

CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS SOLAR FOTOVOLTAICO  
PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA DE LA UNIVERSIDAD  
SANTO TOMAS TUNJA

IVAN DARIO MENDOZA JIMENEZ  
EDISON ALEJANDRO TORRES SUÁREZ

UNIVERSIDAD SANTO TÓMAS SECCIONAL TUNJA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
FACULTAD DE INGENEÍRIA MECÁNICA  
TUNJA, BOYACÁ  
2019

CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS SOLAR FOTOVOLTAICO  
PARA EL LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA DE LA UNIVERSIDAD  
SANTO TOMAS TUNJA

IVAN DARIO MENDOZA JIMÉNEZ  
EDISON ALEJANDRO TORRES SUAREZ

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero  
Mecánico

Director  
EDWIN RUA RAMIREZ  
Mg. Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD SANTO TÓMAS SECCIONAL TUNJA  
DIVISIÓN DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
FACULTAD DE INGENEIRÍA MECÁNICA  
TUNJA, BOYACÁ  
2019

## **NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado titulado “CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS SOLAR FOTOVOLTAICO” realizado por los estudiantes Iván Darío Mendoza Jiménez y Edison Alejandro Torres Suárez, cumple con los requisitos para optar por el título de Ingeniero Mecánico.

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

## CONTENIDO

RESUMEN.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	12
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	12
1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.4 DELIMITACIONES.....	13
2. JUSTIFICACION.....	14
3. OBJETIVOS.....	16
3.1 GENERAL.....	16
3.2 ESPECIFICOS.....	16
4. MARCO REFERENCIAL.....	17
4.1 ANTECEDENTES.....	17
4.2 MARCO CONCEPTUAL.....	18
4.3 MARCO TEORICO.....	22
4.4 MARCO LEGAL.....	31
5. DISEÑO METODOLOGICO.....	34
6. RESULTADOS.....	37
6.1 DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIÓN DE BANCO DE PRUEBAS FOTVOLTAICO.....	37

6.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.....	45
6.3 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS DE ACUERDO A LAS DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES SELECCIONADOS.....	60
6.4 CONSTRUCCION DEL BANCO DE PRUEBAS FOTOVOLTAICO.....	79
6.5 VALIDACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MEDICIONES.....	93
7. CONCLUSIONES.....	110
8. BIBLIOGRAFÍA.....	113
9. ANEXOS.....	116

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo con salida de corriente continua. ....	23
Figura 2. Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo con salida de corriente alterna. ....	23
Figura 3. Esquema de generación fotovoltaica. ....	25
Figura 4. Efecto de la temperatura en un panel solar fotovoltaico. ....	27
Figura 5. Ejemplo de un banco de pruebas ....	28
Figura 6. Cotización de la empresa Improinde S.A.S. ....	46
Figura 7. Cotización del proveedor Tienda Solar ....	47
Figura 8. Cotización de la empresa TSC ....	48
Figura 9. Ilustración del panel solar monocristalino ....	49
Figura 10. Datos del sistema de paneles conectados en paralelo ....	50
Figura 11. Datos del sistema conectado en serie ....	51
Figura 12. Ilustración del Regulador seleccionado ....	52
Figura 13. Ilustración de baterías seleccionadas ....	53
Figura 14. Ilustración del inversor seleccionado. ....	53
Figura 15. Ilustración de los breakers marca Siemens utilizados. ....	56
Figura 16. Ilustración de la caja de protecciones. ....	57
Figura 17. Ilustración de los fusibles. ....	57
Figura 18. Multímetro digital de corriente continua (DC). ....	58
Figura 19. Multímetro digital de corriente alterna (AC). ....	58
Figura 20. Bombillo de 12 V y corriente continua(CC). ....	58
Figura 21. Reflector LED de 10W alimentado con corriente alterna. ....	59
Figura 22. Boceto 1.....	61
Figura 23. Boceto 2.....	61
Figura 24. Boceto 3.....	62
Figura 25. Boceto 4.....	62

Figura 26. Boceto 5.....	63
Figura 27. Boceto 6.....	63
Figura 28. Boceto 7.....	64
Figura 29. Boceto 8.....	64
Figura 30. Boceto 9.....	65
Figura 31. Boceto 10.....	65
Figura 32. Boceto 8 estructura banco fotovoltaico y sujeción de paneles.....	67
Figura 33. Dibujo CAD del banco fotovoltaico en software SolidWorks. ....	68
Figura 34. Esquema y lista de componentes del banco fotovoltaico.....	68
Figura 35. Dibujo CAD del soporte de los paneles y método de inclinación. ....	69
Figura 36. Dibujo CAD de soporte sujeto con bisagras .....	70
Figura 37. Asignación de sujeción de geometría fija para simulación.....	71
Figura 38. Asignación de fuerza para simulación. ....	71
Figura 39. Resultados de simulación de análisis estático.....	72
Figura 40. Guía de inclinación con agujeros taladrados .....	73
Figura 41. Diagrama unifilar del banco de pruebas fotovoltaico. ....	77
Figura 42. Diagrama unifilar explicativo del banco de pruebas fotovoltaico.....	78
Figura 43. Estructura del banco solar fotovoltaico. ....	79
Figura 44. Estructura final entregada por “Tecnisoldaduras”. ....	80
Figura 45. Construcción de soporte para paneles. ....	80
Figura 46. Adecuación de armazón para ensamble de paneles. ....	81
Figura 47. Sujeción de bisagra. ....	81
Figura 48. Remache de bisagra.....	82
Figura 49. Ensamble de soporte de paneles y estructura. ....	82
Figura 50. Instalación de brazo hidráulico. ....	83
Figura 51. Sistema de brazos hidráulicos. ....	84
Figura 52. Montaje y sujeción de paneles.....	84
Figura 53. Taladrado e instalación de equipos. ....	85
Figura 54. Asesoría para conexión de equipos solares. ....	86
Figura 55. Cortes con Motortool para ensamble de multimetros digitales. ....	86

Figura 56. Cortes con Motortool para ensamble de caja de protecciones. ....	87
Figura 57. Instalación de bananas de conexión.....	87
Figura 58. Conexión de entradas de regulador con bananas .....	88
Figura 59. Cables de conexión para bananas macho.....	88
Figura 60. Ensamble de la caja de protecciones. ....	89
Figura 61. Impresión 3D de carcasa para soporte de multímetro digital DC.....	89
Figura 62. Taladrado para guía de fijación de inclinación de paneles solares. ....	90
Figura 63. Goniómetro para indicar ángulo de incidencia solar. ....	91
Figura 64. Conexiones con su respectiva señalización. ....	91
Figura 65. Conexiones con su respectiva señalización. ....	92
Figura 66. Ilustración de banco de pruebas fotovoltaico.....	92
Figura 67. Validación del voltaje pico de los paneles.....	94
Figura 68. Valor de voltaje pico de paneles mostrado por multímetro digital DC...94	
Figura 69. Medición de voltaje pico de paneles conectados en paralelo. ....	95
Figura 70. Medición de voltaje pico de paneles conectados en serie. ....	96
Figura 71. Conexión de baterías y regulador.....	97
Figura 72. Conexión de batería y panel a inversor. ....	98
Figura 73. Verificación voltaje salida CC. ....	98
Figura 74. Conexión de inversor a salida CC. ....	99
Figura 75. Interruptor automático de energización de inversor.....	99
Figura 76. Datos de voltaje de la batería en la interfaz del inversor. ....	100
Figura 77. Interruptor automático 2 activado para energizar inversor.....	100
Figura 78. Inversor energizado y visualización de su display. ....	101
Figura 79. Comprobación de funcionamiento de inversor y salida de voltaje a 110 voltios.....	102
Figura 80. Encendido de reflector alimentado con corriente alterna de salida del inversor.....	102
Figura 81. Esquema del circuito electrónico para medir valores de corriente y voltaje de los paneles fotovoltaicos.....	103

## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Manual de prácticas de laboratorio

Anexo B. Manual de usuario

Anexo C. Planos de piezas

Anexo D. Presupuesto

## RESUMEN

Este trabajo plantea la construcción de un banco de pruebas que facilite realizar prácticas de laboratorio referentes a energía solar fotovoltaica, dirigido a la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomas seccional Tunja. El banco brinda un entorno controlado donde los estudiantes pueden experimentar con los componentes del sistema (inversor, paneles monocristalinos, baterías, regulador, etc.). El usuario puede realizar configuraciones tales como: variar el ángulo de incidencia solar de los paneles y/o realizar las conexiones en serie y paralelo, esto para obtener mediciones y analizar resultados.

Se realizó el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico para seleccionar los componentes que mejor se adaptaran a la necesidad energética, luego se diseñó y construyó el banco de pruebas, para finalmente ensamblar los componentes a la estructura diseñada. Se aplicaron los conceptos obtenidos en el pregrado de ingeniería mecánica relacionados con energía solar implementando el banco de pruebas para calcular los parámetros de los paneles solares, considerar los resultados y verificar los datos técnicos mostrados por el fabricante de estos equipos.

La implementación del banco de pruebas solar fotovoltaico en el laboratorio de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas, Tunja incurrirá significativamente en el desarrollo cognitivo de los estudiantes en lo concerniente al funcionamiento de las instalaciones de energía solar fotovoltaica y la medición del rendimiento de las mismas, ya que, el banco de pruebas es una plataforma para experimentación de proyectos de gran desarrollo que brinda una forma de comprobación rigurosa, transparente y repetible de teorías científicas, elementos computacionales, y otras nuevas tecnologías en un entorno más seguro.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se observa una situación compleja en la que se encuentra comprometida la integridad del planeta debido al cambio climático y que muchos de los recursos que proporciona la naturaleza son limitados, su uso reiterado no es beneficioso para el planeta ya que conlleva a deterioros ambientales y conflictos económicos. Esto es un asunto que incluye a todos, desde diferentes perspectivas en mayor o menor grado, pero sin que nadie esté exento de responsabilidad, pensando en soluciones a estas problemáticas surgen las energías renovables que son la alternativa para la sustitución del uso de energías convencionales como los hidrocarburos y combustibles fósiles que contaminan el medio ambiente y aceleran el cambio climático.

Hace ya tiempo se reconoce la importancia de evaluar experimentalmente la introducción de métodos y herramientas en el proceso de generación de energía solar fotovoltaica, para avanzar en la comprensión de los procesos y productos involucrados. El presente trabajo se centra en el estudio de instalaciones de energía fotovoltaica y se plantea la construcción de un banco de pruebas para la realización de estudios prácticos de energía solar, basado en prácticas de laboratorio dirigidas a estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas seccional Tunja, para evaluar el rendimiento de los paneles monocristalinos en condiciones reales de trabajo.

El banco de pruebas es versátil y funcional, adaptándose a modificaciones que las prácticas que puedan requerir como lo son: diferentes voltajes y corrientes al cambiar el orden de conexión ya sea en serie o paralelo, también variando los ángulos de incidencia solar en los paneles o adaptación de equipos con diferentes características. Los experimentos en bancos de pruebas permiten ensayar instalaciones fotovoltaicas, reflejando las condiciones de funcionamiento reales y su influencia sobre los parámetros a medir.

## **1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

### **1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

La Universidad Santo Tomas en su programa de ingeniería mecánica no cuenta con un banco de pruebas solar fotovoltaico que facilite realizar prácticas relacionadas a instalaciones aisladas de energía solar.

### **1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Actualmente la facultad de ingeniería mecánica en su línea de energías no dispone de herramientas que faciliten desarrollar conocimiento prácticos relacionados a energías alternativas. Se ve la necesidad de implementar un banco de pruebas que sirva de apoyo al desarrollo cognitivo de los estudiantes.

La facultad de ingeniería mecánica presenta la asignatura **energías alternativas** cuyo fin es brindar conocimiento aplicado sobre estas energías, la asignatura es teórico – práctica, pero actualmente las prácticas de solar fotovoltaica se realizan a través del dimensionamiento para diferentes aplicaciones apoyado en hojas de Excel, sin embargo los estudiantes ven la necesidad de entender mejor el comportamiento de cada componente a través de mediciones teniendo en cuenta variables como inclinación, hora sol pico, temperatura ambiente, etc. Además entender el funcionamiento de cada componente del sistema solar fotovoltaico de acuerdo a la aplicación y configuración en un entorno controlado real de trabajo.

### **1.3 PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN**

¿Es conveniente implementar un banco de pruebas solar fotovoltaico para prácticas de laboratorio en la facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomás?

#### 1.4 DELIMITACIONES

El proyecto se materializó e implementó en la planta física de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja y se empleó para la facultad de ingeniería mecánica para uso de los estudiantes en prácticas de laboratorio en las ocasiones que sea requerido para desarrollar conocimientos.

La temática del proyecto se enmarca en los conceptos concernientes a energía solar fotovoltaica, se demostró un sistema solar **fotovoltaico autónomo o aislado** y los componentes que éste requiere para su implementación. Estos son: inversor, regulador, batería, módulos fotovoltaicos y sistema de variación de ángulos de irradiación solar.

Las prácticas a realizar en el banco de pruebas solar fotovoltaico son propuestas para aprovechar las funciones que brinda el banco fotovoltaico y conocerlas a fondo, estas prácticas pueden estar sujetas a cambios en un futuro con el fin de innovar e investigar nuevas funciones del sistema.

## 2. JUSTIFICACION

Dada la actual problemática mundial, derivada del calentamiento global y el cambio climático por el uso exuberante de los combustibles fósiles, la energía solar fotovoltaica es una gran alternativa como fuente de suministro energético cuyo uso debería justificarse por encima de consideraciones económicas. Sin embargo, gracias al desarrollo tecnológico que ha experimentado el sector solar, hoy día está por encima de cualquier otro tipo de energía renovable o de generación eléctrica.<sup>1</sup>

Debido a las circunstancias mencionadas anteriormente las universidades y centros de investigación son los principales invitados a formar profesionales con ética ambiental. Los centros educativos tienen la misión de promover la enseñanza de conocimientos que brinden soluciones innovadoras que mitiguen las problemáticas ambientales de la generación de energía convencional. La Universidad Santo Tomas en su pregrado de ingeniería mecánica cuenta con una línea de profundización referente a **energías alternativas** donde se trabaja la parte teórica, pero hay deficiencias en la parte práctica, por esta razón se ve la necesidad de construir e implementar un **banco de pruebas** que sea de apoyo a los estudiantes y de esta forma afianzar los conceptos de manera práctica y asemejándose a situaciones que se pueden encontrar en su vida laboral.

El Lic. Ricardo Lauretta<sup>2</sup>, responsable del Laboratorio de Energía del Instituto Tecnológico de Buenos Aires asegura que “El ingeniero debe formarse en energías renovables. Hay muchos desafíos tecnológicos relacionados con el

---

<sup>1</sup>RAMÍREZ, E. R., SIABATO, A. B., & ORDUZ, M. G. Análisis técnico, socioeconómico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare: RIAA, 2017 p. 239-248.

<sup>2</sup> LAURETTA, R.. *El ingeniero debe formarse en energías renovables*. Entrevistador: I.T. Aires. 2017.

aprovechamiento de la energía que deberán ser abordados por las próximas generaciones de ingenieros. Su rol será central y es necesario que se formen en energías renovables, ya que se trata de una temática interdisciplinaria y requiere de la participación de todas las especialidades”.

Debido a las situaciones anteriormente expuestas, nace la idea de llevar a cabo el presente proyecto. Además de la contribución que la implementación de un banco de pruebas solar fotovoltaico le pueda traer a la formación de los estudiantes, se busca también iniciar un proceso en el cual los estudiantes de la USTA - Tunja sean introducidos en este importante tema del uso de energías renovables que hoy por hoy es uno de los principales temas de investigación a nivel mundial. Es por eso que con la construcción de este banco de pruebas se inquiera despertar el interés de la comunidad educativa con miras a una mejor y completa formación profesional dentro de lo que a energía solar fotovoltaica respecta.<sup>3</sup>

Un banco de pruebas solar fotovoltaico sirve para familiarizar al practicante con los parámetros del sistema solar, su funcionamiento y los posibles errores que pueden tener en la práctica. Se podrá apreciar cómo a través de la ingeniería mecánica se logra realizar un banco de pruebas para evaluar los sistemas fotovoltaicos aislados, analizar y verificar los resultados dados en las pruebas, además de estudiar el comportamiento en diferentes ángulos con respecto a la fuente lumínica la cual pondrá en funcionamiento al panel solar.

---

<sup>3</sup> VELASQUEZ, E., & SOLANO, J. *Banco de pruebas de energía solar fotovoltaica con el fin de generar energía eléctrica para las luminarias de la plazoleta a la vida de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. 2015. p. 12

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 GENERAL**

Construir un banco de pruebas solar fotovoltaico autónomo para prácticas de laboratorio de los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas, Tunja.

#### **3.2 ESPECIFICOS**

- Realizar el dimensionamiento de los componentes del sistema fotovoltaico para determinar las características adecuadas que permitan el correcto desarrollo del proyecto.
- Seleccionar los componentes del sistema solar fotovoltaico que permita realizar diferentes prácticas, configuraciones y mediciones de laboratorio.
- Diseñar el banco de pruebas de acuerdo a las selecciones de los componentes del sistema solar fotovoltaico, que se adapte a las condiciones del lugar de trabajo donde se va a implementar.
- Construir el banco de pruebas funcional que facilite la realización de prácticas y aplicación de conceptos referentes a energía solar fotovoltaica autónoma.
- Validar el funcionamiento del banco de pruebas a través de la realización de mediciones que verifiquen su correcta funcionalidad.

## 4. MARCO REFERENCIAL

### 4.1 ANTECEDENTES

La energía solar fotovoltaica ha experimentado un crecimiento exponencial en los últimos años, impulsada por la necesidad de asumir los retos que se presentan en materia de generación de energía. Uno de ellos está relacionado directamente con los beneficios sociales, se prevé que a medida que se comiencen a utilizar comercialmente estas nuevas tecnologías, se crearán nuevos puestos de empleo, permitiendo progreso económico para los trabajadores. Este crecimiento se ha producido gracias a los mecanismos de fomento de algunos países como España, que han propiciado un gran incremento de la capacidad global de fabricación, distribución e instalación de esta tecnología.<sup>4</sup>

De acuerdo con Velásquez y Solano<sup>5</sup>, la generación de energía eléctrica a partir del aprovechamiento de la energía solar ha traído consigo una serie de aspectos favorables para el medio ambiente, la economía y la humanidad en general. Es por eso que dicha tecnología de origen francés se ha venido desarrollando y afianzando durante los últimos años. De esta manera con la implementación de un banco de pruebas solar fotovoltaico que permita interactuar didácticamente, fomentara un aprendizaje significativo en los estudiantes y generara en los mismos un pensamiento más amigable con el medio ambiente y los prepara para las que serán las energías del futuro.

---

<sup>4</sup> BARBOSA, U. Janett., & MAYORGA, Manuel A., & SANTAMARÍA, S. Wilmar G., & García, R. David M. *Iluminación con Energía Solar Fotovoltaica para Autoservicios en Bogotá*. Ingenio Magno. Vol 5, 2014. pp. 81-94

<sup>5</sup> VELASQUEZ, E., & SOLANO, J. *Banco de pruebas de energía solar fotovoltaica con el fin de generar energía eléctrica para las luminarias de la plazoleta a la vida de la universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. 2015. p. 18

Según López y Montoya<sup>6</sup>, se postula que en Colombia no se ha difundido mucho el uso de los paneles solares debido a la riqueza hídrica que tiene el país, pero con la aparición de fenómenos climáticos como el niño, donde se ha evidenciado la disminución de las fuentes hídricas. El gobierno ha decidido incentivar el uso de esta fuente de energía, aprovechando que Colombia está en una zona tropical donde la incidencia solar es alta. En esta tesis cabe rescatar la importancia que le dan a que las Universidades fomenten el uso de energías renovables y planteen posibles soluciones que brinden beneficios al medio ambiente.

Tal como dice Durán y Romero<sup>7</sup> un manual de prácticas es de gran utilidad para que los estudiantes mediante este se les faciliten realizar prácticas de laboratorio en la universidad de forma sencilla y segura aportando al aprendizaje y desarrollo de conceptos referentes a la energía solar fotovoltaica. El Manual brinda ejemplos de diversidad de prácticas útiles para el proyecto entre las que destacan “Reconocimiento de Instrumentos de medición de la radiación solar”, “Reconocimiento del sistema fotovoltaico”, “Conexiones en serie y paralelo” y “Conexión de los módulos FV, en circuito serie y circuito paralelo para alimentar cargas en CC”.

## **4.2 MARCO CONCEPTUAL**

El libro titulado “Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas” de los autores José Manuel y Félix de la Cruz Gómez<sup>8</sup> incluye un glosario de términos de

---

<sup>6</sup> LÓPEZ, A., & MONTOYA, C. *Prototipo de laboratorio que permite verificar parámetros técnicos en paneles*. Cali: Universidad de San Buenaventura Cali. 2017

<sup>7</sup> DURÁN, A., & ROMERO, B. *Estudio de reconocimiento sobre la Energía Solar*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2016

<sup>8</sup> DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ, Félix. *Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas*, Ediciones Experiencia, 2009.

energía solar fotovoltaica del cual se extraen y adaptan los conceptos más relevantes para este proyecto y se muestran a continuación.

**4.2.1 Acumulador.** Elemento de instalación capaz de almacenar la energía eléctrica, transformándola en energía química. Se compone de diversas baterías conectadas entre sí en serie o en paralelo.

**4.2.2 Amperio-hora.** Unidad usada para especificar la capacidad de una batería.

**4.2.3 Ángulo acimutal.** El ángulo acimutal indica los grados en que las superficies del colector térmico o del módulo fotovoltaico divergen de la orientación sur exacta.

**4.2.4 Ángulo de inclinación.** Ángulo entre un nivel de captación inclinado y la horizontal. En función del grado de latitud del lugar de colocación de la instalación solar existen distintos grados de inclinación óptimos.

**4.2.5 Baterías.** Dispositivos que acumulan la energía que reciben de los paneles para su posterior consumo.

**4.2.6 Caja de conexiones.** Elemento donde las series de módulos fotovoltaicos son conectados eléctricamente.

**4.2.7 Célula fotovoltaica.** Unidad básica del sistema fotovoltaico, normalmente compuesto por silicio, donde se produce la transformación de la radiación solar incidente en energía eléctrica.

**4.2.8 Condiciones estándar de medida (STC).** Condiciones de irradiancia y temperatura en la célula solar, utilizadas universalmente para caracterizar células, módulos y generadores solares y definidas del modo siguiente:

- Irradiancia solar:  $1000 \text{ W} / \text{m}^2$
- Temperatura de célula:  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

**4.2.9 Controlador de carga.** Componente del sistema fotovoltaico que controla el estado de carga de la batería.

**4.2.10 Efecto fotovoltaico.** Conversión directa de la energía luminosa en energía eléctrica.

**4.2.11 Eficiencia energética de la instalación.** Porcentaje de energía solar que es transformada en energía eléctrica por la célula fotovoltaica. En función de la tecnología y la producción técnica, este porcentaje puede variar entre un 5% y un 30%.

**4.2.12 Inclinación.** Ángulo que forma el panel fotovoltaico con el horizonte.

**4.2.13 Interruptor.** Dispositivo de seguridad y maniobra.

**4.2.14 Interruptor automático de interconexión.** Dispositivo de corte automático sobre el cual actúan las protecciones de interconexión.

**4.2.15 Inversor.** Transforma la corriente continua proporcionada por los módulos en corriente alterna apta para la red. Con la ayuda de una regulación MPP, el inversor extrae del generador fotovoltaico la potencia en el punto máximo de potencia de la curva característica I-V.

**4.2.16 Irradiación.** Cantidad de radiación solar recibida por una superficie, pudiendo ser directa, difusa y global.

**4.2.17 Irradiancia.** Densidad de potencia incidente en una superficie o la energía incidente en una superficie por unidad de tiempo y unidad de superficie. Se mide en  $\text{kW} / \text{m}^2$ .

**4.2.18 Kilovatio-hora (Abreviado kWh).** Unidad de medición de la energía (1 kWh = 1.000 Wh).

**4.2.19 Panel fotovoltaico.** Conjunto formado por las distintas células fotovoltaicas interconectadas, encapsuladas y protegidas por un vidrio en su cara anterior y por un marco en los laterales, provisto de terminales para su conexión a la instalación.

**4.2.20 Potencia.** La energía consumida o proporcionada en cada unidad de tiempo. La unidad de medida de la potencia es el vatio (W) o el kilovatio (kW).  $1 \text{ kW} = 1.000 \text{ W} = 1.000 \text{ J/s}$ .

**4.2.21 Potencia nominal.** Máxima potencia posible de una célula o un módulo solar. La potencia nominal se define como la potencia pico en el punto de potencia máxima bajo condiciones estándar de prueba (STC) y se indica en vatios pico (abreviado Wp).

**4.2.22 Punto de máxima potencia.** (Abreviado MPP). Término inglés para punto de potencia máxima. En este punto de la curva característica I-V de una célula o un módulo solar puede deducirse la potencia máxima. A través del seguimiento MPP, este punto puede encontrarse y ajustarse en cualquier estado de servicio.

**4.2.23 Radiación solar.** Cantidad de energía procedente del sol que se recibe en una superficie y tiempo determinados. Su intensidad depende de la altura solar (latitud, fecha y hora de día), ubicación del panel, condición atmosférica y altura sobre el nivel del mar.

**4.2.24 Regulador de carga.** Se conecta en los sistemas aislados como nexo entre el generador fotovoltaico y el acumulador. Regula y controla el proceso de carga. En sus otras funciones se encuentra, por ejemplo, la de protección ante descargas totales del acumulador.

**4.2.25 Rendimiento.** Es la relación que existe entre la energía que realmente transforma en energía útil y la que requiere un determinado equipo para su funcionamiento.

**4.2.26 Sistemas aislados.** Sistemas fotovoltaicos autónomos sin conexión a la red eléctrica y destinados al autoabastecimiento, normalmente ubicados en áreas rurales y de difícil acceso.

**4.2.27 Sistemas conectados a red.** Sistemas fotovoltaicos que actúan como centrales generadoras de electricidad, suministrando energía a la red.

**4.2.28 Tensión de circuito abierto.** Tensión eléctrica de una célula o un módulo solar cuando los dos polos no están conectados entre sí; es decir, cuando no circula corriente entre ellos.

### **4.3 MARCO TEORICO**

**4.3.1 Sistemas fotovoltaicos aislados o autónomos.** Los Sistemas Fotovoltaicos Autónomos (SFA) son un conjunto de elementos interconectados entre sí con el fin de proporcionar energía eléctrica a unas determinadas cargas, entendiéndose como cargas los elementos de iluminación, equipos de telecomunicación, frigoríficos, etc. Suelen tener los siguientes elementos: generador, acumulador y carga. Los SFA son diseñados con el fin de proporcionar la energía eléctrica a las cargas que la necesitan. Esta es una de las primeras limitaciones que existen en el diseño de SFA, ya que es difícil calcular el consumo energético exacto de cada una de las cargas. En los SFA dado el precio, algo más elevado el kWh fotovoltaico, que el obtenido de la red eléctrica convencional, es necesario una optimización del consumo energético de las cargas<sup>9</sup>.

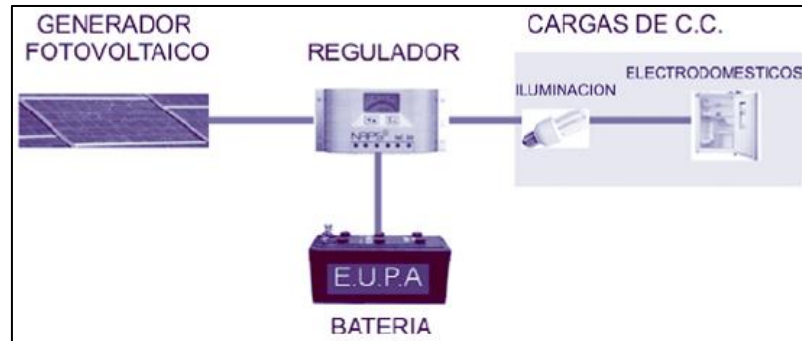
#### **4.3.1.1 Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo.**

Aquí se presentan los dos tipos de esquemas de sistemas fotovoltaicos autónomos según sea el carácter de las cargas:

---

<sup>9</sup> DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ, Félix. Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas, Ediciones Experiencia, 2009, p. 29.

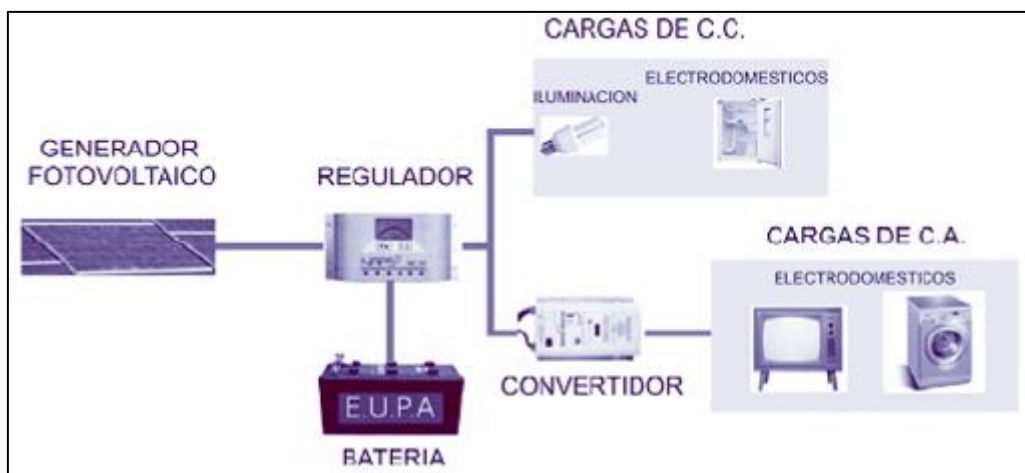
**Figura 1.** Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo con salida de corriente continua.



Fuente: DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ, Félix. Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas, Ediciones Experiencia, 2009.

El esquema de la figura 1 es utilizado cuando las cargas necesitan corriente continua: Iluminación, equipos de corriente continua, frigoríficos especiales, etc. El esquema de la figura 2, se utiliza cuando las cargas necesitan corriente alterna tales como motores en bombeo, electrodomésticos en general, etc.

**Figura 2.** Elementos de un sistema fotovoltaico autónomo con salida de corriente alterna.



Fuente: DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ, Félix. Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas, Ediciones Experiencia, 2009.

**4.3.2 Módulo fotovoltaico.** Las células solares son la parte más importante de un sistema de energía solar, ya que son éstas las que realizan el efecto fotovoltaico y convierten la energía del sol en electricidad. Las células solares aisladas producen muy poca energía eléctrica y son extremadamente delicadas y muy vulnerables a los agentes externos, por lo que raras veces son usadas individualmente. Es por esto, por lo que para su utilización y comercialización se unen entre sí en lo que se denomina módulo solar, módulo solar o módulo FV (PV en inglés), con esto se consigue una estructura compacta manejable y muy resistente, protegiendo las células solares de roturas y de los agentes externos<sup>10</sup>.

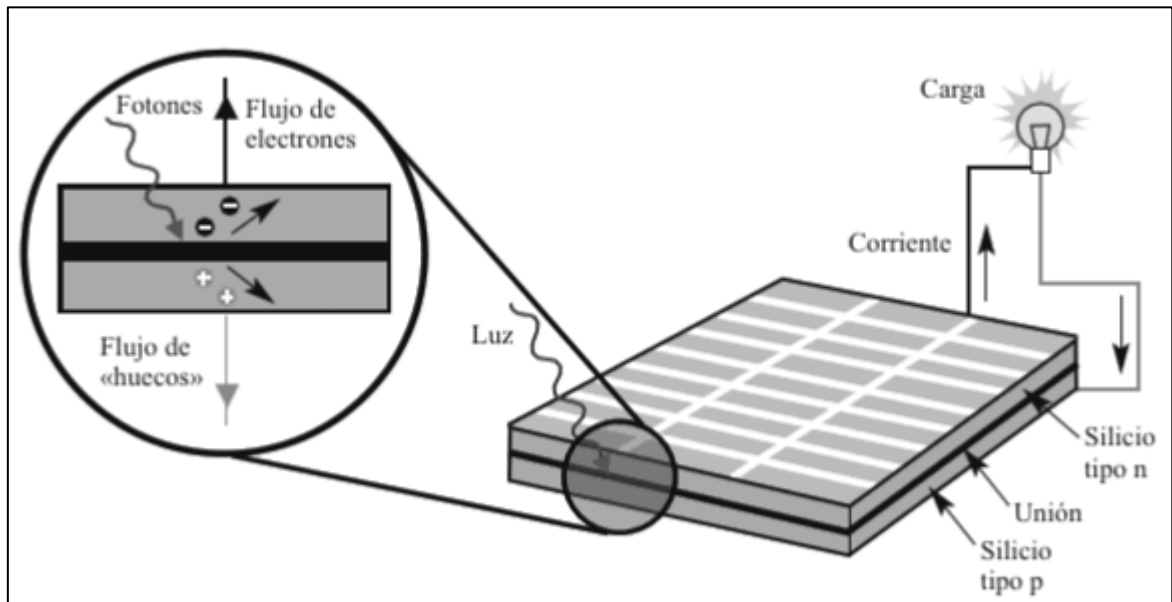
Los paneles o módulos fotovoltaicos están formados por varias células fotovoltaicas, y cada una de ellas está compuesta por lo menos por dos láminas delgadas de silicio, separadas entre ellas por una capa de un elemento semiconductor. Una de estas láminas está formada con elementos con menor carga de electrones que el silicio, o sea con menor carga negativa, y por tanto esta lámina es la positiva (P), y otra formada con elementos con mayor carga de electrones que el silicio, o sea con mayor carga negativa, y por tanto esta lámina es la negativa (N). Por otra parte, los fotones que proceden del sol y que contienen la energía adecuada, inciden sobre la superficie de la lámina P, que al interactuar con el material de dicha capa liberan electrones de los átomos de silicio, y éstos atraviesan la capa de semiconductor para llegar a la lámina N, y una vez en la lámina N no pueden volver por sí solos a la lámina P. Al acumularse electrones en la lámina N se crea una diferencia de potencial o tensión respecto a la P. Y si se unen las dos láminas (N y P) mediante dos cables conductores, unidos éstos a su vez a una carga o elemento que consume electricidad, se crea una corriente eléctrica continua que fluye desde el polo negativo al positivo.<sup>11</sup>

---

<sup>10</sup> DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ, Félix. Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas, Ediciones Experiencia, 2009, p. 31.

<sup>11</sup> MORENO, R. P. *Energías renovables y limpias: solar, eólica, geotérmica, hidráulica, mareomotriz. Obtenido de Explicación sencilla de ¿cómo funciona un panel o placa solar fotovoltaica?.* 2019. Obtenido de <https://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/12/como-funciona-un-panel-solar-fotovoltaico.html>

**Figura 3.** Esquema de generación fotovoltaica.



Fuente: BAYOD, RÚJULA, Ángel Antonio. Energías renovables: sistemas fotovoltaicos, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2009, p. 39.

**4.3.3 Parámetros medibles en un sistema solar fotovoltaico.** En un sistema solar fotovoltaico es posible medir los datos que el fabricante entrega bajo ciertas condiciones y recomendaciones.

**4.3.3.1 Corriente de corto circuito ( $I_{sc}$ ).** Corresponde a la máxima corriente en amperes generada por cada panel, al conectar una carga de resistencia cero en sus terminales de salida. Su valor depende de la superficie del panel y de la radiación solar.

**4.3.3.2 Voltaje de circuito abierto ( $V_{oc}$ ).** Corresponde al voltaje máximo que genera un panel solar y medido en los terminales de salida cuando no existe carga conectada, es decir, a circuito abierto. El comportamiento eléctrico de los paneles está dado por las curvas de corriente v/s voltaje (curva IV) o potencia v/s voltaje (curva PV). La curva de potencia está dada por el producto entre la corriente y el

voltaje en cada punto de la curva IV. Cada modelo de panel tiene una curva IV o PV característica.

La corriente nominal ( $I_{mp}$ ) y el voltaje nominal ( $V_{mp}$ ) del panel se alcanzan en el punto de máxima potencia. Mientras el panel opere fuera del punto de máxima potencia, la potencia de salida será significativamente más baja.<sup>12</sup>

**4.3.3.3 Efecto de la Sombra.** El efecto de sombras sobre los paneles solares, afecta notoriamente el rendimiento de estos, es por esto que se debe procurar al momento de diseñar una instalación fotovoltaica, situar los paneles en lugares donde no sufran este tipo de interferencias. Este efecto es más notorio en instalaciones de paneles conectados en serie, ya que si un panel es sombreado no generará los mismos niveles de energía que los que se encuentran descubiertos, por lo cual consumirá energía, en vez de generarla.<sup>13</sup>

**4.3.3.4 Efecto de la orientación e inclinación.** Los paneles solares trabajarán en forma óptima cuando su orientación sea directa hacia el sol, es decir, que el panel se sitúe perpendicularmente hacia el sol. En instalaciones fijas, es imposible mantener el panel perpendicular al sol, por lo cual, el sistema se debe diseñar de tal forma que su instalación permita aprovechar la mayor cantidad de luz posible y en los periodos de mayor radiación. Para las instalaciones con sistema de seguimiento, este problema tiene menor incidencia, ya que el panel tiende a mantener la perpendicularidad hacia el sol.<sup>14</sup>

**4.3.3.5 Efecto de la Temperatura.** La temperatura de la célula posee un efecto importante sobre el valor del voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ , que es el máximo

---

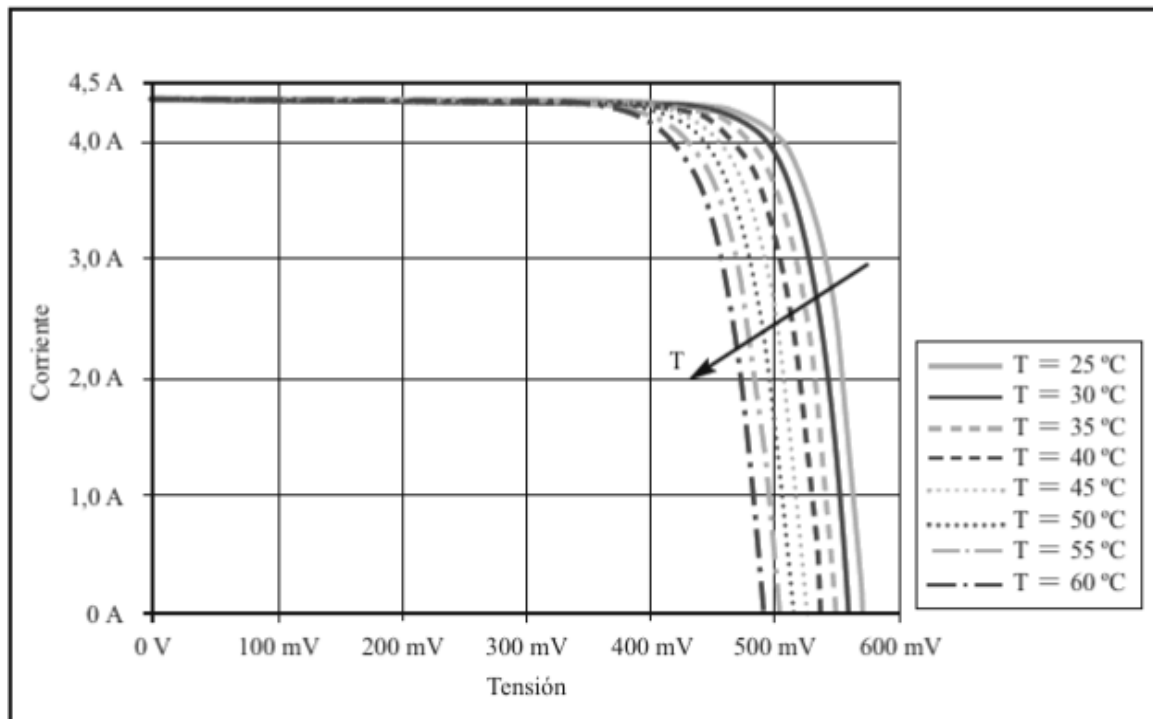
<sup>12</sup> JUÁREZ, A. S. *Electrónica, linternas marinas y sistemas fotovoltaicos*. 2019. Obtenido de *Módulos y arreglos fotovoltaicos*. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/1078130/>

<sup>13</sup> SRL., S. C. *Sistemas de iluminación de bajo consumo, utilizando paneles fotovoltaicos*. Valdivia, Chile. 2010. p. 78.

<sup>14</sup> SEBASTIAN, E. *Inclinación de paneles solares en América Latina*. 2018. Obtenido de <https://eliseosebastian.com/>

valor del voltaje en extremos de la célula y se da cuando esta no está conectada a ninguna carga), y lo podemos ver sobre la curva I – V. Así, al aumentar la temperatura, el voltaje de circuito abierto disminuye del orden de unos pocos mili voltios por cada grado centígrado que aumenta la temperatura (2,3 mV/°C para el silicio y entre 2 y 2,2 mV/°C). Además, como consecuencia de esta variación de Voc, a medida que aumenta la temperatura, provoca a su vez, que la eficiencia de la célula haga lo propio: disminuir al aumentar la temperatura (se reduce entre el 0,4 y 0,5% por °C en las células de silicio y alrededor de 0,3% por °C).<sup>15</sup>

**Figura 4.** Efecto de la temperatura en un panel solar fotovoltaico.



Fuente: BAYOD, RÚJULA, Ángel Antonio. Energías renovables: sistemas fotovoltaicos, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2009, p. 53.

<sup>15</sup> COLLADO, E.. *Energías Renovables. Obtenido de Los efectos de la temperatura en la producción de las instalaciones fotovoltaicas.* 2018. p. 23

**Figura 5.** Ejemplo de un banco de pruebas



Fuente: Adaptado de la página web de NAUGRA®

#### **4.3.4 Equipos necesarios para una instalación fotovoltaica.**

**4.3.4.1 Paneles fotovoltaicos.** Al grupo de células fotoeléctricas o celdas fotovoltaicas se le conoce como panel fotovoltaico. Los paneles fotovoltaicos consisten en una red de células conectadas como circuito en serie para aumentar la tensión de salida hasta el valor deseado (usualmente se utilizan 12V a 48V) a la vez que se conectan varias redes como circuito paralelo para aumentar la corriente eléctrica que es capaz de proporcionar el dispositivo. La eficiencia de conversión media obtenida por las células disponibles comercialmente (producidas a partir de silicio monocristalino) está alrededor del 16%. La vida útil media a máximo rendimiento se sitúa en torno a los 25 años, período a partir del cual la potencia entregada disminuye. El tipo de corriente eléctrica que proporcionan es corriente continua, por lo que si se necesita corriente alterna o aumentar su tensión, se tendrá que añadir un inversor y/o un convertidor de potencia. Es vital identificar la topografía y brillo solar del sitio final en el cual se implementará el

diseño, con el fin de optimizar la posición, especialmente el ángulo respecto al sol, de los paneles solares, con el fin de potencializar la captación de radiación.<sup>16</sup>

**4.3.4.2 Regulador.** El controlador de carga es un elemento propio de las instalaciones fotovoltaicas autónomas. También se le conoce como carga. Al tratarse de una instalación en que la energía generada por los módulos fotovoltaicos no se suministra directamente a la red eléctrica se van a necesitar baterías. Para poder cargar las baterías de un modo seguro los controladores de carga desempeñan un papel fundamental tanto en el proceso de carga como en el de descarga de las baterías. El controlador de carga es el que limita la energía que se le suministra a la batería ya que cuando la batería ya está cargada, si se le sigue suministrando energía, se calienta y se podría generar una situación peligrosa.<sup>17</sup>

**4.3.4.3 Cálculo de la batería del sistema fotovoltaico.** La batería es el elemento más importante de cualquier instalación fotovoltaica aislada de la red. No solo determinan la cantidad de energía que se puede almacenar al sistema sino que también determinan en gran medida el tipo de paneles solares que se utilizarán. Para determinar la capacidad de la batería del sistema tanto en potencia como en corriente es necesario conocer acerca de los días de autonomía en el sistema de energía solar que seguirá abastecimiento de energía sin recibir la radiación solar. El voltaje de las baterías es una de las constantes del sistema la misma que permite definir el nivel de voltaje con la que van a operar cada uno de los elementos y por ende ayudará a establecer el tipo de conexión la que se conectaran los paneles solares.

---

<sup>16</sup> Rua, E., Gonzalez, A., Granados, A., & Ramírez, R. Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 9(2). 2019.

<sup>17</sup> DURÁN, A., & ROMERO, B. *Estudio de reconocimiento sobre la Energía Solar*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2016. P. 11

**4.3.4.4 Inversor.** Este elemento permite convertir la corriente continua (CD) en alterna (CA), dado que los sistemas fotovoltaicos entregan corriente continua es necesario realizar esta conversión para la utilización de los aparatos eléctricos comunes. Los inversores son dispositivos electrónicos los cuales permiten interrumpir las corrientes y cambiar su polaridad, de acuerdo a si el sistema fotovoltaico va a estar aislado de la red podemos utilizar inversores de baja Voltaje (12, 24, 32, 36 o 48 v) generada por las placas fotovoltaicas y la acumulada en las baterías, a corriente alterna de una magnitud y frecuencia necesaria, 110 Volts y 60 Hz de frecuencia. Esto es necesario para poder utilizar los equipos eléctricos de corriente alterna.<sup>18</sup>

**4.3.4.5 Estructura de los soportes.** Las estructuras se las va a dimensionar de acuerdo al tipo de paneles, ya que se debe realizar con las medidas reales.

**4.3.5 Ecuaciones para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.** Las siguientes ecuaciones se adaptaron del curso práctico titulado “Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento” de la empresa “Dinamov Soluciones Renovables” del 2018.

Ecuación 1. Energía total o real generada por los paneles teniendo en cuenta el rendimiento:

$$E_T = E_p * R$$

Ecuación 2. Energía teórica de los paneles

$$E_p = \text{energía total del panel} * N^\circ \text{ de paneles}$$

Ecuación 3. Rendimiento del sistema de almacenamiento.

$$R = 1 - \left[ (1 - k_b - k_c - k_v) \frac{(k_a)(N)}{Pd} \right] - k_b - k_c - k_v$$

---

<sup>18</sup> LÓPEZ, A., & MONTOYA, C. *Prototipo de laboratorio que permite verificar parámetros técnicos en paneles*. Cali: Universidad de San Buenaventura Cali. 2017, p 24.

Ecuación 4. Capacidad útil de la batería ( $Cu$ ):

$$Cu = \frac{E_T * N}{V * Pd}$$

Ecuación 5. Cálculo de potencia máxima de inversor teniendo en cuenta el factor de seguridad.

$$P_{max} = 200W * 1.25$$

Ecuación 6. Corriente a corto circuito máxima teniendo en cuenta factor de seguridad.

$$Fs = \text{Factor de seguridad}$$

$$Fs = 10\%$$

$$Isc_{max} = Isc * Fs$$

Ecuación 7. Potencia eléctrica.

$$P = V * I$$

Fuente: Perolini, Caludio. *Introducción a los circuitos eléctricos 1*, Editorial Hispano Americana HASA, 2009.

De la ecuación 7 se despeja la corriente  $I$  y se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 8. Corriente eléctrica en base a la potencia eléctrica.

$$I = \frac{P}{V}$$

## **4.4 MARCO LEGAL**

**4.4.1 Mundial.** En la instalación, puesta en marcha y supervisión de sistemas fotovoltaicos existen diversas normas, entre ellas:

ASTM E2848 – 13. Método de prueba estándar para la presentación de informes del rendimiento del sistema fotovoltaico.

IEC 61724 de 1998. Supervisión del rendimiento del sistema fotovoltaico - Directrices para la medición, el intercambio y análisis de datos.

**4.4.2 República de Colombia.** Es importante tener presente, que lo concerniente con la energía renovable o también conocidas como fuentes no convencionales de energía, es un asunto de interés público debido a los impactos positivos que reporta respecto a la protección de los recursos naturales y la conservación del ambiente. Es por ello que el gobierno nacional, a través del Ministerio de Minas y Energía, junto con el de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, expide la regulación económica y técnica, de lo relacionado con energía ya sea generación, distribución, transporte, uso y comercialización.

Para la generación eléctrica en Colombia hay unas normas generales (leyes 142 y 143 de 1994) en conjunto con las actividades de transmisión, distribución y comercialización, regidas por el equilibrio tecnológico para beneficiar a los usuarios; por tanto, no es viable usar fuentes renovables, con las tecnologías de hoy, mientras sus costos se mantengan sustancialmente mayores que los de las fuentes convencionales (agua, gas, diésel y carbón).

Los costos de inversión son los no competitivos, porque los de administración, operación y mantenimiento sí lo son.

**La Ley 697/01**, sobre Uso Racional de Energía, define como propósito nacional avanzar hacia la utilización de fuentes renovables en pequeña escala y, particularmente, apoya la investigación básica y aplicada para que, con el tiempo, se reduzcan costos y se amplíe la capacidad de energías como la eólica, la solar, la geotérmica o la de biomasa.

**La Ley 788/02** exime del impuesto a la renta las ventas de energía con fuentes renovables, durante quince años, si se obtienen los certificados de reducción de

emisiones de carbono previstos en el Protocolo de Kioto, los cuales generan ingresos a los empresarios.

## **Constitución Política Colombiana de 1991.**

### **Capítulo III (de los derechos colectivos y del ambiente).**

Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo.

Es deber del Estado proteger la diversidad e integridad del ambiente, conservar las áreas de especial importancia ecológica y fomentar la educación para el logro de estos fines.

Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución.

Además, deberá prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental, imponer las sanciones legales y exigir la reparación de los daños causados. Así mismo, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

Como una respuesta a la problemática ambiental de los sectores productivos colombianos, el gobierno nacional, a través del ministerio del medio ambiente, ha definido dentro de sus políticas ambientales fundamentales incentivar “la prevención de la contaminación” en su origen, en lugar de tratarla una vez generada.

## **5. DISEÑO METODOLOGICO**

El presente estudio se enmarca dentro de los siguientes tipos de investigación:

- Aplicada
- Técnica - científica
- Exploratoria

La investigación es aplicada porque se busca la generación de conocimiento con aplicación directa en el desarrollo de prácticas de laboratorio. La investigación es técnica y científica porque se realiza una exploración rigurosa y precisa aplicando los conocimientos y técnicas aprendidos en los cursos del programa de ingeniería mecánica, con el fin de obtener un banco de pruebas útil. La investigación es exploratoria porque se centra en analizar aspectos concretos de la realidad del proceso de aprovechamiento de energía solar mediante un banco de pruebas funcional que favorezca el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería mecánica.

Etapas a seguir:

### **5.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA**

Se llevó a cabo un análisis del problema que presenta el laboratorio de mecánica por la carencia de implementos para realizar prácticas de laboratorio referentes a energías alternativas. Se implementó una investigación con el fin de identificar la necesidad y a partir de esto darle una solución con la construcción de un banco de pruebas fotovoltaico.

### **5.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

Se procederá a investigar fuentes bibliográficas que traten una problemática similar a la que presenta el laboratorio de ingeniería mecánica, al mismo tiempo se buscó obtener el mayor conocimiento posible de las instalaciones solares fotovoltaicas autónomas.

### **5.3 HIPÓTESIS**

Luego de analizar los diferentes inconvenientes se procedió a encontrar una solución viable y eficiente, para esto se puso en práctica la técnica “lluvia de ideas” para elegir una solución factible a la problemática para brindar un banco de pruebas funcional y de aprovechamiento de los estudiantes.

Se planteó una hipótesis de acuerdo a las necesidades de los estudiantes de ingeniería mecánica, la cual, brinde una serie de ventajas que favorezcan el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas, Tunja.

### **5.4 OBJETIVOS**

Se trazaron las metas a las que se quiso llegar con la implementación de este proyecto.

### **5.5 ELABORACIÓN DEL BANCO DE PRUEBAS**

**5.5.1 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico aislado.** Se realizó un dimensionamiento del sistema fotovoltaico a implementar en el banco de pruebas, se tuvieron en cuenta los parámetros de los paneles como su potencia (200 W) y demás características. Se seleccionaron los componentes principales a utilizar en el banco, para la adquisición de estos componentes se recurrió a la convocatoria de investigación formativa de la Universidad Santo Tomas Tunja, donde se aprobó un presupuesto para la compra de equipos.

**5.5.2 Modelo.** Se definió el modelo de estructura más adecuado para el proyecto teniendo en cuenta los diferentes factores y limitaciones de este, ya que se busca economizar los recursos, se ejecutará la idea más eficiente y adecuada para la implementación del banco de pruebas, esta se obtuvo de la realización de una lluvia de ideas donde al final de una discusión se seleccionó la más adecuada para posteriormente diseñar e implementar el modelo seleccionado.

**5.5.3 Diseño.** Se procedió a realizar un dibujo CAD del diseño seleccionado donde se buscó asesoría de los ingenieros docentes de la facultad de ingeniería mecánica de la USTA Tunja, de estas asesorías se obtuvieron ideas muy útiles para el diseño, al terminar el dibujo CAD se utilizó para generar planos de las estructuras a construir para el chasis del banco y soporte de paneles. Se elaboró un diagrama unifilar para el diseño de las conexiones del sistema fotovoltaico aislado.

**5.5.4 Construcción del banco de pruebas.** Se empezó a construir el diseño seleccionado previamente, teniendo en cuenta los costos y presupuesto, luego de su construcción se puso en marcha el banco de pruebas para verificar su funcionamiento. Se evidencio que tan eficiente es el modelo y si cumple con las expectativas esperadas.

## **5.6. INTERPRETACIÓN DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Se realizaron pruebas de verificación del funcionamiento del banco de pruebas, luego se examinó si este banco es funcional y cumple con lo especificado, al ser así se implementó como solución viable a las necesidades de la facultad de ingeniería mecánica y de las asignaturas de la rama de energías.

## **5.7 CONCLUSIONES**

Se verificó la utilidad del banco de pruebas para tener una idea clara de la viabilidad de su implementación y comprobar que cumple con los objetivos planteados.

## 6. RESULTADOS

### 6.1 DIMENSIONAMIENTO DE INSTALACIÓN DE BANCO DE PRUEBAS FOTOVOLTAICO

En esta sección se presentan los cálculos realizados para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo. Se tendrá en cuenta que el sistema será utilizado para realizar prácticas propuestas en las asignaturas del programa de ingeniería mecánica enfocado en la rama de energías, donde el usuario pueda reconocer los componentes que hacen parte del banco en un entorno controlado, por este motivo, se estima una **potencia de 200 W**, considerada suficiente para demostrar el funcionamiento de dichas instalaciones fotovoltaicas. Esta potencia se considera apta para que el usuario pueda interactuar de manera segura y obtener conocimientos experimentales de este sistema de generación de energía.

**6.1.1 Cálculo de la energía necesaria teniendo en cuenta las pérdidas.** Para el cálculo de la energía necesaria teniendo en cuenta las pérdidas es necesario hallar el valor de la energía total o real generada por los paneles denominada  $E_T$ , el cual se halla con la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Energía total o real generada por los paneles teniendo en cuenta el rendimiento:

$$E_T = E_p * R$$

Fuente: Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. Dinamov Soluciones Renovables. 2018

Donde,

$E_p =$  Energía teórica de los paneles

$R = \text{Rendimiento del sistema de almacenamiento}$

Para cumplir con la potencia requerida por el sistema (200 W), se instalarán dos **paneles solares de 100 W** cada uno, debido a que la intención del banco de pruebas es que el usuario pueda realizar conexiones entre paneles en serie y paralelo esto con el fin de observar las diferencias de voltaje y corriente entre estos dos tipos de conexiones. Lo anterior se evidencia en la siguiente operación:

Ecuación 2. Energía teórica de los paneles

$$E_p = \text{energía total del panel} * N^\circ \text{ de paneles}$$

$$E_p = 100 \text{ W} * 2$$

$$E_p = 200 \text{ W}$$

Fuente: Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. Dinamov Soluciones Renovables. 2018

Como paso a seguir se calcula la variable  $R$  con la siguiente ecuación:

Ecuación 3. Rendimiento del sistema de almacenamiento.

$$R = 1 - \left[ (1 - k_b - k_c - k_v) \frac{(k_a)(N)}{Pd} \right] - k_b - k_c - k_v$$

Fuente: Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. Dinamov Soluciones Renovables. 2018

Donde,

$k_b = \text{Coeficiente de pérdidas por rendimiento del acumulador.}$

$k_a = \text{Coeficiente de autodescarga.}$

$k_c =$  Coeficiente de Pérdidas del Inversor.

$k_v =$  Coeficiente que agrupa otras pérdidas. (otros componentes, diferencia de potencias nominales a potencias reales consumidas, conducción, conexiones).

$N =$  Numero de dias de autonomia

$Pd =$  Profundidad de descarga

Paso siguiente se determinan valores para los coeficientes necesarios para la ecuación. Los valores más usuales (a tomar en defecto de otros más precisos) son:

$$k_a = 0.005$$

$$k_b = 0.05$$

$$k_c = \begin{cases} 0 \rightarrow \text{No hay inversor} \\ 0.006 - 0.13 \rightarrow \text{Inversor senoidal} \\ 0.1 \rightarrow \text{Inversor de onda cuadrada} \end{cases}$$

Para el sistema se toma el valor de coeficiente  $k_c = 0.13$ , ya que se recomienda un inversor de onda senoidal para la insalacion fotovoltaica.

$$k_v = \begin{cases} 0.15 \rightarrow \text{Si las potencias de los consumos son las nominales o teoricas} \\ 0.1 \rightarrow \text{Si no se dispone de informacion en detalle de los rendimientos} \\ 0.05 \rightarrow \text{Si las potencias son las realmente consumidas} \end{cases}$$

Se toma como valor de coeficiente  $k_v = 0.05$ , porque el sistema va a consumir la potencia real a la cual va trabajar el banco de pruebas.

Para el número de días de autonomía se consideró el valor de 2 días, entonces:

$$N = 2$$

Para la profundidad de descarga se consideró el valor de:

$$Pd = 0.5$$

Ya con todas las variables definidas se procede a calcular  $R$ :

$$R = 1 - \left[ (1 - 0.05 - 0.13 - 0.05) \frac{(0.005)(2)}{0.5} \right] - 0.05 - 0.13 - 0.05$$

$$R = 0.75$$

Ahora, retomando la Ecuación 1, se tiene:

$$E_T = E_P * R$$

$$E_T = 200 W * 0.75$$

$$E_T = 150 W$$

Este resultado es la energía real del sistema teniendo en cuenta las pérdidas.

**6.1.2 Cálculo de las baterías del sistema fotovoltaico.** Para el banco de pruebas se instalarán dos **baterías de 12 V** cada una, debido a que la intención del sistema es que el usuario pueda realizar conexiones entre baterías en serie y paralelo esto con el fin de observar las diferencias de voltaje y corriente entre estos dos tipos de conexiones.

Se calculará la capacidad útil de la batería del sistema conectado en paralelo, considerando que opera a una tensión de 12 V, para así obtener los datos suficientes para posteriormente realizar una selección idónea que cumpla con los requerimientos del banco de pruebas.

Ecuación 4. Capacidad útil de la batería ( $Cu$ ):

$$Cu = \frac{E_T * N}{V * Pd}$$

Fuente: Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. Dinamov Soluciones Renovables. 2018

Donde,

*ET = Energia real del sistema*

*N = días de autonomia de las baterias, se tendra en cuenta para dos días.*

*V = voltaje del sistema en paralelo 12 V*

*Pd = profundidad de descarga para el sistema será del 50% para prolongar la vida útil de las baterías.*

Entonces:

$$Cu = \frac{150 W * 2}{12V * 0.5}$$

$$Cu = 50 \text{ Amp.h}$$

Se observa que la capacidad útil de la batería en paralelo es de 50 Amp.h

Se calculara la capacidad útil de la batería del sistema conectado en serie, cuando ésta ópera a una tensión de 24 V, con la ecuación 4.

$$Cu = \frac{ET * N}{V * Pd}$$

Donde,

*ET = Energia real del sistema*

*N = días de autonomia de las baterias, se tendra en cuenta para dos días.*

*V = voltaje del sistema en paralelo 24 V*

*Pd = profundidad de descarga para el sistema será del 50% para prolongar la vida útil de las baterías.*

Entonces:

$$Cu = \frac{150 W * 2}{24 V * 0.5}$$

$$Cu = 25 \text{ Amp.h}$$

Se observa que la capacidad útil de la batería en serie es de 25 Amp.h.

### **6.1.3 Cálculo del inversor del sistema fotovoltaico.**

**6.1.3.1 Cálculo del inversor del sistema conectado en paralelo.** Para el dimensionamiento del inversor se tendrá en cuenta el voltaje de las baterías el cual es de 12 V, por este motivo el inversor debe trabajar al mismo voltaje, con una potencia máxima de 200 W y se tendrá en cuenta un factor de seguridad del 25%.

Ecuación 5. Cálculo de potencia máxima de inversor teniendo en cuenta el factor de seguridad.

$$P_{max} = 200W * 1.25$$

$$P_{max} = 250 W$$

Fuente: Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. Dinamov Soluciones Renovables. 2018

**6.1.3.2 Cálculo del inversor del sistema conectado en serie.** Las especificaciones del inversor conectado en serie serían iguales al inversor conectado en paralelo, con la única diferencia de que este debe soportar una tensión de 24 V.

$$\text{Inversor} = 250 \text{ W}, 24 \text{ V}$$

**6.1.4 Dimensionamiento del panel.** Como ya se planteó, el sistema está idealizado para una potencia de 200 W y se necesita realizar las conexiones en paralelo como se mencionó anteriormente, se comprarán dos paneles de 100 W cada uno para alimentar el sistema fotovoltaico. Se tendrán en cuenta los siguientes conceptos importantes a la hora de seleccionar el panel.

**6.1.4.1 Voltaje en máxima potencia (Vmp).** Es el Voltaje en Máxima Potencia, es decir, el voltaje que generará la placa solar cuando esté funcionando al máximo de su rendimiento. El valor VMP irá en paralelo con el IMP. Ya que los dos ascenderán o bajarán según la cantidad de radiación solar que reciba el panel fotovoltaico.

**6.1.4.2 Intensidad en máxima potencia (Imp).** Significa la Intensidad en Máxima Potencia, es decir, la corriente eléctrica que producirá en un funcionamiento perfecto con el sol incidiendo de forma perpendicular encima de la superficie de la placa. A lo largo del día la intensidad de corriente variará ya que los rayos del sol no incidirán con el mejor ángulo hasta el mediodía. Durante la mañana la capacidad de generar energía será menor, pero irá en aumento hasta las horas centrales del día. Por la tarde, el panel realizará la acción inversa hasta dejar de producir electricidad cuando sea de noche.

**6.1.4.3 Voltaje en circuito abierto (Voc).** Será la tensión de salida del panel cuando no haya ninguna carga.

**6.1.4.4 Corriente a corto circuito (Isc).** Se refiere a la Intensidad por Corto-Circuito, y será la corriente máxima que producirá el panel en una situación de anomalía de funcionamiento del panel cuando exista un cortocircuito. Este valor se suele utilizar para determinar el tamaño de cable de la instalación, así como para dimensionar a medida las protecciones y los fusibles de esta parte de la instalación solar.

Tabla 1: Lista de componentes a seleccionar

<b>ELEMENTOS</b>	<b>SERIE</b>	<b>PARALELO</b>
<b>Regulador</b>	<b>24 V</b>	<b>12 V</b>
<b>Baterías</b>	<b>25 Amp.h</b>	<b>50 Amp.h</b>
<b>Inversor</b>	<b>24 V, 250 W</b>	<b>12 V, 250 W</b>
<b>Paneles</b>	<b>100 W, 24 V</b>	<b>100 W, 12 V</b>

Fuente: Autores


## **6.2 SELECCIÓN DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO.**

**6.2.1 Cotización y selección de proveedores.** Luego de realizar los cálculos para el sistema solar fotovoltaico, y en base a estos se solicitaron diferentes cotizaciones con empresas las cuales podrían suministrar los equipos necesarios para la construcción del banco solar, las entidades realizaron algunas búsquedas y plantearon diferentes sistemas que cumplieran con lo requerido en dimensionamiento solar, se hizo una selección teniendo en cuenta las mejores alternativas que se adecuaban al requerimiento de la instalación.

Se obtuvieron cotizaciones con diferentes empresas proveedoras para seleccionar la alternativa más conveniente para el proyecto en cuanto a su viabilidad funcional y económica.

Se realizó el contacto con la empresa “Improinde” para solicitar la cotización de los componentes para el sistema, a continuación se muestra la propuesta de la empresa:


**Figura 6.** Cotización de la empresa Improinde S.A.S.

<p>Fecha de impresión: 27/02/2019                  Tipo de pago: Transferencia                  Fecha de vencimiento: Contado</p>		 <p><b>improinde sas</b>                  innovación y desarrollo</p>							
<p><b>Vendedor</b>                  Importadora de Productos para la Innovación y el Desarrollo                  CRA. 73A 63F 38                  110171 Bogota, Colombia                  NIT 900702319-1                  comercial@improinde.com                  www.improinde.com                  Teléfono : 3023360375, 3003973502                  Fax: 57-1-4303939                  Bancolombia                  58932461071 Ahorros                  SWIFT : COLOCOBM</p>		<p><b>Cliente</b>                  IVAN DARIO MENDOZA                  TEL:316 370 7784                  Colombia</p>							
N°	Descripción	Referencia	Cantidad	Precio Unidad	Subtotal	IVA %	ICA %	Impuestos	Total bruto
1	<b>Panel Solar Monocristalino 100W</b> 12v 100w Dimensiones: 1060*670*35mm, cable: 90cm tipo MC4. Marca Procet Scientific	80510	2 pc	168.960	337.919,33	19	0	64.204,67	402.124,00
2	<b>Bateria 12V 26 Ah</b> 12v 26ah Ciclo Profundo AGM	81024	2 pc	145.171	290.341,18	19	0	55.164,82	345.506,00
3	<b>Bateria 12V 55 Ah</b> 12v 55ah Ciclo Profundo GEL	81055	2 pc	263.871	527.742,86	19	0	100.271,14	628.014,00
4	<b>Controlador de Carga 20A</b> PWM, 20A 12/24V LCD USB Marca PS	82020	1 pc	71.107	71.106,72	19	0	13.510,28	84.617,00
5	<b>Inversor 600W 24V</b> Onda Pura, 24V a 110v, 600w Marca PS	82407	1 pc	316.241	316.241,18	19	0	60.085,82	376.327,00
								<b>Subtotal</b>	1.543.351,27 COP
								<b>Impuestos</b>	293.236,73 COP
								<b>Total</b>	1.836.588,00 COP

Fuente: Improinde S.A.S.

Como segunda opción se solicitó la cotización al proveedor “Tienda Solar” y la siguiente fue su propuesta:



Figura 7. Cotización del proveedor Tienda Solar

	<b>SOLICITUD DE COTIZACION</b>		FAE-CT-080		
			Version: 01		
			11/01/15		
CLIENTE	Edison Torres	TELEFONO	3138723818		
FECHA DE SOLICITUD:	04/03/2019				
PROYECTO:	SUMINISTROS				
Concepto de Solicitud:	<input type="checkbox"/> Materiales	<input type="checkbox"/> Servicios	<input type="checkbox"/> Dotacion FAE		
	<input type="checkbox"/> Insumos	<input checked="" type="checkbox"/> Equipos	<input type="checkbox"/> Otro		
Si Coloca Otro Especifique:					
PRODUCTO Y/O SERVICIO A REQUERIR					
ITEM	DESCRIPCION	UNID	CANT	V/ UNIT	V/ TOTAL
1	Panel solar monocristalino 100w	UND	2	\$ 260.000	\$ 520.000
2	Bateria AGM 12v/26Ah	UND	2	\$ 182.250	\$ 364.500
3	Inversor onda pura 300w/12v	UND	1	\$ 456.840	\$ 456.840
3	Inversor onda pura 300w/24v	UND	1	\$ 480.465	\$ 480.465
4	Regulador MPPT 20A	UND	1	\$ 411.075	\$ 411.075
	Regulador MPPT 30A	UND	1	\$ 552.825	\$ 552.825
SUBTOTAL				\$	2.785.705
IVA				\$	529.284
TOTAL				\$	3.314.989

Fuente: Proveedor Tienda Solar, Gonzalo Saavedra, Asesor comercial, Bogotá.

Para la tercera opción se contactó a la empresa TSC - Technology Solutions Company y su cotización se muestra en la figura 6:

**Figura 8.** Cotización de la empresa TSC

**TSC-TECHNOLOGY SOLUTIONS COMPANY**  
**NIT 7.182.880-0**  
 Centro Tecnológico y de Negocios Lago Plaza  
 Cll 20 No 13-27 Tunja  
 PBX:(098) 7441563  
 Lunes a viernes 9:00 am a 6:00 pm  
 Email: [tsc.solucionestecnologicas@gmail.com](mailto:tsc.solucionestecnologicas@gmail.com)

Tunja, 20 de marzo de 2019.

Saludo Cordial.

A continuación presentamos la cotización solicitada:

SISTEMA FOTOVOLTAICO			
Descripción	Cant	Vlr Unitario	Vlr Total
Panel solar fotovoltaico monocristalino 100w 12v	2	\$ 286.000	\$ 572.000
Controlador PWM 20 A	1	\$ 107.207	\$ 107.207
Inversor onda pura 600w – 24v	1	\$ 425.425	\$ 425.425
Baterías GEL 26 AH 12V	2	\$ 250.000	\$ 500.000
Conectores MC4 sencillos	6	\$ 10.000	\$ 60.000
Conectores Y	2	\$ 32.000	\$ 64.000
<b>TOTAL CON IVA</b>			<b>\$ 1.728.632</b>

Fuente: TSC, Ing. Julian Fonseca, [tsc.solucionestecnologicas@gmail.com](mailto:tsc.solucionestecnologicas@gmail.com).

Para selección del proveedor se tuvieron en cuenta **tres criterios** los cuales fueron:

- Adaptación al dimensionamiento realizado en el apartado 6.1
- Relación beneficio-costos
- Facilidad de contacto con el proveedor y su disponibilidad de equipos

Luego del análisis y la discusión de las propuestas de estos tres proveedores, se concluyó que la propuesta de la empresa **TSC-Technology Solutions Company** era la que más se acomodaba a los criterios evaluados.

## 6.2.2 Selección de componentes del proveedor.

**6.2.2.1 Selección de paneles.** Se seleccionaron dos paneles solares monocristalinos de 100 W cada uno, los cuales se ilustran en la figura 7.

**Figura 9.** Ilustración del panel solar monocristalino



Fuente: Autores

### **Especificaciones del panel monocristalino seleccionado:**

- Potencia de 100 W
- Eficiencia del 19%
- Dimensiones: 1030 mm x 680 mm x 35 mm.
- **Voltaje en máxima potencia:**

$$V_{mp} = 18 V$$

- **Intensidad en máxima potencia:**

$$I_{mp} = 5.56 A$$

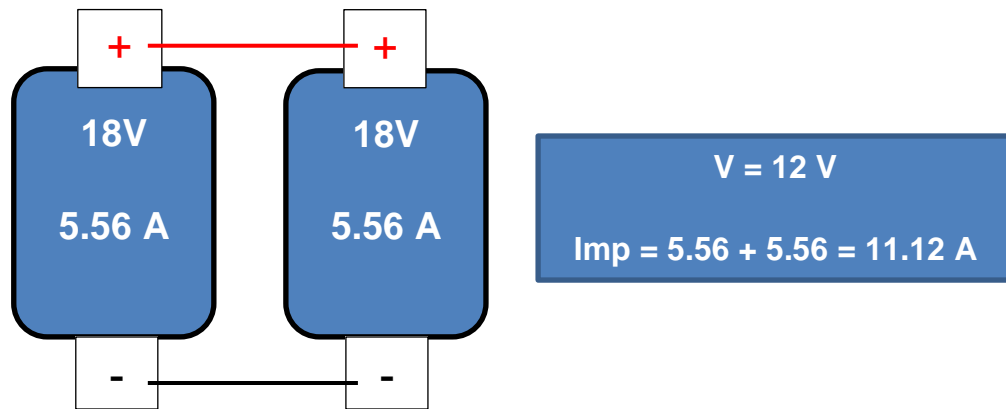
- **Voltaje en circuito abierto**

$$V_{oc} = 22.32 V$$

- **Corriente a corto circuito**

$$I_{sc} = 6 A$$

**Figura 10.** Datos del sistema de paneles conectados en paralelo



Fuente: Autores

- Intensidad en máxima potencia en paralelo:

$$Imp_{max} = 5.56 A * 2$$

$$Imp_{max} = 11.12 A$$

- Corriente a corto circuito máxima en paralelo:

$$Isc = 6 A * 2$$

$$Isc = 12 A$$

Se tendrá en cuenta un factor de seguridad del 10%, para evitar posibles sobrecargas en el regulador.

Ecuación 6. Corriente a corto circuito máxima teniendo en cuenta factor de seguridad.

$$Fs = \text{Factor de seguridad}$$

$$F_s = 10\%$$

$$I_{sc_{max}} = I_{sc} * F_s$$

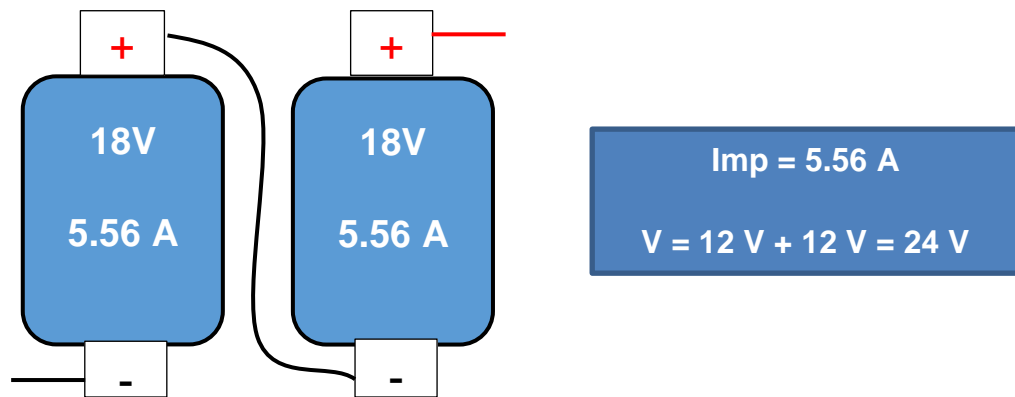
$$I_{sc_{max}} = I_{sc} * 1.1$$

$$I_{sc_{max}} = 12 * 1.1$$

$$I_{sc_{max}} = 13.2 A$$

Fuente: Fundamentos de sistemas fotovoltaicos con almacenamiento. Dinamov Soluciones Renovables. 2018.

**Figura 11.** Datos del sistema conectado en serie



Fuente: Autores

- Voltaje en máxima potencia de los paneles en paralelo:

$$V_{mp} = 18V * 2 = 36V$$

- Corriente máxima a corto circuito en serie, calculada con la ecuación 6:

$$I_{sc} = 6 A$$

$$I_{sc_{max}} = 6 * 1.1 = 6.6 A$$

**6.2.2.2 Selección de regulador.** De acuerdo a los cálculos realizados se seleccionó un regulador de 12 V y con capacidad para 30 A.

**Figura 12.** Ilustración del Regulador seleccionado



Fuente: Autores

**Especificaciones del regulador seleccionado:**

- Dimensiones: 168 mm x 92 mm x 41.5 mm
- Tipo de carga: PWM
- Voltaje del sistema: 12 V / 24 V
- Entrada máxima de voltaje de los paneles: 55 V
- Máxima corriente de carga: 30 A
- Máxima corriente de descarga: 30 A
- Temperatura de trabajo: -20 °C --- +55 °C

**6.2.2.3 Selección de baterías.** Se seleccionaron dos baterías de gel, que operan a 12 V y 26 Amp.h.

**Figura 13.** Ilustración de baterías seleccionadas



Fuente: Autores

### **Especificaciones de las baterías seleccionadas:**

- Dimensiones: 16 mm x 14 mm x 12 mm
- Voltaje de flotación: 13.5 – 13.8 V
- Voltaje en modo cíclico: 14.4 – 14.9 V
- Corriente inicial: 7.8 A
- Temperatura de trabajo: 25 °C

### **6.2.2.4 Selección del inversor.**

**Figura 14.** Ilustración del inversor seleccionado.



Fuente: Autores

### Especificaciones del inversor seleccionado:

- Dimensiones: 20.7 mm x 37.5 mm x 14.5 mm
- Capacidad: 300 W
- Voltaje de entrada: 12 V
- Voltaje de salida: 220 V/110 V  $\pm 5\%$
- Corriente de carga: 20 A (incremento opcional)
- Temperatura de trabajo:  $-10^{\circ}\text{C} - 50^{\circ}\text{C}$

**6.2.2.5 Selección de las protecciones.** Se seleccionaron las protecciones en base al dimensionamiento y a la selección de los componentes principales del sistema fotovoltaico evidenciados anteriormente. Se realizaron cálculos de la corriente del sistema tomando como referencia la potencia máxima, que se muestran a continuación:

- Para el sistema a 12 V:
  - Ecuación 7. Potencia eléctrica.

$$P = V * I$$

Fuente: Perolini, Caludio. *Introducción a los circuitos eléctricos 1*, Editorial Hispano Americana HASA, 2009.

De la ecuación 7 se despeja la corriente  $I$  y se obtiene la siguiente ecuación:

- Ecuación 8. Corriente eléctrica en base a la potencia eléctrica.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{200\text{ W}}{12\text{ V}}$$
$$I = 16.6\text{ A}$$

- Para el sistema a 24 V:
  - Se retomó la ecuación 8 para calcular la corriente:

$$I = \frac{P}{V} = \frac{200 \text{ W}}{24 \text{ V}}$$

$$I = 8.3 \text{ A}$$

- Para el sistema de corriente alterna (110 V):

### Potencia Activa

Esta potencia es la que se transforma en energía en los receptores, la única que se transforma en energía útil. Solo esta potencia eléctrica se transforma en trabajo por el receptor. Esta es la que realmente da el dato de qué potente es el receptor y es la que viene expresada en las características de todos los receptores. Es por lo tanto la más importante. Se mide en vatios (w).<sup>19</sup> La potencia activa se calcula con la siguiente ecuación:

Ecuación 9. Potencia eléctrica activa teniendo en cuenta factor de potencia

$$P = V * I * \cos \varphi$$

Fuente: Redondo, Gallardo, José María. *Análisis práctico de circuitos eléctricos: corriente continua y alterna: formación para el empleo*, Editorial CEP, S.L., 2010.

El  $\cos \varphi$  también se conoce como "Factor de Potencia", es el ángulo de desfase entre el voltaje y la corriente. En el tipo de resistivo puro el voltaje y la corriente están en fase, por ende, el ángulo de desfase es  $0^\circ$  y  $\cos 0^\circ = 1$ . El factor de potencia en receptores de resistencias puras es 1.<sup>20</sup>

$$\cos \varphi = F_p$$

$$F_p = \text{Factor de potencia}$$

---

<sup>19</sup> ROSELL, POLO, Joan Ramón. Circuitos eléctricos monofásicos y trifásicos: fundamentos teóricos y ejercicios resueltos, Edicions de la Universitat de Lleida, 2000, p. 51

<sup>20</sup> *Ibíd.*, p. 55

El circuito del banco de pruebas se considera de tipo resistivo puro, por lo tanto:  $F_p = 1$

Retomando la ecuación 9 se tiene:

$$P = V * I * F_p$$

De esta ecuación se despeja al corriente  $I$  y se obtiene:

$$I = \frac{P}{V * F_p} = \frac{200 W}{110 V * 1}$$

$$I = 1.818 A$$

A continuación se multiplica la corriente obtenida por un factor de seguridad para obtener un valor de corriente más práctico.

$$I = 1.818 A * 1.7$$

$$I = 3.1 A$$

En base a los cálculos anteriores se seleccionaron cuatro breakers marca Siemens, dos de 30 A y dos de 40 A respectivamente. De igual manera se seleccionaron 3 fusibles de 30 A cada uno para proteger los componentes principales y de mayor precaución como lo son las baterías y el inversor.

**Figura 15.** Ilustración de los breakers marca Siemens utilizados.



Fuente: Autores

**Figura 16.** Ilustración de la caja de protecciones.



Fuente: Autores

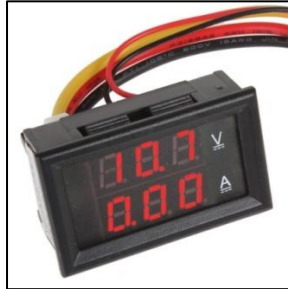
**Figura 17.** Ilustración de los fusibles.



Fuente: Autores

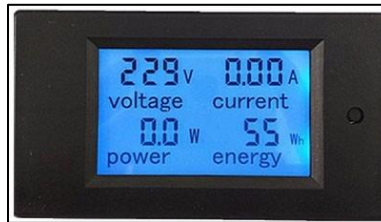
**6.2.2.6 Selección de los componentes varios para el banco de pruebas.** Se seleccionaron varios dispositivos electrónicos para realizar las mediciones de corriente alterna y continua que circulan en el sistema, esto con el fin de dar comodidad al usuario para que pueda realizar y entender las prácticas de forma didáctica. Adicionalmente se instalaron bombillos a 12 y 24 V para realizar la demostración de la generación de energía de corriente continua y un reflector para demostrar de igual manera la generación de corriente alterna.

**Figura 18.** Multímetro digital de corriente continua (DC).



Fuente: Autores

**Figura 19.** Multímetro digital de corriente alterna (AC).



Fuente: Autores

**Figura 20.** Bombillo de 12 V y corriente continua(CC).



Fuente: Autores

**Figura 21.** Reflector LED de 10W alimentado con corriente alterna.



Fuente: Autores

**6.2.2.7 Aplicación a la III convocatoria de investigación formativa para el financiamiento del proyecto.** Luego de seleccionar los componentes y equipos necesarios para la construcción del banco se vio la posibilidad de aplicar a la “III convocatoria de investigación formativa” la cual ofrecía un presupuesto de dos millones de pesos para desarrollar proyectos y trabajos de grado que favorezcan a la universidad. Para aplicar a la convocatoria se diligenciaron los formatos pertinentes y demás requisitos para su posterior entrega a la unidad de investigación de la universidad Santo Tomas, instancia la cual valido y aprobó la propuesta.

Como paso a seguir se gestionó el proceso de compra con el proveedor seleccionado “TSC- Technology Solutions Company” haciendo uso del presupuesto aprobado por la unidad de investigación y la oficina de adquisiciones el cual facilito la compra de los principales equipos del sistema fotovoltaico.

## 6.3 DISEÑO DEL BANCO DE PRUEBAS DE ACUERDO A LAS DIMENSIONES DE LOS COMPONENTES SELECCIONADOS.

**6.3.1 Inicio del proceso de diseño. Lluvia de ideas.** El proceso de diseño es una mezcla de acciones intuitivas y deliberadas. Muchos diseñadores empiezan llevando a cabo una lluvia de ideas o brainstorming, una técnica abierta para generar una serie de ideas iniciales que ayuden a perfilar el problema al tiempo que amplían la propia perspectiva sobre el mismo. El método de la lluvia de ideas, desarrollado en la década de 1950, se convirtió rápidamente en una fórmula muy común para estimular el pensamiento creativo, incluso en el caso de aquellas personas que no se consideraban creativas en absoluto. Aunque hoy continúa siendo una poderosa herramienta para el diseñador, supone tan solo el arranque de un proceso de búsqueda de inspiración y de ideas más amplio.<sup>21</sup>

Esta y otras técnicas relacionadas ayudan a los diseñadores a definir los problemas y a generar conceptos iniciales al arrancar un proyecto. Estos procesos pueden plasmarse en listas escritas o en bocetos y diagramas rápidos. Constituyen un método práctico y eficaz para abrir la mente y liberar el potencial de las ocurrencias menos ortodoxas.<sup>22</sup>

Se implementó la técnica “lluvia de ideas” para iniciar el proceso de diseño del banco de pruebas fotovoltaico, cumpliendo con las estrategias que propone este método, se procedió a delimitar el objetivo del diseño centrándose en un tema específico, el cual fue la construcción de un banco de pruebas solar fotovoltaico para prácticas de laboratorio, para que las ideas postuladas fueran más productivas.

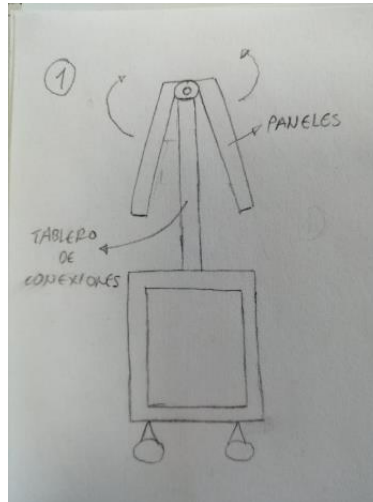
---

<sup>21</sup> LUPTON Ellen. *Intuición, acción, creación*, Editorial Gustavo Gili, 2012, p. 4 ProQuest Ebook Central, <http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaustasp/detail.action?docID=4421910>.

<sup>22</sup> *Ibid.*, p. 16

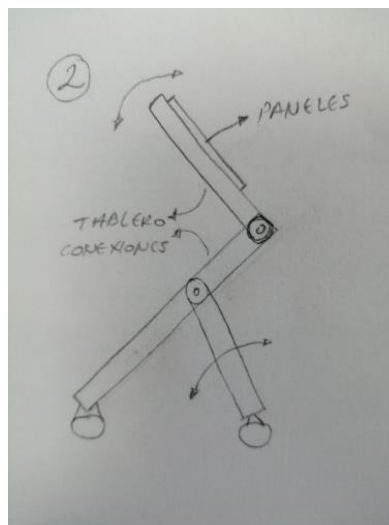
Se realizaron bocetos por cada participante durante un límite de tiempo de 15 minutos, se registraron las ideas, se socializaron y clasificaron al final de la sesión, después de una discusión se postularon 10 bocetos más opcionados para la construcción del banco los cuales se muestran a continuación.

**Figura 22.** Boceto 1



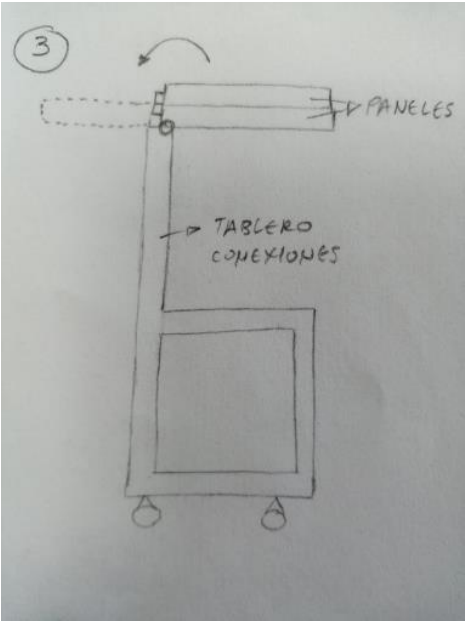
Fuente: Autores

**Figura 23.** Boceto 2



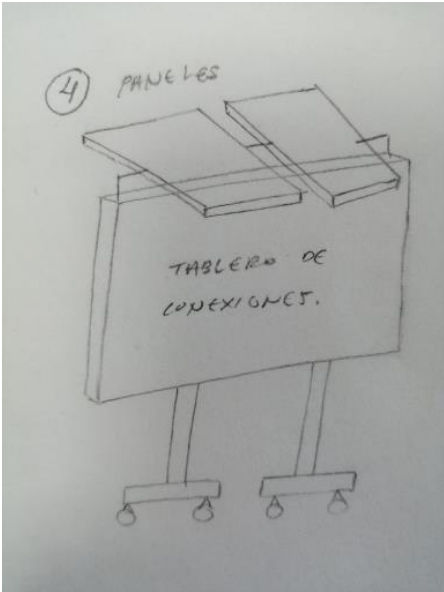
Fuente: Autores

**Figura 24. Boceto 3**



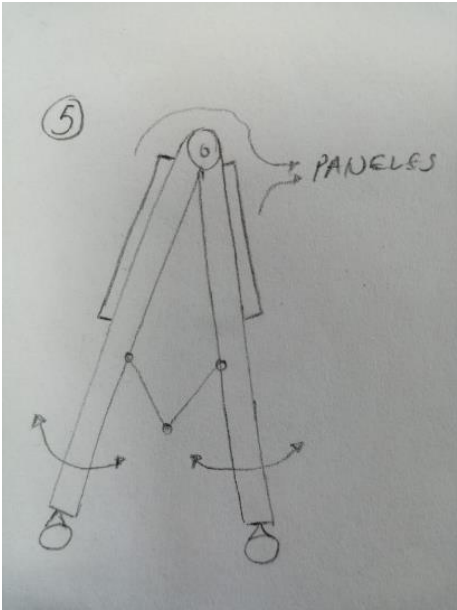
Fuente: Autores

**Figura 25. Boceto 4**



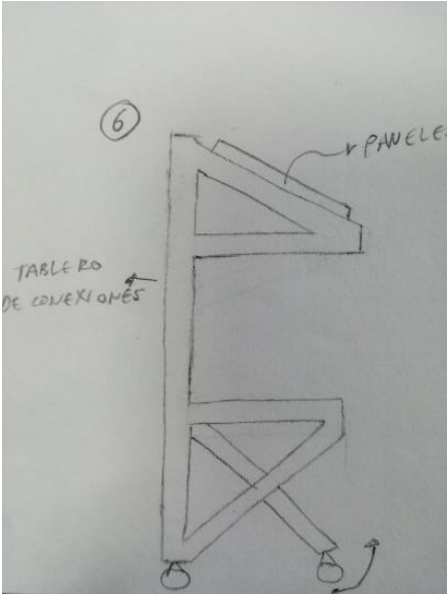
Fuente: Autores

Figura 26. Boceto 5



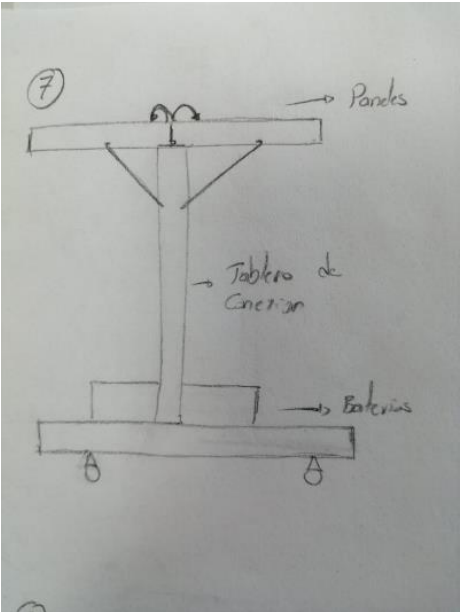
Fuente: Autores

Figura 27. Boceto 6



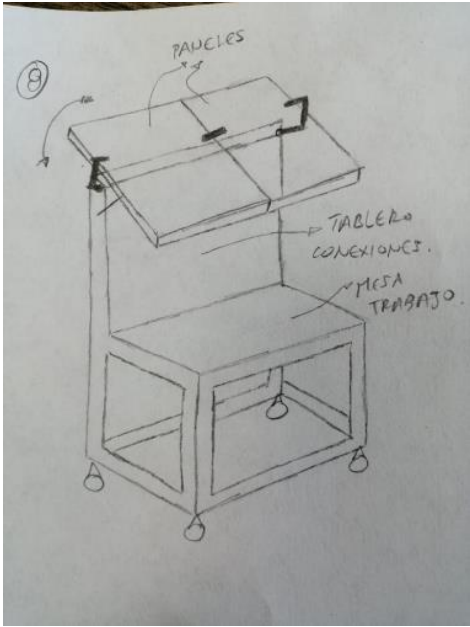
Fuente: Autores

**Figura 28. Boceto 7**



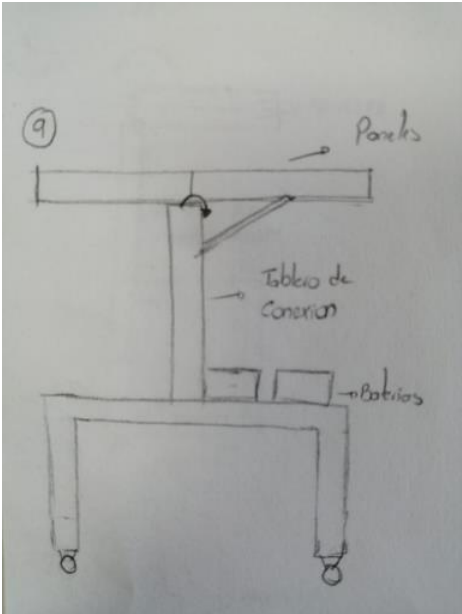
Fuente: Autores

**Figura 29. Boceto 8**



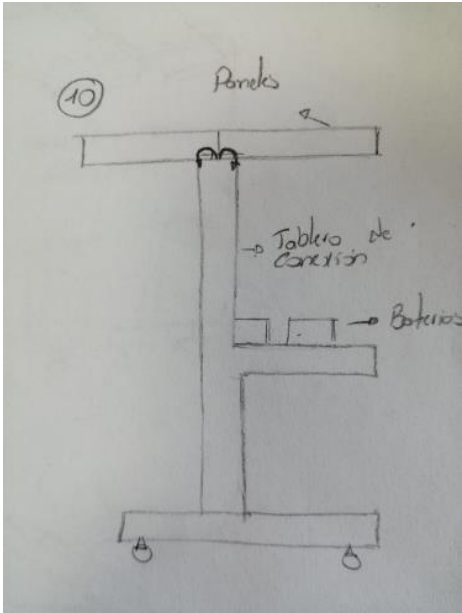
Fuente: Autores

**Figura 30. Boceto 9**



Fuente: Autores

**Figura 31. Boceto 10**



Fuente: Autores

Para la selección del prototipo, se realizó una matriz de evaluación donde se asignaron porcentajes a parámetros dependiendo de su importancia para la ejecución y construcción de la estructura del banco solar, la escala que se tomó fue de cero (0) a cien (100), donde cien es el valor máximo que se le puede dar al criterio y 0 el mínimo, de acuerdo a esto se procedió a evaluar cada uno de los bocetos diseñados, como se muestra en la siguiente tabla.

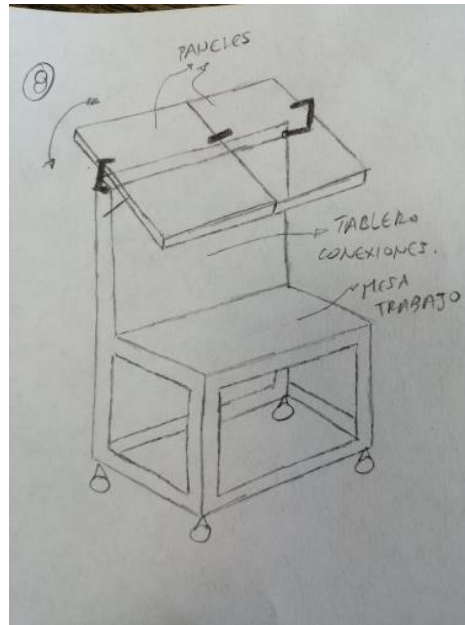
**Tabla 2.** Matriz de evaluación y selección de boceto.

MATRIZ DE EVALUACION Y SELECCIONCION DE BOCETOS									
Boceto	Construccion(20%)	Fiabilidad(10%)	Coste(15%)	Efectividad(10%)	Utilidad(10%)	Ergonomia(15%)	Movilidad(15%)	Estetica(5%)	Total
1	60	70	70	80	80	80	70	70	72,5
2	80	40	80	40	40	25	60	50	51,875
3	70	70	70	75	80	80	70	75	73,75
4	80	50	80	60	60	70	50	60	63,75
5	80	30	70	50	30	30	60	30	47,5
6	60	70	70	70	70	40	70	70	65
7	80	40	70	70	70	50	70	70	65
8	80	80	70	85	80	70	80	80	78,125
9	70	70	60	70	80	70	70	70	70
10	80	60	70	80	60	70	60	70	68,75

Fuente: Autores

Luego de implementar la matriz de evaluación, se tomó la decisión de ejecutar la construcción del banco solar de acuerdo al diseño postulado en el boceto número ocho (8), el cual se muestra a continuación.

**Figura 32.** Boceto 8 estructura banco fotovoltaico y sujeción de paneles.



Fuente: Autores.

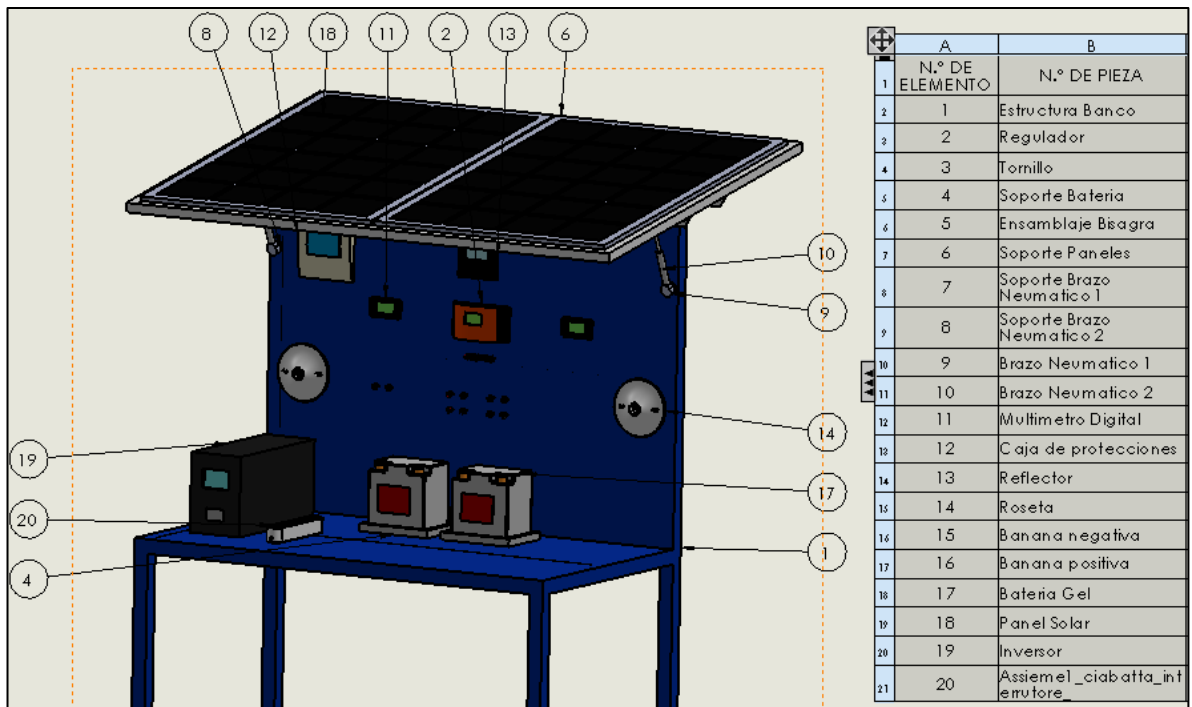
**6.3.2 Elaboración de CAD y obtención de planos de construcción.** Tras elegir el boceto más viable para la construcción del banco solar, se procedió a realizar el CAD utilizando el software SolidWorks para llevar a cabo el diseño implementando los componentes que conforman la estructura del banco de pruebas solar fotovoltaico. A continuación se evidencia el dibujo del CAD en las siguientes ilustraciones.

**Figura 33.** Dibujo CAD del banco fotovoltaico en software SolidWorks.



Fuente: Autores.

**Figura 34.** Esquema y lista de componentes del banco fotovoltaico

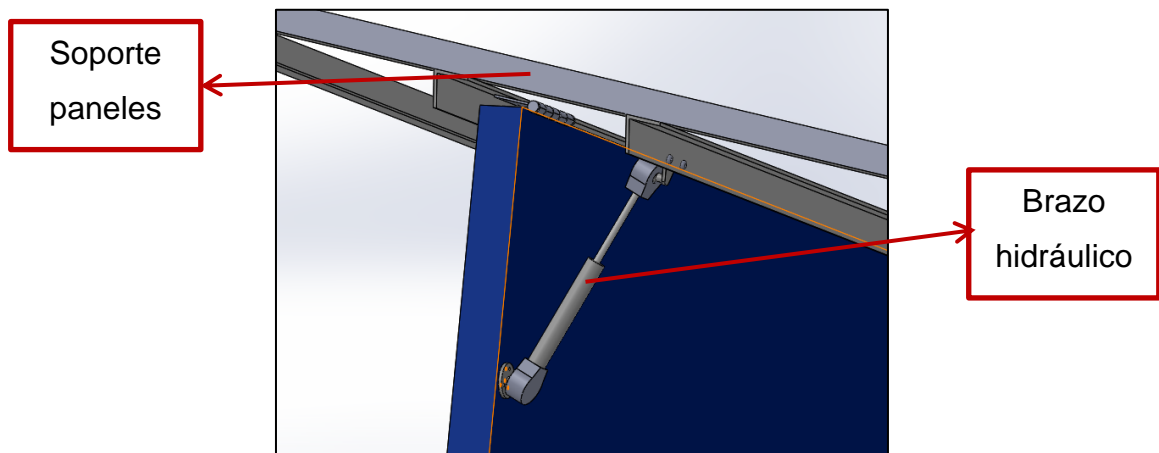


Fuente: Autores.

Para realizar el soporte de los paneles se consultó con los ingenieros de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad Santo Tomas algunas ideas para el montaje de los paneles, se llegó a la conclusión que la mejor alternativa era construir un marco en perfil de aluminio, el soporte se diseñó con el objetivo de sujetar los paneles a la estructura del banco solar, mantener los paneles a la misma inclinación y que fuera lo más liviano posible.

Se buscó un sistema que permitiera, de manera controlada, modificar la inclinación del soporte de los paneles, para cumplir esta tarea se decidió ensamblar dos brazos hidráulicos en cada extremo lateral del banco cuya función fuera pivotar la estructura de paneles de acuerdo a la inclinación deseada o en su defecto regresar a su posición horizontal original. Debido a que el peso de los paneles era de 14 Kg (137,34 N) se decidió usar dos brazos hidráulicos de 80 N cada uno como se muestra en la figura.

**Figura 35.** Dibujo CAD del soporte de los paneles y método de inclinación.

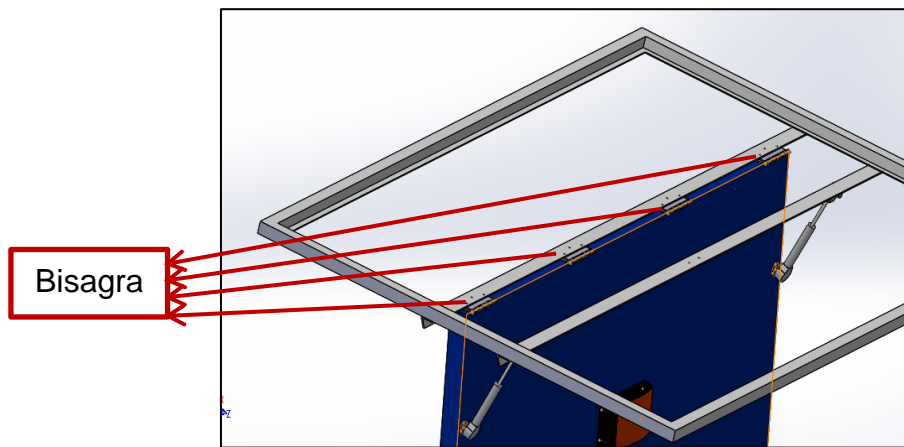


Fuente: Autores.

Para realizar la sujeción del soporte de los paneles a la estructura principal del banco solar se optó por utilizar bisagras debido a que permiten la movilidad para

variar el ángulo de inclinación de incidencia de la radiación solar, las bisagras de igual manera permiten un ensamble sencillo y económico ya que se usaron remaches para su sujeción, de la misma forma las bisagras brindan un grado de seguridad para los paneles porque evitan un vaivén debido a que permiten la rotación en una sola dirección, previniendo que los paneles choquen con la estructura y puedan ocurrir daños.

**Figura 36.** Dibujo CAD de soporte sujeto con bisagras

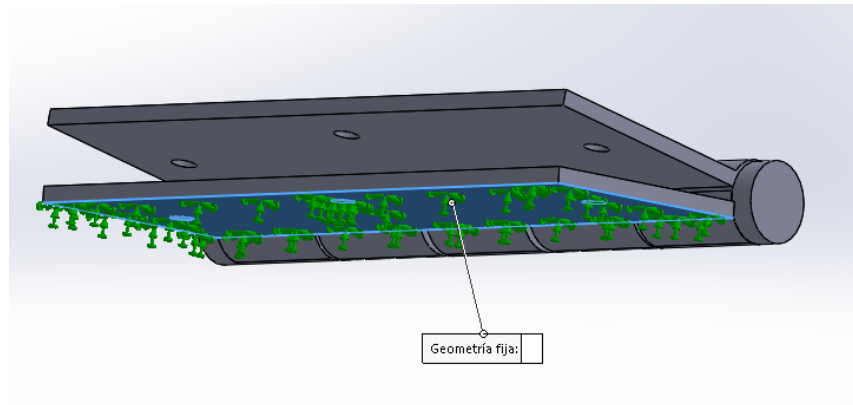


Fuente: Autores.

### **6.3.3 Análisis estático en software de bisagras para sujeción de soportes.**

A continuación se muestra un análisis estático realizado con un software de diseño asistido por computadora (Solidworks Simulation) determinando algunos parámetros en el diseño de estructuras, tales como la tensión máxima.

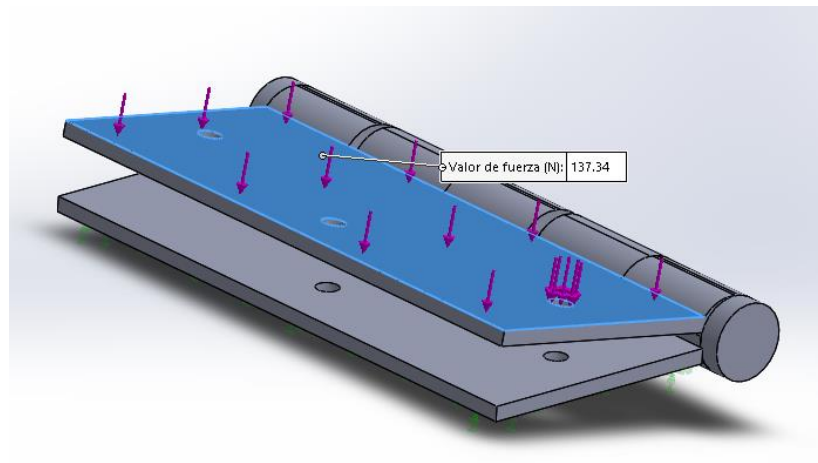
**Figura 37.** Asignación de sujeción de geometría fija para simulación.



Fuente: Autores.

Para la simulación se tuvo en cuenta una fuerza de 137.34 N debido a que las bisagras van a soportar el peso de los paneles y su estructura que es de 14 Kg.

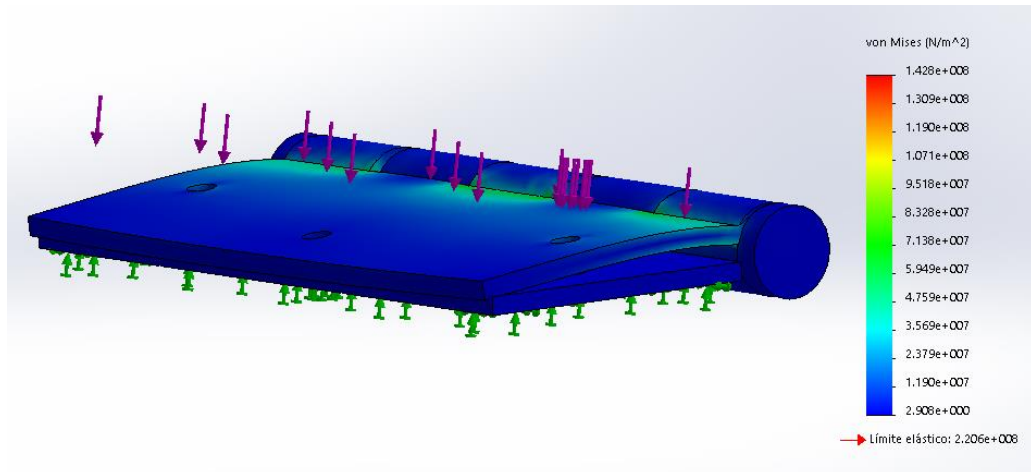
**Figura 38.** Asignación de fuerza para simulación.



Fuente: Autores

Al haber asignado todas las fuerzas y sujeciones se continuo a asignar el material de la bisagra el cual fue acero al carbono para enseguida crear el mallado y ejecutar la simulación.

**Figura 39.** Resultados de simulación de análisis estático



Fuente: Autores

En base al resultado de esfuerzo máximo arrojado en los resultados de la simulación se calculó el factor de seguridad con el fin de ver la viabilidad de las bisagras.

$$F. S. = \frac{S_y}{\sigma_{vm}} = \frac{220.6 \text{ MPa}}{142.8 \text{ MPa}} = 1.54$$

Luego de realizar el cálculo de factor de seguridad se pudo estimar que las bisagras son viables ya que el factor de seguridad es optimista, se optó por implementar este tipo de sujeción y aumentar su número a cuatro para una mayor seguridad.

**6.3.4 Cálculo de distancias de la guía para ángulos de inclinación de los paneles solares.** Debido a que una práctica que se va a realizar en el banco de pruebas es referente al ángulo de incidencia de radiación solar y los resultados de variarlo, se hace necesario busca un sistema para mantener la posición de inclinación estática para poder tomar mediciones de corriente y voltaje. Por este motivo se adecuo una guía con orificios cada uno equivalente a un ángulo de inclinacion, para realizar esta guia de ángulos fue necesario calcular, a base de trigonometria, las distancias a las que habia que taladrar cada agujero respectivamente a su ángulo de inclinación.

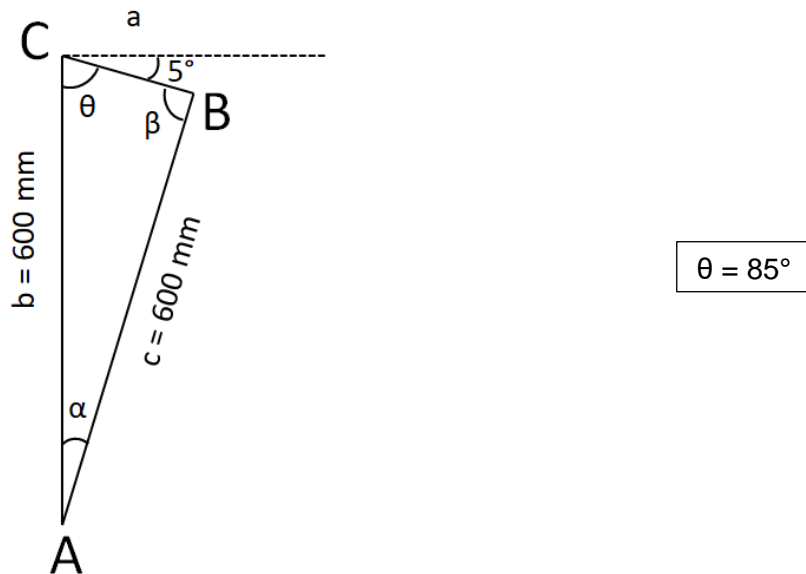
**Figura 40.** Guía de inclinación con agujeros taladrados



Fuente: Autores

A continuación se evidencian los calculos pertinentes.

### 6.3.4.1 Cálculo para una inclinación de paneles a 5°



$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta$$

$$600^2 = a^2 + 600^2 - 2(a)(600) \cos 85^\circ$$

$$360000 = a^2 + 360000 - 104.586(a)$$

$$a^2 - 104.586a = 0$$

$$a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

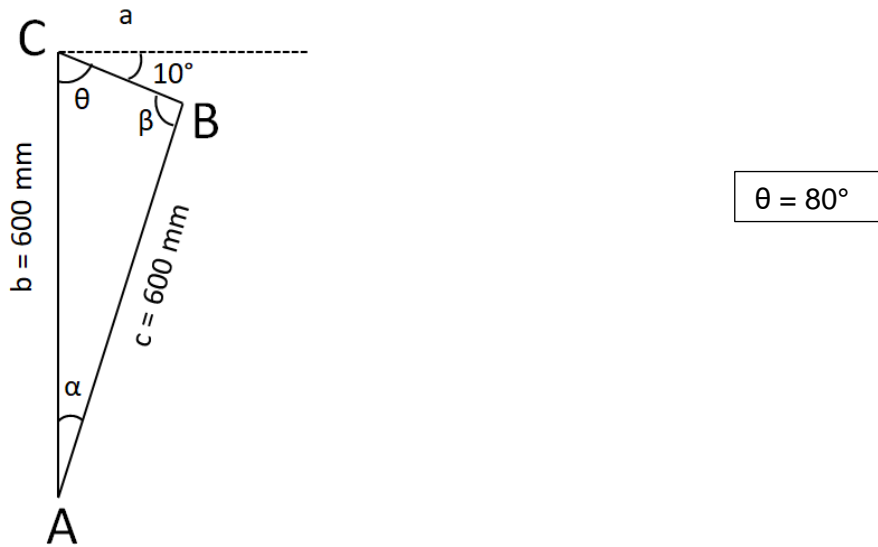
$$a = \frac{-104.5 \pm \sqrt{104.5^2 - 4(1)(0)}}{2(1)}$$

$$a_1 = 0 \text{ mm}$$

$$a_2 = 104.58 \text{ mm}$$

$a_2$  = Distancia a la que se debe taladrar para que el sistema se ajuste a 5° de inclinación.

### 6.3.4.2 Cálculo para una inclinación de paneles a 10°



$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta$$

$$600^2 = a^2 + 600^2 - 2(a)(600) \cos 80^\circ$$

$$360000 = a^2 + 360000 - 208.3(a)$$

$$a^2 - 208.3a = 0$$

$$a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

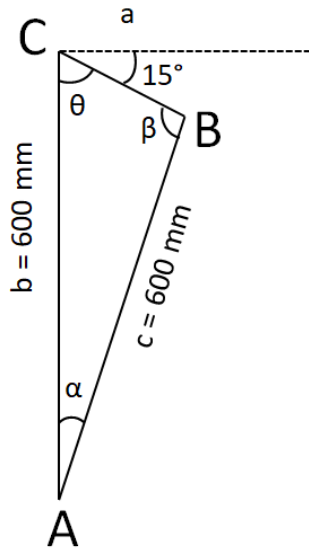
$$a = \frac{-208.3 \pm \sqrt{208.3^2 - 4(1)(0)}}{2(1)}$$

$$a_1 = 0 \text{ mm}$$

$$a_2 = 208.3 \text{ mm}$$

$a_2$  = Distancia a la que se debe taladrar para que el sistema se ajuste a 10° de inclinación.

### 6.3.4.3 Cálculo para una inclinación de paneles a 15°.



$$\theta = 75^\circ$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta$$

$$600^2 = a^2 + 600^2 - 2(a)(600) \cos 75^\circ$$

$$360000 = a^2 + 360000 - 310.58(a)$$

$$a^2 - 310.58a = 0$$

$$a = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$a = \frac{-310.58 \pm \sqrt{310.58^2 - 4(1)(0)}}{2(1)}$$

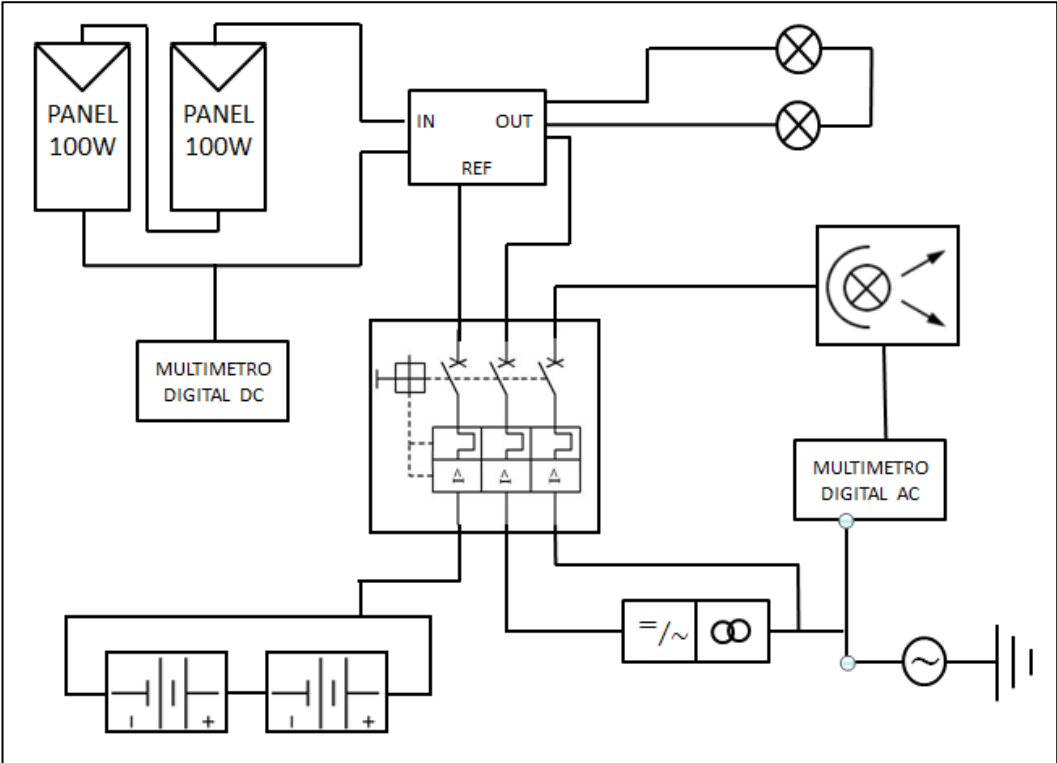
$$a_1 = 0 \text{ mm}$$

$$a_2 = 310.58 \text{ mm}$$

$a_2$  = Distancia a la que se debe taladrar para que el sistema se ajuste a 15°.

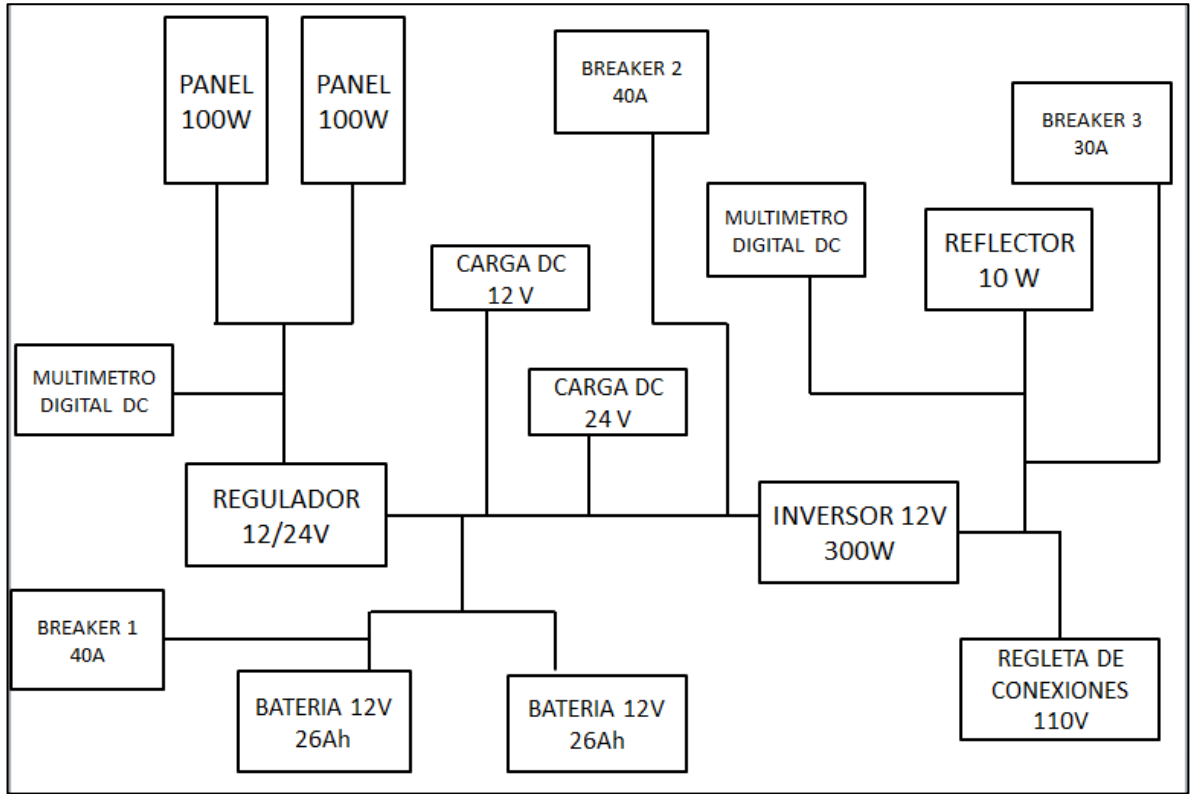
**6.3.5 Diseño del diagrama unifilar de la conexión fotovoltaica.**

**Figura 41.** Diagrama unifilar del banco de pruebas fotovoltaica.



Fuente: Autores.

**Figura 42.** Diagrama unifilar explicativo del banco de pruebas fotovoltaico.



Fuente: Autores

#### **6.4 CONSTRUCCION DEL BANCO DE PRUEBAS FOTOVOLTAICO.**

Se realizó el proceso de construcción de la estructura, para esto se solicitó una cotización a la empresa “Tecnisoldaduras”, donde basándose en criterios como: beneficio-costo, rapidez de entrega, pintura y utilidad de la estructura de acuerdo al diseño, se optó por hacer contratación con la empresa mencionada ya que cumplía con los criterios solicitados, el resultado del trabajo se muestra en la figura 43.

**Figura 43.** Estructura del banco solar fotovoltaico.



Fuente: Autores

En la figura 44 se evidencia la estructura final entregada por la empresa “Tecnisoldaduras” con su respectivo proceso de pintura electrostática realizado al horno.

**Figura 44.** Estructura final entregada por “Tecnisoldaduras”.



Fuente: Autores

Después de tener la estructura del banco se procedió a adecuar una estructura la cual serviría para el soporte de los paneles.

**Figura 45.** Construcción de soporte para paneles.



Fuente: Autores

Luego de construir la estructura para los paneles, se adecuo la estructura principal del banco taladrando la parte superior del armazón para realizar el ensamble del soporte de los panes solares, como se muestra en la figura 46.

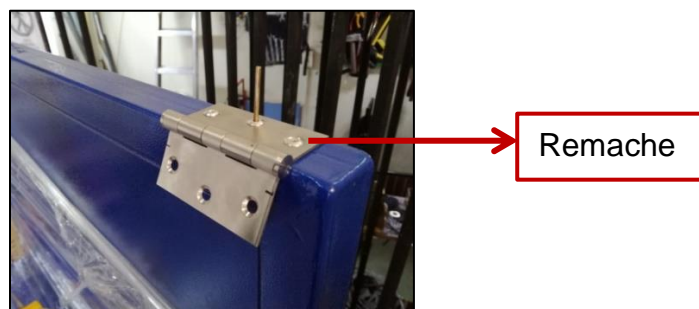
**Figura 46.** Adecuación de armazón para ensamble de paneles.



Fuente: Autores

La union entre el soporte del panel y la estructura principal del banco se realizo por medio de bisagras, para que el soporte se pueda inclinar y variar el angulo de incidencia solar. Se emplearon cuatro bisagras para asegurar una buena sujecion en varios puntos y como metodo de union se usaron remaches, como se ilustra en las figuras.

**Figura 47.** Sujeción de bisagra.



Fuente: Autores.

**Figura 48.** Remache de bisagra.



Fuente: Autores

En la figura 49 se evidencia el ensamble del soporte de los paneles a la estructura del banco, para realizar bien esta labor se verificaron las distancias entre las bisagras anteriormente seleccionadas de tal forma que queden uniformemente distribuidas en la parte superior de la estructura del banco.

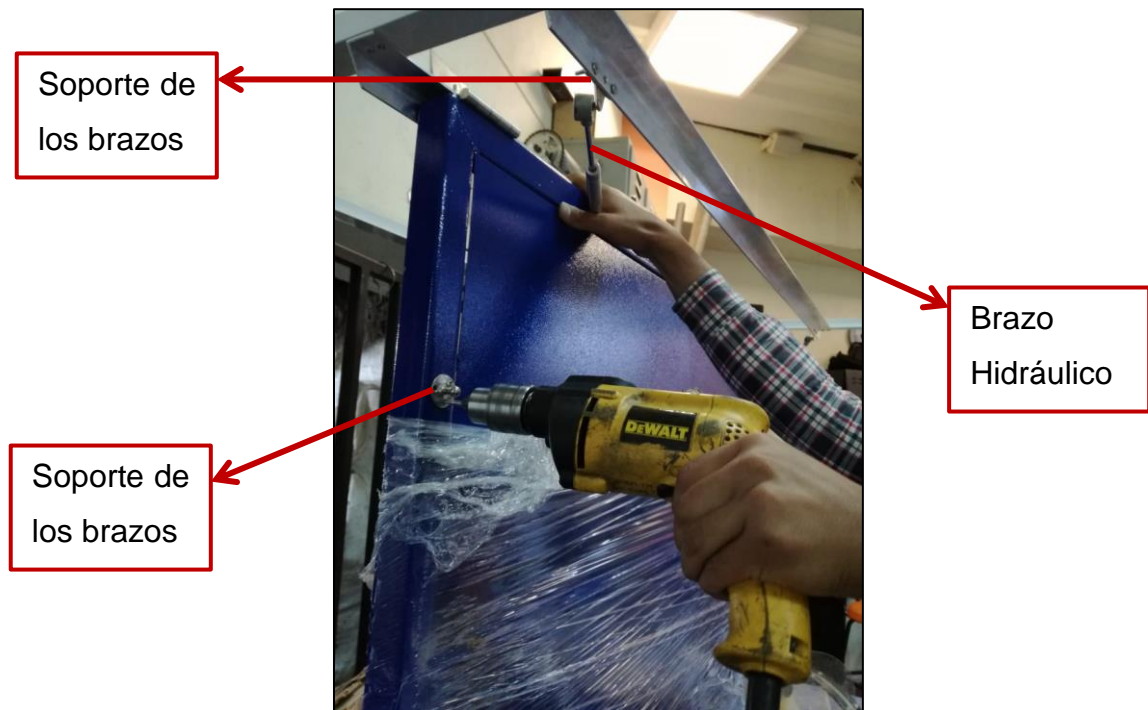
**Figura 49.** Ensamble de soporte de paneles y estructura.



Fuente: Autores

El sistema que se utilizó para elevar y tener un control adecuado de la inclinación del soporte de los paneles consistió en dos brazos hidráulicos con capacidad de 80 N cada uno, esto debido a que el peso del soporte con los dos paneles montados es de 14 kg (137.34 N), cada brazo hidráulico se fijó en los extremos laterales de la estructura para dar un soporte total distribuido de 160 N suficientes para soportar el conjunto de los paneles.

**Figura 50.** Instalación de brazo hidráulico.



Fuente: Autores.

**Figura 51.** Sistema de brazos hidráulicos.



Fuente: Autores.

**Figura 52.** Montaje y sujeción de paneles.



Fuente: Autores

Después de finalizado el ensamble de estructuras, se procedió a instalar los componentes y equipos del sistema solar fotovoltaico al banco de pruebas, para este procedimiento se taladró y se sujetaron los componentes con tornillos tipo bristol métricos de 4mm. El procedimiento se ilustra en la figura 53.

**Figura 53.** Taladrado e instalación de equipos.



Fuente: Autores

Luego del ensamble de los equipos en el banco se solicitó la asesoría por parte del proveedor para realizar las conexiones eléctricas, garantizando un óptimo funcionamiento del sistema solar fotovoltaico y sus respectivas protecciones eléctricas a tener en cuenta.

**Figura 54.** Asesoría para conexión de equipos solares.



Fuente: Autores

Se realizó un proceso de corte con Motortool en la lamina frontal del banco para montar los diferentes componentes de medición y protección del sistema como se evidencia en la figura 55.

**Figura 55.** Cortes con Motortool para ensamble de multímetros digitales.



Fuente: Autores

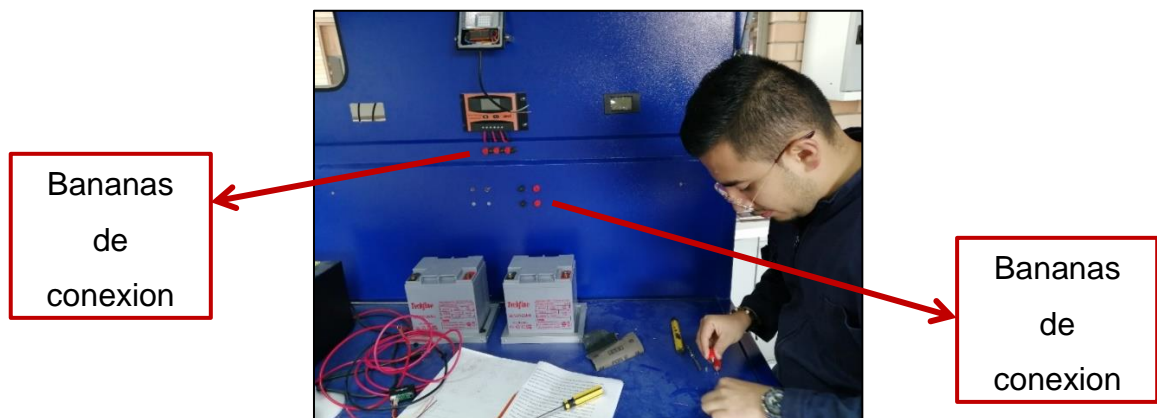
**Figura 56.** Cortes con Motortool para ensamble de caja de protecciones.



Fuente: Autores

Para evitar daños al regulador y que se manipule al mínimo posible, se instalaron bananas de conexión, las que al mismo tiempo brindan una disposición de acople e interacción para realizar conexiones entre componentes y facilitar las practicas realizando diferentes configuraciones entre equipos.

**Figura 57.** Instalación de bananas de conexión.



Fuente: Autores

La conexión de las bananas con la entrada de los componentes se realizó con cable calibre 12 y la sujeción se efectuó con terminales de anillo para garantizar

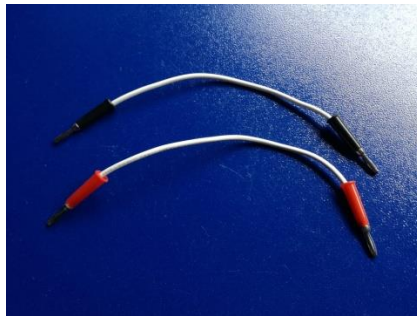
un ajuste óptimo y garantizar un máximo rendimiento eléctrico, se aseguraron con termoencogible.

**Figura 58.** Conexión de entradas de regulador con bananas



Fuente: Autores

**Figura 59.** Cables de conexión para bananas macho.



Fuente: Autores

Se procedió a armar la caja de protecciones teniendo en cuenta las instrucciones del proveedor, al terminar el armado se instalaron los breakers de protección para los componentes principales del sistema de energía, los breakers se conectaron

mediante cable calibre 12. La caja de protecciones fue instalada y asegurada en el corte realizado anteriormente que se ilustra en la figura 47.

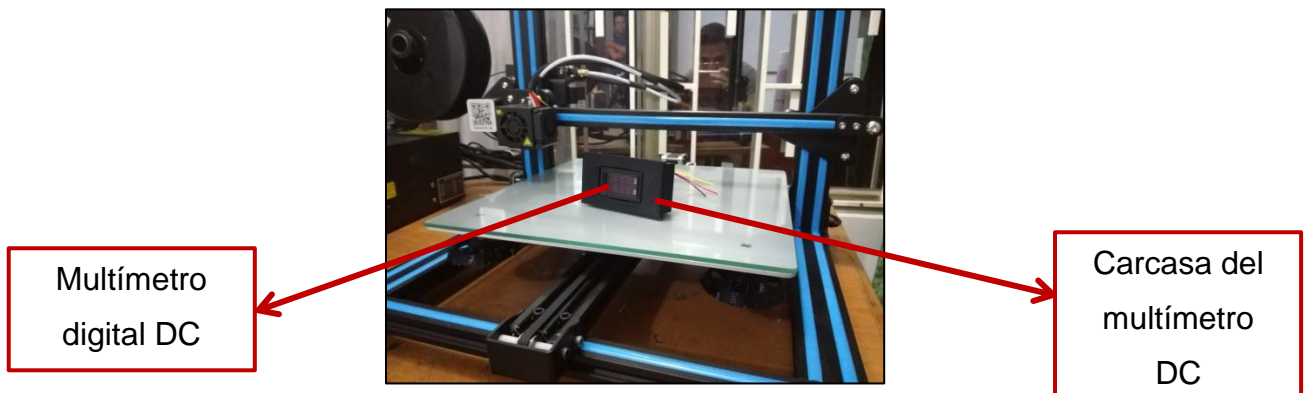
**Figura 60.** Ensamble de la caja de protecciones.



Fuente: Autores

Debido a que las dimensiones del multímetro digital DC eran muy pequeñas y se dificultaba su acople a la lámina, se realizó el CAD de una pieza que funcionara como carcasa del multímetro y facilitara su ensamble al banco, la pieza se elaboró mediante impresión 3D.

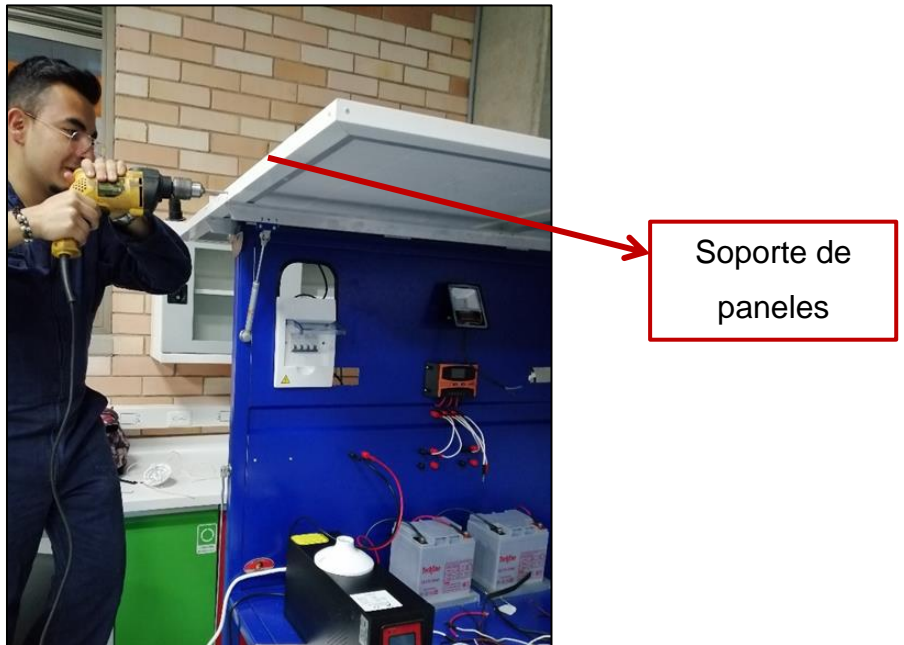
**Figura 61.** Impresión 3D de carcasa para soporte de multímetro digital DC.



Fuente: Autores

Para asegurar las posiciones de inclinación de los paneles solares y así poder obtener datos a diferentes ángulos de incidencia solar se pensó un sistema de fijación el cual consistió en taladrar el soporte de paneles a unas distancias calculadas. Se instaló una varilla a una distancia determinada en el extremo lateral del banco, esta varilla posee un doblez en un extremo el cual se introduce en los orificios taladrados en el soporte de los paneles manteniéndolos inclinados en esta posición. Este proceso se puede observar en la figura.

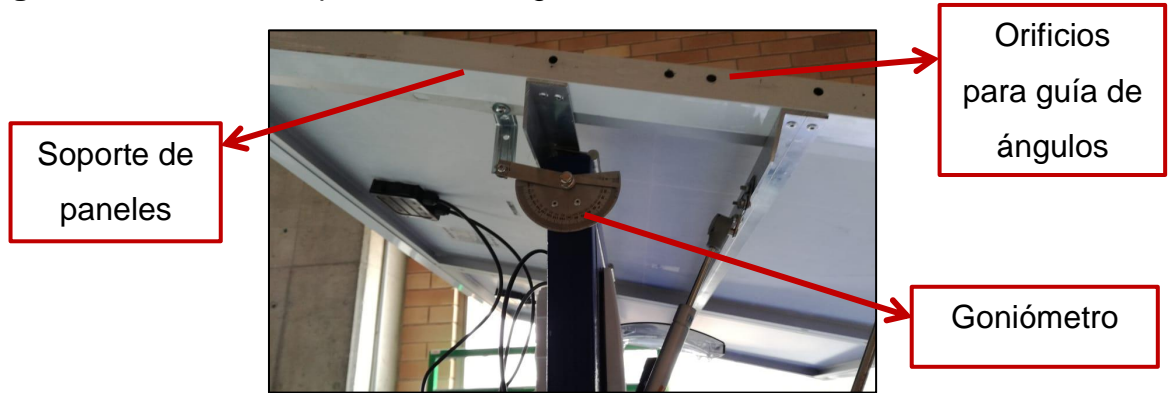
**Figura 62.** Taladrado para guía de fijación de inclinación de paneles solares.



Fuente: Autores

Se instaló un goniómetro en el extremo lateral del banco que al mismo tiempo está sujeto al soporte de los paneles, la función de este es indicar el grado de inclinación al que están los paneles solares.

**Figura 63.** Goniómetro para indicar ángulo de incidencia solar.



Fuente: Autores

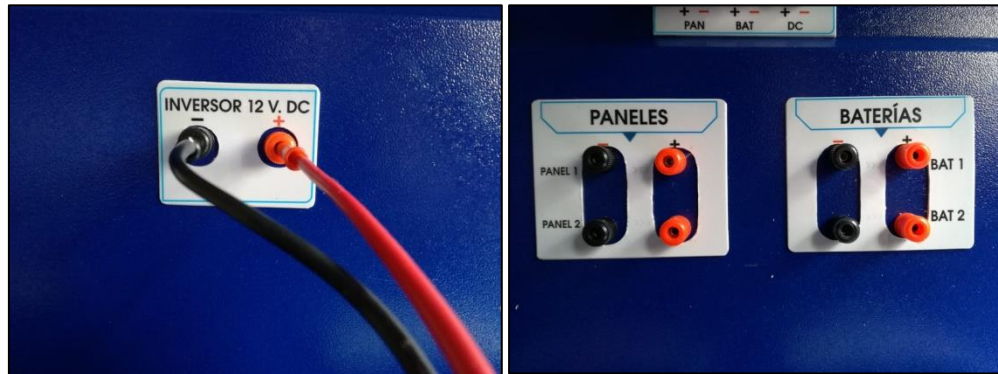
Se diseñaron los letreros y demás señalizaciones de cada componente para que el usuario pueda identificar cada elemento que hace parte del sistema fotovoltaico facilitando la interacción con este. Los letreros fueron elaborados y plasmados en acrílicos por la empresa “Gammas Publicidades”.

**Figura 64.** Conexiones con su respectiva señalización.



Fuente: Autores

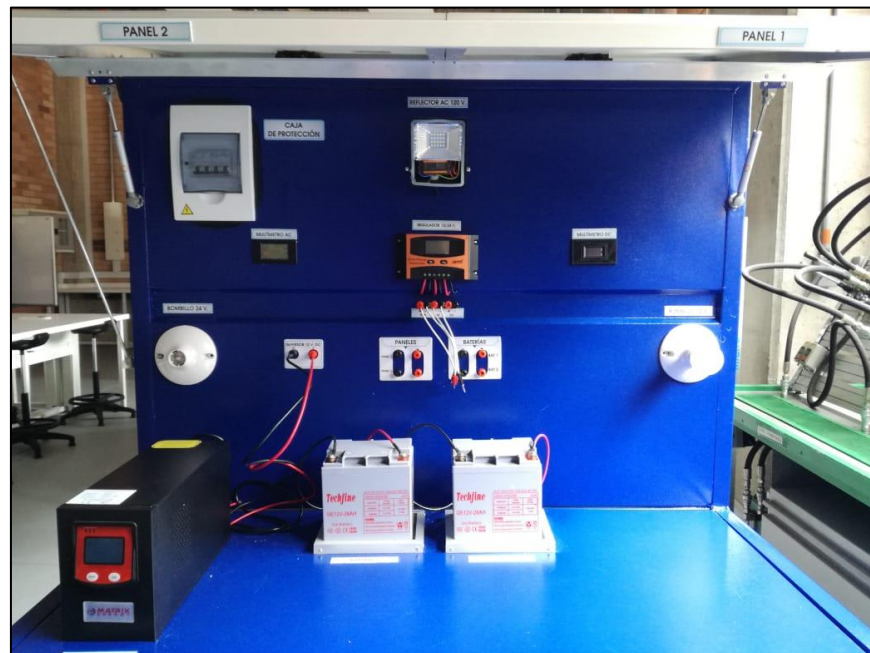
**Figura 65.** Conexiones con su respectiva señalización.



Fuente: Autores

En la figura 66 se puede observar el banco terminado.

**Figura 66.** Ilustración de banco de pruebas fotovoltaico.



Fuente: Autores

## **6.5 VALIDACION DEL FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE PRUEBAS A TRAVÉS DE LA REALIZACIÓN DE MEDICIONES.**

Para realizar la verificación y comprobación del correcto funcionamiento del banco solar, se procedió a realizar mediciones en compañía y asesoría del ingeniero Edwin Rúa quien es el docente encargado de dictar el curso de energías alternativas para el programa de ingeniería mecánica de la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja.

Se realizó la inspección visual, luego se procedió a realizar las diferentes conexiones en serie y paralelo de baterías y paneles para verificar que el sistema estuviera operando de manera eficiente y de acuerdo a los parámetros específicos de cada componente.

Se utilizó el multímetro como instrumento de medida y comprobación para verificar el voltaje de cada conexión y comprobar el correcto funcionamiento del banco. A continuación, se presenta la inspección con diferente toma y variaciones que validan el correcto funcionamiento del banco solar.

Se realizaron mediciones en los paneles para comprobar que el voltaje pico que estos generaban era el que se especificaba en su ficha técnica, para esto se configuro el voltímetro a medición de voltaje en CC y luego se realizaron tomas de datos como se puede observar en la siguiente figura.

**Figura 67.** Validación del voltaje pico de los paneles.



Fuente: Autores

**Figura 68.** Valor de voltaje pico de paneles mostrado por multímetro digital DC.



Fuente: Autores

Voltaje pico (ficha técnica)	Voltaje pico multímetro	Voltaje pico Multímetro DC del banco
22V	21.97V	22.2V

De acuerdo a las especificaciones del fabricante y la medición con el multímetro, se pudo comprobar que el panel generaba aproximadamente los 22V pico como lo indica su ficha técnica.

**Figura 69.** Medición de voltaje pico de paneles conectados en paralelo.



Fuente: Autores

Voltaje pico en serie de paneles (ficha técnica)	Voltaje pico paralelo de paneles multímetro
22V	21.70V

A continuación, se realiza la demostración y verificación de la conexión realizada en serie entre panel para comprobar su funcionamiento de acuerdo a la ficha técnica de fabricante.

**Figura 70.** Medición de voltaje pico de paneles conectados en serie.



Fuente: Autores

Voltaje pico de paneles conectados en serie (ficha técnica)	Voltaje pico de paneles en serie multímetro
44V	43.93V

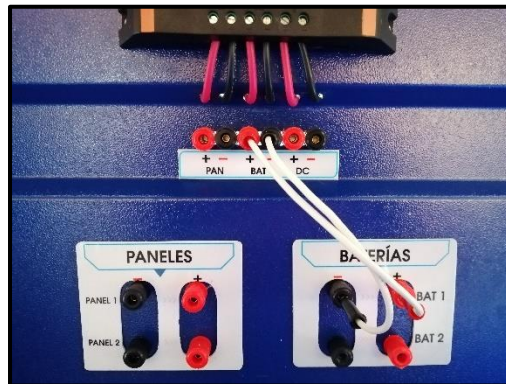
Luego de realizar la medición del voltaje con el voltímetro se puede observar que muy aproximado al valor especificado por la ficha técnica del panel solar lo que valida su correcta funcionalidad y puesta en marcha.

Para verificar que el sistema estuviera funcionando según lo planteado en dimensionamiento y el diseño, se procedió a energizar completamente el sistema a 12V, realizando las conexiones respectivas entre baterías y regulador, paneles y regulador, baterías e inversor y demás dispositivos que conforman el banco solar, a continuación, se explica el paso a paso de la puesta en marcha del sistema.

Como primer paso se realizó un chequeo visual general al banco para identificar posibles fallas. Después de la inspección, se procedió a realizar las configuraciones y conexiones entre paneles y baterías del sistema.

Debido a que el sistema se va a energizar a 12 V para validar su funcionamiento, se realizaron conexiones desde “BAT1+” a la entrada del positivo en el controlador identificado como “BAT+” y otra conexión desde “BAT1-” a la entrada negativa del controlador identificada como “BAT-”, como se ilustra en la siguiente figura.

**Figura 71.** Conexión de baterías y regulador.



Fuente: Autores

Para la conexión de los paneles se realizó la conexión desde “PANEL1+” a la entrada del positivo en el controlador identificado como “PAN+” y otra conexión desde “PANEL-” a la entrada negativa del controlador identificada como “PAN-”, como se ilustra en la siguiente figura.

**Figura 72.** Conexión de batería y panel a inversor.



Fuente: Autores

Luego de realizar las respectivas conexiones y verificar su correcta polaridad, se procedió a comprobar que el voltaje de salida en CC era el adecuado para el inversor.

**Figura 73.** Verificación voltaje salida CC.



Fuente: Autores

Con la ayuda del voltímetro se comprobó y verifico que el voltaje otorgado por el sistema A, era el adecuado para energizar el inversor (12V). Una vez terminada la

validación se conectó el inversor a la salida CC. Como se muestra en la siguiente figura.

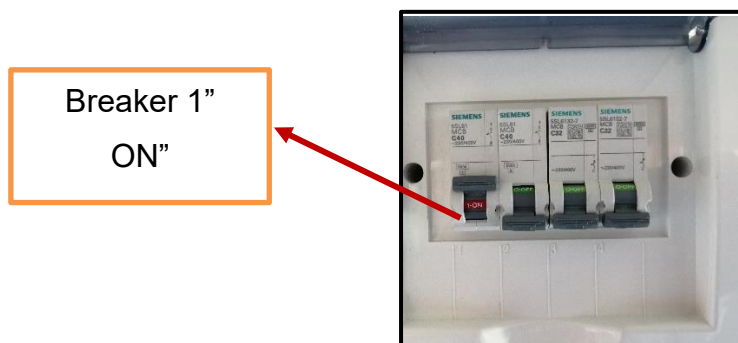
**Figura 74.** Conexión de inversor a salida CC.



Fuente: Autores

Luego de realizarlos pasos anteriores, se energizó el controlador subiendo el taco uno (1) de la protección de modo que quede en estado "ON", como se muestra en la siguiente figura.

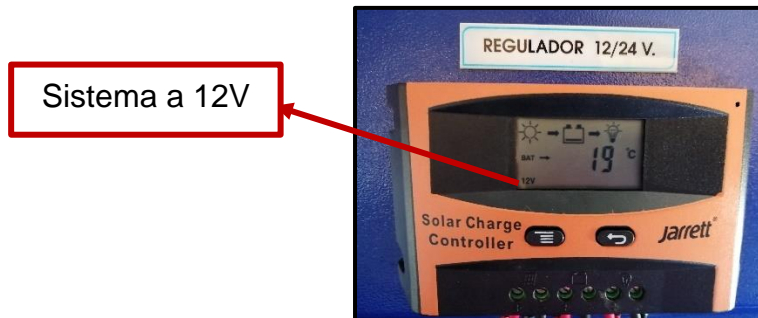
**Figura 75.** Interruptor automático de energización de inversor.



Fuente: Autores

Después de energizar el controlador se ilumino la interfaz, la cual arrojo datos de voltaje de la batería y voltaje de los paneles, como se ve en la siguiente figura.

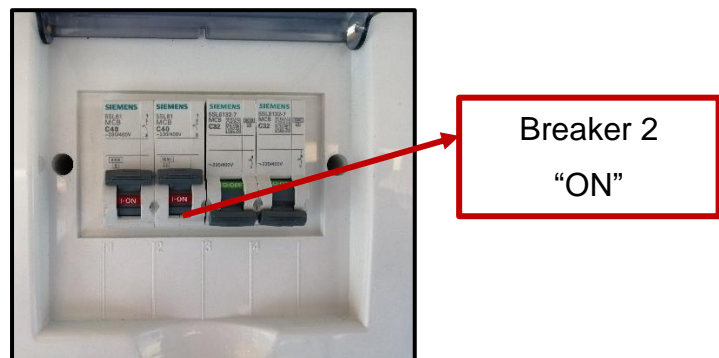
**Figura 76.** Datos de voltaje de la batería en la interfaz del inversor.



Fuente: Autores

Después de energizar el regulador, se procedió a energizar el inversor, para esto se subió el taco de la protección dos (2) de modo que quedara en estado "ON".

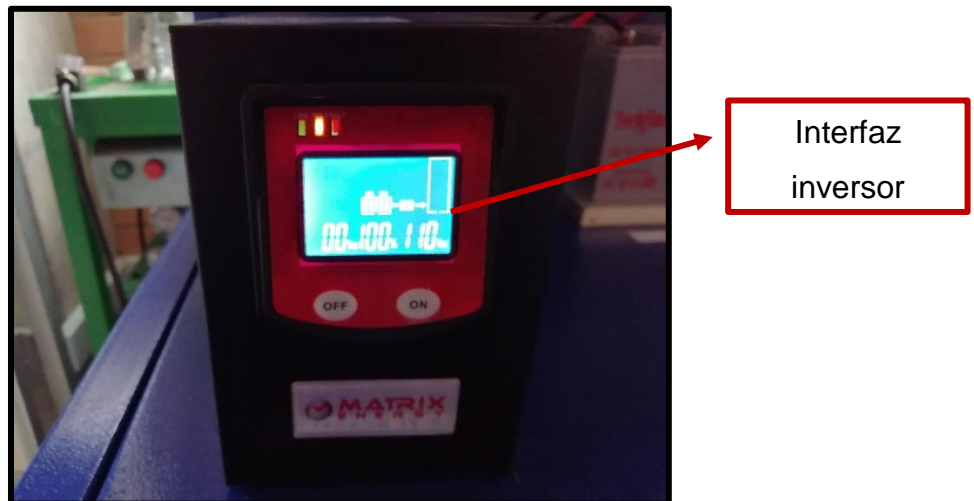
**Figura 77.** Interruptor automático 2 activado para energizar inversor.



Fuente: Autores

Después de energizar el inversor y comprobar la polaridad de las conexiones realizadas anteriormente, se dio inicio al encendido del inversor oprimiendo el botón de “ON” durante dos segundos.

**Figura 78.** Inversor energizado y visualización de su display.



Fuente: Autores

Luego de energizar el inversor, se tomaron medidas para validar el correcto funcionamiento del inversor y su voltaje de salida para las cargas AC.

**Figura 79.** Comprobación de funcionamiento de inversor y salida de voltaje a 110 voltios.



Fuente: Autores

Se verifico que el voltaje de salida del inversor medido con el voltímetro (112.5V) estaba aproximado al denominado por las especificaciones de la ficha técnica (110V).

Para verificar la funcionalidad de la salida AC del inversor se ubicó un reflector de 10W a 110V AC, que se puede energizar subiendo el taco del breaker número tres (3) de la caja de protecciones como se muestra en la siguiente figura.

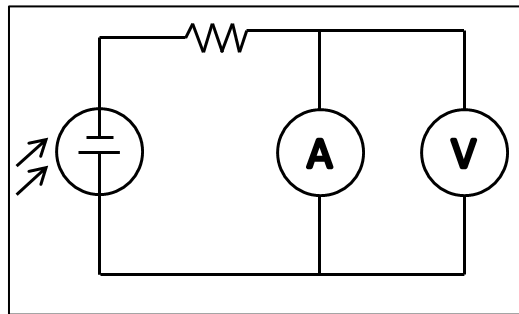
**Figura 80.** Encendido de reflector alimentado con corriente alterna de salida del inversor.



Fuente: Autores

**6.5.1 Generación de curvas características I-V y P-V para evidenciar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos monocristalinos.** Para la validación del funcionamiento del banco de pruebas se realizaron mediciones para determinar el rendimiento de los paneles fotovoltaicos, se realizó un circuito electrónico donde se conectó al panel una carga resistiva de diferente valor en ohmios y se anota el valor de corriente y voltaje, para la medición de voltaje el multímetro se conecta en paralelo en el circuito y para la medición de amperaje se conecta en serie.

**Figura 81.** Esquema del circuito electrónico para medir valores de corriente y voltaje de los paneles fotovoltaicos.



Fuente: Autores

Estas mediciones se llevaron a cabo en el parqueadero del edificio Santo Domingo de Guzmán de la USTA Tunja. Los datos resultantes se evidencian en las tablas a continuación.

**Tabla 3.** Datos de amperaje y voltaje tomados a la intemperie con cielo despejado para generar curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos.

RESISTENCIA ( $\Omega$ )	AMPERAJE (mA)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
10	5.23	20.89	109.2547
30	3.42	21.39	73.1538
82	2.63	21.8	57.334
120	1.87	21.7	40.579
220	1.03	21.89	22.5467
300	0.76	21.93	16.6668
390	0.58	21.4	12.412
470	0.48	22.01	10.5648
510	0.43	21.99	9.4557

Fuente: Autores

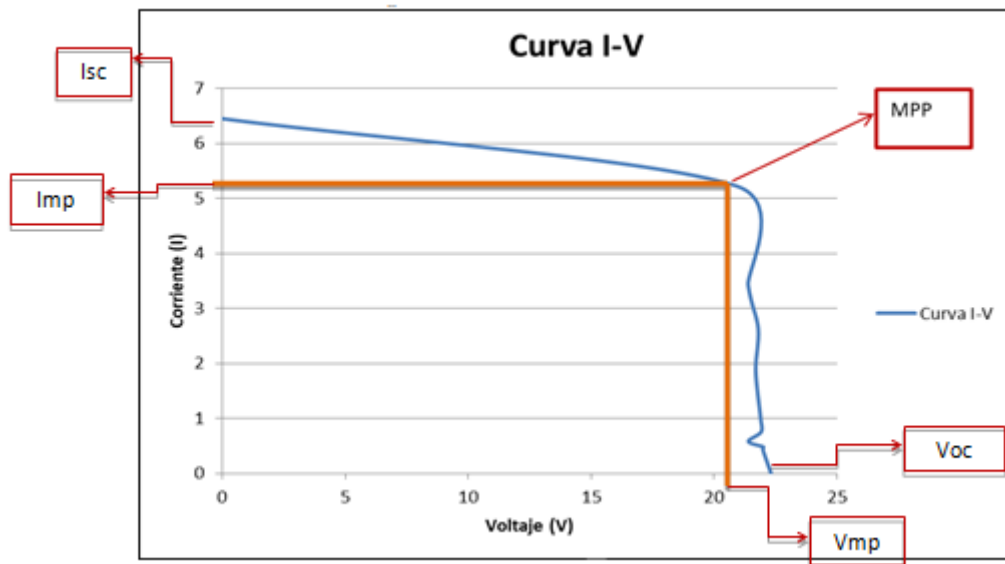
**Tabla 4.** Datos de amperaje y voltaje tomados a la intemperie con cielo nuboso para generar curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos.

RESISTENCIA ( $\Omega$ )	AMPERAJE (mA)	VOLTAJE (V)	POTENCIA (W)
30	4.81	11.3	54.353
52	3.53	17.62	62.1986
82	2.47	19.43	47.9921
220	0.95	19.95	18.9525
310	0.71	20.62	14.6402
390	0.51	20.64	11.352
470	0.34	20.51	9.0244
510	0.3	20.7	8.28

Fuente: Autores

Como paso a seguir se generaron graficas a partir de los datos de las tablas anteriores para generar las curvas características I-V y P-V y así observar el comportamiento de los paneles fotovoltaicos con diferentes valores de cargas resistivas y analizar el rendimiento.

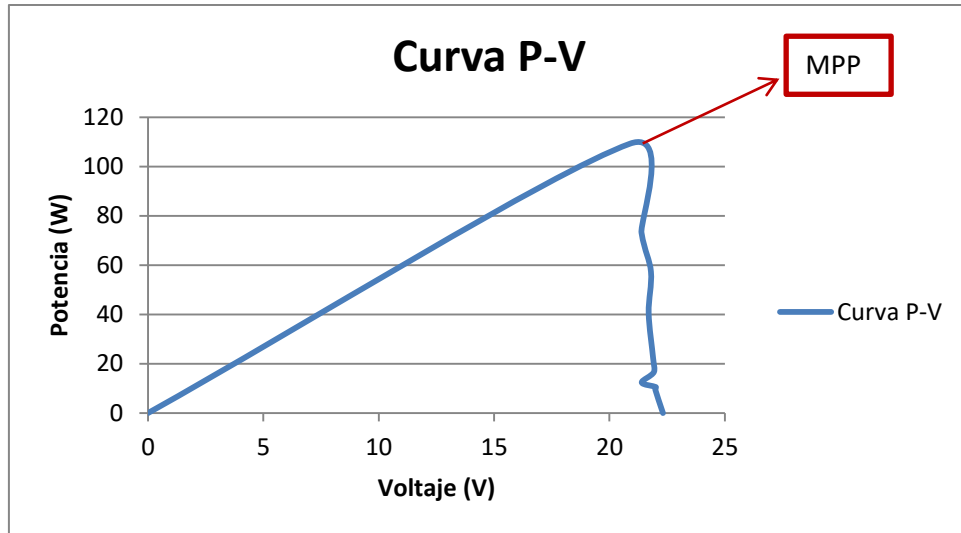
**Grafica 1.** Curva I-V de los paneles fotovoltaicos generada con los datos de la tabla 3.



Fuente: Autores

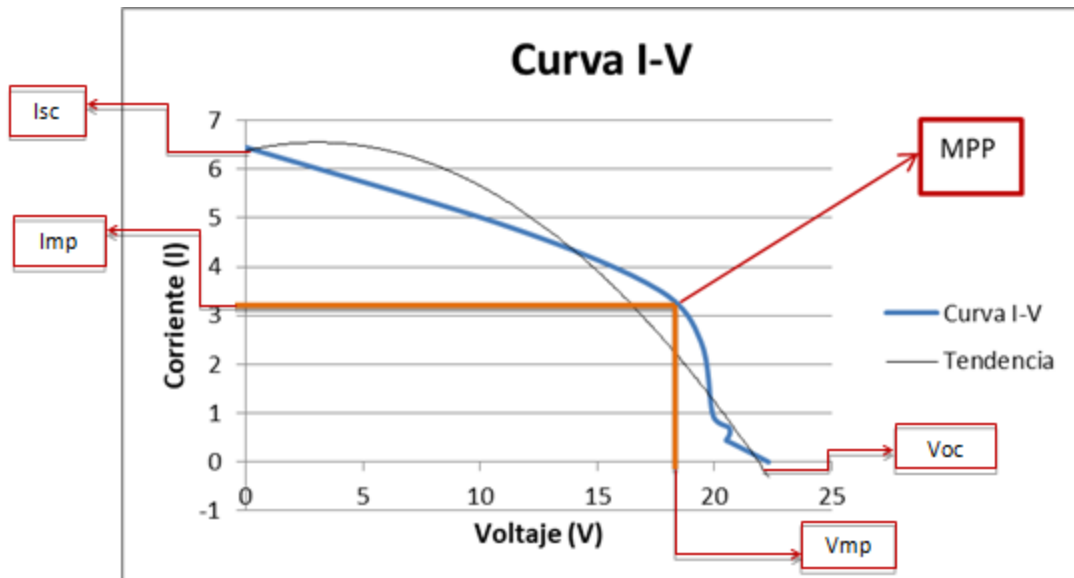
De esta grafica se puede observar que la corriente en máxima potencia es  $I_{mp} = 5.23$  y el voltaje en máxima potencia  $V_{mp} = 20.89$ .

**Grafica 2.** Curva P-V de los paneles fotovoltaicos generada con los datos de la tabla 3.



Fuente: Autores

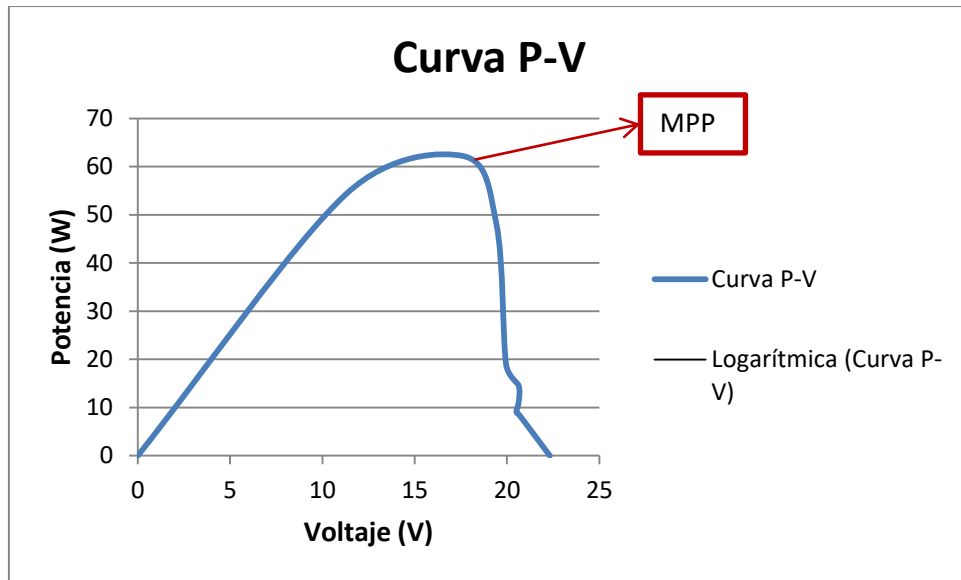
**Grafica 3.** Curva I-V de los paneles fotovoltaicos generada con los datos de la tabla 4.



Fuente: Autores

De esta grafica se puede observar que la corriente en máxima potencia es  $I_{mp} = 2.47$  y el voltaje en máxima potencia  $V_{mp} = 19.43$ .

**Grafica 4.** Curva P-V de los paneles fotovoltaicos generada con los datos de la tabla 4.



Fuente: Autores

**6.5.2 Cálculo de rendimiento de los paneles fotovoltaicos.** Se realizó el cálculo de rendimiento de los paneles en base a las curvas características de I-V y los datos de  $I_{mp}$  y  $V_{mp}$  obtenidos, primero se calculó el rendimiento  $\eta_1$  con los datos de la gráfica 1 y después se calculó el rendimiento  $\eta_2$  haciendo uso de la gráfica 3.

Ecuación 9. Calculo de rendimiento de panel fotovoltaico.

$$\eta_1 = \frac{FF * Voc * Isc}{G * A}$$

Fuente: VELASQUEZ, E., & SOLANO, J. Banco de pruebas de energía solar fotovoltaica con el fin de generar energía eléctrica para las luminarias de la plazoleta a la vida de la Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. 2015.

Ecuación 10. Calculo del factor F.

$$FF = \frac{Vmp * Imp}{Voc * Isc}$$

Fuente: VELASQUEZ, E., & SOLANO, J. Banco de pruebas de energía solar fotovoltaica con el fin de generar energía eléctrica para las luminarias de la plazoleta a la vida de la Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. 2015.

$$FF = \frac{20.89 V * 5.23 A}{22.32 V * 6 A} = 0.8205$$
$$\eta_1 = \frac{0.8205 * 22.32 V * 6 A}{1000 \frac{W}{m^2} * 0.7 m^2} = 0.1569$$
$$\eta_1 = 15.69 \%$$

Ecuación 9. Calculo de rendimiento de panel fotovoltaico.

$$\eta_2 = \frac{FF * Voc * Isc}{G * A}$$

Ecuación 10. Calculo del factor F.

$$FF = \frac{Vmp * Imp}{Voc * Isc}$$

$$FF = \frac{19.43 \text{ V} * 2.47 \text{ A}}{22.32 \text{ V} * 6 \text{ A}} = 0.358$$

$$\eta_2 = \frac{0.358 * 22.32 \text{ V} * 6 \text{ A}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} * 0.7 \text{ m}^2} = 0.0684$$

$$\eta_2 = 6.84 \%$$

## 7. CONCLUSIONES

Con el fin de comprobar las características eléctricas de los paneles fotovoltaicos teniendo en cuenta la conexión en serie y en paralelo se procedió a elaborar la guía planteada en las prácticas de laboratorio referente a las conexiones de paneles donde se concluyó que se cumple lo planteado en la teoría y es que en paralelo: el voltaje tiende a permanecer constante con un valor de 21.7V ( $\approx 22V$ ) mientras que la corriente resulta ser una sumatoria de cada uno de ellos arrojando un valor de 11.12A ( $\approx 12A$ ). En serie: el voltaje se suma arrojando 43.93V ( $\approx 44V$ ) y la corriente tiende a permanecer constante en un valor de 5.56A ( $\approx 6A$ ).

En este proyecto, con el objetivo de conocer cuál es el porcentaje de la luz solar absorbida por un panel que es transformada en energía eléctrica, se ha efectuado una serie de mediciones las cuales han permitido evaluar este indicador en condiciones reales. Por ejemplo en determinado momento con una irradiancia de  $1000 W/m^2$  los paneles de esta instalación alcanzan un rendimiento de 15.69 % aproximadamente, lo cual es un buen indicador debido a que es un valor sobresaliente para la tecnología de los mismos (monocristalinos  $\approx 16\%$ ).

Al realizar mediciones experimentales de los paneles a la intemperie a diferentes condiciones climáticas se logró observar una clara diferencia de rendimientos de los paneles fotovoltaicos en su tarea de generar energía, ya que, con condiciones climáticas de cielo despejado los paneles arrojaron un rendimiento de 15.69 %, en cambio con condiciones de cielo nublado hubo una disminución considerable evidenciando un rendimiento de 6.84 %.

El banco de pruebas implementado logra cumplir con el propósito del proyecto, el cual es brindar un entorno controlado en el cual los estudiantes puedan interactuar con una instalación de energía fotovoltaica de manera segura y práctica. El banco permite a los estudiantes realizar las prácticas de laboratorio planteadas y analizar los parámetros del sistema fotovoltaico como son potencia máxima y eficiencia del

panel solar, estos se logran obtener realizando las curvas características de los paneles solares en diferentes ángulos de inclinación lo cual el banco facilita realizar gracias a su diseño.

La variación de ángulos de inclinación tienen como propósito conocer el comportamiento de los paneles cuando la radiación solar no está directa a la superficie del panel, resultado que se pudo verificar en las gráficas arrojadas con las pruebas hechas con el banco de pruebas con diferentes ángulos de incidencia de la luz solar sobre el panel solar; donde los parámetros eléctricos disminuyeron al aumentar el ángulo de inclinación.

Se ampliaron conocimientos en cuanto al dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos, estos son de gran utilidad para calcular y seleccionar los dispositivos adecuados para el sistema. Para la selección hubo que contactar con proveedores lo cual significó un aprendizaje en lo referente a solicitar cotizaciones, presupuestar y ejecutar un proyecto, esto será de gran utilidad en la vida profesional.

Se evidencio como los conocimientos obtenidos en el transcurso del pregrado de ingeniería mecánica fueron de gran utilidad para estimar los diferentes aspectos a tener en cuenta para la ejecución de proyecto de ingeniería, algunos recursos utilizados fue la lluvia de ideas que fue un método eficaz para iniciar el proceso de diseño, se realizaron análisis estáticos asistidos por software y cálculo de factor de seguridad para un mejor diseño. Se reforzaron conocimientos referentes a máquinas y herramientas para manufactura.

Se participó en la III convocatoria USTA de investigación formativa, con el proyecto titulado “Diseño y Construcción de un banco de pruebas Solar Fotovoltaico para determinar el rendimiento de los paneles solares monocristalinos en Tunja, Boyacá, Colombia” obteniendo la aprobación y presupuesto de dos millones de pesos. Esto ayudo a incentivar el espíritu de investigación y de

generar nuevos proyectos que aporten beneficios a la universidad con miras a una proyección social.

El banco solar fotovoltaico será un equipo útil para la rama de energías, donde se podrán realizar prácticas, y a través de ellas aprender a diseñar, dimensionar, seleccionar, e instalar sistemas fotovoltaicos para aplicaciones como electrificación para viviendas aisladas, iluminación pública, semaforización solar, bombeo de agua, entre otros. Teniendo en cuenta revisiones y precauciones que se deben seguir con los equipos que conforman un sistema fotovoltaico.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

BARBOSA, U. Janett., & MAYORGA, Manuel A., & SANTAMARÍA, S. Wilmar G., & García, R. David M. *Iluminación con Energía Solar Fotovoltaica para Autoservicios en Bogotá*. Ingenio Magno. Vol 5, 2014. pp. 81-94

BAYOD, RÚJULA, Ángel Antonio. *Energías renovables: sistemas fotovoltaicos*, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2009.

COLLADO, E.. *Energías Renovables. Obtenido de Los efectos de la temperatura en la producción de las instalaciones fotovoltaicas*. 2018 Obtenido de <https://www.energias-renovables.com/fotovoltaica/los-efectos-de-la-temperatura-en-la-20150713>.

DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ Félix. *Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas*, Ediciones Experiencia, 2009.

DURÁN, A., & ROMERO, B.. *Estudio de reconocimiento sobre la Energía Solar*. Bogota: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2016.

JUÁREZ, A. S.. *Electronica, linternas marinas y sistemas fotovoltaicos*. 2019 Obtenido de *Modulos y arreglos fotovoltaicos*:. Obtenido de <http://slideplayer.es/slide/1078130/>.

LAURETTA, R.. *El ingeniero debe formarse en energías renovables*. Entrevistador: I. T. Aires , 2017.

LÓPEZ, A., & MONTOYA, C.. *Prototipo de laboratorio que permite verificar parámetros técnicos en paneles*. Cali: Universidad de San Buenaventura Cali. 2017.

LUPTON Ellen. *Intuición, acción, creación*, Editorial Gustavo Gili, 2012, obtenido de:

<http://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliotecaustasp/detail.action?docID=4421910>.

MORENO, R. P.. *Energías renovables y limpias: solar, eólica, geotérmica, hidráulica, mareomotriz. Obtenido de Explicación sencilla de ¿cómo funciona un panel o placa solar fotovoltaica?.* 2019. Obtenido de <https://energias-renovables-y-limpias.blogspot.com/2012/12/como-funciona-un-panel-solar-fotovoltaico.html>

SEBASTIAN, E. *Inclinación de paneles solares en America Latina*. 2018. Obtenido de <https://eliseosebastian.com/>.

SELANDER, S. Design för lärande Liber AB. Dumont *et al.*, The Nature of Learning: Using Research to Inspire Practice. OECD . The ILE Handbook – Preliminary Draft, Online. 2016.

OTT, A., BROMAN, L. Experiences from Twelve Years of Teaching Solar Energy. In: Proc. North Sun'88, Swedish Council of Building Research, 1988. pp. 631–636.

RAMÍREZ, E. R., SIABATO, A. B., & ORDUZ, M. G. Análisis técnico, socioeconómico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare: RIAA, 2017 p. 239-248.

ROSELL, POLO, Joan Ramón. Circuitos eléctricos monofásicos y trifásicos: fundamentos teóricos y ejercicios resueltos, Edicions de la Universitat de Lleida, 2000.

RUA, E., GONZALEZ, A., GRANADOS, A., & RAMÍREZ, R. Diseño estructural de transporte para sistema de bombeo portátil activado con energía solar fotovoltaica para el departamento de Boyacá. *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, 9(2). 2019.

SRL., S. C. *Sistemas de iluminacion de bajo consumo, utilizando paneles fotovoltaicos*. Valdivia, Chile. 2010. p. 78.

VELASQUEZ, E., & SOLANO, J.. *Banco de pruebas de energía solar fotovoltaica con el fin de generar energía eléctrica para las luminarias de la plazoleta a la vida de la Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña*. Ocaña: Universidad Francisco De Paula Santander Ocaña. 2015.

# 9. ANEXOS