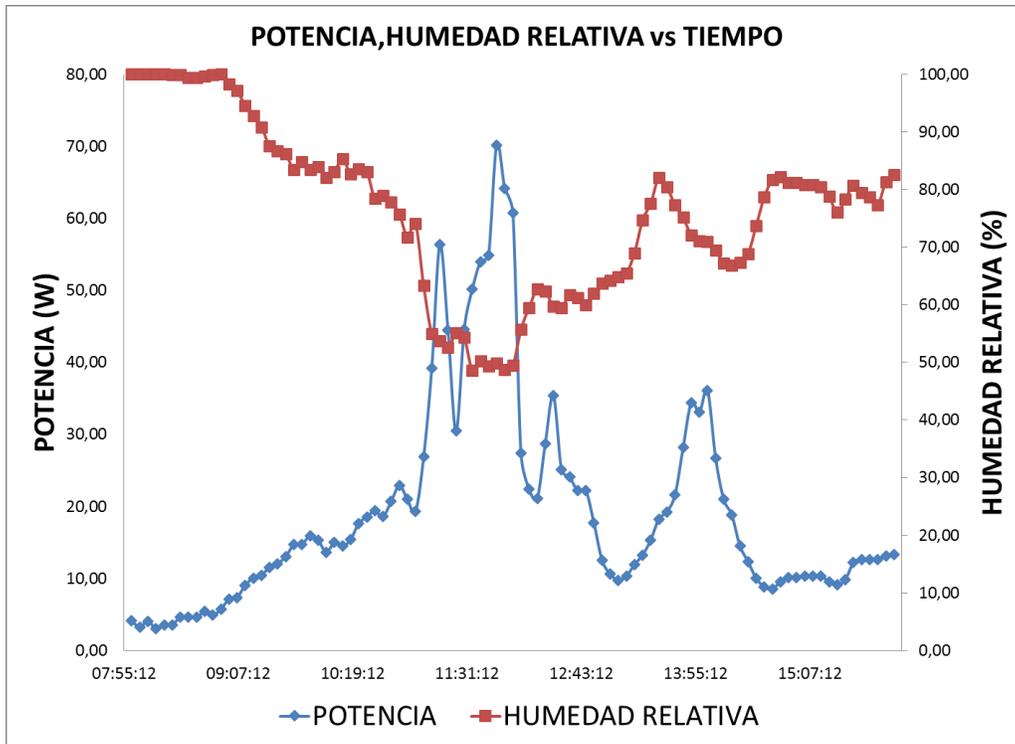
Anexo 1. Potencia, Voltaje vs Tiempo, Mayo 8, a 21°C y 86% HR. SSFV Fijo.



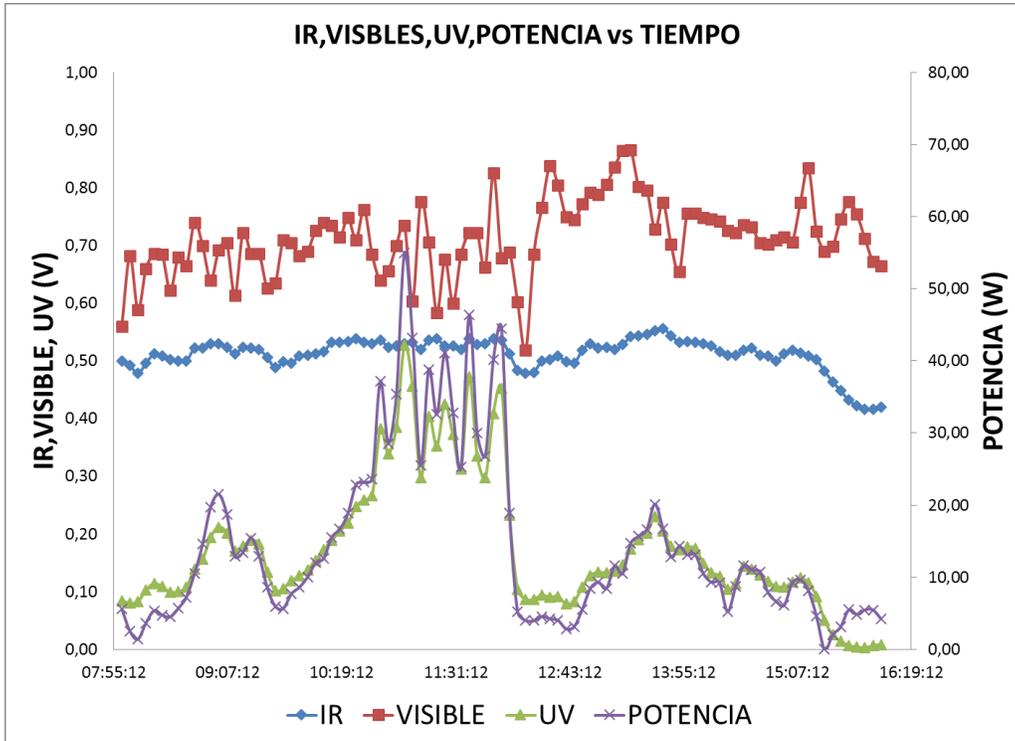
Anexo 2. Potencia, Corriente vs Tiempo, Junio 11, a 26°C y 73% HR. SSFV Fijo.



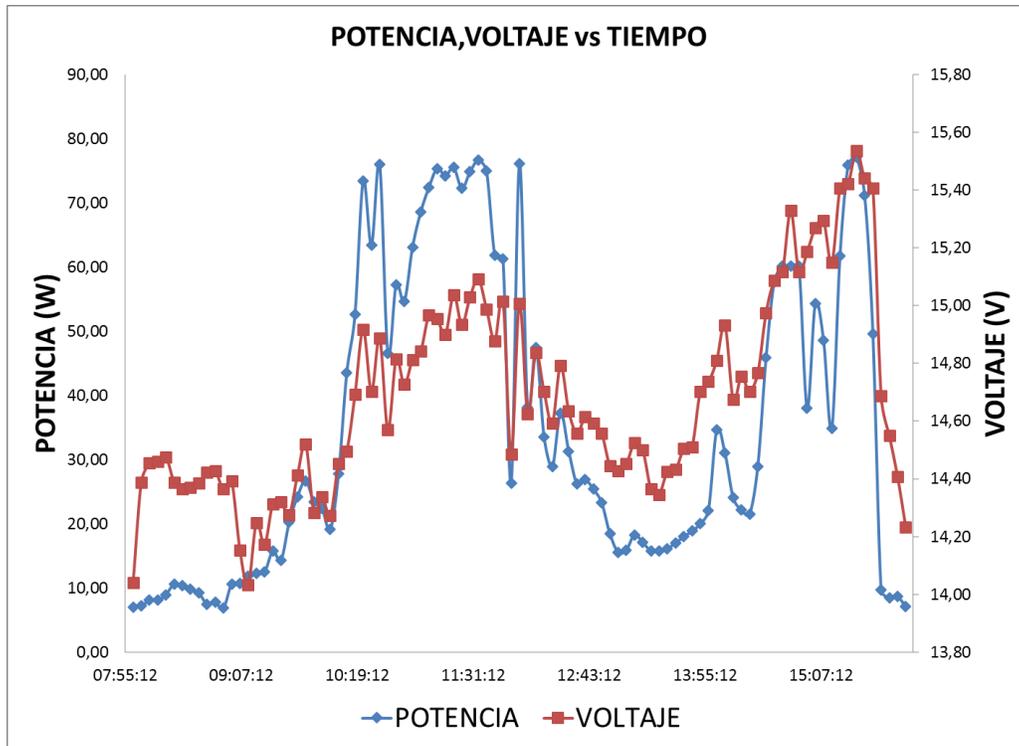
Anexo 3. Temperatura, Potencia vs Tiempo, Mayo 20, a 24°C y 76% HR. SSFV Fijo.



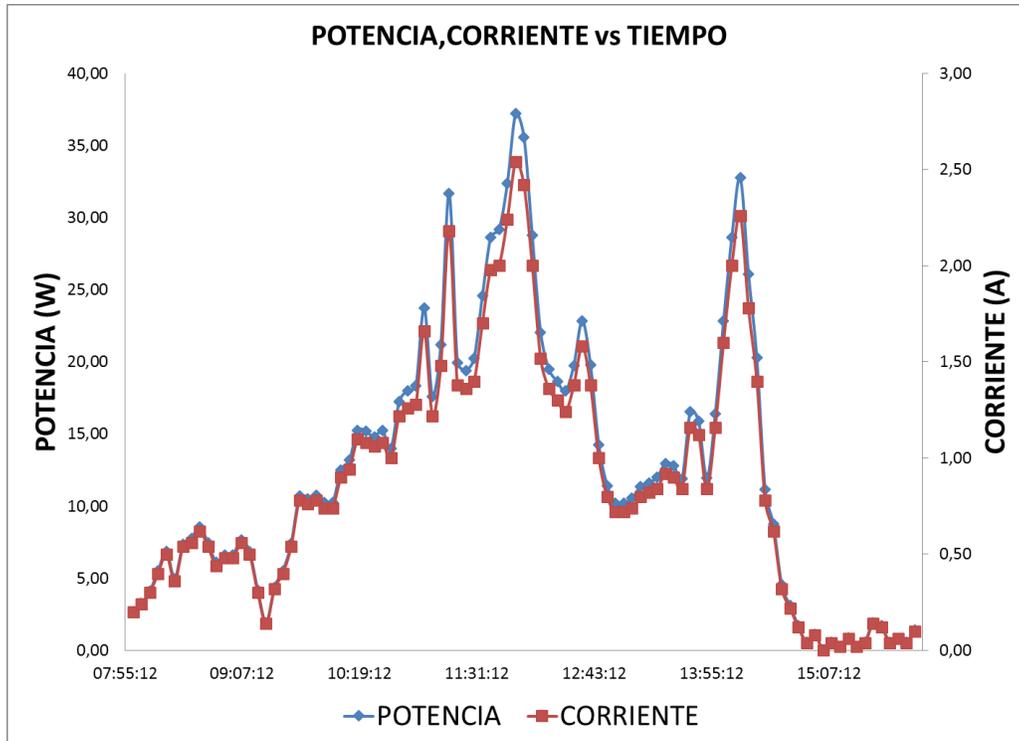
Anexo 4. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Junio 9, a 24°C y 76% HR. SSFV Fijo.



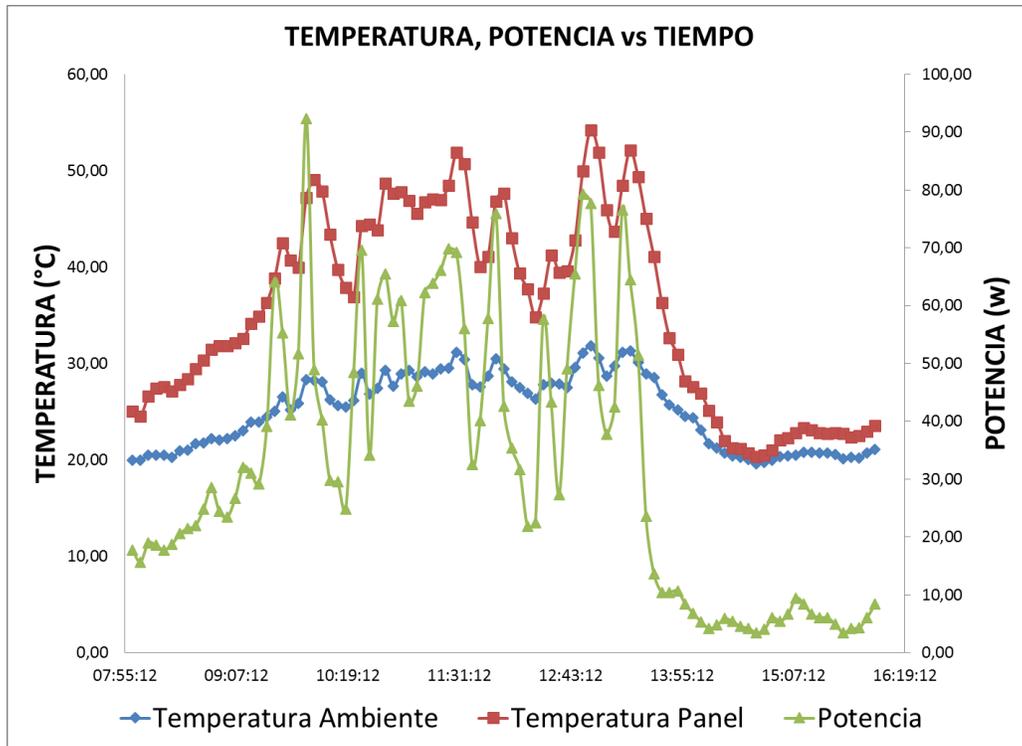
Anexo 5. Espectro, Potencia vs Tiempo, Junio 7, a 23°C y 82% HR. SSFV Fijo.



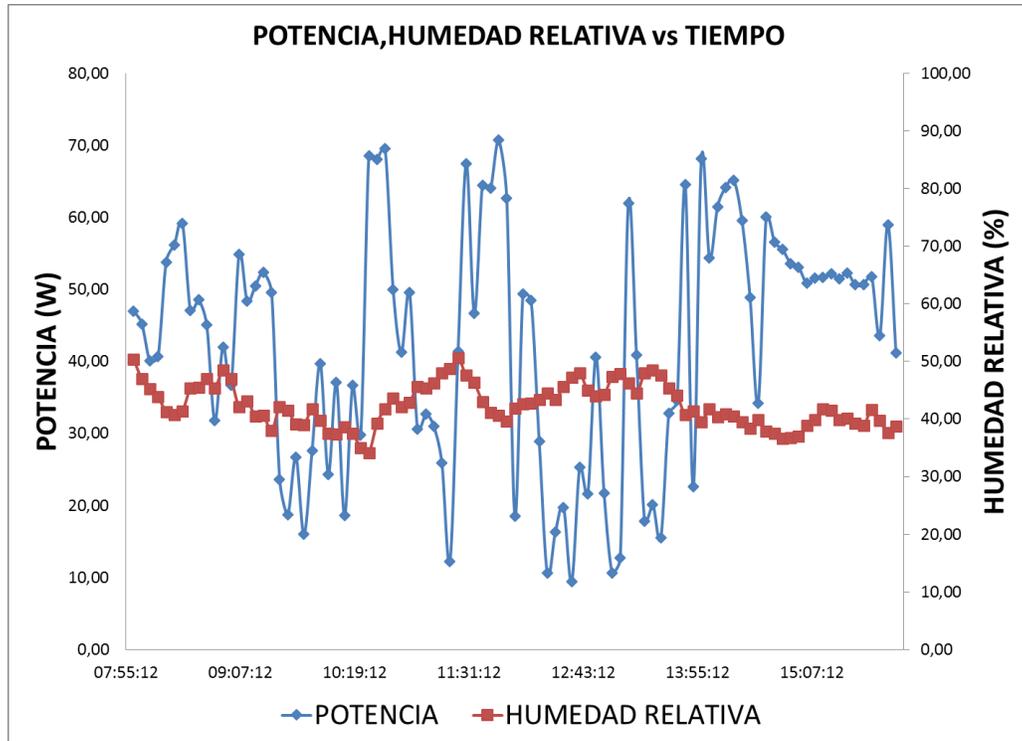
Anexo 6. Potencia, Voltaje vs Tiempo, Mayo 16, a 25°C y 74% HR. SSFV Móvil.



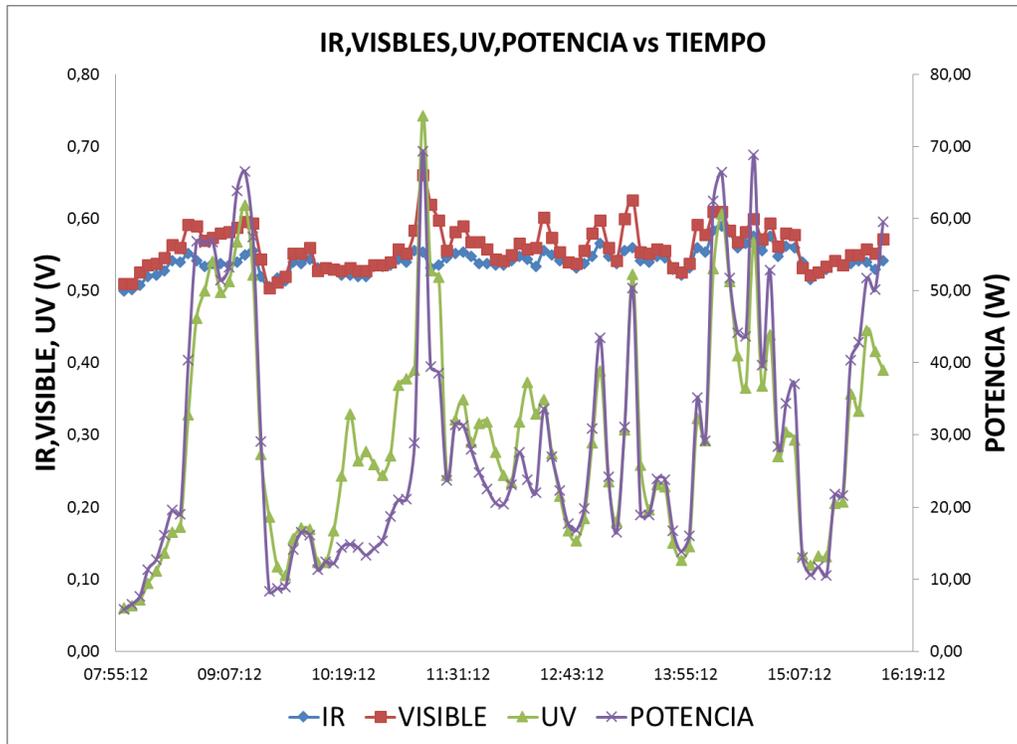
Anexo 7. Potencia, Corriente vs Tiempo, Junio 8, a 22°C y 83% HR. SSFV Móvil.



Anexo 8. Temperatura, Potencia vs Tiempo, Mayo 15, a 25°C y 74% HR. SSFV Móvil.



Anexo 9. Potencia, Humedad Relativa vs Tiempo, Junio 6, a 29°C y 42% HR. SSFV Móvil.



Anexo 10. Espectro, Potencia vs Tiempo, Mayo 18, a 25°C y 72% HR. SSFV Móvil.