



**Diseño e implementación de un laboratorio de sistemas solares fotovoltaicos en la
Universidad Antonio Nariño sede Riohacha**

Elmer Enrique Fajardo Passo

21131622518

Robinson Evans Puentes Garcerán

21131613165

Universidad Antonio Nariño

Programa de Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Riohacha, Colombia

2021

**Diseño e implementación de un laboratorio de sistemas solares fotovoltaicos en la
Universidad Antonio Nariño sede Riohacha**

**Elmer Enrique Fajardo Passo
Robinson Evans Puentes Garcerán**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director (a):

Especialista, Ing. Electrónica. Deisy Johana Cala Morales

Línea de Investigación:

Energías Renovables.

Universidad Antonio Nariño

Programa de Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Riohacha, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
**Diseño e implementación de un laboratorio de
sistemas solares fotovoltaicos en la Universidad
Antonio Nariño sede Riohacha,**
Cumple con los requisitos para optar
Al título de **Ingeniero Electromecánico.**

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

Contenido

Preliminares.....	VIII
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción	13
1. Marco referencial	19
1.1 Antecedentes	19
1.1.1 Experimentación y prácticas de laboratorio en programas de Ingeniería.....	20
1.1.2 Laboratorios docentes en energías renovables	23
1.2 Marco conceptual	24
1.3 Marco teórico.....	26
1.3.1 Sistemas fotovoltaicos	26
1.3.2 Elementos de sistemas fotovoltaicos	27
1.3.3 Ecuaciones de dimensionamiento	34
1.4 Marco legal	37
2. Metodología	37
2.1 Recopilación de información.....	38
2.2 Diseño.....	39
2.2.1 Cálculo de la energía teniendo en cuenta las pérdidas	39
2.2.2 Cálculo de las baterías	42
2.2.3 Cálculo del inversor	42
2.2.4 Diseño de la estructura	43
2.3 Construcción.....	47
2.3.1 Estructura	47
2.3.2 Selección de componentes	51
2.4 Elaboración de documentos	57
2.4.1 Manual de operación y mantenimiento.....	57
2.4.2 Guías sugeridas para prácticas en el laboratorio didáctico	58
2.5 Implementación y pruebas	61
3. Conclusiones y Recomendaciones	74
3.1 Conclusiones.....	74
3.2 Recomendaciones	75
A. Anexo: Manual de operación y mantenimiento.....	76
B. Anexo: Guías sugeridas para prácticas en el laboratorio didáctico	91
Referencias Bibliográfica	122

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Elementos de un SFA con acumulador.....	28
Figura 1-2: Elementos de un SFA directo.....	28
Figura 1-3: Elementos de un SFCR	29
Figura 1-4: Principio de funcionamiento de un panel solar.	30
Figura 1-5: Efecto de la temperatura en un Panel Solar.....	32
Figura 1-6: Forma de onda según el inversor.....	34
Figura 2-1: Módulo base para paneles en SolidWorks.	45
Figura 2-2: Base metálica en SolidWorks.....	46
Figura 2-3: Diseño del laboratorio en SolidWorks.....	47
Figura 2-4: Módulo base para los paneles.....	48
Figura 2-5: Estructura de paneles pintada.	49
Figura 2-6: Estructura del laboratorio.....	49
Figura 2-7: Estructura tratada con anticorrosivo y pintura.	50
Figura 2-8: Laboratorio con paredes de PVC.....	51
Figura 2-9: Características del panel seleccionado para el laboratorio.....	52
Figura 2-10: Regulador MPPT.	53
Figura 2-11: Regulador PWM.	54
Figura 2-12: Batería seleccionada para el laboratorio.	54
Figura 2-13: Inversor seleccionado.....	55
Figura 2-14: Multímetro digital.	56
Figura 2-15: Carga de corriente directa.	56
Figura 2-16: Carga de corriente alterna.	57
Figura 2-17: Código de acceso rápido al tutorial de la guía de laboratorio #1	60
Figura 2-18: Código de acceso rápido al tutorial de la guía de laboratorio #2	60
Figura 2-19: Código de acceso rápido al tutorial de la práctica básica #1.....	61
Figura 2-20: Código de acceso rápido al tutorial de la práctica básica #2.....	61
Figura 2-21: Prueba Voc paneles.....	62
Figura 2-22: Resultado de prueba Voc en serie.....	63
Figura 2-23: Resultado de prueba Voc en paralelo.	64
Figura 2-24: Prueba de Voc a las baterías.....	65
Figura 2-25: prueba de Voc en las baterías conectadas en serie.	66
Figura 2-26: Prueba de Voc en las baterías conectadas en paralelo.	66
Figura 2-27: Controladores conectados a las baterías.....	67
Figura 2-28: Amperaje de controlador PWM en carga.....	68
Figura 2-29: Amperaje de controlador MPPT en plena carga.....	68
Figura 2-30: Inversor energizado por la parte DC.....	70
Figura 2-31: Inversor energizado con interruptor de AC encendido.....	70
Figura 2-32: Laboratorio alimentando una carga AC.	71

Figura 2-33:	Laboratorio alimentando una carga DC.	71
Figura 2-34:	Amperaje de la carga AC.	72
Figura 2-35:	Amperaje de la carga DC.	72

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1: Lista de elementos a seleccionar.....	43
Tabla 2: Pruebas de Voc en los paneles.....	63
Tabla 3: Potencia de carga se los controladores.....	69
Tabla 4: Potencia de cargas AC y DC.	73

Preliminares

Dedicatoria

A mi madre, Emperatriz Passo, a mi padre Eyder Fajardo, a mi amada esposa Edit Arrieta, quienes en su amor y constancia han permanecido apoyándome y dándome el aliento necesario para no desfallecer en el camino. Este trabajo no habría sido posible sin todo el amor que me mostraron en cada etapa.

Elmer Fajardo

A mis padres, Sonia y Robinson que siempre se esforzaron por brindarme una excelente educación; a mi tío Baldomero, quien siempre estuvo influyendo para que completara los estudios; a mis hijos que son la razón de mis esfuerzos; a mi familia de sangre y de la vida, pero en especial a Alexa, mi esposa, quien me ha apoyado desde el inicio.

Robinson Puentes

Agradecimientos

A mi Dios, Jehová por darme las fuerzas, los medios y el gran honor de conocerlo. A mis padres Eyder y Emperatriz, por ayudarme a entender la importancia del estudio e inculcarme el deseo de aprovecharlo. A todos los que sin tener la obligación hicieron una pausa en su camino para tenderme la mano sin esperar nada a cambio en momentos en que lo necesité. Un agradecimiento muy especial a mi amada esposa Edit Arrieta, quién en su gran amor hacia mí, estuvo dispuesta a trasnochar conmigo ayudándome las veces que se hizo necesario, gracias porque sin su amor no habría logrado llegar a este punto. Gracias a los profesores que más que enseñar, motivaron mi deseo de aprender cada vez más. Al ingeniero Romel Oliveros y en especial a los Doctores Rosa Urquiza y Manuel Moscote.

Elmer Fajardo Passo

Primero que todo, gracias a Dios, quien es el dueño de la vida y de toda la gloria que podamos alcanzar los seres humanos. A mi familia, mis compañeros y amigos de las dos sedes con quienes compartí parte del proceso y en cada una de sus palabras encontré motivos para llegar juntos al anhelado título. Por último, pero no menos importante, al selecto grupo de ingenieros docentes que nunca dudaron de mí, Ingeniera Deisy Cala por su gran apoyo, Ingeniero Nicolas Rúa por su constante esfuerzo en entregar mejores ingenieros a la sociedad, al ingeniero Romel Oliveros, quien por siempre compartió su extensa sabiduría y al ingeniero Carlos Batista, quien afianzó y reforzó mis conocimientos en energías limpias.

Robinson Puentes Garcerán

Resumen

La energía solar fotovoltaica es una energía renovable con un crecimiento exponencial en los últimos años. En Colombia, la generación fotovoltaica en 2005 alcanzaba valores de 208,06 kW, para el año 2015 llegó a un total aproximado de 12 GW. Este crecimiento exige por parte de los entes educativos innovar en la enseñanza para garantizar la mayor calidad en la educación teórica y práctica. El presente proyecto se dedicó a diseñar e implementar un laboratorio para el estudio práctico del funcionamiento de sistemas solares fotovoltaicos en la Universidad Antonio Nariño sede Riohacha, que permitirá a esta sede estar a la vanguardia de la enseñanza, capacitando mediante cursos prácticos a todos aquellos que deseen contribuir a este crecimiento en una zona donde las condiciones para estudiar el comportamiento de sistemas solares fotovoltaicos en una zona geográfica de las mejores en el país, con una radiación global mensual promedio de entre 5,0 y 5,5 kWh/m². El laboratorio cuenta con dos paneles solares y dos baterías que permiten evaluar las variaciones en el sistema cuando se efectúan conexiones en serie o en paralelo, brinda la oportunidad de comprobar teorías científicas a través de la experimentación, repetición y análisis riguroso de resultados en un ambiente seguro y cómodo para el proceso de aprendizaje. Esto representará una ayuda significativa en el desarrollo cognitivo de los estudiantes que tengan la oportunidad de usarlo en clases, así como una ayuda didáctica bastante útil para los docentes que vean a bien utilizarlos para el desarrollo de sus actividades curriculares.

Palabras clave: Laboratorio fotovoltaico, energía solar, rendimiento de paneles solares, efecto fotovoltaico.

Abstract

Photovoltaic solar energy is a type of renewable energy that has grown exponentially in recent years. In Colombia, specifically in 2005, photovoltaic energy generation reached values of 208.06 kW, and by 2015 it reached an approximate total of 12 GW. This growth requires that educational institutions upgrade and innovate their teaching and training, guaranteeing an education of the highest quality. This project proposes the design and implementation of a laboratory for the practical study of the operation of photovoltaic solar systems at the Riohacha campus of Antonio Nariño University, which will allow this campus to be at the forefront of teaching, training through practical courses whoever wish to study and delve deeper within this field in an area where the conditions to investigate the behavior of PV solar energy systems are among the best in the country, for it has an average monthly global radiation between 5.0 and 5.5 kWh /m². The laboratory has two solar panels and two batteries that allow to evaluate the variations in the system when connections are made in series or in parallel, offering the opportunity to test scientific theories through experimentation, repetition, and rigorous analysis of results in a safe and comfortable environment. This will represent a significant support in the professional development of students who could use it in class, as well as a valuable didactic aid for teachers who would like to use them for the development of their curricular activities.

Keywords: Photovoltaic laboratory, solar energy, solar panel performance, photovoltaic effect.

Introducción

En Física, la energía se define como la capacidad que tienen los cuerpos para realizar un trabajo. Depende de distintos factores como su composición, posición o velocidad. La energía también varía según la forma o el sistema físico en que se manifiesta, considerándose distintos tipos de energía, como: térmica, mecánica, química, eléctrica, entre otras. De todas las fuentes de energía, el Sol provee la mayor cantidad a la Tierra. Tanto las plantas, como los animales y las personas dependen de la energía solar para el calor y la alimentación. Es de las más importantes para el ser humano por otros factores, por ejemplo, hace posible el uso de la energía hidráulica, pues esta depende de la evaporación del agua en los mares a causa del Sol para su posterior precipitación en la tierra y así abastecer a las presas y los ríos. La energía eólica también depende en parte de la energía solar, pues utiliza las corrientes de aire que se producen por el aire que es calentado por el Sol y el movimiento de la tierra. Sin embargo, el hombre también ha hallado la manera de transformar directamente la energía solar en energía eléctrica, en particular por medio del efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico consiste en convertir una radiación electromagnética como la luz solar en energía eléctrica, mediante células fotovoltaicas. Este tipo de energía ha tenido un amplio crecimiento en los últimos años, debido las distintas ventajas que tiene con respecto a otras alternativas de generación. Una de las ventajas más importantes es que es amigable con el medio ambiente, pues acelerar su implementación puede reducir las emisiones de CO₂ en un 21% para el 2050 (IRENA, 2019). También se considera una gran ventaja la disponibilidad en todo el planeta, la posibilidad de instalarla en sitios donde por su geografía o largas distancias no es viable usar la energía de la red.

En 2016 se añadieron 161 GW de capacidad de fuentes renovables donde la energía fotovoltaica (EFV) representó un 47% (Banco Mundial, 2017). El constante crecimiento de la EFV también ha logrado que los costos de producción bajen rápidamente, proyectándose desde una reducción de 0.085 USD/kWh en 2018, hasta entre 0.05 y 0.014 USD/kWh en 2050 (IRENA, 2019). Todas estas ventajas hacen necesario que se prioricen las investigaciones y capacitaciones en el tema. Con el objetivo de comprender lo mejor posible el funcionamiento y las características de este sistema se ha diseñado el presente laboratorio didáctico para la sede Riohacha de la Universidad Antonio Nariño. Su intención es permitir una comprensión práctica de los componentes de sistemas de energía fotovoltaica mediante la evaluación experimental de sus componentes, características y desempeño. Para ello se concibe con gran versatilidad y funcionalidad.

Este laboratorio didáctico permite realizar cambios que le permitan al estudiante observar el desempeño de los componentes según sus conexiones o ángulos de incidencia solar de los paneles. Estas prácticas ayudarán al estudiante a alcanzar la comprensión necesaria sobre estos sistemas evaluando el rendimiento y funcionalidad de sus componentes.

Definición del problema

Planteamiento del problema

La Universidad Antonio Nariño, como institución de educación superior con la clara misión de formar ciudadanos idóneos y competitivos, éticos y humanistas, comprometidos con los procesos de transformación positiva del país, tiene la responsabilidad de proveer los medios necesarios para lograr una educación de calidad. Sin embargo, no cuenta en su sede de Riohacha con un banco de pruebas o laboratorio didáctico que permita realizar prácticas

relacionadas al estudio de sistemas solares fotovoltaicos aislados, materia importante en el desarrollo económico y ambiental del país y el mundo en general.

Descripción del problema

De todas las manifestaciones de la energía, en la actualidad la energía eléctrica es de las más versátiles. Esta nos permite disfrutar de luz, refrigeración, climatización o telecomunicación entre otros servicios. De hecho, sería muy difícil intentar realizar nuestras actividades cotidianas sin los equipos que la utilizan para su funcionamiento. Si bien la energía eléctrica es claramente una necesidad en nuestros tiempos, la forma en la que la conseguimos también debe importarnos. Hoy, la quema de combustibles fósiles, así como la energía nuclear son de las principales fuentes de energía en el mundo. A pesar de las claras consecuencias desfavorables para el medio ambiente como las enormes emisiones de CO₂, SO₂, y NO₂, o la peligrosidad de los residuos radiactivos.

El continuo avance de las tecnologías ecológicas en el mundo, sugiere varios modelos eco amigables para la generación de energía eléctrica en cualquier lugar. Dependiendo de las condiciones meteorológicas del sitio se aprovechan al máximo las condiciones favorables, viento, sol y en ciertas ocasiones también las olas.

Analizando el fuerte crecimiento de la generación de energía por medio de sistemas fotovoltaicos en el mundo y tomando en cuenta las proyecciones que hace la IRENA para el 2050 en su reporte de 2019: “El futuro de la energía solar fotovoltaica. Despliegue, inversión, tecnología, integración en la red y aspectos socioeconómicos” se hace necesario que las entidades de educación superior inviertan en una enseñanza de calidad para capacitar a personas idóneas que contribuyan al desarrollo de la energía fotovoltaica en el mundo.

En el departamento de La Guajira, el promedio anual de radiación es de entre 5 y 5.5 KWh/m² (IDEAM, 2015). Por ser el departamento de mayor incidencia solar en el país se constituye en un territorio ideal para la capacitación en sistemas fotovoltaicos. Al tener en cuenta que el proceso de la enseñanza no es solamente teórico, es fundamental que las instituciones encargadas de capacitar a las personas cuenten con la tecnología necesaria para garantizar la calidad de la educación en todo momento. De ahí surge la necesidad de saber si es posible diseñar e implementar un laboratorio de sistemas solares fotovoltaicos, su banco didáctico, las guías y procedimientos de las prácticas, que permitan complementar la formación de los estudiantes.

Delimitaciones

Este proyecto se materializa e implementa en la planta física de la Universidad Antonio Nariño en la sede de Riohacha, para permitir a sus estudiantes realizar prácticas de laboratorio en los momentos en que sea necesario para complementar el conocimiento teórico.

Se enmarca en los conceptos de energías alternativas, más específicamente en la energía solar fotovoltaica. Se demuestra un sistema solar fotovoltaico aislado y los componentes necesarios para su implementación. Se proponen prácticas de laboratorio para aprovechar al máximo sus funciones. Estas prácticas están sujetas a cambios futuros con el objetivo de mantenerse actualizadas según los avances en investigaciones relacionadas.

Justificación

Es notable el crecimiento que han tenido las energías renovables, como la energía solar fotovoltaica que además de no ser contaminante está ampliamente disponible en el planeta. Esto permite además que sea de las más utilizadas de estas fuentes de energías

representando un 47% del aumento de 161 GW generados por fuente renovables en el 2016 (Banco Mundial, 2017).

En vista del constante crecimiento de la energía solar fotovoltaica, así como las distintas ventajas que tiene con relación a las alternativas actuales se hace necesario que las universidades y centros de investigación la aprovechen para formar profesionales con ética ambiental. Los centros educativos como la Universidad Antonio Nariño, con la clara misión de formar ciudadanos éticos, humanistas, altamente calificados y comprometidos con los procesos de transformación positiva del país, deben usar los recursos posibles para lograr en sus estudiantes una educación de calidad, tanto de forma teórica como práctica.

Este laboratorio permite al practicante familiarizarse con los parámetros de un sistema solar fotovoltaico, con su funcionamiento y hasta con los posibles errores que pueden tenerse en la práctica. Podrá evaluar los sistemas fotovoltaicos autónomos, así como estudiar el comportamiento del sistema variando factores como el ángulo de incidencia solar de los paneles o la conexión de los mismos, analizando y verificando los resultados dados en las pruebas y comparándolos con los resultados teóricos impartidos en clase, convirtiéndose en un complemento ideal para la educación en energía solar fotovoltaica.

Objetivos

Objetivo general

Diseñar e implementar un laboratorio para el estudio práctico del funcionamiento de sistemas solares fotovoltaicos en la Universidad Antonio Nariño sede Riohacha.

Objetivos específicos

- Dimensionar las características de los distintos componentes y seleccionarlos para asegurar una operación segura de la simulación de un sistema de energía solar fotovoltaico.
- Diseñar la estructura del prototipo de laboratorio de sistemas solar fotovoltaico.
- Construir el laboratorio adaptando cada componente a la estructura para que el estudiante pueda realizar las prácticas interactivas de manera cómoda y segura.
- Elaborar el manual de operación y mantenimiento y las guías de laboratorio, que permitan el desarrollo de prácticas académicas.
- Implementar el laboratorio, realizando pruebas que permitan verificar el correcto funcionamiento del mismo.

1. Marco referencial

1.1 Antecedentes

Aunque la energía solar se ha utilizado por mucho tiempo en distintas civilizaciones, su transformación a energía eléctrica es un logro más moderno. En 1839, el físico Alexandre Bequerel descubrió el efecto fotoeléctrico, que dio comienzo a las células fotovoltaicas. Y no fue sino hasta 66 años más tarde que el físico teórico Albert Einstein descubrió el trasfondo físico de este efecto y pudo explicar el fenómeno, en el año de 1905. Las células solares basadas en silicio son aún más recientes. En 1954 un equipo de investigación de la corporación Bell en compañía de los especialistas Calvin Fuller, Daryl Chapin y Gerald Pearson lograron desarrollar la primera célula solar con un rendimiento del 6%. Hoy, los paneles solares alcanzan un coeficiente de rendimiento mucho mayor, superior incluso al 22% en algunos casos (TRITEC INTERVENTO, 2020).

El creciente desarrollo de las energías alternativas durante los últimos años, impulsado por los distintos retos que presenta la generación de energía eléctrica de manera eficiente y con responsabilidad ambiental ha permitido grandes beneficios. Hoy existen alternativas menos contaminantes para la generación de energía. Entre ellas se encuentra la energía solar fotovoltaica. Esta presenta varias ventajas, como que utiliza un recurso inagotable presente en todo el planeta y contribuye al desarrollo sostenible. La energía solar es una energía limpia, sin emisiones de gases contaminantes ni ningún otro residuo. Es una buena solución para proveer de electricidad a zonas aisladas. Puede instalarse a gran escala en zonas urbanas y se pueden desmontar sus componentes al final de su vida útil para su reutilización. Sin embargo, también presenta algunas desventajas, entre ellas que: Tienen un alto costo inicial y un periodo de amortización largo. A pesar de las desventajas que trae este sistema hoy día siguen siendo la solución más prometedora para requerimientos de baja y

mediana potencia con la finalidad de reducir el consumo de energía producida por los combustibles fósiles (UPME, 2015).

1.1.1 Experimentación y prácticas de laboratorio en programas de Ingeniería

Dentro de la Misión declarada por la Universidad Antonio Nariño como institución de Educación Superior aparece explícitamente: “Formar ciudadanos idóneos y competitivos, éticos y humanistas, con pensamiento autónomo y crítico, personas altamente calificadas y comprometidas con los procesos de transformación positiva del país, fundamentados en la incorporación, difusión, generación e innovación del conocimiento universal” (UAN, 2005, p. 23).

Asimismo, se plantea que:

La formación integral de los profesionales que participarán en la construcción del país o de la comunidad global, es una tarea que requiere cuidado y claridad acerca de: en qué se forma, quién facilita el proceso, para qué y por qué se forma. La formación en la Universidad se orienta al desarrollo de una complejidad constituida al menos por tres elementos; los conocimientos, las habilidades o destrezas y ciertas disposiciones actitudinales, elementos que se articulan en competencias (comunicativas, profesionales, artísticas, sociales).

Las competencias articulan el saber, el saber hacer y el ser. De esta manera, la formación busca que la persona desarrolle competencias profesionales básicas en su disciplina, esto es capacidades específicas pertinentes con su objeto de estudio, con sus tareas específicas, con los problemas que debe afrontar eficientemente en su ejercicio profesional.”

(UAN, 2005, p. 54)

La experimentación tiene un rol muy importante en el desarrollo de competencias profesionales, como una actividad que acuerda la interacción entre lo natural y lo social (el experimentador y pares), ligado a un espacio o sitio determinado, comúnmente, conocido como laboratorio (Quintero, 2010). El trabajo práctico en laboratorio proporciona la posibilidad de experimentar y “descubrir”, se convierte en contrapartida a creer ciegamente en los resultados aprendidos sólo a partir de datos procedentes de los libros. La experiencia en laboratorio también brinda a los estudiantes una valiosa oportunidad para que desarrollen habilidades de comunicación oral y escrita, liderazgo y cooperación. Los experimentos y la divulgación de esta información a su profesor y otros compañeros favorecen el desarrollo de competencias similares a las que necesitan los ingenieros en su práctica profesional (Lugo, 2006).

La implementación de las prácticas de laboratorio implica un proceso de enseñanza-aprendizaje facilitado y regulado por el docente, el cual debe organizar temporal y espacialmente ambientes de aprendizaje para ejecutar etapas estrechamente relacionadas que le permitan a los estudiantes, realizar acciones psicomotoras y sociales a través del trabajo colaborativo, establecer comunicación entre las diversas fuentes de información, interactuar con equipos e instrumentos y abordar la solución de los problemas desde un enfoque interdisciplinar-profesional (Lugo, 2006) (Cardona, 2013).

En el área de ingeniería, un laboratorio bien diseñado es una valiosa herramienta que contribuye a reforzar la enseñanza y en el que los alumnos pueden llegar a un nivel de comprensión imposible de lograr por otros medios. Es importante recalcar que se ha demostrado que los estudiantes parecen estar más motivados cuando tienen la oportunidad de hacer experimentos con situaciones reales (Lugo, 2006).

Diferentes universidades colombianas han prestado atención a la necesidad de perfeccionar las prácticas experimentales en programas de ingeniería, dedicándose pasantías, proyectos de grado y otras investigaciones a esta temática: Universidad Autónoma de Occidente y Fundación Universitaria Católica Lumen Gentium para Ingeniería Industrial (Herrera, 2008), (Henaó, 2016); Universidad Católica de Colombia (Barragán & Trujillo, 2018), (Ciendúa, Rivera & Salamanca, 2019) y Corporación Universitaria Minuto de Dios (Perico-Granados, Galarza, Díaz, Arévalo-Algarra & Perico-Martínez, 2020) para Ingeniería Civil.

Como resultados de estas investigaciones, se hicieron consideraciones previas de distinta índole, se evaluó el estado técnico del equipamiento, las materias de los programas y su necesidad de prácticas experimentales y se formularon planes estratégicos de distinto alcance al identificar falencias en los laboratorios y evaluar aspectos de calidad, costos y tiempo. Como parte de los resultados a entregar, se generaron guías prácticas para desarrollar ensayos en distintas materias.

Según los proyectos de grado mencionados, hay consenso acerca de la importancia de las guías para el adecuado desarrollo de las prácticas de laboratorio, y que tales instrumentos deben contener como elementos:

- Título
- Introducción
- Objetivos
- Aspectos teóricos fundamentales
- Material y equipos
- Procedimiento y recomendaciones
- Bibliografía

1.1.2 Laboratorios docentes en energías renovables

Las prácticas de laboratorio se constituyen en una importante herramienta del proceso de enseñanza/aprendizaje, ya que además de aportar a los estudiantes una mejor comprensión teórica en diversos contenidos, les permite aclarar con mayor facilidad las dificultades presentadas, pues pueden cuestionar sus saberes y confrontarlos con la realidad, además de poner en juego sus conocimientos previos y verificarlos mediante las prácticas (Osorio, 2004). El equipo a utilizar debe ser del mismo tipo y calidad del que utilizan los ingenieros en campo, el trabajo en laboratorio servirá como punto focal de la significativa interacción entre los estudiantes en forma individual y la academia, enriqueciendo de este modo su experiencia educativa (Lugo, 2006).

Con el fin de capacitar a las personas en los sistemas de energías renovables se han desarrollado distintos textos especializados, así como bancos de pruebas. Constituyen un acercamiento a la realidad de las energías renovables que el futuro ingeniero encontrará, una ruta inicial entre la teoría y la práctica, en la que a través de la experimentación podrá comprobar la teoría (Reyes, 2020).

El trabajo “Banco de pruebas didáctico para sistema de energía eólica” desarrollado en Cuenca, Ecuador, demostró ser un apoyo tanto para estudiantes como para docentes en el proceso de enseñanza de calidad en sistemas de energías renovables (Aguilar, 2017). El banco de pruebas solar fotovoltaico realizado por Iván Mendoza y Edison Torres para la Universidad Santo Tomás seccional Tunja también dio buenos resultados. Con este proyecto, los autores lograron ampliar sus conocimientos en cuanto al dimensionamiento de sistemas solares fotovoltaicos y estiman que su proyecto será útil para complementar los conocimientos teóricos durante las clases (Mendoza & Torres, 2019).

El trabajo “Construcción de un prototipo para el mejoramiento de la enseñanza de la energía fotovoltaica” (Rojas & Contreras, 2019) consistente en un prototipo para el mejoramiento en la enseñanza de energía fotovoltaica también tuvo buenos resultados, desarrollando un prototipo de fácil acceso y comprensión por parte de los estudiantes. Sin embargo, estos trabajos al ser implementados en zonas donde la temperatura ambiente máxima en promedio está entre los 17 y los 20°C su diseño obligaba a los estudiantes a realizar las prácticas bajo el sol. Esto dificultaría el correcto desarrollo de las actividades académicas en la ciudad de Riohacha pues la temperatura promedio la mayor parte del año está entre 32 y 35°C, por esta razón se tomó la decisión de separar el módulo de los paneles del resto de la estructura, esto permite tener las clases dentro de un aula mientras que los paneles estén expuestos a la radiación solar.

1.2 Marco conceptual

A los sistemas de generación de energía solar fotovoltaica hay asociada una terminología técnica que se definida claramente en el libro “Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas” de José Manuel y Félix De La Cruz Gómez. Estas definiciones se muestran a continuación:

Acumulador: Dispositivo utilizado para almacenar la energía eléctrica producida por los paneles, normalmente baterías.

Célula solar: Dispositivo donde se produce la conversión de una onda electromagnética (luz) en electricidad.

Controlador de carga: Componente que controla el estado de carga de los acumuladores.

Corriente: Flujo de electrones a través de un material.

Corriente alterna: Corriente eléctrica variable en la que las cargas cambian el sentido del movimiento de manera periódica.

Corriente de corto circuito: Corriente que fluye a través de un conductor de resistividad 0 que une los polos de una célula o panel solar.

Corriente directa: También llamada corriente continua, es la corriente eléctrica que fluye de manera constante y en una misma dirección.

Efecto fotovoltaico: Conversión de una radiación electromagnética a corriente eléctrica.

Energía: Capacidad que posee un cuerpo para realizar un trabajo. **Hora solar pico:** Es el número de horas en que la irradiancia solar es constante y equivalente a 1 kW/m². Se expresa como HSP.

Intensidad de la corriente: Cantidad de carga que atraviesa cierta sección de un conductor por unidad de tiempo. Su unidad es el amperio (A).

Interruptor: Dispositivo de seguridad y maniobra que corta o permite el flujo de la corriente eléctrica a través de un conductor.

Irradiación: Cantidad de radiación solar recibida por una superficie en un período de tiempo. Se expresa en Wh/m².

Irradiancia: Magnitud que mide la radiación solar que alcanza a la tierra en términos de potencia por unidad de área. Se expresa en W/m².

Laboratorio fotovoltaico: Equipo didáctico conformado por elementos mecánicos, electrónicos y eléctricos que concurren en la captación de la radiación electromagnética emitida por el sol para su posterior transformación en energía eléctrica utilizable.

Panel fotovoltaico: También llamado módulo solar o módulo solar fotovoltaico es un dispositivo formado por un conjunto de células solares interconectadas eléctricamente y provisto con terminales de conexión.

Potencia: Energía por unidad de tiempo. Su unidad es el Vatio (W).

Potencia nominal: Máxima potencia posible de una célula o un panel solar.

Radiación solar: Conjunto de radiaciones emitidas por el sol. Puede ser: directa, si no posee cambios al ingresar a la superficie terrestre; difusa, si es impedida por obstáculos tales como la polución, nubosidad o partículas en la atmosfera; y reflejada, cuando choca contra la superficie terrestre y se refleja nuevamente a la atmosfera.

Rendimiento: Relación existente entre la energía que utiliza un determinado equipo para su funcionamiento y la energía que transforma en energía útil.

Sistema conectado a la red: Configuración de un sistema fotovoltaico que le permite inyectar energía a la red.

Sistema aislado: Configuración de un sistema fotovoltaico destinado al autoabastecimiento. Se usa normalmente en áreas donde el acceso a la red eléctrica convencional no es posible.

Voltaje: Magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos. Su unidad es el voltio (V).

Voltaje de circuito abierto: También llamado tensión de circuito abierto, es el voltaje medido en una célula o panel solar cuando los dos polos no están conectados entre sí.

1.3 Marco teórico

1.3.1 Sistemas fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos están constituidos por un grupo de dispositivos interconectados entre sí para proporcionar energía eléctrica a cargas determinadas. Estos

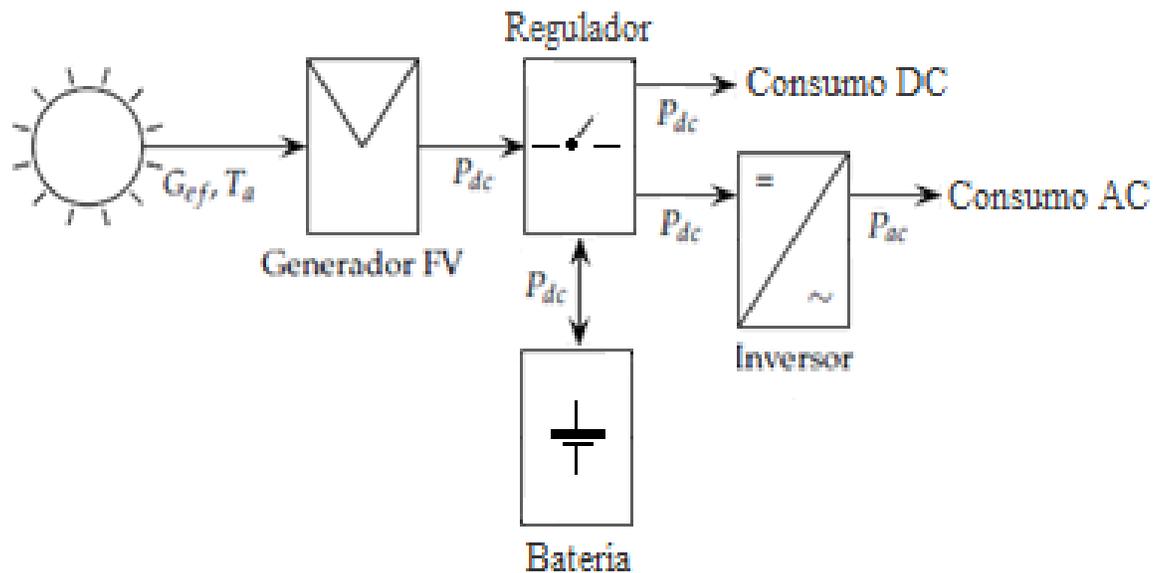
pueden ser aislados (SFA) o de conexión a red (SFCR). En el caso de los SFA también podemos encontrar de dos tipos, con acumulación y directos. Los primeros se usan en aplicaciones en las que es necesario que haya disponibilidad del fluido eléctrico aun cuando no haya radiación solar. Los SFA directos se utilizan cuando no es crítico contar con disponibilidad energética en momentos en que no exista radiación solar. Los SFA son diseñados con el fin de abastecer energéticamente a cargas específicas y está es ya en sí una de las limitantes para su diseño, debido a la complejidad que hay en calcular el consumo energético exacto de cada una de las cargas. Debido a que el costo de cada kWh fotovoltaico es muy elevado en comparación con el obtenido por la red eléctrica convencional, se hace necesaria una optimización del consumo energético de las cargas.

1.3.2 Elementos de sistemas fotovoltaicos

Aquí se presentan los esquemas de los distintos tipos de sistemas fotovoltaicos:

Los sistemas fotovoltaicos aislados son los que mayor cantidad de componentes necesitan, esto es porque como puede observarse en la **Figura 1-1** necesitan de un acumulador y un regulador que controle la carga del acumulador esto para evitar situaciones que afecten su vida útil.

Figura 1-1: Elementos de un SFA con acumulador.



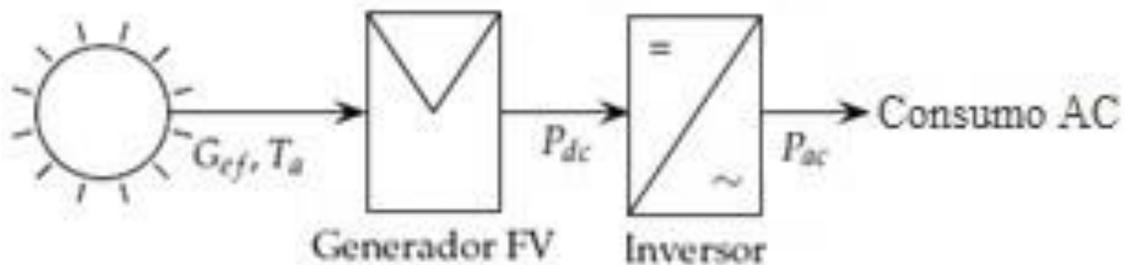
Fuente: DITECSA, Soluciones industriales y medioambientales. Sistemas solares

Fotovoltaicos: dispositivos e ingeniería conceptual.

La configuración representada en la **Figura 1-2** tiene aplicaciones muy específicas en la industria es utilizada normalmente en lugares donde no se cuente con una conexión a red y cuando la necesidad de la carga coincide con las horas de sol, como en el bombeo directo.

Figura 1-2: Elementos de un SFA directo.

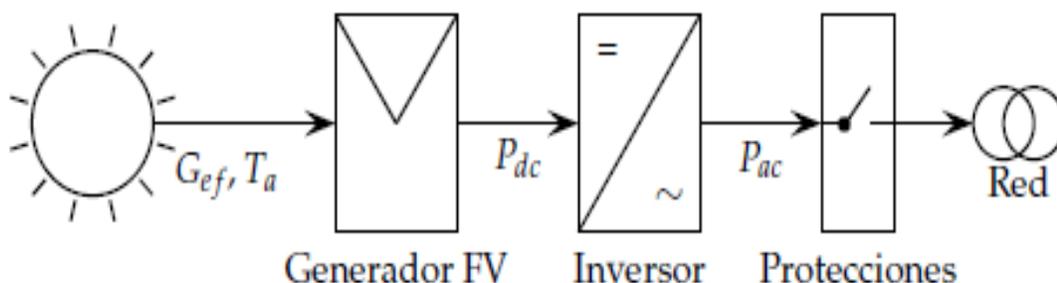
<



Fuente: Adaptado de: DITECSA, Soluciones industriales y medioambientales. Sistemas solares Fotovoltaicos: dispositivos e ingeniería conceptual.

La configuración representada en la **Figura 1-3** es la más común en estos momentos. Entre sus ventajas está el hecho de que disminuye el consumo de energía eléctrica proveniente de la red, ayuda a la disminución de gases contaminantes y su implementación puede ser gradual.

Figura 1-3: Elementos de un SFCR



Fuente: DITECSA, Soluciones industriales y medioambientales. Sistemas solares

Fotovoltaicos: dispositivos e ingeniería conceptual.

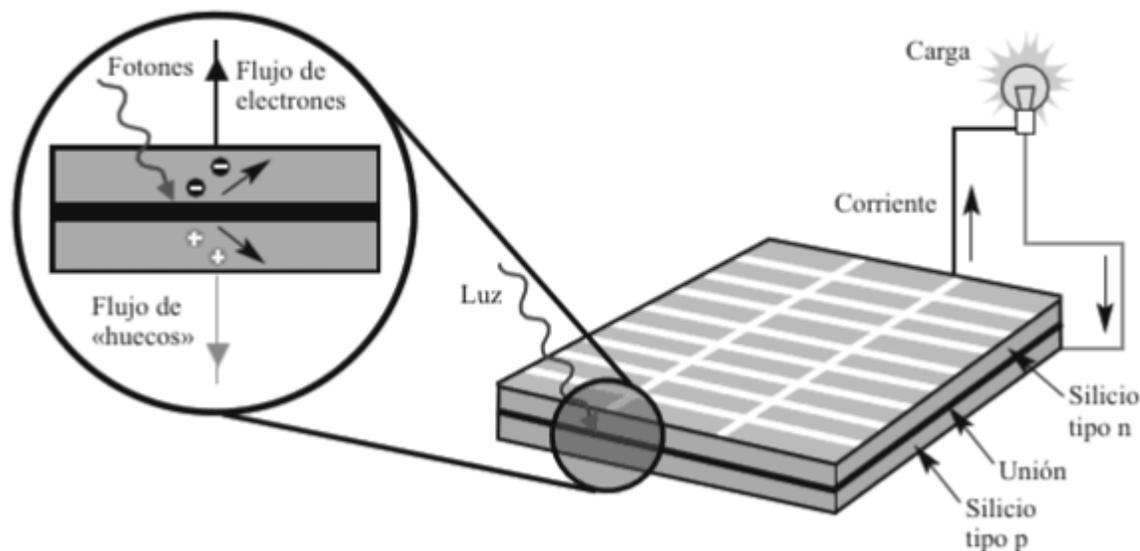
A continuación, se describen los elementos que componen los sistemas solares fotovoltaicos:

- Generador fotovoltaico:** Los paneles solares fotovoltaicos son conformados por un grupo de células solares interconectadas eléctricamente entre sí, su potencia máxima depende, entre otros factores, de cuantas células lo conformen, de cuantas estén conectadas en serie y que tantas estén conectadas en paralelo. Usualmente las células se conectan entre sí para lograr un voltaje final en el panel de entre 12V y 48V. Esto se logra conectando las células en serie, a la vez que se conectan varios grupos de células en paralelo para aumentar la corriente que produce el panel final. El mismo principio aplica al momento de interconectar los paneles entre sí. Conectar los paneles en serie hará que produzcan la misma corriente y aumentará su voltaje, mientras que conectarlos en paralelo hará que produzcan el mismo

voltaje, pero aumentará la corriente producida. Este proceso se observa gráficamente en la

Figura 1-4.

Figura 1-4: Principio de funcionamiento de un panel solar.



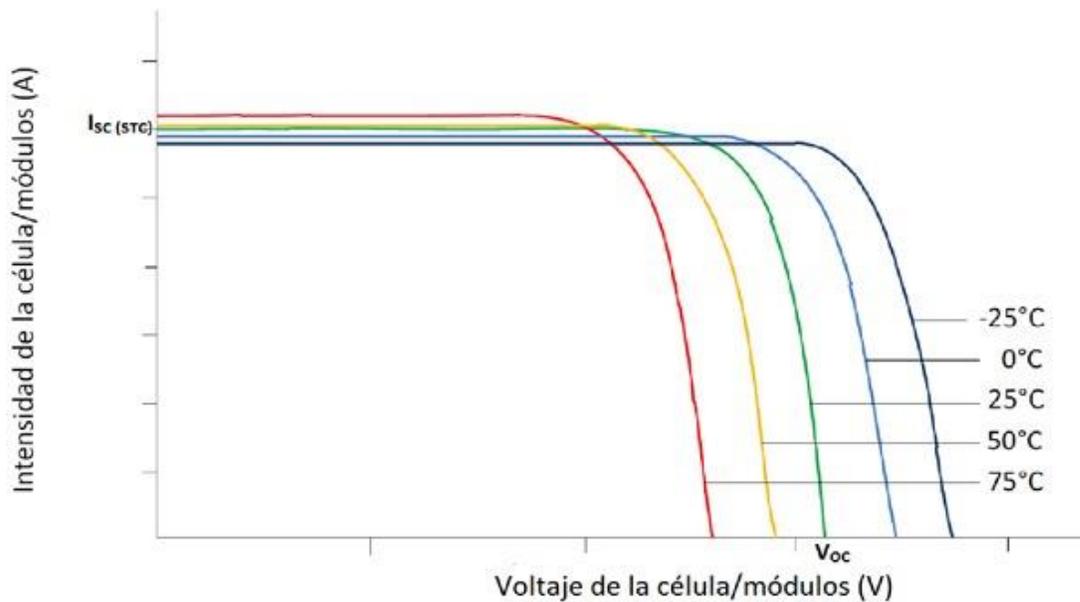
Fuente: BAYOD, RÚJULA, Ángel Antonio. Energías renovables: sistemas fotovoltaicos, Prensas de la Universidad de Zaragoza, 2009, p. 39.

Los paneles comerciales en este momento logran eficiencias de entre el 17% y el 22% con una vida útil de aproximadamente 25 años, después de lo cual la potencia de salida empieza a disminuir significativamente. Estos dispositivos entregan corriente continua, por lo que para abastecer una carga de corriente alterna es necesario usar un inversor en el sistema. Existen factores que pueden afectar la eficiencia de estos dispositivos y parámetros entregados por el fabricante que pueden ser medidos por el usuario. Tales parámetros y factores son los siguientes:

- **Corriente de corto circuito (I_{SC}):** Esta es la corriente máxima generada por cada panel al conectar una carga de 0Ω de resistencia en sus terminales de salida.

- **Voltaje de circuito abierto (V_{OC}):** Este es el voltaje máximo generado por el panel cuando no tiene ninguna carga conectada a sus terminales de salida.
- **Comportamiento eléctrico:** Este está dado por las curvas IV o PV que corresponden a la comparación de la corriente vs el voltaje o la potencia vs el voltaje respectivamente y son curvas características de cada modelo. Con respecto a la corriente y el voltaje nominal del panel, se alcanzan en el punto de máxima potencia del mismo.
- **Sombra:** La disminución de la radiación electromagnética recibida por los paneles debido a efectos de sombra disminuye en gran medida el rendimiento de estos. Este efecto se hace más notorio cuando en el sistema hay paneles conectados en serie pues el ensombrecimiento de solo uno de ellos hará que disminuya su potencia generada y consumirá energía de los otros paneles conectados.
- **Orientación e inclinación:** La orientación óptima de trabajo de los paneles solares es perpendicular a la radiación electromagnética emitida por el sol. Algunos sistemas permiten a los paneles moverse en dirección al sol, pero en el caso de las instalaciones fijas, debe buscarse la orientación que asegure aprovechar la mayor radiación solar posible, esto influirá en la eficiencia del sistema.
- **Temperatura:** La temperatura disminuye el voltaje máximo que pueden entregar las células solares afectando la potencia del panel. Entre mayor sea la temperatura menor será el voltaje que esta entregue al sistema afectando la eficiencia del panel. Este efecto se ve claramente en la **Figura 1-5**.

Figura 1-5: Efecto de la temperatura en un Panel Solar.



Fuente: Energías Renovables, Los efectos de la temperatura en la producción de las instalaciones fotovoltaicas, 2015.

- **Regulador o controlador de carga.** Este es un elemento propio de los SFA con acumulador. Su objetivo es utilizar la potencia entregada por los paneles para cargar las baterías de forma segura, protegiéndola de sobrecargas, así como controlar el proceso de descarga de las mismas evitando sobre descargas profundas prolongando la vida útil de estas y evitando eventos que pudieran poner en peligro la integridad del sistema. También protege a la batería de sobre tensiones o del flujo de la corriente de la batería a los paneles, algo que ocurriría en momentos en que la tensión de los paneles fuera inferior a la de las baterías como en las noches. Existen dos tipos de reguladores de carga:

- **PWM (Pulse-Width Modulation)**, que son los más comunes en instalaciones de 12V y 24V. La vida útil de estos es bastante larga ya que su construcción está basada en componentes muy sencillos. Una desventaja de este tipo de reguladores es que utilizan sólo el voltaje que necesita la batería para su carga o descarga, así pues, si el módulo fotovoltaico

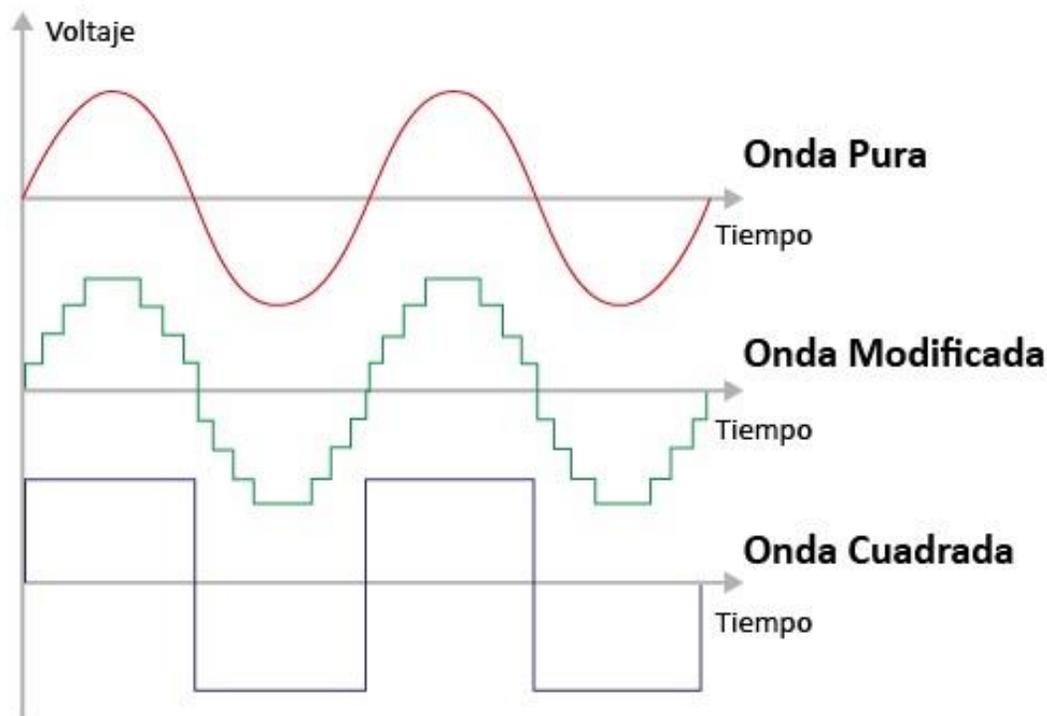
produce una tensión superior a la de la batería el regulador desechará el restante pudiendo generar pérdidas de potencia.

- **MPPT** (*Maximum Power Point Tracking*) Estos se caracterizan por aprovechar al máximo la potencia de los módulos solares. Así pues, si el voltaje de los módulos es superior al de las baterías, este reducirá el voltaje, pero aumentará la corriente manteniendo el punto máximo de potencia ofrecido por el sistema. Al mantenerse constantemente en este punto óptimo el rendimiento del sistema se vuelve superior al de los reguladores PWM. La desventaja más notoria de estos reguladores vendría a ser su precio, pues es muy superior al de los reguladores PWM.

- **Acumulador.** Este elemento permite la independencia de la red en los SFA mientras permiten el fluido de energía eléctrica en momentos en que no hay radiación solar. Para calcular la capacidad de las baterías es necesario determinar el tiempo en que las cargas estarán activas (consumiendo energía) mientras no haya radiación solar o que está sea insuficiente. Es tal vez el elemento más costoso de estos sistemas y tienen por lo general una vida útil de apenas 5 años.

- **Inversor.** Este elemento permite convertir la corriente directa (DC) en alterna (AC). Son necesarios para alimentar cargas de corriente alterna pues los sistemas fotovoltaicos proveen corriente directa. Los inversores funcionan utilizando transistores IGBT y un controlador. Los IGBT hacen las veces de interruptores controlados lo que permite variar forma de la onda de salida mientras el controlador define la velocidad a la que estos se abren y cierran y el tiempo que permanecen en ese estado. Los inversores se dividen en 3 tipos según la modificación de onda que logren, estos son: de onda cuadrada, de onda modificada y de onda pura. La **Figura 1-6** muestra la diferencia entre la forma de estas ondas.

Figura 1-6: Forma de onda según el inversor



Fuente: Auto Solar, ¿Cómo son los inversores de onda senoidal?, 2015.

1.3.3 Ecuaciones de dimensionamiento

Con el objetivo de usar los elementos más adecuados para un sistema solar fotovoltaico y no incurrir en sobre dimensionamientos costosos e innecesarios, pero garantizando un sistema eficiente es necesario calcular las dimensiones de cada componente en el sistema. Las ecuaciones descritas a continuación son tomadas del libro: “Curso: *Instalação e Manutenção de Sistema Solar Fotovoltaico*” producido por el equipo técnico del centro de innovación y tecnología industrial – CITI, del SENAI de Paraíba, Brasil. comparándolas y complementándolas con los cursos: “Cálculo de instalación fotovoltaica aislada” de la empresa *SunFields* y el curso electivo "Energía solar" de la Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica Dictado por el Dr. BATISTA RODRÍGUEZ Carlos R.:

Ecuación 1.1: Energía total generada por el panel o conjunto de paneles teniendo en cuenta el rendimiento

$$E_T = E_p * R$$

Ecuación 1.2: Energía teórica de los paneles

$$E_p = \text{energía teórica de los paneles} * \text{Número de paneles}$$

Ecuación 1.3: Número de paneles necesarios para el sistema

$$N_p = \frac{L_{md}}{P_{MP} * HPS * PR}$$

Donde,

L_{md} = Consumo medio diario del sistema

P_{MP} = Potencia máxima del panel en condiciones estándar de trabajo

PR = Factor global de funcionamiento

HPS = Horas de máxima irradiancia

Ecuación 1.4: Rendimiento del sistema de almacenamiento

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

Donde,

k_a = Coeficiente de autodescarga

k_b = Coeficiente de pérdida por rendimiento de la batería

k_c = Coeficiente de pérdida en el inversor

k_v = Coeficiente de otras pérdidas

N = Número de días de autonomía

Pd = Profundidad de descarga de las baterías

Para los valores de los coeficientes se tienen las siguientes consideraciones:

$$k_a = \begin{cases} 0.002 & \text{Baterías de baja autodescarga} \\ 0.005 & \text{Baterías estacionarias} \\ 0.012 & \text{Baterías de alta autodescarga} \end{cases}$$

$$k_b = \begin{cases} 0.05 & \text{Sistemas sin descargas intensas} \\ 0.1 & \text{Sistemas con descarga profunda} \end{cases}$$

$$k_c = \begin{cases} 0 & \text{No hay inversor} \\ 0.05 & \text{Inversor de onda pura en régimen óptimo} \\ 0.1 & \text{Condiciones de trabajo lejos del óptimo} \end{cases}$$

$k_v =$ Se usan 0.05 – 0.15 como valores de referencia

Ecuación 1.5: Capacidad útil de las baterías

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

Ecuación 1.6: Potencia máxima del inversor teniendo en cuenta el factor de seguridad

$$P_{inv} = 1.25 * P_{AC}$$

Es importante tener en cuenta que algunos equipos con motor tienen picos de arranque donde la potencia demandada es mucho mayor a la nominal. Es necesario tener en cuenta esta potencia de arranque para dimensionar correctamente el inversor y evitar problemas de funcionamiento en nuestros equipos.

Ecuación 1.7: Corriente de entrada al regulador de carga

$$I_i = FS * I_{SC,p} * N_{PP}$$

Donde,

$I_{SC,p}$ = Corriente de corto circuito unitaria del panel

N_{PP} = Número de ramas en paralelo

Ecuación 1.8: Corriente de salida del regulador de carga

$$I_o = \frac{FS * (P_{DC} + \frac{P_{AC}}{\eta_{inv}})}{V_{Bat}}$$

1.4 Marco legal

En Colombia existen leyes que buscan fomentar el aumento de uso de energías alternativas. Tal es el caso de las siguientes normativas.

- LEY 697 DE 2001 - fomenta el uso racional y eficiente de la energía a la vez que promueve la utilización de energías alternativas.
- LEY 1715 DE 2014 - regula la integración de las energías renovables al Sistema Energético Nacional, promoviendo el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales, con el fin de desarrollar la economía sostenible y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero mientras se garantiza el abastecimiento energético. En el estatuto tributario fue incluido el literal *i*, según el que se exime del pago de impuestos a: “La importación de maquinaria y equipos destinados al desarrollo de proyectos o actividades que sean exportadores de certificados de reducción de emisiones de carbono y que contribuyan a reducir la emisión de los gases efecto invernadero y por lo tanto al desarrollo sostenible”.
- Código Eléctrico Colombiano, incluido en la Norma Técnica Colombiana, NTC 2050: en su Sección 690 define los requerimientos referentes a los sistemas eléctricos fotovoltaicos. La Sección 705 de la misma norma trata la instalación de fuentes de energía eléctrica interconectadas.

2. Metodología

Para la realización de este proyecto se siguieron las siguientes fases:

- Recopilación de información
- Diseño
- Construcción
- Elaboración de documentos

- Implementación y pruebas

Todas estas etapas se describen detalladamente a continuación.

2.1 Recopilación de información

De las investigaciones realizadas durante la revisión bibliográfica se tomaron los aspectos más relevantes y que se consideraron oportunos para la construcción del laboratorio. Tomando en consideración los trabajos: Construcción de un banco de pruebas solar fotovoltaico para el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad Santo Tomas Tunja (Mendoza & Torres, 2019) y Construcción de un prototipo para el mejoramiento de la enseñanza de la energía fotovoltaica (Rojas & Contreras, 2019) se decidió que la cantidad mínima de paneles solares y de baterías requerida por el banco para realizar prácticas en serie y paralelo sería de dos.

También se decidió montar los componentes en un soporte en forma de tablero, para facilitar la visibilidad de los componentes y las conexiones a los estudiantes que se mantengan de observadores durante las prácticas. Esto los ayudaría a desarrollar las actividades más fácilmente, a partir de observar el ejemplo de sus compañeros o del docente encargado.

Los trabajos mencionados, sin embargo, coincidían en que los paneles solares eran instalados en la parte superior del banco, diseño poco recomendable para este proyecto debido a las altas temperaturas que se presentan en la zona. Por lo anterior se usó el criterio del trabajo: Diseño y construcción de un banco didáctico para prácticas de energía solar fotovoltaica (Zenón & Riofrio 2013) en este se separa el módulo de paneles del banco, permitiendo tener las clases bajo techo en un sitio protegido por el ambiente mientras que los paneles se exponen a la radiación solar y proveen de energía al sistema.

Se tuvo en cuenta que el propósito de la instalación es principalmente académico, por eso se tomó la decisión de usar dos paneles solares de 100 W, potencia estimada suficiente para hacer pruebas de funcionamiento en los componentes de este tipo de sistemas y segura al momento de interactuar con ellos (Mendoza & Torres, 2019), se eligieron paneles con un voltaje mayor al de las baterías con el objetivo de facilitar la diferenciación entre los controladores de carga MPPT y PWM.

El resto de los componentes se calculó a partir de esta información. Se hizo uso del libro: “*Curso: Instalação e Manutenção de Sistema Solar Fotovoltaico*” producido por el equipo técnico del centro de innovación y tecnología industrial – CITI, del SENAI de Paraíba, Brasil, del cual fueron tomadas y adaptadas las ecuaciones para los siguientes cálculos, comparándolas con los cursos: “Manual de cálculo de una instalación fotovoltaica con baterías aislada” (SunFields, 2015) y el curso electivo "Energía solar" de la Universidad Antonio Nariño (Batista, 2021).

2.2 Diseño

Para el dimensionamiento de los componentes del banco se tuvieron en cuenta los hallazgos obtenidos durante la revisión bibliográfica, así como los conocimientos previos adquiridos por los autores mientras cursaban sus estudios en los periodos académicos en la Universidad Antonio Nariño en la Sede de Riohacha. Estos cálculos se detallan a continuación.

2.2.1 Cálculo de la energía teniendo en cuenta las pérdidas

Para estimar la potencia real que brindaría el sistema fue necesario tener en cuenta las pérdidas propias en este tipo de sistemas debido a las conexiones y equipos que se utilizan. Para ello usamos las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1.1: Energía total generada por el panel o conjunto de paneles teniendo en cuenta el rendimiento

$$E_T = E_p * R$$

Donde,

$E_p =$ Energía teórica de los paneles

$R =$ Rendimiento del sistema

Para encontrar la energía teórica de los paneles fue necesario aplicar la ecuación descrita a continuación.

Ecuación 1.2: Energía teórica de los paneles

$$E_p = \text{energía teórica del panel} * \text{Número de paneles}$$

$$E_p = 100 \text{ W} * 2 = 200 \text{ W}$$

Una vez se halló este valor procedió a encontrarse el valor de R mediante la ecuación

4.

Ecuación 1.3: Rendimiento del Sistema

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

Donde,

$k_a =$ Coeficiente de autodescarga

$k_b =$ Coeficiente de pérdida por rendimiento de la batería

$k_c =$ Coeficiente de pérdida en el inversor

$k_v =$ Coeficiente de otras pérdidas

$N =$ Número de días de autonomía

$Pd =$ Profundidad de descarga de las baterías

Fue necesario determinar los valores de los coeficientes de la ecuación, para lo cual se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

$$k_a = \begin{cases} 0.002 & \text{Baterías de baja autodescarga} \\ 0.005 & \text{Baterías estacionarias} \\ 0.012 & \text{Baterías de alta autodescarga} \end{cases}$$

$$k_a = 0.005$$

$$k_b = \begin{cases} 0.05 & \text{Sistemas sin descargas intensas} \\ 0.1 & \text{Sistemas con descarga profunda} \end{cases}$$

$$k_b = 0.05$$

$$k_c = \begin{cases} 0 & \text{No hay inversor} \\ 0.05 & \text{Inversor de onda pura en régimen óptimo} \\ 0.1 & \text{Condiciones de trabajo lejos del óptimo} \end{cases}$$

$$k_c = 0.05$$

$$k_v = \text{Se usan } 0.05 - 0.15 \text{ como valores de referencia}$$

$$k_v = 0.10$$

$$N = 2$$

$$Pd = 0.4$$

Con estas consideraciones la ecuación quedó de la siguiente manera:

$$R = (1 - 0.05 - 0.05 - 0.10) * \left(1 - \frac{0.005 * 2}{0.4}\right) = 0.78$$

Volviendo a la **ecuación 1.1**:

$$E_T = E_P * R$$

$$E_T = 200 \text{ W} * 0.78 = 156 \text{ W}$$

Este es el valor de la energía real del sistema teniendo en cuenta las pérdidas.

2.2.2 Cálculo de las baterías

Con el objetivo de hacer cambios a la configuración de conexión de las baterías se tomó la decisión de integrar al banco dos baterías de 12 V cada una, esto para que los estudiantes puedan medir las diferencias que implican al sistema conectar las baterías en serie a conectarlas en paralelo. Para definir la capacidad útil de estas baterías se tuvo en cuenta las dos posibles configuraciones y como afectan al sistema. Para el cálculo de la conexión en paralelo se usó la **ecuación 1.4**.

Ecuación 1.4: Capacidad útil de las baterías

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

$$Cu = \frac{156 W * 2}{12 V * 0.4}$$

$$Cu = 65 Ah$$

Así pues, la capacidad útil de las baterías en conexión en paralelo es de 65 Ah. Para la conexión en serie debe tenerse en cuenta que el voltaje será el doble de la conexión en paralelo por lo que la ecuación queda:

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

$$Cu = \frac{156 W * 2}{24 V * 0.4}$$

$$Cu = 32.5 Ah$$

Así pues, el requisito mínimo del sistema será de dos baterías a 12 V y de 32.5 Ah cada una.

2.2.3 Cálculo del inversor

Teniendo en cuenta que las posibles configuraciones de las baterías permiten voltajes de 12 V o 24 V el inversor deberá trabajar con cualquiera de estos voltajes. Para determinar

la potencia nominal de este usaremos un factor de seguridad establecido en el 25% por encima de la potencia máxima del sistema. Así, la ecuación usada para determinar nuestro inversor es la **ecuación 1.5** dando el siguiente resultado:

$$P_{inv} = E_P * FS$$

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

$$P_{inv} = 250 W$$

Por los resultados de la ecuación se obtiene que la potencia mínima que debe soportar el inversor es de 250 W.

Una vez se obtuvieron los resultados y capacidades mínimas de cada componente se tabuló la información para facilitar el proceso de compra y construcción. Los datos de este proceso se resumen en la **Tabla 1**.

Tabla 1: Lista de elementos a seleccionar.

Componentes	Parámetros	Cantidad
Panel	100W	2
Regulador	PWM 12V/24V	1
Regulador	MPPT 12V/24V	1
Batería	12V 32.5Ah	2
Inversor	250W 12V/24V	1

2.2.4 Diseño de la estructura

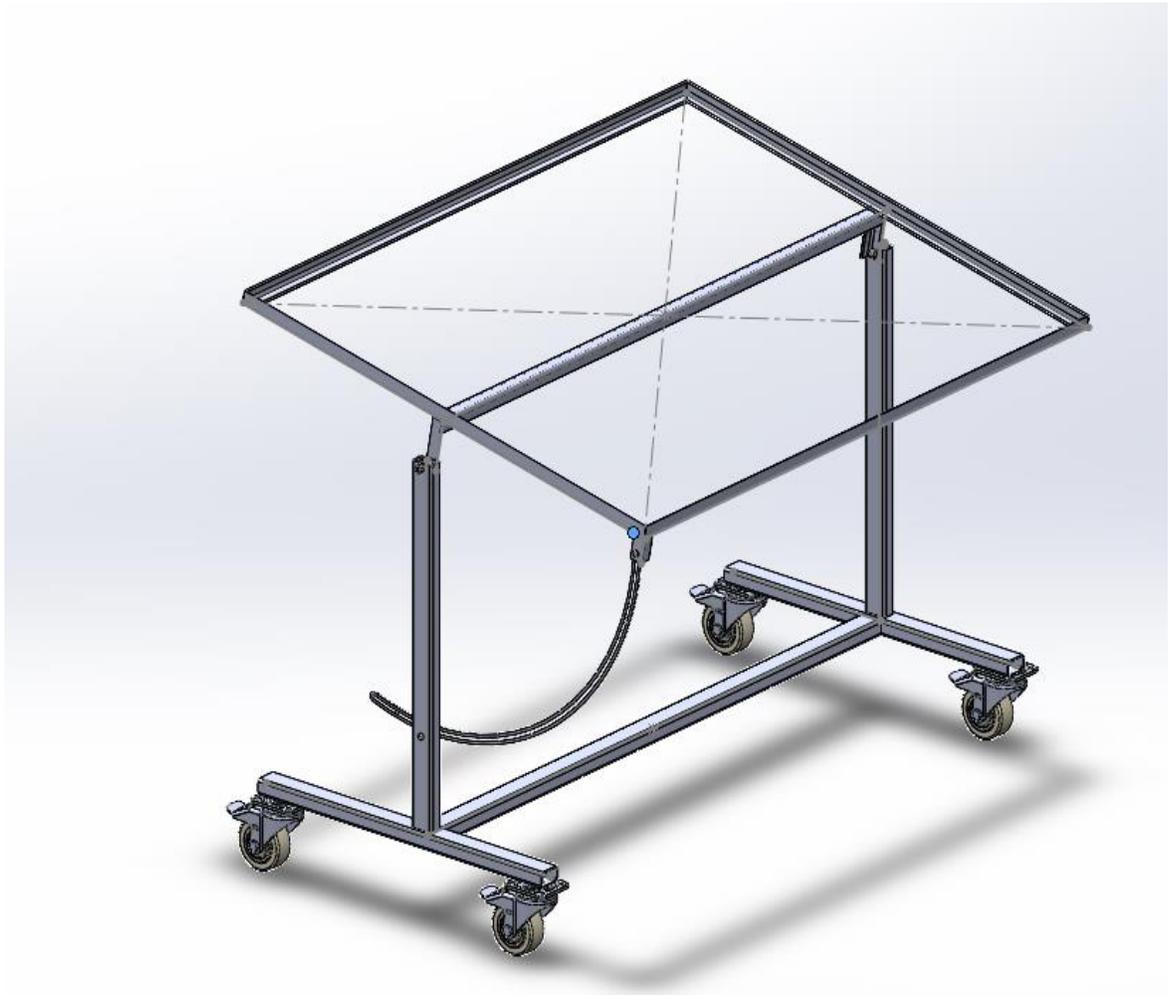
En esta etapa se aplicaron los conocimientos adquiridos de la revisión hecha en la primera etapa, y una vez se dimensionaron los componentes teniendo en cuenta las necesidades didácticas del sistema, así como los materiales con los que ya se contaban para

el desarrollo del laboratorio, esto con el fin de optimizar los recursos de los autores, se procedió a diseñar la estructura del laboratorio.

De acuerdo al tamaño de los componentes seleccionados, y teniendo presente que el laboratorio debe ser durable en el tiempo, se empleó el método de lluvia de ideas entre los autores y dos profesionales en el campo de la energía solar fotovoltaica. Se buscaron modelos de bancos didácticos en internet y se discutió su idoneidad para realizar prácticas en la zona de Riohacha, una vez definida la estructura se diseñó con la herramienta SolidWorks, procurando que fuera fácil de transportar y cómoda al momento de realizar las prácticas de laboratorio. Se emuló la forma de un tablero en un salón de clases para la parte de las conexiones permitiendo a los interesados tener a simple vista las acciones de los practicantes.

Para el diseño del laboratorio se buscó la practicidad y comodidad de los usuarios. Teniendo en cuenta que para realizar las prácticas los paneles deberán estar expuestos al sol, y en la zona la temperatura promedio es de entre 32 y 35°C, se tomó la decisión de separar el módulo que sostiene los paneles del resto del banco, esto permitirá exponer los paneles a la radiación solar mientras que se trabaja con el laboratorio en un lugar donde haya sombra como un salón de clases u otro lugar que el docente considere conveniente. Se tomó la decisión de usar rodachines con freno en el módulo de los paneles para que transportarlos fuese más sencillo. Se planteó el diseño en el software SolidWorks antes de construirlo en físico. Se presenta el diseño de la base de los paneles en el programa en la **Figura 2-1**.

Figura 2-1: Módulo base para paneles en SolidWorks.



Fuente: Autores.

Para la base del laboratorio se optó por desarrollar una base tipo caja con un tablero vertical que permita a los interesados observar sin dificultad las prácticas desarrolladas. Se diseñó cerrado en su parte inferior con una puerta frontal para guardar algunos de los componentes desmontables, como los cables para las conexiones y las cargas sugeridas. El diseño puede observarse en la **Figura 2-2**

Figura 2-2: Base metálica en SolidWorks.



Fuente: Autores.

La base del laboratorio también fue provista con rodachines para movilizar el banco de forma fácil y segura en los momentos que fueran necesarios o que el docente encargado lo considerara conveniente. La **Figura 2-3** muestra el boceto del laboratorio en el programa SolidWorks.

Figura 2-3: Diseño del laboratorio en SolidWorks.



Fuente: Autores.

2.3 Construcción

2.3.1 Estructura

La estructura se desarrolló teniendo en cuenta el diseño establecido con materiales que garantizaran la durabilidad del laboratorio y teniendo en cuenta los futuros

mantenimientos a realizar. La estructura que sostiene los paneles se construyó en metal para hacerla más durable, se proveyó de rodachines con frenos para que pudiera ser transportado de forma fácil y segura pero que también pudiera mantenerse en un sitio sin ser impelida por el viento. A partir de la **Figura 2-4** se muestran imágenes del proceso de construcción

Figura 2-4: Módulo base para los paneles.



Fuente: Autores.

Al módulo que sostiene los paneles también se le trató con anticorrosivo y pintura para evitar el deterioro de sus partes por oxidación o corrosión debido a la alta salinidad de la zona. En la **Figura 2-5** puede verse la estructura tratada.

Figura 2-5: Estructura de paneles pintada.



Fuente: Autores.

La estructura del laboratorio se construyó en metal, con el objetivo de hacerla durable y resistente. Se le agregaron rodachines, como puede apreciarse en la **Figura 2-6** para facilitar su transportabilidad de forma sencilla y sobre todo segura.

Figura 2-6: Estructura del laboratorio.



Fuente: Autores.

Se trató esta estructura con anticorrosivo y pintura para evitar el deterioro por óxido, el resultado puede apreciarse en la **Figura 2-7**.

Figura 2-7: Estructura tratada con anticorrosivo y pintura.



Fuente: Autores.

Se decidió usar PVC para las paredes del laboratorio y la puerta. Para permitir que el laboratorio fuera más liviano y fácil de transportar. Su imagen mejoró notablemente de esta forma, como puede apreciarse en la **Figura 2-8**.

Figura 2-8: Laboratorio con paredes de PVC.



Fuente: Autores.

2.3.2 Selección de componentes

Paneles solares: Los paneles escogidos para el desarrollo de este proyecto fueron paneles de 100 W a 18 V. Tal configuración permitirá apreciar mejor la diferencia entre el controlador de carga PWM y el MPPT. Las características del panel escogido se muestran a continuación en la **Figura 2-9:**

Figura 2-9: Características del panel seleccionado para el laboratorio.

	Modelo del panel	100-18-P
	Vida útil	25 años
	Composición	Policristalino
	Potencia máxima nominal (Pmax)	100 W
	Voltaje a potencia máxima (Vmp)	18.50V
	Corriente a máxima potencia (Imp)	5.43A
	Voltaje de corto circuito (Voc)	22.14V
	Corriente de corto circuito (Isc)	5.78A
Disponible en: https://es.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/5794		

Fuente: Ficha técnica panel solar 100-18-P.

De las características especificadas en la **figura 2-9** se obtienen estos datos:

Intensidad en máxima potencia en paralelo:

$$I_{mp_p} = 5.43 A * 2$$

$$I_{mp_p} = 10.86 A$$

Intensidad en corto circuito en paralelo:

$$I_{sc_p} = 5.78 * 2$$

$$I_{sc_p} = 11.56 A$$

Tomando un factor de seguridad del 10% para proteger al regulador de sobrecargas se tiene que:

$$I_{sc_{max}} = I_{sc_p} * FS$$

$$I_{sc_{max}} = 11.56 A * 1.1$$

$$I_{sc_{max}} = 12.72 A$$

Voltaje en máxima potencia conectado en serie:

$$V_{mp_s} = 18.5 V * 2$$

$$V_{mp_s} = 37 V$$

Reguladores de carga: Con el objetivo de que los estudiantes puedan medir la diferencia entre los reguladores de carga PWM y MPPT se tomó la decisión de comprar uno de cada uno con voltajes de entrada 12V / 24V, esto permitirá que se hagan las pruebas en serie o paralelo. A continuación, se muestran los reguladores escogidos. La **Figura 2-10** muestra el regulador MPPT escogido.

Figura 2-10: Regulador MPPT.

	Corriente nominal	40 ^a
	Tensión del sistema	12V / 24V
	Máximo voltaje de entrada	50V
	Potencia Máxima a 12V	480W
	Potencia Máxima a 24V	960W
	Protecciones	Sobre carga
		Cortocircuito
Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-595991071-controlador-regulador-de-carga-panel-solar-usb-mppt-40-amp-_JM		

Fuente: Ficha técnica de regulador de carga MPPT 12V/24V.

En la **Figura 2-10** se puede observar que los parámetros de funcionalidad del regulador MPPT está dentro del rango de seguridad y permiten los cambios en las conexiones que permitirán a los estudiantes evaluar las características de cada configuración, sea en serie o en paralelo.

En la **Figura 2-11** se muestra el regulador PWM escogido para el proyecto.

Figura 2-11: Regulador PWM.

	Corriente nominal	30 ^a
	Tensión del sistema	12V/24V
	Máximo voltaje de entrada	50V
	Protecciones	Sobre carga Cortocircuito
Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-613497841-control-regulador-carga-panel-solar-30a-12v24v-pantalla-_JM		

Fuente: Ficha técnica de regulador de carga PWM 12V/24V.

Baterías: Según el cálculo de capacidad útil de las baterías para el funcionamiento del laboratorio era necesario usar 2 baterías con características mínimas de 12V y 32.5Ah. Se adquirieron 2 baterías de 12V y 35Ah, que es una capacidad muy cercana superior a la mínima requerida por el banco. Las baterías escogidas se presentan a continuación en la

Figura 2-12:**Figura 2-12:** Batería seleccionada para el laboratorio.

	Voltaje nominal	12V
	Capacidad nominal (índice de 10 horas)	35Ah
	Resistencia interna Carga completa (25°C)	Aproximadamente 10mΩ
	Temperatura nominal de funcionamiento	25°C ± 3 °C (77 °F ± 5°F)
Disponible en: https://newline.com.co/producto/bateria-netion-agm-12v35ah/?attachment_id=2560&download_file=05ipi09km32rb		

Fuente: Ficha técnica de batería Netion AGM 12V35AH.

Inversor: El inversor seleccionado tiene una capacidad superior a la capacidad mínima establecida en los cálculos de dimensionamiento realizados. Esto contribuye a la flexibilidad del laboratorio permitiendo un posible aumento en la capacidad neta del mismo para realizar pruebas específicas en los momentos en que el docente encargado lo considere necesario teniendo en cuenta que al ser un inversor de onda modificada no es conveniente conectar cargas inductivas. Las características del mismo se muestran en la **Figura 2-13**

Figura 2-13: Inversor seleccionado.

	Tipo de onda de salida	Modificada
	Potencia de salida	500 W
	Potencia pico	1000 W
	Rango de voltaje entrada	10 – 15 VDC / 20 – 30 VDC
	Rango de voltaje salida	110 +/- 10% VAC
	Rango de frecuencia salida	60 +/- 5 Hz
	Alarma de baja tensión	10.5 +/- 0,3 VDC / 21 +/- 0,5 VDC
	Apagado por batería baja	10 +/- 0,3 VDC / 20.3 +/- 0,5 VDC
	Apagado por batería cargada	15 +/- 1 VDC / 30 +/- 2 VDC
	Temperatura de trabajo	0 – 40 °C
	Refrigeración	Por ventilador
	Disponible en: https://ingenieriasustentable.com/producto/inversor-500w-24vdc-110-vac-onda-modificada/	

Fuente: Ficha técnica de inversor 500w 24vdc – 110 vac onda modificada.

Componentes de medición y cargas. Con el objetivo de hacer el laboratorio funcional en todo momento se tomó la decisión de incluir dispositivos de medición que permitieran la lectura de datos como la corriente que fluye por cierta parte del circuito o el voltaje en algunos elementos. Se instalaron también bombillos como cargas para evaluar la generación del sistema en corriente continua y alterna. La **Figura 2-14** muestra el dispositivo de medición usado en el proyecto, mientras que las **Figuras 2-15** y **2-16** representan las cargas utilizadas en el laboratorio.

Figura 2-14: Multímetro digital.

	Voltaje DC	400mV/4V/40V/400V/1000V
	Voltaje AC	4V/40V/400V/750V
	Corriente DC	40uA/400uA/4mA/40mA/400mA/10 ^a
	Corriente AC	40mA/400mA/10 ^a
	Resistencia	400Ω/4kΩ/40kΩ/400kΩ/4MΩ/200MΩ
<p>Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-540267061-multimetro-digital-uni-t-ut39a-multiuso-transistores-buzzer-_JM</p>		

Fuente: Ficha técnica de Multímetro Digital Uni-t Ut39a+.

Figura 2-15: Carga de corriente directa.

	Voltaje nominal	12 - 48V
	Voltaje máximo	50V
	Potencia nominal	9W
	Luz	6400K (Blanca)
	Vida útil	30.000 horas
<p>Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-608963230-bombillo-led-luz-blanca-12-24v-9w-rce27-_JM</p>		

Fuente: Ficha técnica de bombillo 9W DC 12V-48V.

Figura 2-16: Carga de corriente alterna.

	Voltaje nominal	100 - 240V
	Frecuencia	50 – 60 Hz
	Potencia nominal	9W
	Luz	6500K (Blanca)
	Vida útil	15.000 horas
	Tipo de rosca	E27
<p>Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-515263294-bombillo-led-9w-luz-blanca-_JM</p>		

Fuente: Ficha técnica de bombillo 9W AC 100-240V.

2.4 Elaboración de documentos

El Manual de operación y mantenimiento y las guías de laboratorios se agregan como anexos al presente documento.

2.4.1 Manual de operación y mantenimiento

Con el objetivo de prolongar la vida útil del laboratorio y garantizar prácticas seguras para la comunidad educativa que interactúe con él, se diseñó un Manual de operación y mantenimiento. En este se describe el laboratorio, se definen sus partes y accesorios y se recomiendan las actividades y materiales necesarias para cumplir con el mantenimiento del mismo de forma segura y eficiente.

Contiene los siguientes aspectos:

- Descripción
- Objetivos
- Alcance
- Precauciones de uso
- Definiciones

- Operación
- Gestión
- Seguridad
- Materiales
- Ejecución
- Lista de chequeo de mantenimiento.

Seguir las sugerencias allí descritas permitirá que el laboratorio se encuentre siempre en óptimas condiciones al momento de usarlo.

2.4.2 Guías sugeridas para prácticas en el laboratorio didáctico

Como fue explicado en 1.1.1, en universidades colombianas se han dedicado pasantías y proyectos de grado a la elaboración de guías para prácticas experimentales en programas de ingeniería (Herrera, 2008), (Heno, 2016), (Barragán y Trujillo, 2018), (Ciendúa, Rivera y Salamanca, 2019). Como resultados de estas investigaciones, se hicieron consideraciones previas de distinta índole y se generaron guías prácticas para desarrollar ensayos en distintas materias.

En los proyectos de grado mencionados, hay consenso acerca de que las guías para prácticas de laboratorio deben contener los elementos: título, objetivos, introducción, aspectos teóricos fundamentales, descripción de los materiales y equipos a utilizar, procedimiento con recomendaciones y bibliografía.

A partir de esas consideraciones, en el presente proyecto se desarrollaron guías de laboratorio que detallan el procedimiento a seguir durante las prácticas. Son sugerencias de los autores y no representan una camisa de fuerza para el tutor a cargo de las clases, quien tiene la potestad de añadir una nueva guía, modificar algunas actividades o incluso reemplazar una o varias de las guías sugeridas si, basado en su experiencia profesional lo

considera necesario. Sin embargo, el uso de las guías de laboratorio es obligatorio para operar el equipo de manera segura, y el tutor debe asegurarse de que los estudiantes se ciñan a las indicaciones descritas en las mismas.

Las cuatro (4) guías propuestas constan de las siguientes partes:

- Título
- Objetivos
- Metodología
- Logros previstos
- Definiciones
- Ejercicios a desarrollar
- Materiales
- Procedimiento de ensayo
- Bibliografía

Con el objetivo de brindar un procedimiento más exacto sobre el desarrollo de las guías se optó por crear video tutoriales que mostraran el paso a paso de las mismas. Estos explican de forma sencilla y breve el procedimiento para desarrollar las guías y lo que debe esperarse al llevarlo a cabo. Con el fin de poder acceder a estos tutoriales directamente desde este documento se desarrollaron códigos de acceso rápido o códigos QR que se muestran a continuación en las **Figuras 2-17, Figura 2-18, Figura 2-19 y Figura 2-20**

Figura 2-17: Código de acceso rápido al tutorial de la guía de laboratorio #1



Fuente: Autores

Figura 2-18: Código de acceso rápido al tutorial de la guía de laboratorio #2



Fuente: Autores

Figura 2-19: Código de acceso rápido al tutorial de la práctica básica #1



Fuente: Autores

Figura 2-20: Código de acceso rápido al tutorial de la práctica básica #2



Fuente: Autores

2.5 Implementación y pruebas

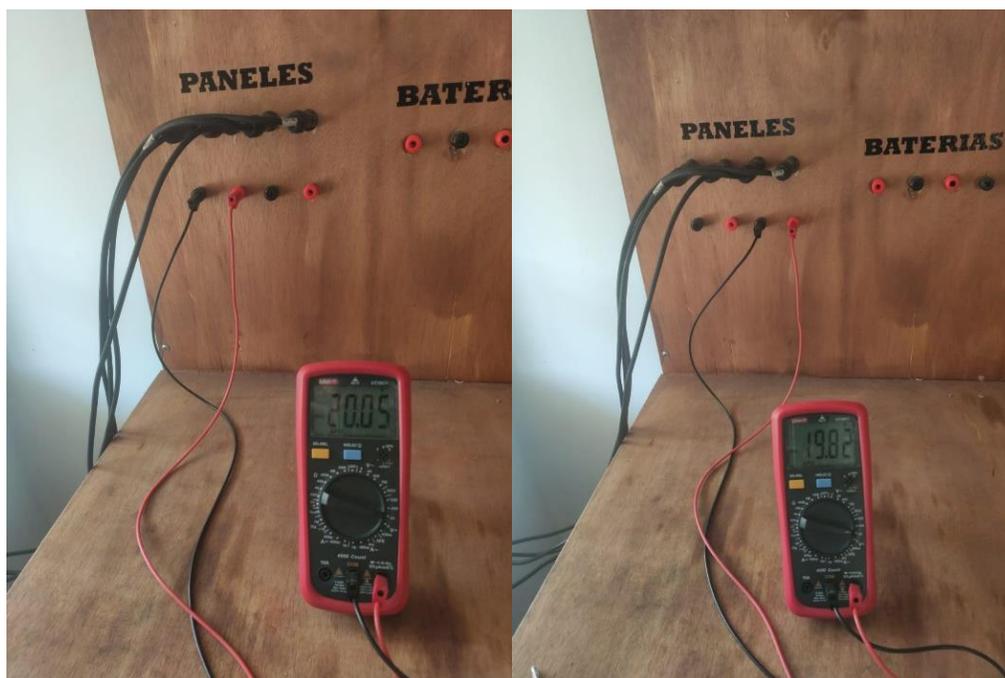
Con el objetivo de detectar, documentar y reparar posibles fallas presentes en el banco se tomó la decisión de realizar pruebas de funcionamiento.

Inicialmente se realizaron pruebas en vacío, comprobando continuidad entre los bornes. Estas pruebas fueron exitosas, pues permitieron detectar fallas de conexión y

corregirlas antes de pasar a las pruebas con carga. Las pruebas con carga demostraron la funcionalidad del banco, se describen a continuación:

Prueba a paneles. A los paneles se le hicieron pruebas de voltaje en circuito abierto (Voc) de manera individual. La **Figura 2-21** muestra los resultados de cada panel durante la prueba individual de Voc.

Figura 2-21: Prueba Voc paneles



Fuente: Autores.

Los resultados de estas pruebas fueron comparados con las especificaciones técnicas de los paneles y tabulados en la **Tabla 2**, lo cual permitió corroborar el correcto funcionamiento de los paneles. De estos resultados se pudo comprobar que el voltaje entregado por lo paneles es cercano al de su Ficha Técnica y que es óptimo para realizar las pruebas. Los datos y su comparativa se muestran a continuación.

Tabla 2: Pruebas de Voc en los paneles

Panel	Voc según ficha técnica	Voc según prueba
1	22.14 V	20.05 V
2	22.14 V	19.82 V

Además de estas pruebas individuales se realizaron pruebas Voc en serie y paralelo y fueron documentado los resultados.

La **Figura 2-22** muestra los resultados de la prueba en serie, mientras que la **Figura 2-23** registra los resultados de la prueba con los paneles conectados en paralelo.

Figura 2-22: Resultado de prueba Voc en serie

Fuente: Autores.

Figura 2-23: Resultado de prueba Voc en paralelo.

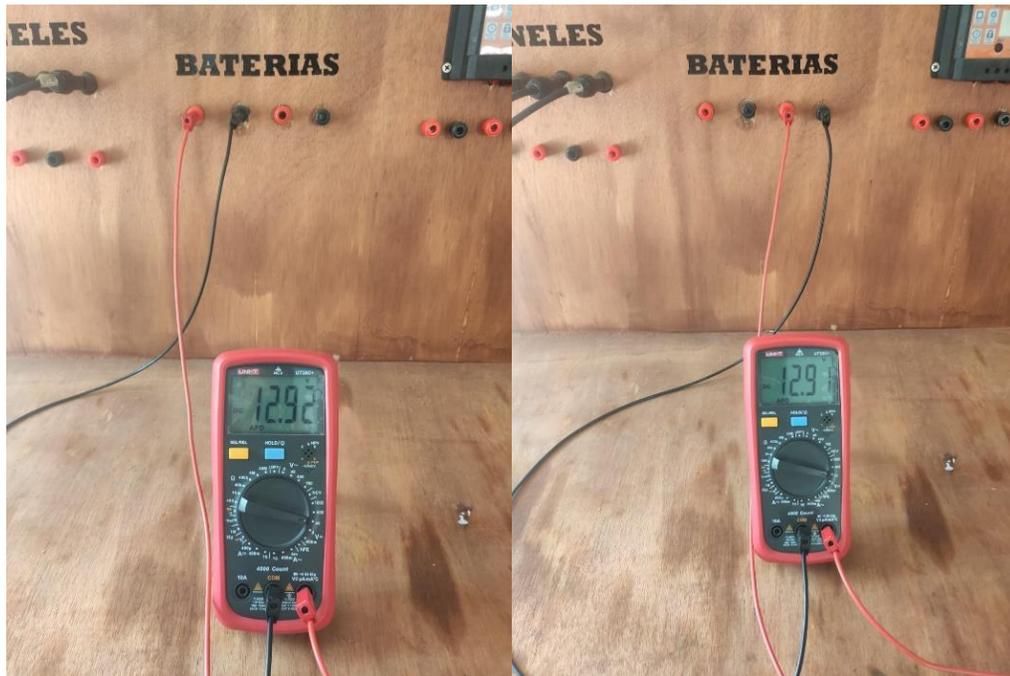


Fuente: Autores

La configuración de los paneles brinda según su ficha técnica un voltaje de circuito abierto en paralelo de 44.28 V y el resultado de la prueba fue de 39.5 V. Este resultado garantiza que los controladores de carga puedan operar en condiciones normales de trabajo, pues tienen capacidad de soportar hasta 48 V.

Prueba a baterías. El siguiente equipo al que se le hicieron pruebas fue a las baterías. Están configuradas para entregar 12 V y 35Ah. Las pruebas Voc arrojaron un buen resultado, mostrando que las baterías estaban cargadas y listas para usarse. La **Figura 2-24** muestra los resultados que arrojaron ambas baterías.

Figura 2-24: Prueba de Voc a las baterías.



Fuente: Autores.

La siguiente prueba consistió en analizar las conexiones en serie y paralelo. El resultado de estas pruebas también fue el esperado garantizando que los estudiantes pudieran variar las conexiones y analizar los resultados.

Las **Figuras 2-25** y **2-26** muestran los resultados obtenidos en las pruebas de conexiones serie y paralelo de las baterías.

Figura 2-25: prueba de Voc en las baterías conectadas en serie.



Fuente: Autores.

Figura 2-26: Prueba de Voc en las baterías conectadas en paralelo.



Fuente: Autores.

Controladores de carga. Una vez confirmado el correcto funcionamiento de los paneles y las baterías, se procedió a comprobar el correcto funcionamiento de los

controladores. El procedimiento empezó por medio de energizar los controladores conectando una batería a cada controlador. Esto es importante siempre que vayan a utilizarse estos dispositivos, pues establece la configuración de carga que se empleará.

Una vez energizados se pudo observar que los controladores funcionaban de manera correcta y controlaban la velocidad de descarga de las baterías (**Figura 2-27**), por lo que se procedió a probar la configuración de carga conectando los paneles a los controladores y medir amperaje para poder determinar la potencia de carga. Los resultados de estas pruebas se muestran en las **Figuras 2-28** y **2-29**, así como en la Tabla 3.

Figura 2-27: Controladores conectados a las baterías.



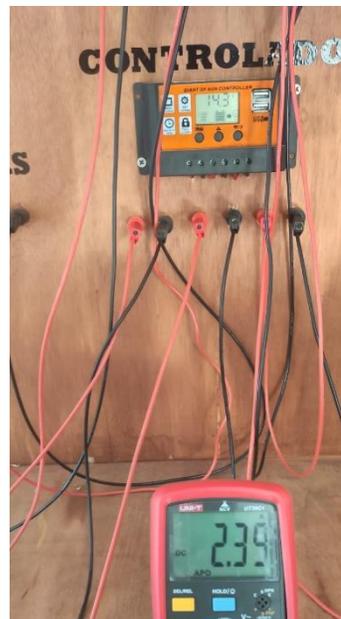
Fuente: Autores.

Figura 2-28: Amperaje de controlador PWM en carga.



Fuente: Autores.

Figura 2-29: Amperaje de controlador MPPT en plena carga.



Fuente: Autores.

En la **Tabla 3** se observa claramente la diferencia entre los controladores PWM y MPPT, lo cual permite al estudiante conocer los beneficios técnicos de escoger uno por encima de otro en una instalación.

Tabla 3: Potencia de carga se los controladores.

Controlador	Amperaje	Voltaje	Potencia de carga
PWM	1.00 A	13.7 V	13.7 W
MPPT	2.39 A	14.3 V	34.18 W

Inversor. La prueba de funcionamiento del inversor tuvo tres etapas. La primera, como se muestra en la **Figura 2-30**, consistió en energizar el inversor por su parte de corriente directa y percatarse de que se encendiera el led indicador. Una vez realizada esta comprobación se accionó el interruptor de salida alterna y se revisó que se encendieran el segundo led indicador y la ventiladora del dispositivo (**Figura 2-31**).

Después de establecer que el componente no presentaba ninguna falla notoria se procedió a cerrar el interruptor para evitar cortos circuitos y conectar los cables a la salida AC del inversor, para confirmar que estuviera dando el voltaje correcto. Una vez confirmado esto se conectó una carga AC para probar el correcto funcionamiento de todos los componentes en conjunto (**Figura 2-32**), también se conectó una carga en DC y se midieron voltajes y corrientes de las cargas para estimar su potencia (**Figuras 2-33, 2-34, 2-35 y Tabla 4**).

Figura 2-30: Inversor energizado por la parte DC.



Fuente: Autores.

Figura 2-31: Inversor energizado con interruptor de AC encendido.



Fuente: Autores.

Figura 2-32: Laboratorio alimentando una carga AC.



Fuente: Autores.

Figura 2-33: Laboratorio alimentando una carga DC.



Fuente: Autores.

Figura 2-34: Amperaje de la carga AC.



Fuente: Autores.

Figura 2-35: Amperaje de la carga DC.



Fuente: Autores.

Tabla 4: Potencia de cargas AC y DC.

Tipo de carga	Voltaje	Corriente	Potencia
AC	126 V	0.12 A	15.12 W
DC	13.25 V	0.54 A	7.16 W

Después de comprobado el correcto funcionamiento de cada elemento del banco se procedió a la implementación. Esta se realizó desarrollando cuatro de las guías sugeridas en este mismo documento.

Fue comprobada la utilidad del laboratorio y su valor como recurso didáctico. Este proceso de implementación quedó grabado en video y se desarrollaron códigos de acceso rápido (QR) para acceder a ellos. Estos códigos están en las **Figuras 2-17 a 2-20** del presente documento.

3. Conclusiones y Recomendaciones

3.1 Conclusiones

Se logró diseñar e implementar un laboratorio para el estudio práctico del funcionamiento de sistemas solares fotovoltaicos siguiendo una secuencia de procedimientos que se definen a continuación:

- Se dimensionaron las características de los distintos componentes y se seleccionaron para asegurar una operación segura de la simulación de un sistema de energía solar fotovoltaico aislado teniendo en cuenta sus posibles variantes.
- Se diseñó una estructura resistente en materiales durables y aislantes que permiten garantizar una operación segura del laboratorio de sistemas solares fotovoltaico.
- Fue construido el laboratorio, adaptando cada componente a la estructura permitiendo una correcta visibilidad para todos los involucrados en las clases, permitiendo realizar prácticas interactivas de manera cómoda y segura.
- Se desarrollaron documentos con guías de acción que permiten un correcto mantenimiento (manual de operación y mantenimiento) y operación (guías de laboratorio) del laboratorio, que permiten el desarrollo de prácticas académicas más completas.
- Fue implementado el laboratorio, realizando pruebas que corroboraron el correcto funcionamiento del mismo, su inestimable valor pedagógico en el aula de clases para los estudiantes de la Universidad Antonio Nariño y el gran apoyo didáctico que significa para los docentes de la institución

3.2 Recomendaciones

- El laboratorio puede ser útil para crear un curso especial de instalaciones solares fotovoltaicas en la Universidad Antonio Nariño.
- Es posible motorizar el módulo de paneles y aprovechar al máximo la irradiancia solar.

A. Anexo: Manual de operación y mantenimiento

**MANUAL DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LABORATORIO DE
SISTEMAS SOLARES FOTOVOLTAICOS**

Tabla de contenido del manual de operación y mantenimiento

	Pág.
Descripción.....	79
Objetivos.....	79
Alcance.....	79
Precauciones de uso.....	79
Definiciones.....	80
Operación del laboratorio.....	84
Gestión de mantenimiento.....	84
Seguridad en el mantenimiento.....	84
Materiales para el mantenimiento.....	85
Ejecución del mantenimiento.....	88
Lista de chequeo de mantenimiento.....	90

DESCRIPCIÓN

El laboratorio de sistemas solares fotovoltaicos ha sido desarrollado teniendo en cuenta la necesidad de un elemento con el cual se puedan en un solo sitio, realizar las prácticas pertinentes con la facilidad de que todo está integrado en un solo equipo.

El laboratorio consta de un módulo de paneles solares abatibles y un banco de laboratorio donde se encuentran la totalidad de componentes.

Ambos componentes son diseñados en estructura metálica tipo cajeta resistente y a su vez liviano, cuentan con rodachines para su fácil movilidad y frenos de seguridad en los rodachines delanteros de cada módulo.

OBJETIVOS

El objetivo principal del manual de operación y mantenimiento del laboratorio de sistemas solares fotovoltaicos, es garantizar la disponibilidad de los elementos que componen el laboratorio, para el desarrollo de las prácticas y de los proyectos de investigación y así lograr que los estudiantes adquieran las competencias definidas.

ALCANCE

El presente documento define el manual de operación y mantenimiento de los elementos del laboratorio de la sede de la Universidad Antonio Nariño en Riohacha el cual debe integrarse a los planes de mantenimiento actuales.

PRECAUCIONES DE USO

Este equipo ha sido probado por parte de los diseñadores y completamente seguro, respetando la correcta observación de las precauciones de seguridad:

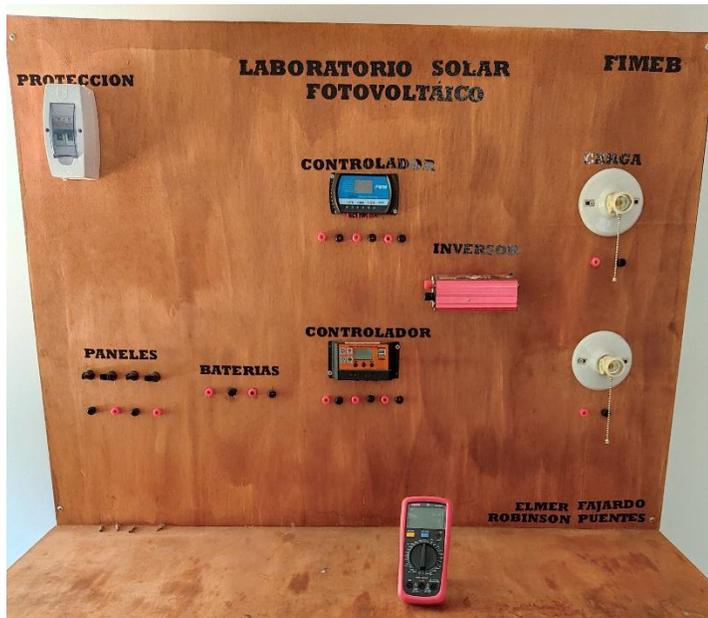
- No utilice este equipo de forma distinta a las especificadas en este manual, el uso incorrecto del mismo puede resultar en lesiones graves al personal.
- No intente operar este equipo con las manos mojadas.

- Asegúrese que los rodachines están asegurados antes de empezar cualquier actividad.
- No modificar el equipo o cualquiera de sus partes.
- Utilizar los elementos de seguridad pertinentes a la hora de elaborar los mantenimientos.

El inversor del laboratorio genera un voltaje 110V a 60 Hz, lo cual puede causar descargas eléctricas, no encienda el inversor si las salidas del mismo están abiertas o colgando.

DEFINICIONES

- **Banco de laboratorio:** Es la estructura diseñada con un tablero que expone los elementos al alcance de la vista de los estudiantes.



Módulo de paneles: Es el módulo abatible que contiene los paneles solares.



Inversor 12/24V a 110V con 500Watts: Es un dispositivo que convierte la energía eléctrica DC almacenada en las baterías a energía eléctrica AC a 110 voltios, con una potencia de 500 vatios, para poder conectar cualquier tipo de electrodoméstico.



- **Batería:** Dispositivo con la capacidad de almacenar la energía eléctrica obtenida por los paneles solares, por medio de un efecto químico eléctrico, esta energía es DC.



- **Regulador MPPT y PWM:** Dispositivo encargado de controlar la forma en la que la energía eléctrica generada por los paneles solares ingresa a las baterías.



- **Bombillo DC:** Dispositivo encargado de convertir la energía eléctrica DC en energía lumínica.



- **Bombillo AC:** Dispositivo encargado de convertir la energía eléctrica AC en energía lumínica.



Multímetro: Herramienta suministrada para realizar las mediciones pertinentes en el laboratorio solar.



Líneas de conexión: son aquellos elementos de color rojo y negro que sirven para realizar las conexiones entre nodos durante las prácticas.



- **Avería:** Daño, rotura o fallo que impide o perjudica el funcionamiento del mecanismo de una máquina, una red de distribución u otra cosa.
- **Criticidad:** La criticidad es la condición o el estado de crítico.
- **EPP.** Elemento de protección personal.
- **Fallos:** Son los daños de los componentes que impiden el normal funcionamiento de los mismos.
- **Mantenimiento Correctivo:** Es el mantenimiento realizado para hacer que el equipo retorne a su función estándar luego de un fallo.

OPERACIÓN DEL LABORATORIO

Para la buena operación del laboratorio es necesario ceñirse a las guías del laboratorio diseñadas para el buen funcionamiento del mismo.

GESTIÓN DE MANTENIMIENTO

Dentro de la gestión de mantenimiento, el director de mantenimiento o responsable de los activos de la universidad, debe almacenar toda la documentación pertinente con respecto al laboratorio, componentes y accesorios. Se debe crear y almacenar un formato para revisión periódica del laboratorio que corresponde a la ejecución del plan de mantenimiento como tal.

- Reemplazo de elementos: dentro del plan de mantenimiento es necesario comprender cuando es necesario reemplazar elementos por:
 - Reemplazo por fallas: esto sucede cuando se evidencia mal funcionamiento en el elemento a raíz de una falla previamente observada.
 - Reemplazo planificado: esto sucede cuando en las revisiones previas se evidencia un deterioro leve, que puede llegar a ser un daño mayor y se cambia para evitar comprometer otros componentes.

SEGURIDAD EN EL MANTENIMIENTO

Todas las actividades de mantenimiento representan riesgos. Para la ejecución del plan de mantenimiento es necesario portar con los EPP adecuados, los cuales son:

- Botas de seguridad con puntera, éstas evitaran en caso de un mantenimiento a las baterías, sufrir de alguna lesión por las mismas sobre los pies.

- Guantes multiflex poliéster/nitrilo, estos para evitar cortes, rasguños y golpes a la hora de manipular las baterías y/o los paneles solares.

MATERIALES PARA EL MANTENIMIENTO

- Multímetro.



- Pinza volti-amperimétrica.



- Cepillo de acero o limpia bornes.



- Atomizador con agua o solución comercial limpiavidrios.



- Paños limpios.



- Plumilla limpiavidrios.



- Llave de boca 10mm.



- Llave de boca 11mm



- Llave de boca 13mm.



- Pinza de punta.



- Pinza tipo caimán.



- Destornillador tipo estrella.



- Destornillador tipo paleta.



EJECUCIÓN DEL MANTENIMIENTO

Este mantenimiento se recomienda que sea ejecutado una vez cada dos meses y se cumpla de acuerdo a este orden:

1. Módulo de paneles solares:
 - Se debe realizar limpieza del cristal de los paneles con agua o un limpiavidrios comercial.
 - Se deben revisar los pivotes de la estructura, que se encuentren en correcto estado.
 - Se debe revisar el estado de las ruedas de la base, con las respectivas tuercas y los frenos.
 - Se deben revisar cada una de las 4 líneas de cables, que salen desde el módulo de paneles a conectar en el banco del laboratorio, que no tengan cortes, pelones o grietas.
 - Se deben revisar los conectores Mc4 de los paneles solares.
2. Banco de laboratorio:
 - Se debe revisar el estado de las ruedas de la base, con las respectivas tuercas y los frenos.

- Se debe revisar el estado de la puerta y el porta candado.
- Revisar el estado de los paneles laterales, tablero y panel trasero.

3. Baterías:

- Se debe revisar el estado de los bornes de las baterías, que estén correctamente ajustados y no tengan sulfatos.

- Con el multímetro se debe comprobar el estado de carga de las baterías, entre 12,48 VDC y 13,4VDC.

4. Reguladores:

- La inspección del regulador se basa en su comportamiento de operación, que no se caliente, que no expela ningún olor y que el estado de carga sea óptimo.

5. Inversor:

- La inspección del inversor va en el siguiente orden:

- i.** Revisión de cables y conexiones, que no tengan sulfato, que las conexiones estén ajustadas, que no tengan oxido.

- ii.** Revisión de fusibles, medir la continuidad en el fusible de protección y observar que no tenga señales de recalentamiento.

- iii.** Inspección visual y olfativa, revisar que en funcionamiento el inversor no expela ninguna clase de olor, que la temperatura de operación sea regulada y que el extractor funcione correctamente.

Este plan de mantenimiento debe añadirse y ajustarse al plan actual de mantenimiento que lleva la Universidad Antonio Nariño sede Riohacha con respecto a sus activos.

LISTA DE CHEQUEO DE MANTENIMIENTO

Banco de laboratorio					
ELEMENTO	ESTADO		OBSERVACIONES		VoBo
	BUENO	MALO			
Ruedas de carga					
Puerta					
Porta candado					
Paneles laterales					
Paneles traseros					
Tablero					
Plafoneras					
Interruptores termomagnéticos					
Conectores					
Baterías					
Bornes de baterías					
Conexiones de baterías					
Voltaje de baterías					
Regulador PWM					
Regulador MPPT					
Inversor 12Vdc/110Ac					
Inversor 24Vdc/110Vac					
Módulo de paneles solares					
ELEMENTO	ESTADO		OBSERVACIONES		VoBo
	BUENO	MALO			
Panel #1					
Panel #2					
Eje pivote					
Cables panel #1					
Cables panel #2					
conectores Mc4					
Mariposa					
Ruedas de carga					

Hora de entrada: _____

Hora de salida: _____

Fecha: _____

Responsable: _____

Nota: El tutor es responsable de la utilización de este laboratorio, debe entregarlo limpio, organizado y operativo cada vez que sea utilizado. Este formato se debe diligenciar cada vez que se utilice el equipo para las prácticas. Este documento es de manejo libre y puede ser consultado para verificar algún inconveniente.

B. Anexo: Guías sugeridas para prácticas en el laboratorio didáctico

GUÍA DE LABORATORIO #1
CÁLCULOS DE IRRADIANCIA Y ÁNGULO IDEAL DE INSTALACIÓN
DE PANELES

OBJETIVOS

- Afianzar los conocimientos adquiridos a través de la teoría.
 - Interpretar las fórmulas aplicables para el aprovechamiento de la franja solar.
 - Reconocer la importancia de los cálculos al momento de realizar instalaciones fotovoltaicas.
- Dependiendo del día y la ubicación geográfica, el estudiante debe calcular la inclinación óptima para la instalación del panel solar.

METODOLOGÍA

En esta guía los estudiantes:

- Leen los conceptos, resuelven los ejercicios planteados y los llevan a la práctica en el módulo de paneles.
- Plantean sus inquietudes al tutor durante la práctica.
- Reciben orientaciones del tutor de manera presencial.

LOGROS

Un estudiante alcanzará sus logros si:

- Interpreta de manera correcta las tablas de datos del mapa solar, suministrado por el IDEAM.
- Realiza los cálculos correctos sobre la orientación del panel, inclinación y mejor ángulo de aprovechamiento para hora, día, mes o año.

DEFINICIONES

- **Cenit:** punto más alto de intersección de la esfera celeste con una línea normal (a 90 grados) respecto a una superficie horizontal cualquiera en La Tierra.

- **Ángulo Cenital (θ_z):** ángulo que se forma entre el rayo solar y una línea vertical normal a una superficie que define el cenit de la superficie.

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

- **Radiación directa (beam radiation):** radiación recibida desde el Sol sin ser dispersada ni desviada por la atmósfera.

- **Radiación difusa (diffuse radiation):** radiación recibida desde el Sol después que la dirección de la misma ha sido desviada y dispersada por la atmósfera.

- **Radiación total o global:** suma de la radiación directa más la radiación difusa en una superficie.

- **Irradiancia (W/m^2):** índice o razón de la potencia radiada sobre una unidad de área de superficie. Se identifica con el símbolo G con un subíndice: para denotar la irradiancia directa G_b , difusa G_d

- **Irradiación (J/m^2):** la razón de energía radiada sobre una unidad de superficie.

- **Insolación (J/m^2):** término aplicado a la energía de irradiación. Se utilizan los símbolos: H para la insolación por días, I para la insolación por hora. Son importantes los subíndices: el número cero (0) para hacer referencia a la irradiancia o insolación en la parte superior de la atmósfera, la letra b para referirse a la radiación directa y la letra d para referirse a la radiación difusa.

G_0 – irradiancia total en la parte superior de la atmósfera

G_b – irradiancia directa en la superficie de La Tierra

H_b – insolación diaria directa en la superficie de La Tierra

- Radiosidad: la razón o índice de la energía radiante que abandona una unidad de superficie que puede ser por la combinación de emisión, reflexión o transmitancia.
- Tiempo solar: medida del **tiempo** fundamentada en el movimiento aparente del Sol sobre el horizonte del lugar. Toma como origen el instante en el cual el Sol pasa por el meridiano, que es su punto más alto en el cielo, denominado mediodía.

- Latitud (ϕ): localización angular Norte o Sur respecto al ecuador

$$-90 \leq \phi \leq 90$$

- Declinación (δ): posición angular del Sol cuando está al mediodía (sobre el meridiano local) respecto al plano del ecuador.

$$-23,45 \leq \delta \leq 23,45$$

- Inclinación (pendiente) (β): ángulo que se forma entre un plano de una superficie cualquiera y un plano horizontal.

$$0 \leq \beta \leq 180$$

- Ángulo azimutal de superficie (γ): ángulo en el plano horizontal que se forma entre un lugar en un meridiano específico respecto al punto sur que es la referencia cero, valor negativo al oriente (Este) y valor positivo al occidente (Oeste).

$$-180 \leq \gamma \leq 180$$

- Ángulo de incidencia (θ): ángulo que se forma entre la radiación directa sobre una superficie y la línea normal a dicha superficie.

- Ángulo horario (ω): desplazamiento angular del Sol de Este a Oeste en el meridiano local, debido a la rotación de La Tierra respecto a su eje y de 15° por cada hora. Por la mañana se considera negativo -15° y por la tarde positivo $+15^\circ$.
- El sol: Esfera de materia gaseosa muy caliente, diámetro de $1\,390\,000\text{ km} = 1,39 \times 10^9\text{ m}$, a una distancia media de $150\,000\,000\text{ km}$ de La Tierra. Rota sobre su propio eje aproximadamente 1 vez cada 4 semanas.
- Temperatura efectiva como cuerpo negro: $5777\text{ k} = 5\,503,85^\circ\text{C}$. Se estima que temperatura en región interior está entre 8×10^6 y 40×10^6 . Principales gases en reacción dentro del núcleo: helio con hidrógeno. Masa del Sol: aproximadamente $2 \times 10^{30}\text{ kg}$.
- Energía solar: La energía llega a La Tierra desde el Sol en dos formas: radiación o luz solar. Para el estudio de las propiedades de la luz solar se necesita considerarla y entenderla desde dos puntos de vista: como una onda electromagnética y como un flujo de fotones. El primer punto de vista es esencial para las aplicaciones térmicas solares, con sus superficies reflectantes o absorbedoras. El segundo punto de vista es esencial para considerar el funcionamiento de las celdas solares, las tecnologías fotovoltaicas y fotoquímicas.
- Constante solar: La constante solar (GSC) es la energía del Sol por unidad de tiempo ($\text{J/s} = \text{W}$), recibida en una unidad de área (m^2) de la superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación solar a una distancia media de La Tierra en la parte superior de la atmósfera. El valor aceptado actualmente es: $G_{SC} = 1367 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
- Variación de la radiación solar: La radiación que emite el Sol por su naturaleza es variable ($<1,5\%$), está relacionado con las manchas solares. Debido a la variación de la distancia del Sol hasta La Tierra, en otras palabras, para cada mes del año

hay diferente radiación. La irradiancia normal sobre una superficie en lo alto de la atmósfera para cada día del año se puede calcular por dos expresiones:

$$G_{On} = G_{SC} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \& G_{On} = G_{SC} (1,000110 + 0,034221 \cos B + 0,001280 \sin B + 0,000719 \cos 2B + 0,000077 \sin 2B)$$

$$\text{donde } B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

- Irradiancia directa sobre un panel solar horizontal: $H_{dm(0)}$ = es la irradiancia global horizontal sobre la superficie de la tierra (Base de datos IDEAM)

D_0 = Es la irradiancia difusa horizontal sobre la superficie de la tierra.

$$D_0 = F_{Dm} \times G_0 \text{ donde } F_{Dm} = 1 - 1,13K_{Tm}$$

EJERCICIOS

- 1) Calcular la irradiancia normal en la superficie de la atmósfera para el día de hoy, por ambas fórmulas, y comparar los resultados.
- 2) Calcular la irradiancia que llega sobre el panel solar horizontal.
- 3) Calcular el ángulo Cenital y el ángulo Azimutal.
- 4) Según los pasos #5 y #6 del procedimiento, calcular potencia máxima generada.
- 5) Según los pasos #5 y #6 del procedimiento, calcular rendimiento de los paneles.
- 6) Luego de resolver los cálculos anteriores, responda:
 - a. ¿Cuál es la diferencia entre la irradiancia en la superficie de la atmosfera y la superficie del panel? Justifique su respuesta.
 - b. ¿Cuál es la diferencia entre la radiación difusa y la fracción difusa?
 - c. ¿explique cómo se obtiene el índice de claridad?

MATERIALES

- Modulo solar fotovoltaico
- Transportador
- Mapa de irradiancia solar (IDEAM).

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Después de haber realizado los cálculos, ajuste el módulo de paneles solares de la siguiente forma:

1. Ubique el módulo de paneles solares paralelo al suelo, ángulo de incidencia de 90° .
2. Oriente el módulo de paneles con el pivote hacia el sur, es decir, la base de la estructura apuntando hacia el sur.
3. Utilice los frenos de los rodachines para inmovilizar la estructura.
4. Ajuste el ángulo de la estructura según los resultados formulados y fije la estructura con la mariposa de sujeción.
5. Realice medición de voltaje de los paneles en vacío.
6. Realice medición de corriente de los paneles sin carga.
7. Conecte los paneles al controlador de carga y compruebe su funcionamiento.
8. Desconecte lo elementos anteriormente conectados y guárdelos en el módulo.

BIBLIOGRAFÍA

- John A. Duffie and William A. Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes.
- S. Sumathi, L. Ashok Kumar and P. Surekha (2015). Solar PV and Wind Energy Conversion Systems.
- Carlos R. Batista Rodríguez, Curso electivo "Energía solar". Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica. 2021.
- Sunfields Europe. Manual de cálculo de una instalación fotovoltaica con baterías aislada. Madrid, 2015. [Internet]. c2015 Madrid – España; Disponible en <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>

GUÍA DE LABORATORIO #2

SISTEMA DE ALMACENAMIENTO - BATERÍAS

OBJETIVOS

- Afianzar los conocimientos adquiridos a través de la teoría.
- Interpretar las fórmulas aplicables para determinar los componentes a utilizar según necesidad.

- Reconocer la importancia de los cálculos al momento de realizar instalaciones fotovoltaicas.

METODOLOGÍA

En esta guía los estudiantes:

- Leen los conceptos, resuelven los ejercicios planteados y los llevan a la práctica en el laboratorio solar fotovoltaico.
- Plantean sus inquietudes al tutor durante la práctica.
- Reciben orientaciones del tutor de manera presencial.

LOGROS

Un estudiante alcanzará sus logros si:

- Interpreta de manera correcta los resultados de las fórmulas previamente trabajadas para la selección de los componentes.
- Realiza los cálculos correctos sobre la capacidad de los elementos a utilizar.
- Realiza un ensamble de sistema fotovoltaico según necesidad y norma vigente actual RETIE.

DEFINICIONES

Rendimiento del sistema de almacenamiento:

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

Donde,

k_a = *coeficiente de autodescarga*

k_b = *coeficiente de pérdida por rendimiento de la batería*

k_c = *coeficiente de pérdida del inversor*

k_v = *coeficiente de pérdidas por otros componentes.*

N = *número de días de autonomía*

Pd = *profundidad de descarga de la batería*

Capacidad útil de las baterías:

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

Capacidad de las baterías.

$$Ah = \frac{Wh/Hora * Hora}{Pd * Vb}$$

Donde,

Ah = *Capacidad de las baterías*

Pd = *Profundidad de descarga de la batería*

Vb = *Voltaje de baterías*

MATERIALES

- Banco solar.
- Cables de conexión.
- Controladores de carga PWM y MPPT.
- Inversores DC/AC 12VDC y 24VDC.
- Multímetro.
- Pinza volti-amperimétrica.
- Lápiz y papel.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Después de haber realizado los cálculos:

9. Ubique el banco solar y el módulo de paneles solares.
10. Extraiga los componentes a utilizar, los cuales se encuentran dentro del gabinete inferior.
11. Utilice los frenos de los rodachines para inmovilizar las estructuras.
12. Ajuste el ángulo de la estructura de los paneles y fije la estructura con la mariposa de sujeción.
13. Realice medición de voltaje de las baterías en vacío. Anote resultados.
14. Realice conexión de baterías en paralelo 12Vdc.
15. Conecte el inversor 12Vdc/110Vac.
16. Conecte dos cargas de 9 watts al inversor previamente conectado.
17. Encienda el inversor y realice medidas de voltaje y corriente cada un minuto, durante 10 minutos, anote las medidas tomadas.
18. Conecte el módulo de paneles al banco de prueba y luego al regulador de carga PWM. Anote el tiempo.

19. Realice medición de voltaje a las baterías mientras carga, cada minuto, durante 10 minutos.
20. Desconectar todos los elementos anteriores.
21. Realice conexión de baterías en serie para obtener 24Vdc
22. Conecte el inversor 24Vdc/110Vac.
23. Conecte dos cargas de 9 watts al inversor previamente conectado.
24. Encienda el inversor y realice medidas de voltaje y corriente cada un minuto, durante 10 minutos, anote las medidas tomadas.
25. Luego de realizar las mediciones de voltaje y corriente, compare los resultados de las gráficas.
26. Conecte las baterías al regulador de carga.
27. Conecte el módulo de paneles al banco de prueba y luego al regulador de carga MPPT. Anote el tiempo.
28. Realice medición de voltaje y corriente a las baterías mientras carga, cada minuto, durante 10 minutos.
29. Desconectar todos los elementos anteriores.

EJERCICIOS

1. De acuerdo a las mediciones tomadas en el paso #9 del procedimiento, realice dos gráficas, voltaje vs tiempo y corriente vs tiempo.
2. De acuerdo a las mediciones tomadas en el paso #11 del procedimiento, realice dos gráficas, voltaje vs tiempo y corriente vs tiempo.
3. De acuerdo a las mediciones tomadas en el paso #15 del procedimiento, realice dos gráficas, voltaje vs tiempo y corriente vs tiempo.

4. De acuerdo a las mediciones tomadas en el paso #20 del procedimiento, realice dos gráficas, voltaje vs tiempo y corriente vs tiempo.
5. Luego de analizar las gráficas, responda:
 - a. ¿Cuál sistema consumió menos corriente y por qué?
 - b. ¿Cuál regulador recupero con mayor facilidad las baterías y por qué?
 - c. ¿Cuánto tiempo tomaría descargar las baterías al 50% en el sistema a 24Vdc?
 - d. ¿Cuánto tiempo tomaría descargar las baterías al 50% en el sistema a 12Vdc?
 - e. ¿Según su criterio cual es la mejor configuración, justifique?

BIBLIOGRAFÍA

- John A. Duffie and William A. Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes.
- S. Sumathi, L. Ashok Kumar and P. Surekha (2015). Solar PV and Wind Energy Conversion Systems.
- Carlos R. Batista Rodríguez, Curso electivo "Energía solar". Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica. 2021.
- Sunfields Europe. Manual de cálculo de una instalación fotovoltaica con baterías aislada. Madrid, 2015. [Internet]. c2015 Madrid – España; Disponible en <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>

GUÍA DE LABORATORIO #3

CÁLCULO DE POTENCIA Y REGULADORES DE CARGA

OBJETIVOS

- Afianzar los conocimientos adquiridos a través de la teoría.
- Interpretar las fórmulas aplicables para determinar los componentes a utilizar según necesidad.

- Reconocer la importancia de los cálculos al momento de realizar instalaciones fotovoltaicas.

METODOLOGÍA

En esta guía los estudiantes:

- Leen los conceptos, resuelven los ejercicios planteados y los llevan a la práctica en el laboratorio solar fotovoltaico.
- Plantean sus inquietudes al tutor durante la práctica.
- Reciben orientaciones del tutor de manera presencial.

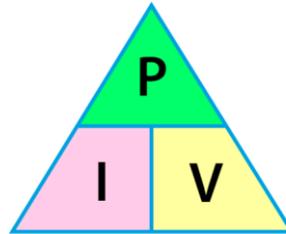
LOGROS

Un estudiante alcanzará sus logros si:

- Interpreta de manera correcta los resultados de las fórmulas previamente trabajadas para la selección de los componentes.
- Realiza los cálculos correctos sobre la capacidad de los elementos a utilizar.
- Realiza un ensamble de sistema fotovoltaico según necesidad y norma vigente actual RETIE.

DEFINICIONES

Triangulo de potencias:



Capacidad de los paneles:

$$E_p = \text{energía teórica de los paneles} * \text{Número de paneles}$$

$$E_p = 100 \text{ W} * 2 = 200 \text{ W}$$

MATERIALES

- Banco solar.
- Módulo de paneles.
- Cables de conexión.
- Controlador de carga según selección PWM o MPPT.
- Osciloscopio.
- Multímetro.
- Pinza volti-amperimétrica.

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Después de haber realizado los cálculos:

30. Ubique el banco solar.
31. Utilice los frenos de los rodachines para inmovilizar la estructura.
32. Ajuste el ángulo de la estructura de los paneles, según los resultados

formulados y fije la estructura con la mariposa de sujeción.

33. Seleccione el regulador PWM, realice las conexiones a batería y paneles.
34. Con el osciloscopio, realice medición de onda, voltaje y frecuencia en el regulador. Anote.
35. Desconecte los elementos anteriormente conectados.
36. Seleccione el regulador MPPT, realice las conexiones a batería y paneles.
37. Con el osciloscopio, realice medición de onda, voltaje y frecuencia en el regulador. Anote.
38. Desconecte todos los elementos.

EJERCICIOS

- Realice el cálculo de potencia, según los elementos suministrados 2 paneles de 100 Watts y 2 baterías 12Vdc/35Ah.
- Según los pasos #5 y #7 del procedimiento, realice una gráfica comparativa, Voltaje vs Corriente para cada uno de los reguladores de carga.
- Según los cálculos anteriores responda:
- ¿Cuál es la potencia máxima del sistema?
- ¿Cuál es el mejor regulador de carga? Justifique su respuesta.
- ¿Cuál sistema de carga es más eficiente y por qué?

BIBLIOGRAFÍA

- John A. Duffie and William A. Beckman (2013). Solar Engineering of Thermal Processes.
- C. Julian Chen (2011) Physics of Solar Energy.
- S. Sumathi, L. Ashok Kumar and P. Surekha (2015). Solar PV and Wind Energy Conversion Systems.
- Carlos R. Batista Rodríguez, Curso electivo "Energía solar". Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica. 2021.

GUÍA DE LABORATORIO #4

ANÁLISIS DE ONDA DE INVERSOR

OBJETIVOS

- Afianzar los conocimientos adquiridos a través de la teoría.
- Reconocer la importancia de los cálculos al momento de realizar instalaciones fotovoltaicas.

METODOLOGÍA

En esta guía los estudiantes:

- Leen los conceptos, resuelven los ejercicios planteados y los llevan a la práctica en el laboratorio solar fotovoltaico.
- Plantean sus inquietudes al tutor durante la práctica.
- Reciben orientaciones del tutor de manera presencial.

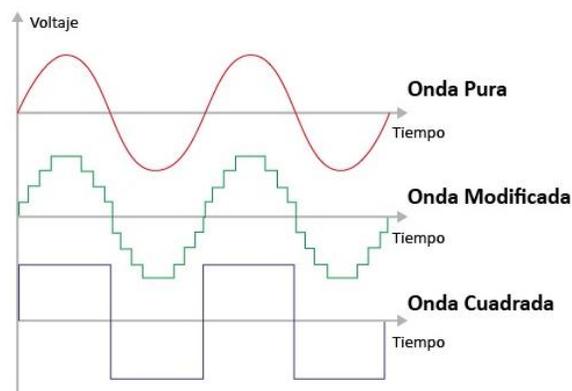
LOGROS

Un estudiante alcanzará sus logros si:

- Interpreta de manera correcta los resultados de las fórmulas previamente trabajadas para la selección de los componentes.
- Realiza los cálculos correctos sobre la capacidad de los elementos a utilizar.
- Realiza un ensamble de sistema fotovoltaico según necesidad y norma vigente actual RETIE.
- Reconocer la onda y el funcionamiento de un inversor DC/AC.

DEFINICIONES

Inversor: Este elemento permite convertir la corriente directa (DC) en alterna (AC). Son necesarios para alimentar cargas de corriente alterna pues los sistemas fotovoltaicos proveen corriente directa. Los inversores funcionan utilizando transistores IGBT y un controlador. Los IGBT hacen las veces de interruptores controlados lo que permite variar forma de la onda de salida mientras el controlador define la velocidad a la que estos se abren y cierran y el tiempo que permanecen en ese estado. Los inversores se dividen en 3 tipos según la modificación de onda que logren, estos son: de onda cuadrada, de onda modificada y de onda pura. La siguiente imagen muestra la diferencia entre la forma de estas ondas.



MATERIALES

- Banco solar.
- Módulo de paneles.
- Cables de conexión.
- Inversor DC/AC.
- Osciloscopio.
- Multímetro.
- Pinza volti-amperimétrica.

EJERCICIOS

Luego de analizar las imágenes en el osciloscopio según el procedimiento, responda:

- ¿Cuál es el comportamiento de onda en el inversor en vacío?
- ¿Cuál es la diferencia entre el comportamiento del inversor al momento de aumentar las cargas?
- ¿Qué tipo de onda tiene el inversor?
- ¿Considera que existió algún cambio en la frecuencia? ¿por qué?

PROCEDIMIENTO DE ENSAYO

Después de haber realizado los cálculos:

39. Ubique el banco solar.
40. Extraiga los componentes a utilizar, los cuales se encuentran dentro del gabinete inferior.
41. Utilice los frenos de los rodachines para inmovilizar la estructura.
42. Conecte las baterías al inversor DC/AC.
43. Conecte una carga de 60 Watts al inversor.
44. Con el osciloscopio, revise el tipo de onda del inversor, la carga y su comportamiento.
45. Conecte otra carga de 60 Watts al inversor.
46. Con el osciloscopio, revise el tipo de onda del inversor, la carga y su comportamiento.
47. Con el osciloscopio, realice mediciones del tipo de onda que tiene el inversor y grafique.

48. Aumente la carga en el inversor y analice las imágenes del osciloscopio.
49. Con la pinza volti-amperimétrica, verifica la intensidad de la carga y compruebe el funcionamiento del inversor.
50. Desconecte los elementos utilizados.

BIBLIOGRAFÍA

- Carlos R. Batista Rodríguez, Curso electivo "Energía solar". Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica. 2021.

PRÁCTICA BÁSICA #1

ALIMENTACIÓN DE UNA CARGA DC.

OBJETIVOS

- Conectar los diferentes componentes del laboratorio solar fotovoltaico para generar corriente directa.
- Medir corriente y voltaje en los dispositivos.
- Identificar, manipular y entender el funcionamiento de los elementos que constituyen el laboratorio solar fotovoltaico.

METODOLOGÍA

En esta guía los estudiantes:

- Identifican los componentes descritos en la tabla de “materiales y equipos” (Tabla 1).
- Realizan las conexiones de los componentes como indica el “esquema de conexión” (Figura 1).
- Siguen al pie de la letra las indicaciones descritas en “procedimiento” (Tabla 2).
- Plantean sus inquietudes al tutor durante la práctica.
- Reciben orientaciones del tutor de manera presencial.

LOGROS

Un estudiante alcanzará sus logros si:

- Realiza las conexiones de los componentes del laboratorio de manera correcta.

- Evalúa los datos obtenidos en la práctica y comprende los datos relacionados sobre la potencia, el voltaje y el flujo de corriente de los componentes involucrados en la práctica.

MATERIALES Y EQUIPOS.

Cantidad	Descripción	Característica
1	Panel fotovoltaico	100W-18V
1	Batería	12V
1	Controlador de carga	PWM o MPPT
1	Carga	DC
1	Multímetro	
1	Interruptor	
1	Cables de conexión	

Tabla 1. Descripción de materiales y equipos utilizados en la práctica.

ESQUEMA DE CONEXIÓN

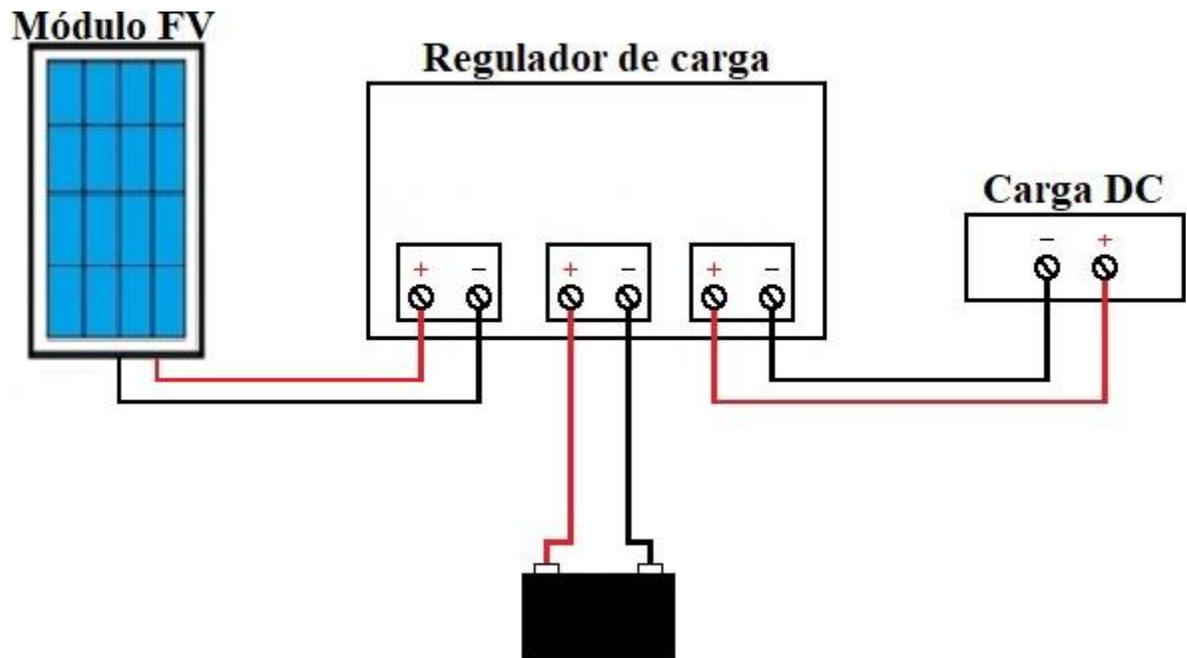


Figura 1 Esquema de conexión de los componentes para la práctica.

PROCEDIMIENTO

Número	Paso a paso
1	Conectar la batería al regulador de carga conforme se muestra en el esquema.
2	Comprobar que el sistema está energizado (se enciende la pantalla del controlador de carga)
3	Conectar el panel fotovoltaico al regulador de carga conforme se muestra en el esquema.
4	Comprobar que el sistema está energizado (se enciende testigo en el controlador de carga)
5	Conectar la carga DC al regulador de carga conforme se muestra en el esquema.
6	Encender la carga accionando el interruptor.

7	Medir el voltaje y el flujo de corriente en los componentes
8	Realizar los cálculos necesarios para determinar la Potencia ($P= V.I$) en Watts, y la resistencia ($I=V/R$) en Ω , en la carga y registrarlos.
9	Fin de la experiencia. Desconectar los componentes y guardarlos en orden.

Tabla 2. Descripción del procedimiento a realizar en la práctica.

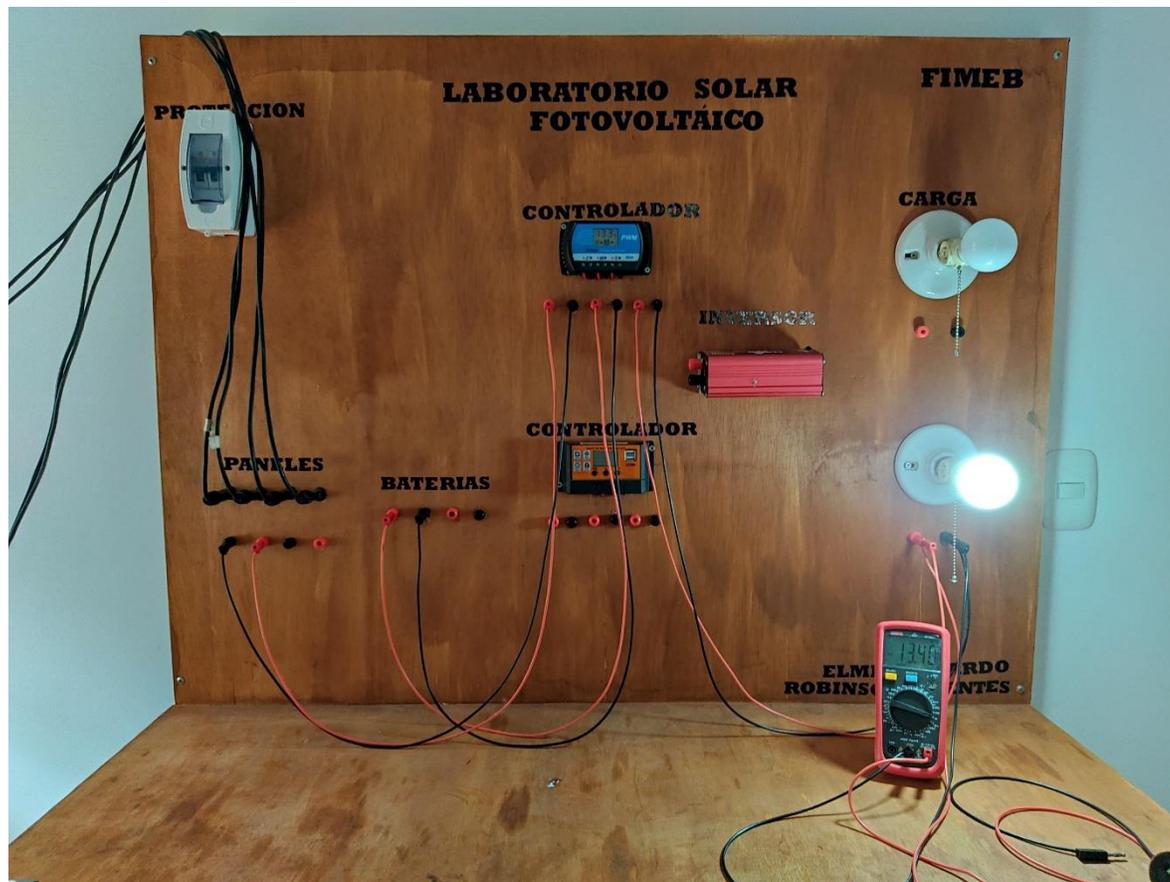


Figura 2. Conexión de componentes en DC en el laboratorio fotovoltaico.

PRÁCTICA BÁSICA #2

ALIMENTACIÓN DE UNA CARGA AC.

OBJETIVOS

- Conectar los diferentes componentes del laboratorio solar fotovoltaico para generar corriente directa.
- Medir corriente y voltaje en los dispositivos.
- Identificar, manipular y entender el funcionamiento de los elementos que constituyen el laboratorio solar fotovoltaico.

METODOLOGÍA

En esta guía los estudiantes:

- Identifican los componentes descritos en la tabla de “materiales y equipos” (Tabla 1).
- Realizan las conexiones de los componentes como indica el “esquema de conexión” (Figura 1).
- Siguen al pie de la letra las indicaciones descritas en “procedimiento” (Tabla 2).
- Plantean sus inquietudes al tutor durante la práctica.
- Reciben orientaciones del tutor de manera presencial.

LOGROS

Un estudiante alcanzará sus logros si:

- Realiza las conexiones de los componentes del laboratorio de manera correcta.

- Evalúa los datos obtenidos en la práctica y comprende los datos relacionados sobre la potencia, el voltaje y el flujo de corriente de los componentes involucrados en la práctica.

MATERIALES Y EQUIPOS.

Cantidad	Descripción	Característica
1	Panel fotovoltaico	100W-18V
1	Batería	12V
1	Controlador de carga	PWM o MPPT
1	Inversor	500W
1	Carga	DC
1	Multímetro	
1	Interruptor	
1	Cables de conexión	

Tabla 1. Descripción de materiales y equipos utilizados en la práctica.

ESQUEMA DE CONEXIÓN

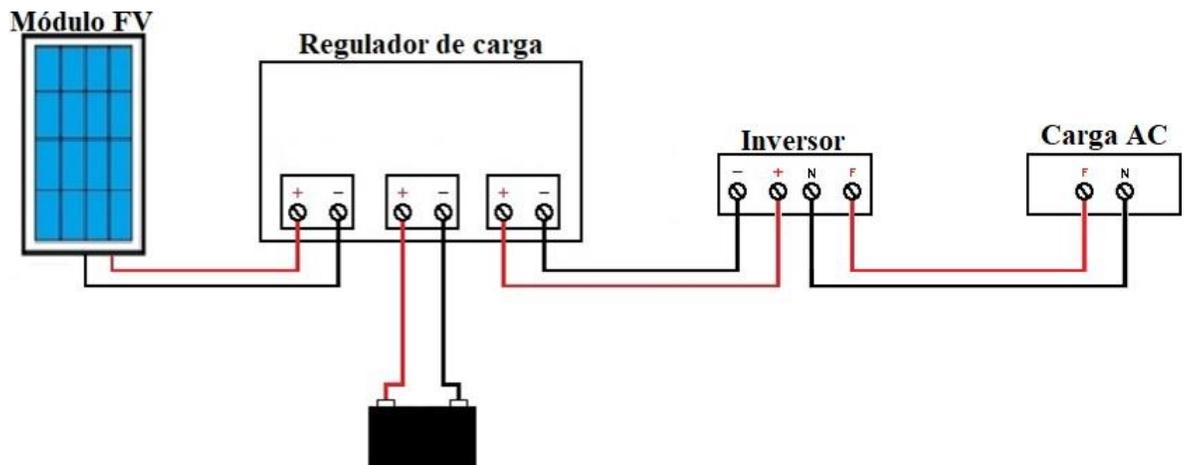


Figura 1 Esquema de conexión de los componentes para la práctica.

PROCEDIMIENTO

Número	Paso a paso
1	Conectar la batería al regulador de carga conforme se muestra en el esquema.
2	Comprobar que el sistema está energizado (se enciende la pantalla del controlador de carga)
3	Conectar el panel fotovoltaico al regulador de carga conforme se muestra en el esquema.
4	Comprobar que el sistema está energizado (se enciende testigo en el controlador de carga)
5	Conectar el inversor al regulador de carga conforme se muestra en el esquema.
6	Comprobar que el sistema está energizado (se enciende led en el inversor)
7	Encender el inversor accionando el interruptor ubicado en el cuerpo del mismo.
8	Comprobar que el sistema está energizado (se enciende led y ventilador en el inversor)

9	Conectar la carga AC al inversor conforme se muestra en el esquema.
10	Encender la carga accionando el interruptor.
11	Medir el voltaje y el flujo de corriente en los componentes
12	Realizar los cálculos necesarios para determinar la Potencia ($P= V.I$) en Watts, y la resistencia ($I=V/R$) en Ω , en la carga y registrarlos.
13	Fin de la experiencia. Desconectar los componentes y guardarlos en orden.

Tabla 2. Descripción del procedimiento a realizar en la práctica.

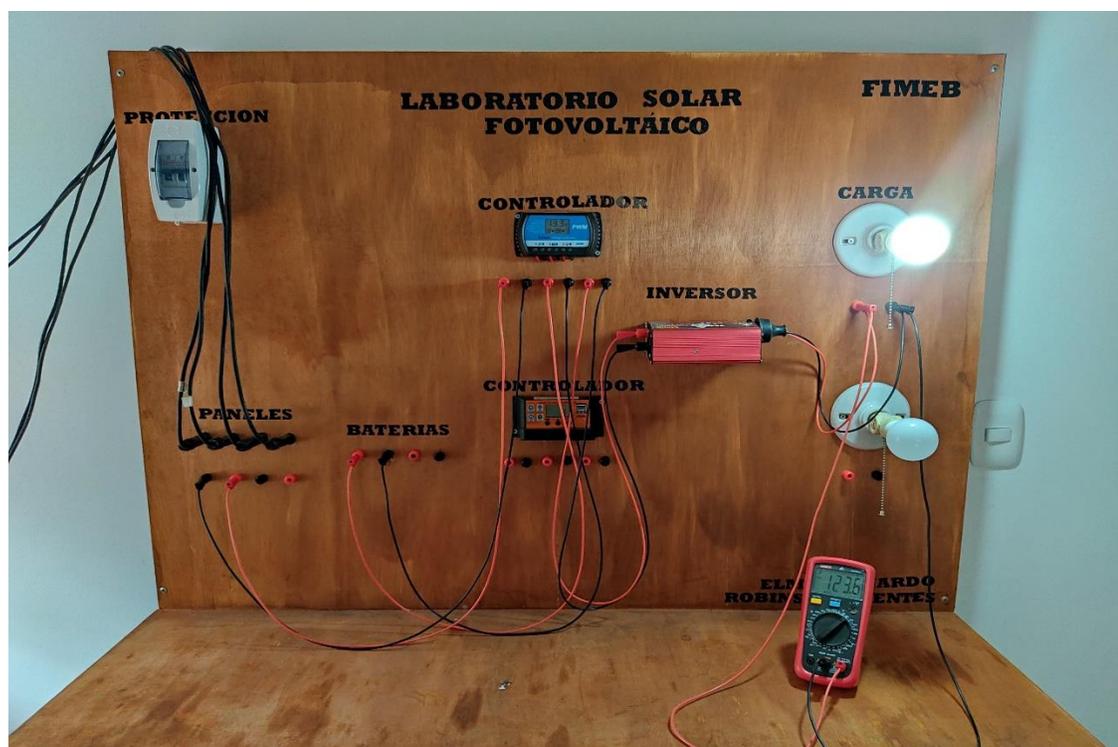


Figura 2. Conexión de componentes en AC en el laboratorio fotovoltaico.

Referencias Bibliográficas

- A. Q. Kyle Williams, «Internet of Things: Solar array tracker» IEEE, p. 4, 2017.
- AGUILAR LOAYZA, Roddy. Laboratorio didáctico para el sistema de energía eólica. Trabajo de graduación previo a la obtención del título de ingeniero electrónico. Cuenca, Ecuador. Universidad del Azuay, 2017.
- AUTOSOLAR ENERGY SOLUTIONS. ¿Cómo son los inversores de onda senoidal? Alcàsser, 2020. [Internet]. c2020 Alcàsser – España; Disponible en <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/como-son-los-inversores-de-onda-senoidal>
- AUTOSOLAR ENERGY SOLUTIONS. Efecto fotovoltaico. Alcàsser, 2020. [Internet]. c2020 Alcàsser – España; Disponible en <https://autosolar.es/blog/aspectos-tecnicos/efecto-fotovoltaico>
- BARRAGÁN PEÑA, C.C. y TRUJILLO OSORIO, M.A. ELABORACIÓN DE GUÍAS DE LABORATORIO DE ESTRUCTURAS DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA. Trabajo de grado en opción al título de Ingeniero Civil, UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL BOGOTÁ, D. C, 2018.
- BATISTA RODRÍGUEZ Carlos R., Curso electivo "Energía solar". Universidad Antonio Nariño, Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica. 2021.
- CARDONA BUITRAGO, F. E. (2013). *LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO COMO ESTRATEGIA DIDÁCTICA*. Tesis de grado en opción al título de Licenciada en Educación Básica, Universidad del Valle, Santiago de Cali. Recuperado el 1 de octubre de 2021, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/6772/1/CD-0395428.pdf>
- CASAS M., B.M. Instalaciones Solares Fotovoltaicas., Barcelona, España: Marcombo, 2017.
- CEMAER - Centro de Estudios en Medio Ambiente y Energías Renovables. Tipos de Sistemas de Energía Solar Fotovoltaica. Bogotá, D. C., 2019. [Internet]. c2019 Bogotá – Colombia; Disponible en <https://www.cemaer.org/tipos-de-sistemas-de-energia-solar-fotovoltaica/>
- CIENDÚA MARTIN, O.; RIVERA POSSO, C. A. y SALAMANCA SOLANO, M. A. Formulación de un plan estratégico para el laboratorio de ingeniería en la universidad católica de Colombia apoyado en la guía PMBOK. Resumen analítico en Educación. Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Civil, Especialización en Gerencia de Obras, 2019.
- DE LA CRUZ, GÓMEZ, José Manuel, GÓMEZ, DE LA CRUZ, Félix. Guía de mantenimiento en instalaciones fotovoltaicas, Ediciones Experiencia, 2009.

DITECSA, Soluciones industriales y medioambientales. Sistemas solares Fotovoltaicos: dispositivos e ingeniería conceptual. Sevilla, 2017. [Internet]. c2017 Sevilla – España; Disponible en <http://www.grupoditecsa.com/es/sistemas-solares-fotovoltaicos-dispositivos-e-ingenieria-conceptual/>

G. P. R, «Replanteo y funcionamiento de las instalaciones solares Fotovoltaicas.» IEEE, p. 8, 2011.

HENAO SALAZAR, I. J. Diseño de una guía para prácticas de laboratorio de métodos y tiempos en un proceso de llenado manual con dosificador de líquidos electrónico en UNICOMFACAUCA. Proyecto de grado presentado para optar por el título de Ingeniera Industrial, FUNDACION UNIVERSITARIA CATOLICA LUMEN GENTIUM, FACULTAD DE INGENIERIA, SANTIAGO DE CALI, 2016

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto, et al. Metodología de la investigación. 6 edición. España: McGraw-Hill Interamericana de España, 26-08-2014. 600p. ISBN: 978-1-4562-2396-0.

HERRERA CASANOVA, Alexánder. ELABORACION GUIAS PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIOS DE PROCESOS Y MATERIALES DE INGENIERIA INDUSTRIAL. Pasantía para título de ingeniero Industrial en UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE OCCIDENTE FACULTAD DE INGENIERIA DEPARTAMENTO DE SISTEMAS DE PRODUCCIÓN PROGRAMA DE INGENIERIA INDUSTRIAL SANTIAGO DE CALI, 2008.

IDAE. Condiciones Técnicas para Instalaciones de Energía Solar Fotovoltaica. 2002.

IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. IDEAM, Atlas de Radiación Solar – Interactivo – año 2015. Bogotá, D. C., 2015. [Internet]. c2015 Bogotá – Colombia; Disponible en <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html/>

LÓPEZ-SARMIENTO, D. L. Modelo para la implementación de un laboratorio de prácticas académicas de simulación enfocado a la ingeniería industrial. Revista Estrategia Organizacional, Vol. 4 (2015), pp: 21-26. <https://doi.org/10.22490/25392786.2129>

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

LUGO, Guadalupe. La importancia de los laboratorios. Revista Ingeniería (2006) (www.imcyc.com), Construcción y Tecnología, pp. 20-22

MARÍN QUINTERO, M. (2010). El trabajo experimental en la enseñanza de la Química en contexto de resolución de problemas. *Revista EDUCyT, Vol I*, enero-junio, pp. 37-52. ISSN 2215-8227. Recuperado el 1 de octubre de 2021 de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/7553/1/3.pdf>

MENDOZA JIMÉNEZ, Iván; TORRES SUARÉZ, Edison. Construcción de un laboratorio solar fotovoltaico para el laboratorio de ingeniería mecánica de la Universidad

Santo Tomás Tunja. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero mecánico. Tunja – Colombia: Universidad Santo Tomás seccional Tunja, 2019.

PERICO-GRANADOS, N.R., GALARZA, E.Y., DÍAZ O., M.L., ARÉVALO-ALGARRA, H.M., PERICO-MARTÍNEZ, N.R. Guía práctica de investigación en ingeniería: apoyo a la formación de docentes y estudiantes. Edición 1 (2020) Corporación Universitaria Minuto de Dios UNIMINUTO, CDD: 001.42 G84g BRGH Registro Catálogo UNIMINUTO No. 99595, 2020. ISBN: 978-958-763-417-4 (Digital). Archivo descargable en MARC a través del link: <https://tinyurl.com/bib99959>

PROYECTO EDUCATIVO INSTITUCIONAL – UAN. Lineamientos curriculares UAN (2005). ISBN: 958-9423-48-5. Recuperado 25 de septiembre de 2021 de <https://www.uan.edu.co/images/Institucion/ItemsInstitucionales/documentos/PEI.pdf>

REYES AGUILERA, Edwin Antonio. Prácticas de laboratorio: la antesala a la realidad. Revista Multi-ensayos, Vol 6, No. 11 (2020). ISSN: 2412-3285. DOI: <https://doi.org/10.5377/multiensayos.v6i11.9290>

ROJAS AGUILAR, Juan; CONTRERAS CASTILLO, Santiago. Construcción de un prototipo para el mejoramiento de la enseñanza de la energía fotovoltaica. Trabajo de grado para optar al título de ingeniero electrónico. Bogotá – Colombia: Universidad Santo Tomás 2019.

Rúa Ramírez, E. B., Barrera Siabato, A. I., & Gómez Orduz, M. (2017). Análisis técnico, socioeconómico y ambiental de la electrificación con energía solar fotovoltaica aislada para vivienda rural en Hato Corozal, Casanare, Colombia. *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*, 8(1), 239 - 248. <https://doi.org/10.22490/21456453.1853>

Sánchez Maza, M. (2008). Energía solar fotovoltaica. México: Editorial Limusa.

SENAI - Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. *Curso: Instalação e Manutenção de Sistema Solar Fotovoltaico*. Paraíba, 2015. [Internet]. c2015 Paraíba – Brasil; Disponible en <https://es.slideshare.net/alvferreira/curso-fotovoltaico-49734334>

SUNFIELDS EUROPE. Cómo dimensionar y calcular paneles solares fotovoltaicos necesarios. Madrid, 2015. [Internet]. c2015 Madrid – España; Disponible en <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/calcular-paneles-solares-necesarios/>

SUNFIELDS EUROPE. Manual de cálculo de una instalación fotovoltaica con baterías aislada. Madrid, 2015. [Internet]. c2015 Madrid – España; Disponible en <https://www.sfe-solar.com/baterias-solares/manual-calculo/>

SUNFIELDS EUROPE. Rendimiento de placas solares. Madrid, 2015. [Internet]. c2015 Madrid – España; Disponible en <https://www.sfe-solar.com/paneles-solares/rendimiento/>

T. G. Arias. A, «Cartilla para la enseñanza de las energías renovables,» Editorial Universidad de Burgos, p. 148, 2013.

Tobajas Vázquez, C. (2018). Energía solar fotovoltaica.

Tobajas Vázquez, M. (2012). Energía solar térmica para instaladores (4a. ed.).

V. M. Labouret A., «Solar Photovoltaic Energy» IEEE, 2009.