

# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE



Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas  
Carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico

## IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS Y PILAS DE COMBUSTIBLE

Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en  
Mantenimiento Eléctrico

**Autor:**

Pinda Román Diego Fernando

**Director:**

Ing. Eliana Carolina Ormeño Mejía MSc.

Ibarra – Ecuador

2020-2021



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

## AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

### 1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
<b>CÉDULA DE IDENTIDAD:</b>	172310921-9		
<b>APELLIDOS Y NOMBRES:</b>	Pinda Román Diego Fernando		
<b>DIRECCIÓN:</b>	El olivo, Av. Universitaria		
<b>EMAIL:</b>	dfpindar@utn.edu.ec		
<b>TELÉFONO FIJO:</b>	022742324	<b>TELÉFONO MÓVIL:</b>	0990285880

DATOS DE LA OBRA	
<b>TÍTULO:</b>	IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS Y PILAS DE COMBUSTIBLE
<b>AUTOR (ES):</b>	Pinda Román Diego Fernando
<b>FECHA: DD/MM/AAAA</b>	11/10/2021
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
<b>PROGRAMA:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> <b>PREGRADO</b> <input type="checkbox"/> <b>POSGRADO</b>
<b>TITULO POR EL QUE OPTA:</b>	Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico
<b>ASESOR /DIRECTOR:</b>	MSc. Eliana Carolina Ormeño Mejía

## 2. CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 11 días del mes de octubre de 2021.

### EL AUTOR:



.....  
Nombre: Diego Fernando Pinda Román  
C.C: 172310921-9



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS**

**ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR**

MSc. Eliana Ormeño

**CERTIFICA**

Que después de haber examinado el presente trabajo de investigación elaborado por el señor estudiante: Pinda Román Diego Fernando, certifico que ha cumplido con las normas establecidas en la elaboración de investigación titulado: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS Y PILAS DE COMBUSTIBLE”**. Para la obtención de título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico; aprobado la defensa, impresión y empastado.

.....  
MSc. Eliana Ormeño

Director de tesis

## **DEDICATORIAS**

El presente trabajo le dedico a mi familia, especialmente a mi madre por siempre creer en mí y apoyarme a lo largo de esta travesía estudiantil, pues sin ella no lo habría logrado. Así también a mi hermana y abuelita que siempre están dándome ánimos para seguir adelante y estar pendiente por mi bienestar en todo momento.

## **AGRADECIMIENTO**

Este agradecimiento va dirigido especialmente a mi madre y abuelita quienes siempre me bendicen y oran por mí y que fueron un pilar fundamental para concluir con este trabajo.

De manera especial a mi tutora la MSc. Eliana Ormeño por su calidad humana y ayuda para dirigir esta tesis hasta su culminación. A mis asesores, PhD. Gerardo Collaguazo y MSc. Olger Arellano por su tiempo invertido en las revisiones de este trabajo.

También quiero agradecer a los docentes Ing. Alejandra Urquiza y MSc. Claudio Otero por esas palabras de aliento que me dieron cuando más las necesitaba y al resto de docentes que me han acompañado a lo largo de este camino, impartiendo sus conocimientos para mi formación profesional.

Además, quiero agradecer a la Universidad Técnica del Norte por abrirme sus puertas y por su formación académica de calidad. Al Club de electricidad y Automatización, al Capítulo Técnico Power and Energy Society de la rama estudiantil IEEE, por haberme brindado la oportunidad de dirigirlos como presidente, obteniendo grandes logros y actividades que dejaron en grande a mi querida Universidad a nivel nacional e internacional.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

Identificación de la obra.....	II
Constancias.....	III
Certificación del director de trabajo de grado.....	IV
Dedicatoria.....	V
Agradecimiento.....	VI
Resumen.....	XIV
Abstract.....	XV
Introducción.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Formulación del problema.....	2
Objetivos.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Alcance del Trabajo.....	3
Justificación.....	3
Viabilidad de la Investigación.....	4
CAPÍTULO 1.....	5
Descripción y comparación de las tecnologías de generación solar.....	5
1.1.    Introducción a la energía solar.....	5
1.2.    Fundamentos de tecnologías fotovoltaicas.....	6
1.2.1.    Sistemas fotovoltaicos conectados a la red.....	6
1.2.2.    Sistemas fotovoltaicos aislados.....	7
1.3.    Paneles solares.....	8
1.3.1.    Partes del panel solar fotovoltaico.....	8
1.3.2.    Tipos de paneles solares.....	9
1.4.    Comparativa de las tecnologías existentes sobre paneles solares.....	13
1.5.    Características técnicas de los paneles solares.....	14
1.5.1.    Curva característica de un panel fotovoltaico.....	14
1.5.2.    Características eléctricas de los paneles solares.....	15

1.6.	Componentes para la medición y funcionamiento de un sistema fotovoltaica.....	18
1.6.1.	Sensor de irradiación - Piranómetro .....	18
1.6.2.	Regulador de carga .....	19
1.6.3.	Inversor de carga CD/CA .....	20
1.7.	Sistemas de almacenamiento .....	20
1.7.1.	Pilas de Combustible.....	20
1.7.2.	Principio de funcionamiento de una Celda de Combustible .....	21
1.7.3.	Curva de Polarización .....	22
1.7.4.	Composición .....	22
1.7.5.	Tipos de Celdas de Combustible.....	24
1.8.	Comparativa de las tecnologías existentes sobre las pilas de combustible .....	28
1.9.	Aplicaciones de las pilas de combustible.....	28
1.10	Comparativa entre el módulo FESTO LV 46549-E0.....	29
CAPÍTULO 2 .....		32
2.1.	Introducción .....	32
2.2.	Metodología .....	32
2.2.1.	Diseño del módulo.....	33
2.2.2.	Diagramas de conexiones .....	35
2.2.3.	Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema .....	37
2.2.4.	Diagrama para la adquisición de datos.....	39
2.3.	Selección de los elementos para un sistema solar y almacenamiento con pila de combustible .....	40
2.3.1.	Lámparas halógenas .....	40
2.3.2.	Panel solar .....	41
2.3.3.	Regulador de carga .....	41
2.3.4.	Batería.....	42
2.3.5.	Pila de combustible .....	44
2.3.6.	Inversor .....	45
2.3.7.	Piranómetro.....	46

2.3.8. Arduino.....	47
2.3.9. Selección del sensor de voltaje .....	48
2.3.10. Selección del sensor de corriente.....	49
2.3.11. Selección del Reóstato.....	49
2.4. Puesta a tierra del módulo .....	50
CAPÍTULO 3 .....	51
3.1. Implementación del módulo .....	51
3.1.1. Construcción de la estructura .....	51
3.1.2. Instalación del panel solar y lámparas halógenas.....	52
3.1.3. Instalación de los componentes del panel frontal .....	55
3.2. Adquisición de datos.....	57
3.2.1. Instalación del microcontrolador .....	57
3.2.2. Instalación de los sensores .....	58
3.2.3. Configuración y comunicación entre Arduino y LabVIEW .....	58
3.3. Pruebas de funcionamiento del módulo fotovoltaico .....	60
3.3.1. Análisis de parámetros de salida del módulo solar .....	60
3.3.2. Datos de salida del módulo solar en vacío .....	61
3.3.3. Medición de tensión en vacío del panel solar con ventilación .....	63
3.3.4. Medición de tensión en vacío del panel solar sin ventilación .....	64
3.3.5. Medición de tensión con carga .....	65
3.3.6. Caracterización de los paneles con carga .....	68
3.4. Curva característica de la pila de combustible .....	75
Conclusiones.....	77
Recomendaciones.....	78
Bibliografía.....	79
Anexos .....	83

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Diagrama general sistema ON-GRID O GRID TIE.....	6
Fig. 2. Diagrama general de conexión en sitio.....	7
Fig. 3. Sistema Fotovoltaico Aislado de la Red SFVA .....	8
Fig. 4. Partes de un módulo fotovoltaico.....	9
Fig. 5. Panel solar monocristalino.....	10
Fig. 6. Panel solar policristalino .....	10
Fig. 7. Panel solar amorfo .....	11
Fig. 8. Panel solar de sulfuro de cadmio.....	11
Fig. 9. Panel solar de arsénico de galio.....	12
Fig. 10. Panel solar de di seleniuro de cobre en indio .....	12
Fig. 11. Panel solar de telurio de cadmio .....	13
Fig. 12. Panel solar híbrido.....	13
Fig. 13. Curva I-V de un Panel solar fotovoltaico .....	15
Fig. 14. Curva I-V a diferentes irradiancias.....	17
Fig. 15. Curva I-V a diferentes temperaturas .....	17
Fig. 16. Piranómetro de radiación solar global.....	18
Fig. 17. Gráfico de respuesta espectral .....	19
Fig. 18. Regulador de carga de 20A.....	19
Fig. 19. Inversor de carga.....	20
Fig. 20. Pila de Combustible.....	21
Fig. 21. Principio básico de funcionamiento de una pila de combustible.....	22
Fig. 22. Curva de polarización de una pila de combustible .....	22
Fig. 23. Composición de una pila de combustible.....	24
Fig. 24. Celda de combustible tipo PEM.....	25
Fig. 25. Celda de combustible alcalina .....	26
Fig. 26. Celda de combustible de ácido fosfórico.....	26
Fig. 27. Celda de combustible de carbonato fundido .....	27
Fig. 28. Celda de combustible de Oxido solido .....	27
Fig. 29. Celda de combustible Metanol directo .....	28
Fig. 30. Aplicaciones de las pilas de combustible en función de la potencia.....	29
Fig. 31. Módulo Festo serie LV 46549-E0 .....	30
Fig. 32. Distribución de elementos del módulo .....	33
Fig. 33. Diseño de la cubierta de las luminarias y el panel solar .....	34
Fig. 34. Diseño de todo el módulo en AUTOCAD 3D .....	34
Fig. 35. Diagrama de conexión unifilar del módulo de generación solar .....	35

Fig. 36. Diagrama de control para la generación solar .....	36
Fig. 37. Diagrama de fuerza para la generación solar .....	37
Fig. 38. Diagrama de flujo del funcionamiento.....	38
Fig. 39. Diagrama de flujo de la adquisición de datos.....	39
Fig. 40. Lámparas halógenas .....	40
Fig. 41. Panel solar monocristalino.....	41
Fig. 42. Regulador de carga .....	42
Fig. 43 Banco de batería de 12V, 35Ah,20HR.....	43
Fig. 44. Recipiente para el agua.....	44
Fig. 45. Pila de combustible .....	44
Fig. 46. Voltímetro y Amperímetro analógicos .....	45
Fig. 47. Piranómetro S_LIB-M003 .....	46
Fig. 48. HOBO Micro Station .....	47
Fig. 49. Arduino UNO y sus partes .....	48
Fig. 50. Sensor de voltaje para Arduino.....	49
Fig. 51. Sensor de corriente para Arduino .....	49
Fig. 52. Reóstato manual de carga variable .....	49
Fig. 53. Puesta a tierra del panel solar en diagrama unifilar .....	50
Fig. 54. Estructura del módulo de pruebas .....	51
Fig. 55. Montaje de lámparas halógenas en el módulo.....	52
Fig. 56. Montaje de ventilador para el enfriamiento del panel solar .....	53
Fig. 57 Montaje del piranómetro en el panel solar .....	53
Fig. 58. Circuito sensor de temperatura.....	54
Fig. 59. Montaje del panel solar y luminarias halógenas.....	54
Fig. 60. Conexiones del módulo de pruebas.....	55
Fig. 61 Montaje de componentes y fijación de cables.....	56
Fig. 62. Resultados del montaje de los componentes en el módulo fotovoltaico.....	57
Fig. 63. Placa PCB para la comunicación entre el microcontrolador y los sensores .....	58
Fig. 64. Instalación de los sensores de medición.....	58
Fig. 65. Activación del puerto serial .....	59
Fig. 66. Adquisición de datos del puerto COM de Arduino.....	59
Fig. 67. Interfaz del muestreo de datos .....	60
Fig. 68. Gráfica de la radiación solar vs número de lámparas .....	61
Fig. 69. Comparación del Voltaje - Temperatura con ventilación en el panel solar .....	62
Fig. 70. Comparación del Voltaje - Temperatura sin ventilación en el panel solar .....	63
Fig. 71. Curva de la radiación en función del voltaje de circuito abierto con ventilación .....	64
Fig. 72. Curva de la radiación en función del voltaje sin ventilación .....	65

Fig. 73. Focos de 12 y 18W respectivamente.....	65
Fig. 74. Curva de I-V con una carga de 12W.....	66
Fig. 75. Curva de P-V a una carga de 12W.....	67
Fig. 76. Curva de I-V a una carga de 18W.....	67
Fig. 77. Curva de P-V a una carga de 18W.....	68
Fig. 78. Curva de I-V con una lámpara y enfriamiento en el panel solar.....	69
Fig. 79. Curva de P-V con una lámpara y enfriamiento en el panel solar.....	70
Fig. 80. Curva de I-V con dos lámparas y con enfriamiento en el panel solar.....	71
Fig. 81. Curva de P-V con dos lámparas y con enfriamiento en el panel solar.....	71
Fig. 82. Curva de I-V con tres lámparas y con enfriamiento en el panel solar.....	72
Fig. 83. Curva de P-V con tres lámparas y con enfriamiento en el panel solar.....	73
Fig. 84. Curva de I-V con cuatro lámparas y con enfriamiento en el panel solar.....	74
Fig. 85. Curva de P-V con cuatro lámparas y con enfriamiento en el panel solar.....	75
Fig. 86. Curva característica I-V de una pila de combustible.....	76
Fig. 87. Curva característica P-V de una pila de combustible.....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características de los paneles solares.....	1414
Tabla 1.2 Características eléctricas de los paneles solares.....	1515
Tabla 2.1 Especificaciones técnicas del panel solar .....	41
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del regulador de carga .....	42
Tabla 2.3 Especificaciones técnicas del inversor .....	46
Tabla 2.4 Características del piranómetro .....	47
Tabla 2.5 Comparativa de varios Arduino del mercado .....	47
Tabla 3.1 Datos obtenidos del piranómetro de acuerdo con el número de lámparas .....	61
Tabla 3.2 Datos medidos del voltaje inicial y voltaje final con ventilación al panel solar.....	61
Tabla 3.3 Datos medidos del voltaje inicial y voltaje final sin ventilación al panel solar .....	62
Tabla 3.4 Valores de las mediciones realizadas en vacío con ventilación .....	63
Tabla 3.5 Valores de las mediciones realizadas en vacío sin ventilación .....	64
Tabla 3.6 Valores medidos con una carga de 12W .....	66
Tabla 3.7 Valores medidos con una carga de 18W .....	67
Tabla 3.8 Mediciones realizadas con un voltímetro y un amperímetro - 1 lámpara .....	68
Tabla 3.9 Mediciones realizadas con un voltímetro y un amperímetro - 2 lámparas .....	70
Tabla 3.10 Mediciones realizadas con un voltímetro y un amperímetro - 3 lámparas .....	72
Tabla 3.11 Mediciones realizadas con un voltímetro y un amperímetro - 4 lámparas .....	73
Tabla 3.12 Adquisición de datos de la pila de combustible .....	75

## Resumen

Los sistemas de generación solar presentan grandes beneficios tanto en el área ambiental como en el ámbito social, por esta razón su estudio tiene una gran relevancia y se vuelve un campo innovador al aplicarlo para la generación eléctrica. Los sistemas de generación fotovoltaicos incorporan varios componentes, tales como: paneles solares, reguladores de carga, inversores, baterías, protecciones del sistema entre otras, con los cuales se realiza la implementación y generación de energía eléctrica.

Estos sistemas presentan grandes beneficios, debido a que permiten reducir la dependencia de combustibles fósiles, que de alguna manera influyen en el calentamiento global, esto ha generado el interés a nivel de docencia e investigación. Para conocer los principios de funcionamiento de este sistema, se implementa un módulo de pruebas a nivel de laboratorio para el estudio de paneles solares fotovoltaicos y pilas de combustible, mediante el uso de equipos y componentes, el cual además permitirá la visualización de las curvas características de corriente, potencia y voltaje.

Con las pruebas realizadas en el módulo se demostró que las curvas características de los paneles solares y pilas de combustible obtenidas se asemejan a las que son características para este tipo de modelos las cuales son proporcionadas por el fabricante, así teniendo un módulo didáctico con el cual los estudiantes podrán aprender de una forma sencilla e intuitiva todo lo relacionado con la generación de la energía solar.

**Palabras claves:** Energía renovable, Módulo de pruebas, Generación de energía fotovoltaica, Pila de combustible.

## Abstract

Solar generation systems have great benefits both in the environmental and social areas, for this reason its study has a great relevance and becomes an innovative field when applied to power generation. The photovoltaic generation systems incorporate several components, such as: solar panels, charge controllers, inverters, batteries, system protections, among others, with which the implementation and generation of electric energy is carried out.

These systems have great benefits, because they reduce dependence on fossil fuels, which somehow influence global warming, this has generated interest at the level of teaching and research. In order to know the principles of operation of this system, a testing module is implemented at laboratory level for the study of photovoltaic solar panels and fuel cells, through the use of equipment and components, which will also allow the visualization of the characteristic curves of current, power and voltage.

With the tests performed in the module it was demonstrated that the characteristic curves of the solar panels and fuel cells obtained are similar to those that are characteristic for this type of models which are provided by the manufacturer, thus having a didactic module with which students can learn in a simple and intuitive way everything related to solar energy generation.

**Keywords:** Sustainable energy, Test module, Photovoltaic power generation, Fuel cell.

## Introducción

En la actualidad, dependemos de las energías para cubrir nuestras necesidades, pasando por muchas formas de uso, desde la generación, hasta nuestros hogares. Alrededor del 75% de la energía consumida a nivel mundial es derivadas de energías no renovables (carbón, petróleo y gas) y un 25% por otro tipo de energías como la nuclear con un 6%, la hidráulica con un 7% y el restante 13% proviene de otras fuentes de energía no convencionales, incluidas las energías renovables(UNED, 2016).

La radiación del sol es fundamental para nuestro planeta y representa su mayor parte de energía, ya que está en todas las fuentes conocidas como energías renovables y no renovables y que son producidas directa o indirectamente por la radiación que emite el sol sobre la tierra. Se calcula que entre el 1 - 2% de la energía solar se convierte en viento(Moro, 2010).

En Latinoamérica se alcanza una potencia fotovoltaica instalada de 10GW, según las nuevas estadísticas publicadas por la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA), América del sur alcanzo unos 5.469MW de potencia instalada donde Brasil y Chile son los mayores productores con 2.2 GW y 2.1GW respectivamente y en esta lista se encuentra Ecuador con un 26MW a finales de 2018(Bellini E, 2019).

Los paneles solares fotovoltaicos generan señales en continua y se requiere elementos electrónicos de potencia como inversores para generar una onda cercana a la sinusoidal con una pequeña distorsión que pueda adaptarse a la red(Ballesteros, 2012).

La energía solar es una de las fuentes de energía renovable no convencionales en la que más se ha trabajado recientemente en Ecuador y es notorio que la mayoría de los proyectos son a pequeña escala y aislados, aun sabiendo que esta fuente de energía ofrece enorme potencia, particularmente en aplicaciones fotovoltaicas. El potencial energético solar en nuestro país es enorme y merece un mayor apoyo por parte del estado, tanto en investigación como en desarrollo, ya sea por inversión directa o creando estímulos para que otras fuentes de financiamiento puedan incursionar en este campo(Luis & Espinoza, 2015).

Uno de los aspectos importantes dentro de la energía solar fotovoltaica son los sistemas de almacenamiento, ya que el recurso es instantáneo y se necesita un dispositivo para poder almacenarla. Hoy en día se han desarrollado muchas tecnologías e investigaciones como las

pilas de combustible o celda de combustible. Se trata de un dispositivo electroquímico de conversión de energía similar a una batería y se diferencia en que está diseñada para el abastecimiento continuo de los reactivos consumidos. Es decir, produce electricidad de una fuente externa de combustible y de oxígeno u otro agente oxidante, lo que su proceso químico es de alta eficiencia y mínimo impacto ambiental(BOSCH, 1996).

La eficiencia energética de una pila de combustible esta entre el 40 – 60%, y puede llegar hasta un 85-90% en cogeneración, si se captura el calor residual para su uso. (S. et al., 2015).

Las baterías convencionales son dispositivos de almacenamiento de energía y su combustible está en su interior y producen energía hasta que se consume. Sin embargo, en la pila de combustible los reactivos se suministran como un flujo continuo desde el exterior, lo que permite generar energía de forma interrumpida(EG & Services, 2004).

## **Planteamiento del problema**

El uso de energías renovables no convencionales a nivel mundial ha generado mucho interés, debido a que permiten reducir la dependencia de combustibles fósiles, para la generación de energía que de alguna manera influyen en el calentamiento global, por lo que ha despertado el interés a nivel de docencia e investigación el conocer los principios de funcionamiento de estos fenómenos.

Por tal razón es necesario que la universidad cuente con módulos de pruebas a escalas de laboratorio para el estudio de energías renovables, por ese motivo nos centramos en los paneles solares fotovoltaicos y pilas de combustible, pero no se encuentran implementadas en la universidad debido a su costo.

## **Formulación del problema**

¿Es posible implementar un módulo de pruebas para paneles solares fotovoltaicos y pilas de combustible para los laboratorios de la Carrera de Electricidad?

# Objetivos

## Objetivo General

Implementar un módulo de pruebas a nivel de laboratorio para el estudio de paneles solares fotovoltaicos y pilas de combustible, mediante el uso de equipos y componentes reales para la capacitación de los estudiantes de la Carrera de Electricidad.

## Objetivos Específicos

- Realizar la comparación de las diferentes tecnologías para sistemas fotovoltaicos y sistemas de almacenamiento basado en pilas de combustible.
- Diseñar el módulo de pruebas a escala de laboratorio.
- Evaluar el funcionamiento del módulo con su respectivo manual de prácticas.

## Alcance del Trabajo

Para la implementación se tomará de referencia a módulos similares didácticos con aplicaciones similares a escala de laboratorio.

El módulo de estudio de paneles solares y pilas de combustible se utilizará para desarrollar un manual de prácticas en temas de relevancia e innovación de aplicación de las tecnologías mencionadas y de acuerdo con la información recopilada.

Para la adquisición y visualización de datos se realizará mediante software específico.

Se elaborarán al menos cinco prácticas de laboratorio, las mismas que podrán ser utilizadas en materias con contexto relacionado y que permitirá a los estudiantes tener una noción básica del principio de funcionamiento de estas tecnologías.

## Justificación

En el Ecuador se han incorporado varias políticas para fomentar el uso de energías renovables no convencionales. En la constitución de la república de 1998 ya se establecía que el estado promoverá su uso, mientras que, en la constitución del 2008, se afianza este principio y se incorpore el concepto de eficiencia energética.

De acuerdo con la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica (aprobada en enero de 2015). Dispone como principio fundamental la promoción y ejecución de planes y

proyectos con fuentes de energías renovables. Se destaca que el Estado debe desarrollar mecanismos específicos para la promoción de energías renovables. En este sentido se establece que el MEER promoverá un sistema eléctrico sostenible, sustentado en los recursos renovables.

La electricidad producida contará con condiciones preferentes, así como también se exonera el pago de aranceles, además impuestos adicionales y gravámenes que afecten a la importación de materias equipos no producidos en el país, para la investigación, producción, fabricación e instalación de sistemas destinados a la utilización de energía solar, eólica, geotérmica, biomasa y otras. Así mismo se mencionan la exoneración del pago de impuestos sobre la renta, durante cinco años a partir de su instalación a las empresas que, con su inversión, instalen y operen centrales de producción de electricidad usando recursos energéticos no convencionales.

La regulación Nro. ARCONEL – 003/18 menciona que la reducción de aranceles se aplica a clientes comerciales que tienen un consumo superior a 2000kW/h, aclarando que beneficia al sector productivo con altos niveles de consumo energético(ARCONEL, 2019).

Como consecuencia de lo antes expuesto se ha visto la necesidad de impulsar la investigación de estas energías renovables, desde la universidad que debe implementar módulos de laboratorios para que los estudiantes conozcan el principio de funcionamiento de estas energías.

## **Viabilidad de la Investigación**

La disponibilidad de conocimientos en esta área los encontramos en libros en bibliotecas virtuales que facilitan seguir con esta investigación.

Para el diseño y la implementación de este módulo se toma como referencia estudios similares realizados, para brindar una alta confiabilidad al momento de realizar prácticas en laboratorio.

Para la realización de este módulo se cuenta con la disponibilidad de algunos equipos existentes en los laboratorios lo que reducirá el costo para la implementación, que ayudarían a la investigación tanto del estudiante como de los docentes y despiertan el interés por estos temas que son parte de la formación profesional.

# CAPÍTULO 1

## Descripción y comparación de las tecnologías de generación solar

En un sistema de generación solar se encuentran varios componentes como: paneles solares, reguladores de carga, inversores, baterías, protecciones del sistema, etc. Con los cuales se realiza un análisis para la implementación y generación de energía fotovoltaica. Las fuentes de energía con mayor proyección a futuro son las energías renovables, especialmente la energía fotovoltaica que utiliza la energía solar y la convierte en energía eléctrica.

El panel solar monocristalino está constituido por silicio que es un material abundante en el planeta. Teniendo una ventaja que a mayor cantidad de radiación es mayor la cantidad de energía que estos producen. Para una alimentación de usuarios se utiliza un inversor que convierte la corriente continua que produce el panel solar a corriente alterna.

Para la energía entregada por el panel solar es recomendable tener implementado un sistema de almacenamiento para abastecer energía en los periodos de baja irradiancia y que la carga se mantenga constante. Por esta razón se considera dos tipos de almacenamientos, una batería de acuerdo con la carga requerida por el usuario y una pila de combustible que no suministra la suficiente potencia, pero es ideal para su estudio ya que presenta un alto rendimiento, mayor nivel de seguridad y que innovan dentro de las nuevas tecnologías.

En el presente capítulo se da a conocer los conceptos teórico técnicos utilizados para el diseño e implementación del módulo de pruebas de generación fotovoltaico.

### 1.1. Introducción a la energía solar

La energía fotovoltaica se genera a partir del efecto fotoeléctrico, el cual consiste en que, bajo ciertas condiciones, los fotones consiguen liberar electrones de los átomos a que pertenecen, produciéndose así corriente eléctrica, pero para que este efecto sea producido, se requiere que en los electrones una cantidad de energía determinada, por lo cual, no toda la radiación solar cuenta con la capacidad de liberar dichos electrones (Báez & Forero, 2018).

Se denomina “banda prohibida” o “gap” a la energía requerida para liberar un electrón, los fotones con energía mayor al “gap” interaccionan con los electrones covalentes que unen los átomos de silicio del panel solar, rompiendo los enlaces, liberando electrones y permitiendo la generación de energía eléctrica aprovechable (Soria, 2018).

## 1.2. Fundamentos de tecnologías fotovoltaicas

En funcionamiento convencional de este sistema se realiza de la siguiente manera: la luz solar es recibida sobre la superficie del conjunto de celdas fotovoltaicas, en donde el primer proceso por el que pasa es la conversión de la energía eléctrica generada en Corriente Directa (CD) por las celdas solares; la energía generada es recolectada y procede a ser transportada hasta un controlador de carga, el cual tiene la función de enviar toda o parte de esta energía hasta el banco de baterías, en donde es almacenada, cuidando que no se excedan los límites de sobrecarga y sobre descarga; dependiendo del diseño aplicado, parte de esta energía es enviada directamente a las cargas (Tello, 2010).

Estos sistemas, independientemente de su utilización y del tamaño de potencia, se pueden dividir en dos categorías:

- Sistemas Interconectados a la red (grid connected).
- Sistemas Aislados (stand alone).

### 1.2.1. Sistemas fotovoltaicos conectados a la red

Los sistemas solares fotovoltaicos ON-GRID o Grid Tie, son sistemas de sincronización directa con una red existente (red de suministro de energía a la carga), generalmente se encuentra a cargo de una empresa prestadora de servicios públicos eléctricos; estos sistemas "Grid Tie" permiten reducir el consumo en la carga, además su principal ventaja es que toda la energía sobrante generada es incorporada a la red de suministro, este efecto hace de que para estos sistemas se deban implementar sistemas de regulación de potencia para evitar los excedentes o la instalación de medidores bidireccionales, de esta manera se hace un registro de la cantidad de energía entrante como consumo y la saliente como excedentes, este proceso se muestra en la Figura. 1 (Castrillón, 2018).

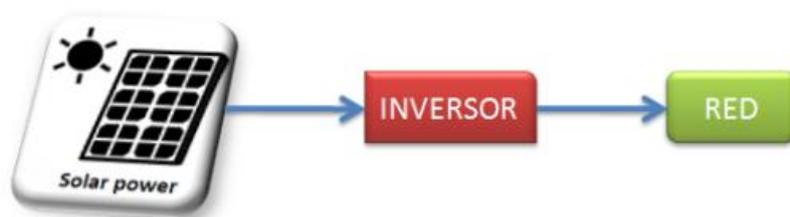


Fig. 1. Diagrama general sistema ON-GRID O GRID TIE  
Fuente: (Castrillón, 2018)

Estos sistemas presentan transferencia de energía directa, lo que quiere decir que la energía producida por la etapa fotovoltaica se transfiere con pérdidas mínimas a la Red. En la instalación de sistemas conectados a red, de inyección a una red ON-GRID, se deben tener

en cuenta que la conexión se debe realizar al lado del consumo teniendo en cuenta el diagrama mostrado en la Figura. 2 (H. López & Puente, 2014).

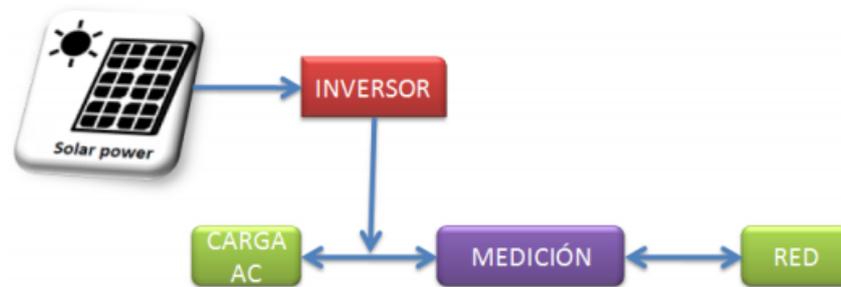


Fig. 2. Diagrama general de conexión en sitio  
Fuente: (H. López & Puente, 2014)

### 1.2.2. Sistemas fotovoltaicos aislados

Este tipo de sistemas constructivamente son pequeños y por lo regular se diseñan para baja potencia, hasta micro redes donde el sistema está centralizado y sirve a varios usuarios mediante redes de distribución, estos Sistemas FotoVoltaicos Aislados (SFVA), hacen que la corriente generada por los paneles se almacene en un banco de baterías a través de un regulador de carga que controla el voltaje y la corriente en el sistema. La conexión a las cargas en corriente continua es directa, en tanto que para satisfacer las de corriente alterna se instala un inversor (Macancela, 2012).

El Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) subdivide a los SFVA en:

- SFVAR residenciales o domiciliarios: con cargas en CD, CA o mixtas.
- SFVAC para uso comunitario: centros de salud, escuelas, casas comunales, iglesias, etc.
- SFVAE para usos especiales: telecomunicaciones, bombeo de agua, iluminación pública, sistemas de seguridad, etc.
- SFVAM en microrredes. Incluye las redes de distribución.

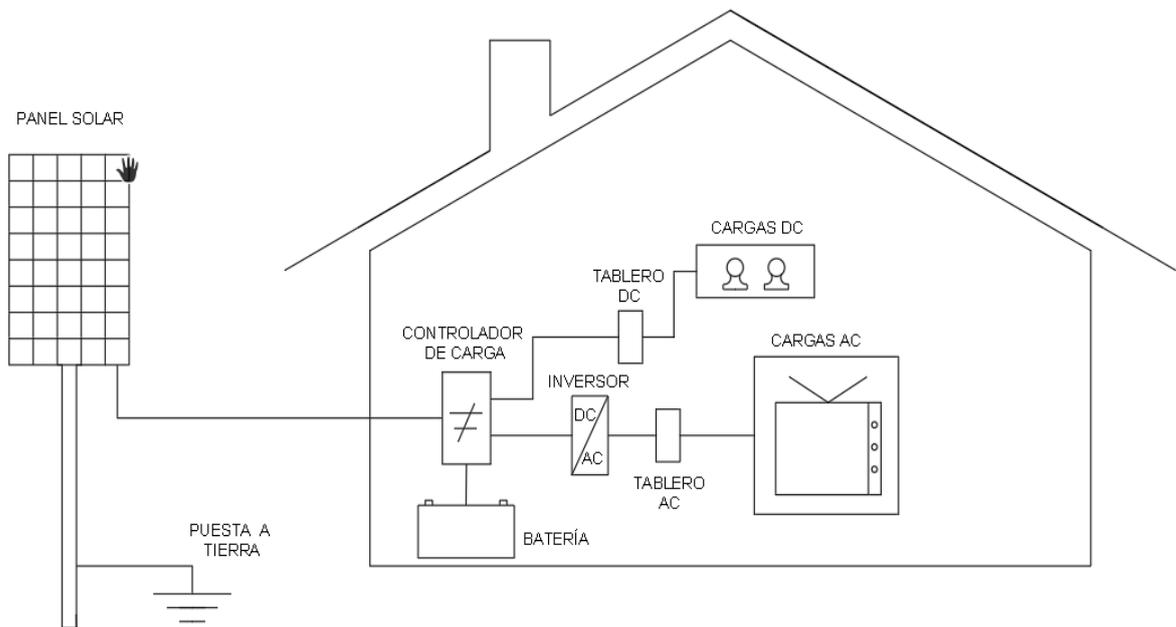


Fig. 3. Sistema Fotovoltaico Aislado de la Red SFVA  
Fuente: (Macancela, 2012)

### 1.3. Paneles solares

El panel solar es el elemento principal dentro de cualquier instalación para la generación de energía solar, convirtiendo la energía del sol en energía eléctrica (corriente continua). Su función es convertir en electricidad los fotones que provienen de la luz del sol o también llamado efecto fotovoltaico (Chávez, 2012).

Dentro de un panel solar se encuentra el conjunto de celdas fotovoltaicas compuestas por materiales semiconductores, como por ejemplo el silicio cristalino o el arseniuro de galio, que se comportan como conductores de electricidad o aislantes, según como se ubiquen (Lindao, 2020).

Los paneles solares al momento de quedar expuestos a la radiación solar, transmiten energía a los electrones y estos pueden romper la barrera de potencia de la unión P-N (positivo – negativo) y salir así del semiconductor a través de un circuito exterior, además se configuran de formas diversas para lograr un voltaje y potencia deseada (Ruiz, 2020).

#### 1.3.1. Partes del panel solar fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico se constituye por las siguientes partes mostradas en la siguiente Figura. 4 (Buitrón & Encalada, 2012):



Fig. 4. Partes de un módulo fotovoltaico  
Fuente: (Buitrón & Encalada, 2012)

**Marco:** Tiene la función de facilitar la fijación de todo el conjunto a un soporte.

**Cubierta o vidrio frontal:** Es anti reflejante para optimizar la captación de los rayos solares.

**Encapsulado frontal y trasero:** Proporciona solidez a las células, son insertadas en un material transparente para aislarlas eléctricamente. Su encapsulado debe permitir la transmisión de la radiación solar y no degradarse con la luz ultravioleta.

**Recubrimiento trasero:** Debe ser blanca para mejorar el rendimiento del módulo, ayudando a reflejar la radiación que incide entre los huecos que dejan las células.

**Caja de Conexiones:** Están situadas en la parte posterior del módulo, con una protección contra el polvo (protección IP54).

### 1.3.2. Tipos de paneles solares

Los paneles solares que se encuentran en el mercado son:

- **Paneles solares monocristalinos**

Tienen un rendimiento más elevado, con un 20% de fabricación y 24% los elaborados en laboratorios. Su composición es de silicio puro fundido y dopado con boro, tienen un costo medio alto, son más usados para climas que tienen nubes, tormentas y con temperaturas máximas no muy altas, consiguiendo las máximas radiaciones en bajas temperaturas (Autosolar, 2020).

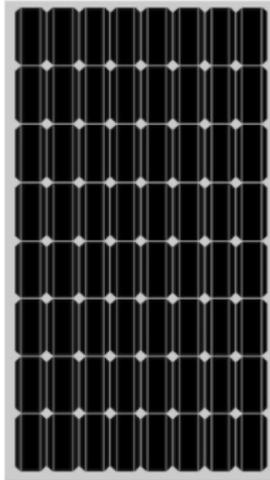


Fig. 5. Panel solar monocristalino  
Fuente: (EcoInventos, 2019)

- **Paneles solares policristalinos**

Proporcionan un rendimiento entre el 12 y 14%, con un espesor más reducido. Su diferencia con los paneles solares monocristalinos es que son de forma cuadrada, haciendo que se aproveche mejor el espacio entre células del panel solar y se aplica menos silicio en su fabricación y su proceso es menos complicado (Blas Martínez & Ángel Torres, 2010).

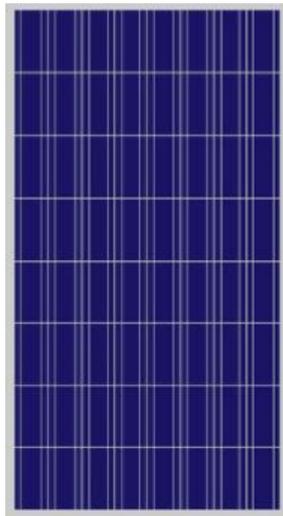


Fig. 6. Panel solar policristalino  
Fuente: (EcoInventos, 2019)

- **Paneles solares amorfos**

Estos proporcionan un rendimiento inferior al 10%, la ventaja es su maleabilidad. Se encuentran instalados en edificios donde se aplican tamaños considerables por su adaptación, son más delgados y económicos (Chacón, 2019).



Fig. 7. Panel solar amorfo  
Fuente: (Chacón, 2019)

- **Paneles solares de sulfuro de cadmio y sulfuro de cobre**

Tienen como ventaja su proceso de fabricación y se utiliza poco material activo. Su rendimiento es reducido cuando llegan a actividad industrial mientras que en rendimiento obtenido en laboratorio llegan al 10%. Se degradan con el paso del tiempo y se convierte en un problema (Pizano, 2016).



Fig. 8. Panel solar de sulfuro de cadmio  
Fuente: (Pizano, 2016)

- **Paneles solares de arsénico de galio**

Los paneles de arsénico de galio son los más indicados en la fabricación, teniendo un rendimiento cercano al 27-28% en su versión monocristalina. Con poco material se logra una eficacia elevada, pero la escasez del material encarece mucho, son de tecnología muy costosa y son usadas en naves espaciales (Roca, 2018).

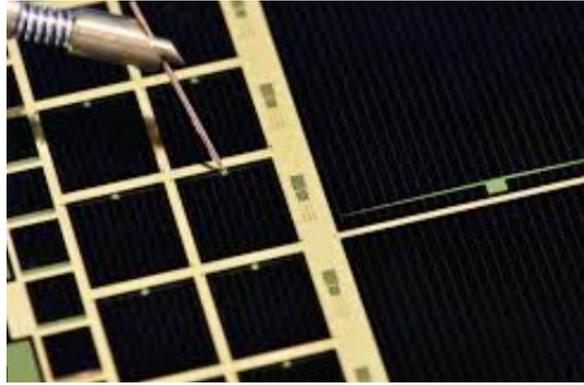


Fig. 9. Panel solar de arsénico de galio  
Fuente: (Roca, 2018)

- **Paneles solares de di seleniuro de cobre en indio**

Es una célula solar que cuenta con una película muy delgada que sobre su soporte de vidrio o plástico se deposita una fina capa de cobre en galio, que provechan mejor la radiación solar. Además tienen un rendimiento en laboratorio próximos al 17% y en los módulos comerciales del 9% (Flisom, 2014).

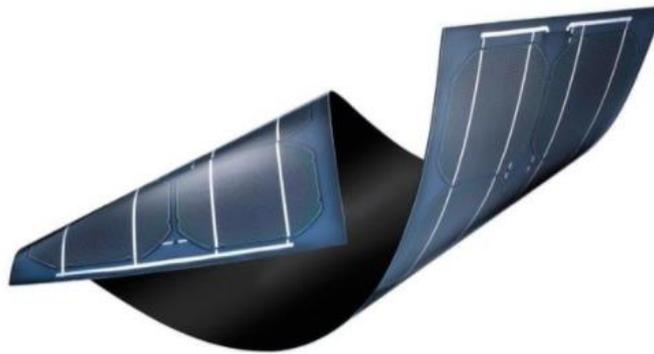


Fig. 10. Panel solar de di seleniuro de cobre en indio  
Fuente: (Flisom, 2014)

- **Paneles solares de telurio de cadmio**

Estos paneles solares son altamente eficientes, usando una tecnología de película delgada ofreciendo una operación muy cercana a su eficiencia energética. El rendimiento en laboratorio es del 16% y en módulos comerciales del 8% (PNGEGG, 2018).



Fig. 11. Panel solar de telurio de cadmio  
Fuente: (PNGEGG, 2018)

- **Paneles solares híbridos**

Es la combinación de un panel solar fotovoltaico y un panel solar térmico. Se refrigeran las células fotovoltaicas con agua, que a su vez, se puede acumular y utilizar como agua caliente (ENDEF, 2019).



Fig. 12. Panel solar híbrido  
Fuente: (ENDEF, 2019)

#### **1.4. Comparativa de las tecnologías existentes sobre paneles solares**

De acuerdo con las tecnologías detalladas previamente se puede notar que los paneles solares de arsénico de galio son los de mayor rendimiento con un 27%-28%, pero estos tienen un costo muy elevado y su material de fabricación es escaso, a diferencia con los demás paneles solares descritos los que tienen más ventajas son los monocristalinos que tienen un porcentaje del 20% de rendimiento, consiguen máximas radiaciones en bajas temperaturas, sus materiales de construcción son más fáciles de encontrar, cuenta con un costo menor y

son más utilizados para aplicaciones prácticas y didácticas de esta manera resultando ser la opción más accesible para la implementación del presente trabajo.

### 1.5. Características técnicas de los paneles solares

La ficha técnica de un panel fotovoltaico nos define eléctricamente una serie de parámetros. Estos datos vienen medidos por los fabricantes en condiciones estándar (STC) para una irradiancia de  $1000W/m^2$ , con una temperatura de célula de  $25^\circ$  y una distribución espectral de AM 1.5G. En la siguiente Tabla 1.1 se muestran los datos eléctricos, temperatura y límite máximo establecido por del fabricante de acuerdo con el panel solar (Tecnosol, 2019).

TABLA 1.1  
CARACTERÍSTICAS DE LOS PANELES SOLARES

<b>Características eléctricas</b>				
<i>P<sub>max</sub>, V<sub>DC</sub>, I<sub>SC</sub>, V<sub>mp</sub>, I<sub>mp</sub> en condiciones estandar (<math>1000W/m^2</math>, <math>25^\circ C</math>, AM 1.5G)</i>				
Potencia Máxima ( <i>P<sub>max</sub></i> )	225W	235W	245W	255W
Voltaje en Circuito Abierto ( <i>V<sub>DC</sub></i> )	36.8V	37.0V	37.2V	37.4V
Corriente Circuito Abierto ( <i>I<sub>SC</sub></i> )	8.16A	8.42A	8.62A	8.82A
Voltaje a Potencia Máxima ( <i>V<sub>mp</sub></i> )	30.1V	30.3V	30.4V	30.6V
Corriente a Potencia Máxima ( <i>I<sub>mp</sub></i> )	7.48A	7.76A	8.06A	8.34A
Efificencia del módulo(%)	13.8	14.4	15.0	15.6
<b>Coefficiente de Temperatura</b>				
Coefficiente de Temperatura para ( <i>P<sub>max</sub></i> )	-0.43 %/ °C			
Coefficiente de Temperatura para ( <i>V<sub>DC</sub></i> )	-0.33 %/ °C			
Coefficiente de Temperatura para ( <i>I<sub>SC</sub></i> )	+0.056 %/ °C			
<b>Límite Máximo Absoluto</b>				
Sistema Máximo de Voltaje	1000V DC			
Temperatura de operación del módulo	-40°C hasta + 85°C			

Fuente:(Tecnosol, 2019)

Los paneles solares fotovoltaicos se componen de un conjunto de células conectadas unas a otras, que reúnen condiciones óptimas para su utilización. Un ejemplo de cómo están constituidos sería que los paneles de 12V se componen de 36 células mientras que un panel de 24V está conformado por 72 células y los llamados conexión a red por 60 células (Tecnosol, 2019).

#### 1.5.1. Curva característica de un panel fotovoltaico

La curva característica o también llamada curva intensidad(I)-voltaje(V), representa los valores de tensión y corriente, medidos experimentalmente bajo condiciones constantes de insolación y temperatura, variando desde cero a infinito (Esquiú, 2011).

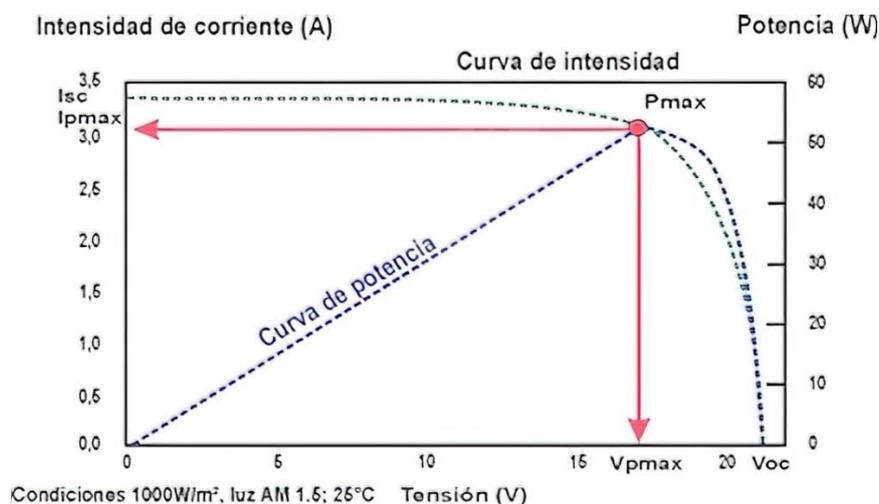


Fig. 13. Curva I-V de un Panel solar fotovoltaico  
Fuente: (Tecnosol, 2019)

### 1.5.2. Características eléctricas de los paneles solares

En la siguiente tabla se muestra los parámetros eléctricos que se deben considerar en una ficha técnica de los paneles solares.

TABLA 1.2  
CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LOS PANELES SOLARES

<b>Intensidad de cortocircuito (Icc o Isc)</b>	Se produce a tensión 0 voltios y se puede medir directamente con un amperímetro, sus valores varían en función de las condiciones atmosféricas de medida
<b>Tensión de circuito abierto (Vca o Voc)</b>	Es la tensión máxima del panel, se puede medir sin carga con un voltímetro y su valor varía de acuerdo con las condiciones atmosféricas
<b>Potencia máxima (Pmax)</b>	Medición dada en vatios pico (Wp). Es la potencia máxima que puede suministrar el panel fotovoltaico, en otras palabras, es el punto donde el producto intensidad y tensión es máxima, bajo condiciones estándar de medida
<b>Corriente en el punto de máxima potencia (Imp)</b>	Viene a ser la corriente producida cuando la potencia es máxima en condiciones estándares de medida

<b>Voltaje en el punto de máxima potencia (Vmp)</b>	Viene a ser la tensión producida cuando la potencia es máxima en condiciones estándares de medida
<b>Eficiencia (%)</b>	Define la eficiencia de conversión ( $\eta$ ), es la cantidad de potencia de radiación incidente sobre el panel solar que es capaz de convertirse en potencia eléctrica (Tecnosol, 2019).  <i>Rendimiento o eficiencia = <math>W_p/W_r</math></i>
<b>Tolerancia (%)</b>	Representa una pequeña dispersión de la potencia del módulo que está dentro de una banda 63%,65,0+3%. Siendo lo ideal que estas tolerancias sean positivas
<b>TONC(°C), temperatura nominal de operación de la célula</b>	Es la temperatura que alcanzan las células cuando se someten a irradiación de 800W/m <sup>2</sup> , temperatura ambiente de 20°C, una velocidad del viento de 1m/s y una distribución espectral AM 1.5G

Fuente: (Tobajas, 2014)

- **Efecto de la intensidad de iluminación (Irradiancia)**

La corriente suministrada al panel es proporcional a la intensidad de la radiación y la superficie de células del panel. En la Figura. 14 se muestra diferentes irradiancias a temperatura constante y como varia la intensidad, a mayor incidente, mayor intensidad (Tecnosol, 2019).

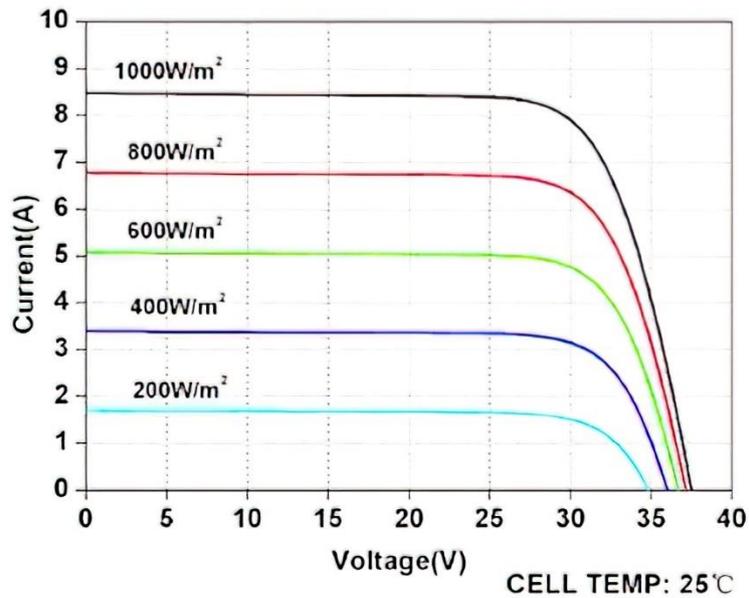


Fig. 14. Curva I-V a diferentes irradiancias  
Fuente: (Tecnosol, 2019)

Debido a la temperatura de operación los paneles representan unas pérdidas, por lo general oscilan por cada 10°C de incremento en un 4% (Tecnosol, 2019).

En función de la temperatura la tensión proporcionada aumenta. En la gráfica se puede observar:

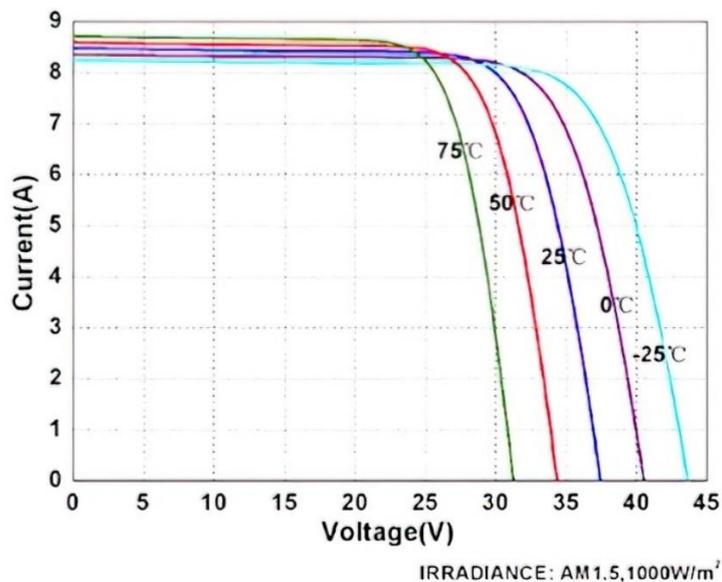


Fig. 15. Curva I-V a diferentes temperaturas  
Fuente: (Tecnosol, 2019)

En las fichas técnicas nos dan la variación en la potencia máxima ( $P_{\text{máx}}$ ). Además de la tensión en circuito abierto ( $V_{\text{oc}}$ ) e intensidad de cortocircuito ( $I_{\text{sc}}$ ) con la temperatura (Tecnosol, 2019).

## 1.6. Componentes para la medición y funcionamiento de un sistema fotovoltaica.

En la siguiente sección se da a conocer los componentes utilizados en la generación, regulación y distribución del sistema fotovoltaico, además de los componentes para la conversión y almacenamiento de energía desde el panel solar siendo estos los cuales fueron seleccionados mediante el análisis previo detallado en el capítulo 1.

### 1.6.1. Sensor de irradiación - Piranómetro

Son dispositivos que utilizan una celda solar de silicio policristalino para medir la radiación solar global y capaces de medir el índice de radiación solar UV en nuestra atmosfera sobre una superficie plana, cuentan con un ángulo de visión de 120 grados y su cantidad de energía esta expresada por  $W/m^2$  (Vera, 2016).

Poseen una armadura resistente a cualquier ambiente o condiciones climatológicas. Se pueden instalar de forma horizontal o inclinada y también de manera invertida para la recepción de radiación reflejada (Zúñiga & Granda, 2019).

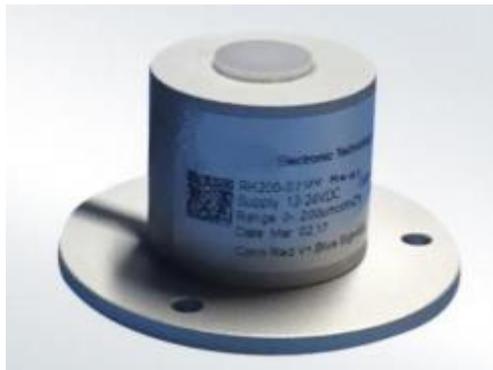


Fig. 16. Piranómetro de radiación solar global  
Fuente: (Zúñiga & Granda, 2019)

A continuación, se muestra la ficha técnica de este sensor, dependiendo los voltajes de entrada - salida y longitud de onda.

- Salida 4~20mA.
- Rango 0~1500  $W/m^2$ .
- Precisión  $\pm 5\%$ .
- Error Coseno suele ser inferior al 3% de la vertical a  $85^\circ$  en todas las direcciones.
- Coeficiente de Temperatura 0.15% por cada  $1^\circ C$ .

En el siguiente gráfico se muestra la respuesta espectral que mide el piranómetro que va desde los 300 y 1100 nanómetros, esto debido a que más del 90% de energía solar está dentro de ese rango. El piranómetro esta calibrado a fin de estimar la onda corta de la radiación solar (Vera, 2016).

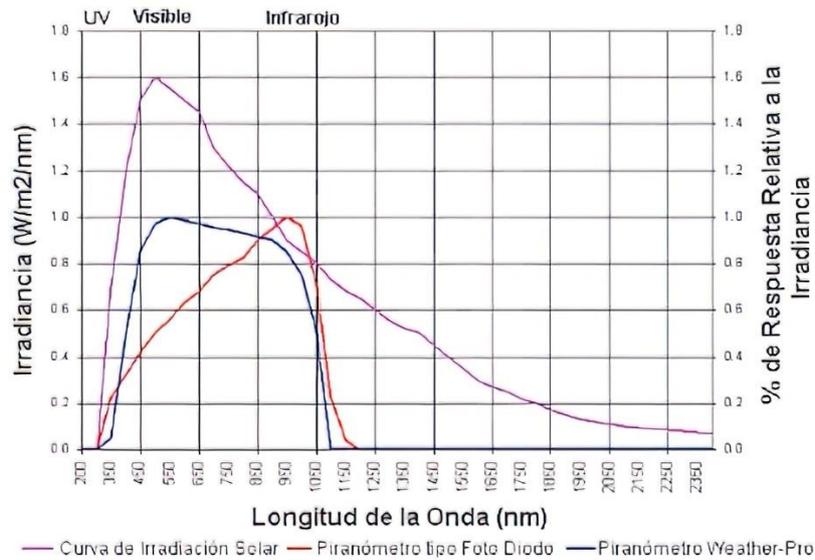


Fig. 17. Gráfico de respuesta espectral  
Fuente: (Vera, 2016)

### 1.6.2. Regulador de carga

La función principal de un regulador de carga es impedir que la batería continúe recibiendo energía del panel solar cuando ya ha alcanzado la carga máxima, también ayuda a la prevención de la sobre carga en la batería, evitando la disminución de almacenamiento de la batería (Buitrón & Encalada, 2012).



Fig. 18. Regulador de carga de 20A  
Fuente: Fotografía del Autor

Estos reguladores se ajustan automáticamente al sistema, ya sea con voltaje de 12V o 24V. Incorporan un sistema de seguridad y visualización al momento de sobre carga y sobre descarga (Buitrón & Encalada, 2012).

### 1.6.3 Inversor de carga CD/CA

Los inversores son dispositivos que transforman la corriente continua en corriente alterna, con una magnitud y frecuencia deseada, además se encarga de proporcionar un voltaje de salida de 120V.

Constan de transistores o dispositivos similares como: tiristores, triac, IGBT y MOSFETs (Buitrón & Encalada, 2012).



Fig. 19. Inversor de carga  
Fuente: Fotografía del Autor

## 1.7. Sistemas de almacenamiento

Para un sistema de energía solar fotovoltaica se requiere un almacenamiento de energía, teniendo así un sistema autosuficiente de generación y distribución (Abdullah, 2012).

Entre los métodos de almacenamiento se encuentran las baterías y las pilas de combustible o también llamada celda de combustible, que son dispositivos electroquímicos en el que se produce un flujo continuo de combustible y oxidante, haciendo una reacción química controlada y suministra directamente corriente eléctrica a un circuito externo (Bosch, 2003).

### 1.7.1. Pilas de Combustible

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de un combustible directamente en electricidad. Se parece a las baterías en muchos aspectos: tiene un electrolito, un electrodo positivo y otro negativo y genera electricidad en corriente continua. Sin embargo, se diferencia de éstas en que no almacena la energía química, sino que se tiene que suministrar de manera continua el combustible para obtener la energía

eléctrica, mientras que las pilas de combustible funcionan de manera indefinida al tener combustible y oxidante a los electrodos (Chao, 2017).

Como resultado de la reacción electroquímica se obtendrá la electricidad, agua y calor. El agua sale de la pila de combustible y la corriente eléctrica pasa por un circuito externo. Siendo así que la combinación del oxígeno y el hidrogeno es de manera inversa a la electrolítica, y lo único que produce es vapor que puede ser liberada libremente al medio ambiente sin causar ningún daño(Tipán, 2015).



Fig. 20. Pila de Combustible  
Fuente: (Chao, 2017)

### 1.7.2. Principio de funcionamiento de una Celda de Combustible

El hidrogeno ( $H_2$ ) ingresa por el electrodo negativo (ánodo) y se separa, en presencia del catalizador, en iones positivos  $H^+$  y electrones. El oxígeno ( $O_2$ ) procedente del aire ingresa por el electrodo opuesto (cátodo) y se separa en presencia del catalizador en iones  $O_2$ . Los iones positivos del hidrogeno se escapan a través del electrolito en dirección al cátodo, dejando a los electrones libres en el ánodo, como se muestra en la Figura. 21.

Se produce energía eléctrica cuando existe un camino eléctrico entre el ánodo y el cátodo. En el cátodo se vuelve a combinar el hidrogeno con el oxígeno para formar moléculas de agua (Calderón A. & Mesa-Palacio, 2004).

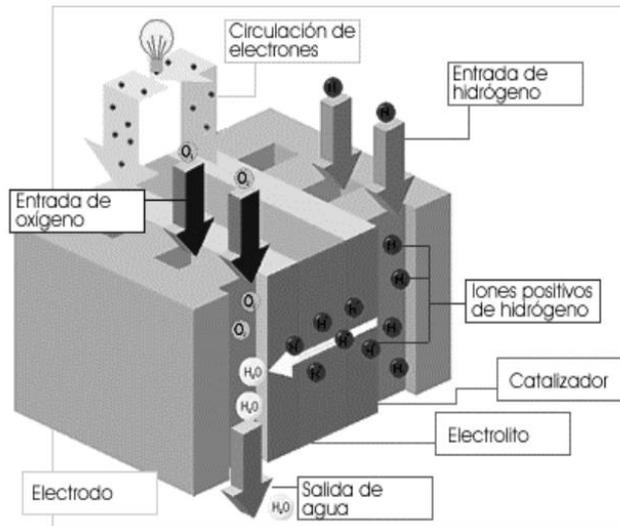


Fig. 21. Principio básico de funcionamiento de una pila de combustible  
Fuente: (Calderón A. & Mesa-Palacio, 2004)

### 1.7.3. Curva de Polarización

En una pila de combustible podemos ver su rendimiento con la curva de polarización, que muestra el comportamiento del voltaje de la celda contra la densidad de corriente de operación como se indica en la siguiente Figura. 22.

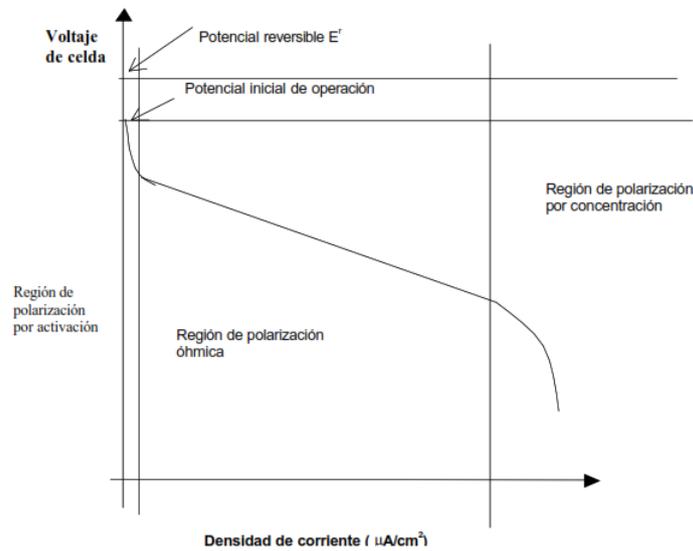


Fig. 22. Curva de polarización de una pila de combustible  
Fuente: (Calderón A. & Mesa-Palacio, 2004)

### 1.7.4. Composición

Los elementos básicos de una pila de combustible son: los electrodos (el cátodo o polo positivo y el ánodo o polo negativo); el electrolito, sustancia encargada de transportar los iones; y la placa bipolar, que actúa como colector de corriente y distribuidor de gas (Ramírez et al., 2010).

Estos componentes se detallan con más profundidad a continuación (Tipán, 2015):

**Combustible:** Sustancia oxidable, puede ser  $H_2$ .

**Oxidante:** Es la sustancia que oxida, generalmente oxígeno del aire.

**Ánodo:** Electrodo donde ocurre las reacciones anódicas o de oxidación. Los mismos que están compuestos por un metal poroso conductor, recubierto por un electro-catalizador de platino o aleaciones de platino. La reacción de oxidación que ocurre en una celda de combustible que utiliza hidrógeno es:



**Cátodo:** Electrodo donde ocurren las reacciones catódicas o de reducción. Al igual que el ánodo, estos electrodos están compuestos por un material poroso conductor recubierto por un electrolizador, usualmente PtRu/C. La reacción de reducción que ocurre en el caso de una celda de combustible de hidrógeno o una de alcohol directo es:



**Membrana o electrolito:** Es un polímero por donde se transfieren los iones. En el caso de la celda de combustible de hidrógeno o una de alcohol directo, es por donde se transfieren los protones desde el ánodo hacia el cátodo.

Las membranas utilizadas están constituidas por polímeros rígidos con sustituyentes voluminosos que combinan con una gran selectividad elevada de permeabilidad. Las elevadas temperaturas de estos materiales reducen los procesos de envejecimiento que disminuyen las prestaciones de las membranas poliméricas (Tipán, 2015).

**Placas bipolares.** En una pila de combustible, las placas bipolares tienen cuatro funciones fundamentales. Distribución del combustible y el oxidante por la celda. Separar las celdas individuales del Stack. Facilitar la gestión del agua y el calor dentro de la celda. Colectar la corriente. Las placas bipolares se construyen a partir de materiales que deben presentar unas propiedades físicas y químicas acordes con la función a desempeñar como la permeabilidad del hidrógeno resistente a la corrosión, conductividad eléctrica, conductividad térmica y fuerza compresora. Los materiales más aptos para el uso en placas bipolares son los compuestos de carbón-polímero y los metálicos con recubrimiento. El grafito posee excelente resistencia a la corrosión, pero por otra parte tiene baja resistencia eléctrica y baja resistencia al contacto, aunque tiene alto peso y volumen. Los compuestos carbón-carbón poseen baja densidad, alta

resistencia a la corrosión y baja resistencia al contacto (Tipán, 2015).

**Productos:** Dependiendo del combustible y del oxidante empleado son los productos obtenidos en las reacciones de oxidación y de reducción. En el caso de la celda de combustible de hidrógeno el único producto es el agua y en una celda de alcohol directo, es  $CO_2$  y  $H_2O$  (Macías & Ramírez, 2019).

**Circuito externo (carga):** Es el lugar donde se cierra el circuito eléctrico y permite la transferencia de electrones del ánodo al cátodo, la cual puede aprovecharse para realizar un trabajo eléctrico (Macías & Ramírez, 2019).

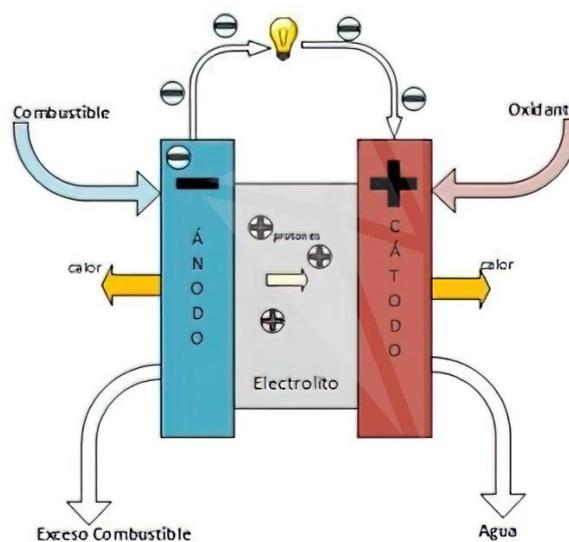


Fig. 23. Composición de una pila de combustible  
Fuente: (Ramírez et al., 2010)

### 1.7.5. Tipos de Celdas de Combustible

Existen diversos tipos de celdas de combustible, que se suelen clasificar según el tipo de electrolito empleado. Así, los distintos tipos de celdas de combustible operan a diferentes temperaturas, y requieren diversos grados de pureza del hidrógeno suministrado. Una forma de clasificación de celdas es según el tipo de electrolito, estos son los seis tipos de celda de combustible existentes (González, 2017).

- Celdas de Membrana de Intercambio de Protones o de Membrana Polimérica (PEMFC)
- Celdas de combustible Alcalinas (AFC).
- Celdas de Ácido Fosfórico (PAFC)
- Celdas de Carbonato Fundido (MCFC)

- Celdas de Óxido Sólido (SOFC)
- Celdas de Metanol Directo (DMFC)

- **Celda de Membrana Polimérica**

Comúnmente llamadas pilas de combustible de membrana de intercambio de protones, pero su nombre oficial es Celda de Membrana Polimérica (PEM). Estas usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen platino como catalizador. Una celda de combustible tipo PEM consiste en dos electrodos: el ánodo “electrodo combustible” y el cátodo “electrodo oxidante” separados por un electrolito (la membrana) (Macías & Ramírez, 2019).

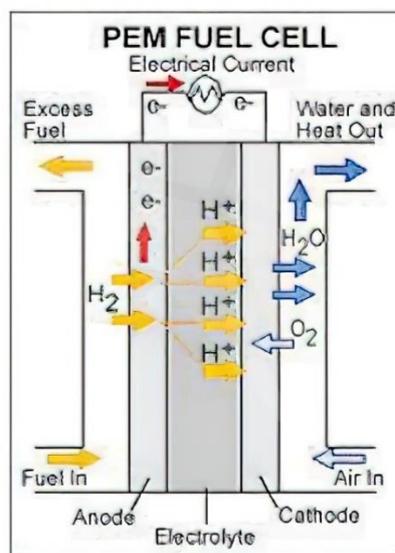


Fig. 24. Celda de combustible tipo PEM  
Fuente: (Macías & Ramírez, 2019)

- **Celdas de Combustible Alcalinas**

Estas celdas son utilizadas desde hace mucho tiempo por la National Aeronautics Space Administration (NASA) en misiones espaciales, este tipo de celdas pueden alcanzar eficiencias de generación eléctrica de hasta 70%. El electrolito utilizado en este tipo de celda es el Hidróxido de potasio (KOH). Hasta hace poco tiempo eran demasiado costosas para aplicaciones comerciales pero varias compañías están examinando formas de reducir estos costos y mejorar la flexibilidad en su operación (Macías & Ramírez, 2019).

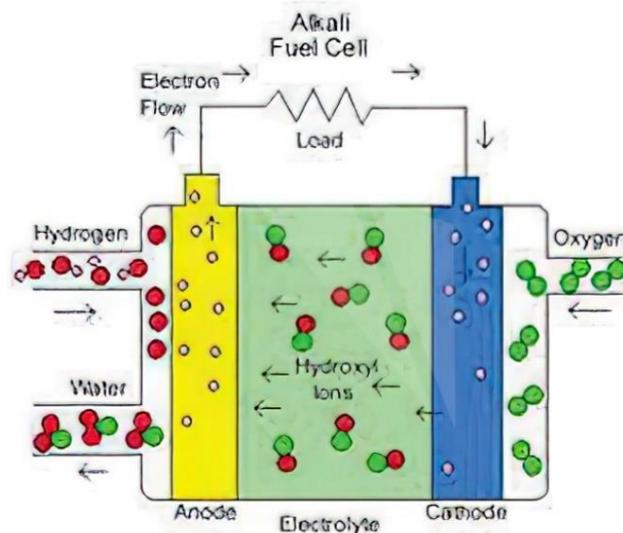


Fig. 25. Celda de combustible alcalina  
Fuente: (Macías & Ramírez, 2019)

- **Celdas de Ácido Fosfórico**

Este tipo de celda de combustible compuesta por Ácido Fosfórico (PAFCs) son las más desarrolladas a nivel comercial, contando con una alta eficiencia acoplado a procesos de cogeneración pero su desventaja es que tienen un costo elevado y se usan en aplicaciones tan diversas como hospitales, hoteles, edificios de oficinas, escuelas, plantas eléctricas etc. (Pulido, 2005).

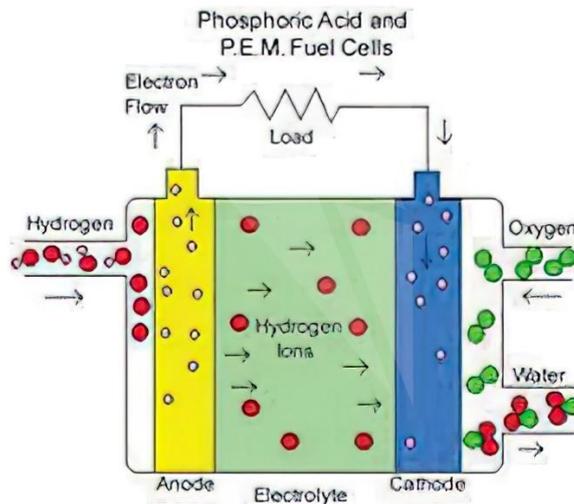


Fig. 26. Celda de combustible de ácido fosfórico  
Fuente: (Pulido, 2005)

Las celdas de combustible de ácido fosfórico generan electricidad a más del 40% de eficiencia, y cerca del 85% si el vapor que ésta produce es empleado en cogeneración comparado con el 30% de la más eficiente máquina de combustión interna. Las temperaturas

de operación se encuentran en el rango de los 400 °F (204°C). Este tipo de celdas pueden ser usadas en vehículos grandes como autobuses y locomotoras.

- **Celdas de Carbonato Fundido**

Conocidas como celdas de Carbonato Fundido (MCFCs), prometen altas eficiencias y la habilidad para consumir combustible a base carbón. Esta celda opera a temperaturas aproximadas a los 1200°F. La primera pila de carbonato fundido a gran escala ha sido ya probada y algunas unidades para demostración están siendo terminadas para su prueba en California desde 1996 (Mendoza, 2018).

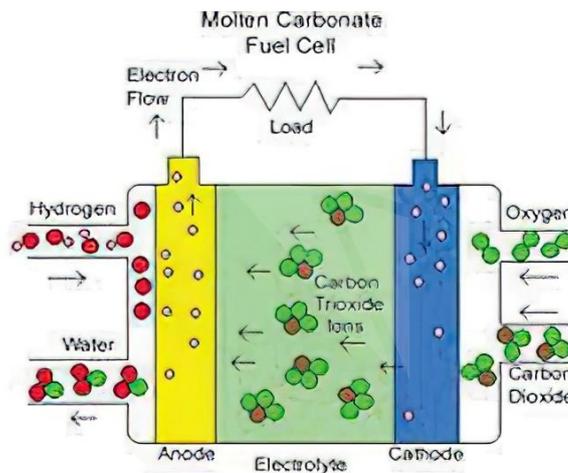


Fig. 27. Celda de combustible de carbonato fundido  
Fuente: (Mendoza, 2018)

- **Celdas de Óxido Sólido**

Para grandes aplicaciones tenemos las celdas de combustible de Óxido Sólido por su alta potencia, incluyendo estaciones de generación de energía eléctrica a gran escala y también para el uso industrial (A. López, 2011).

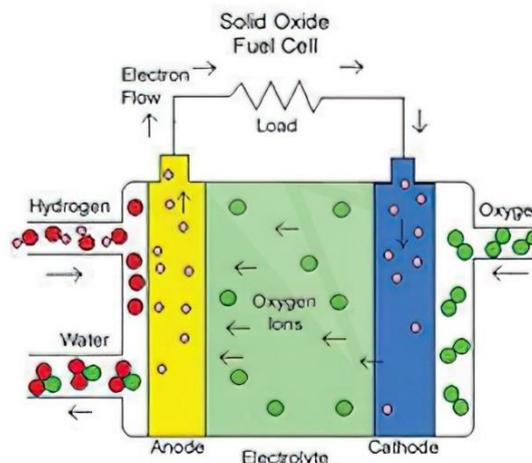


Fig. 28. Celda de combustible de Oxido solido  
Fuente: (A. López, 2011)

- **Celdas de Metanol Directo**

Con una similitud a las celdas de Polímetro Sólido que utiliza una membrana de Polímero como electrolito, tenemos a las Celdas de Metanol Directo (Direct Metanol Fuel Cell DMFC), donde el ánodo saca el hidrógeno directamente del metanol sin necesidad de un reformador de combustible. Actualmente se esperan eficiencias del 40% ya que operan a unas temperaturas de entre 120 – 190°C (Tipán, 2015).

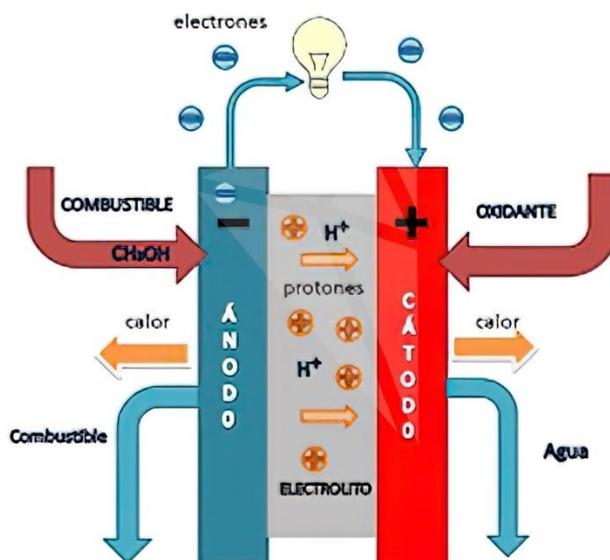


Fig. 29. Celda de combustible Metanol directo  
Fuente: (Roca, 2019)

### 1.8. Comparativa de las tecnologías existentes sobre las pilas de combustible

Con la descripción y funcionamiento de cada una de las celdas de combustible observamos que las pilas de combustible más eficientes son las de Ácido Fosfórico (PAFCs) que llegan hasta un 85% si el vapor es empleado en cogeneración pero tienen un costo muy elevado, a diferencia de las celdas de combustible Alcalinas que fueron usadas en la NASA para misiones espaciales con una eficiencia del 70%, resultando así una opción más accesible para la implementación del presente trabajo, esto debido a que presenta ventajas como un tamaño reducido y su fácil instalación. Se debe recalcar que presentan una desventaja siendo esta que no se puede adquirir en mercados nacionales, pero son los más utilizados para aplicaciones prácticas y didácticas en el aprendizaje acerca de esta nueva revolución en almacenamiento y generación de energía.

### 1.9. Aplicaciones de las pilas de combustible

Las pilas de combustible se dotan de un gran potencial para múltiples aplicaciones, ya que se trata de energía cuya eficiencia no se ve prácticamente afectada por el tamaño. Esto permite abarcar un amplio intervalo de potencias y por ello en la actualidad se perfilan tanto

para aplicaciones estacionarias como para aplicaciones portátiles. En cuanto a las aplicaciones estacionarias, en la actualidad son de gran interés en plantas de cogeneración para aprovechar tanto la energía eléctrica como la calorífica. En aplicaciones de automoción, esta tecnología provee altos niveles de eficiencia y rápidas respuestas con un mínimo de mantenimiento. En aplicaciones portátiles se presentan como una alternativa a las baterías para todo tipo de aplicaciones, en especial ordenadores y teléfonos móviles (Agila, 2013).

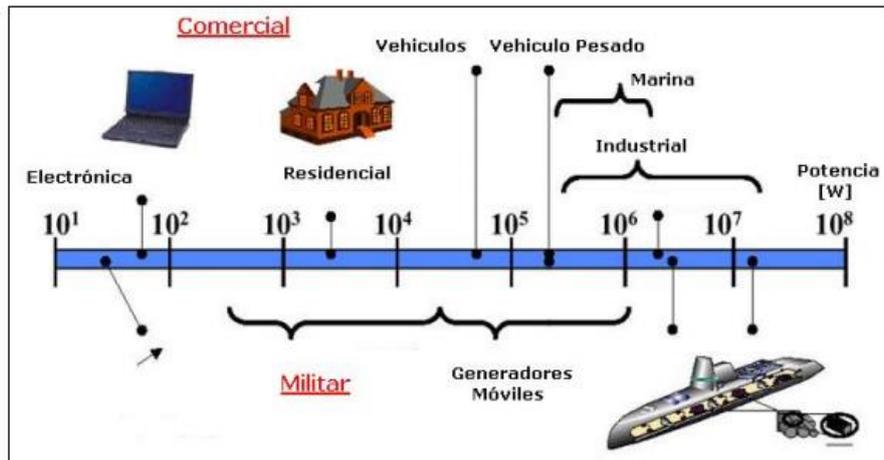


Fig. 30. Aplicaciones de las pilas de combustible en función de la potencia  
Fuente: (Agila, 2013)

### 1.10 Comparativa entre el módulo FESTO LV 46549-E0

Actualmente, en el mercado tecnológico la empresa FESTO cuenta con el módulo de prácticas de energía fotovoltaica de mejor rendimiento, siendo el modelo que destaca el de serie LV 46549-E0, además cuenta con las herramientas de adquisición de datos más modernas, que permiten llevar a cabo mediciones sencillas, seguras y rápidas, con el fin de acelerar el tiempo de ajuste y reducir los periodos de inactividad derivados del uso de instrumentos de medición estándar. El módulo de FESTO se muestra en la Figura. 31.



Fig. 31. Módulo Festo serie LV 46549-E0  
Fuente: (Festo,2020)

La interfaz de adquisición de datos incluye un osciloscopio, un analizador de fasores. Los elementos incorporados se detallan a continuación:

- Baterías de plomo-ácido de 12 V
- Banco de pruebas de panel solar
- Panel solar de silicio monocristalino
- Lámparas 48 V CC
- Lámparas 230 V CA
- Contador de energía 1 CA
- Paquete de baterías de ácido plomo 48 V
- Controlador de carga PWM 48 V CC
- Alimentación de tensión de 230 V CA
- Alimentación de tensión 24 V CA
- Inversor autónomo 1 CA 230 V
- Inversor dependiente de la red 1 CA 230 V
- Controlador del dinamómetro y alimentación de tensión de 4 cuadrantes
- Función de firmware
- Controlador de carga MPPT 48 V CC
- Interfaz de adquisición de datos y control

En comparación al módulo presentado anteriormente el diseño implementado en el presente trabajo consta de un sistema similar en cuanto a características técnicas y además adiciona un sistema de almacenamiento de pila de combustible, también se implementa varios componentes que se detallan más adelante en el desarrollo del presente proyecto.

Con estas especificaciones se determina que la relación de costos entre el módulo FESTO y el módulo implementado es mucho más económico.

# CAPÍTULO 2

## DISEÑO DEL MÓDULO DE PRUEBAS A NIVEL DE LABORATORIO

### 2.1. Introducción

La generación de energía eléctrica con fuentes renovables ha tenido un aumento considerable, esto por las grandes ventajas que tienen al ser amigables para el medio ambiente y reducir la contaminación ambiental dejando en segundo plano otros sistemas de generación. El estudio de energías renovables con componentes reales y la manipulación de estos ayudan a la formación académica, despertando el interés de los estudiantes para interpretar nuevos conceptos sobre el funcionamiento de un sistema de este tipo de generación.

En este capítulo se describió el diseño del presente proyecto, en el cual se analizan y desarrollan los temas correspondientes para la posterior construcción de un módulo de pruebas a nivel de laboratorio para el estudio de paneles fotovoltaicos y pilas de combustible, en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería en Electricidad (CIELE) que se encuentran en la Universidad Técnica del Norte (UTN) Campus El Olivo

### 2.2. Metodología

Para el diseño del proyecto con base en el segundo objetivo específico se desarrolló los siguientes pasos que se describen a continuación:

- Se examinó la información de los componentes de un sistema fotovoltaico, esto para que el diseño este acorde al espacio donde se va a realizar la implementación del módulo.
- Para la distribución de los componentes en el módulo de pruebas se realizó los diseños en el software AUTOCAD, obteniendo una vista previa del sistema a ser implementado, posteriormente se optó por utilizar otro sistema de diseño mediante el programa AUTOCAD 3D, el cual permitió visualizar a detalle cada uno de los elementos que fueron integrados.
- Se realizó el diseño del módulo de tal manera que sea intuitivo y fácil de manipular para los estudiantes y docentes, a fin de observar el funcionamiento y conexión de este.
- Se realizó la adquisición de datos con los parámetros de comunicación entre los sensores utilizados en el módulo, para que así estos sean graficados por medio del programa LabVIEW.

### 2.2.1. Diseño del módulo

La distribución de los elementos en el espacio físico está colocada de tal manera que se pueden visualizar los sistemas principales, los cuales son el sistema de generación de energía fotovoltaica y una mesa de trabajo como se observa en la Figura. 32, de esta manera permite realizar las prácticas de laboratorio y las respectivas adquisiciones de datos mediante un computador. Además, cuenta con un sistema compartido de generación eólica el cual no es estudiado en el presente trabajo, pero está incluido en el módulo.

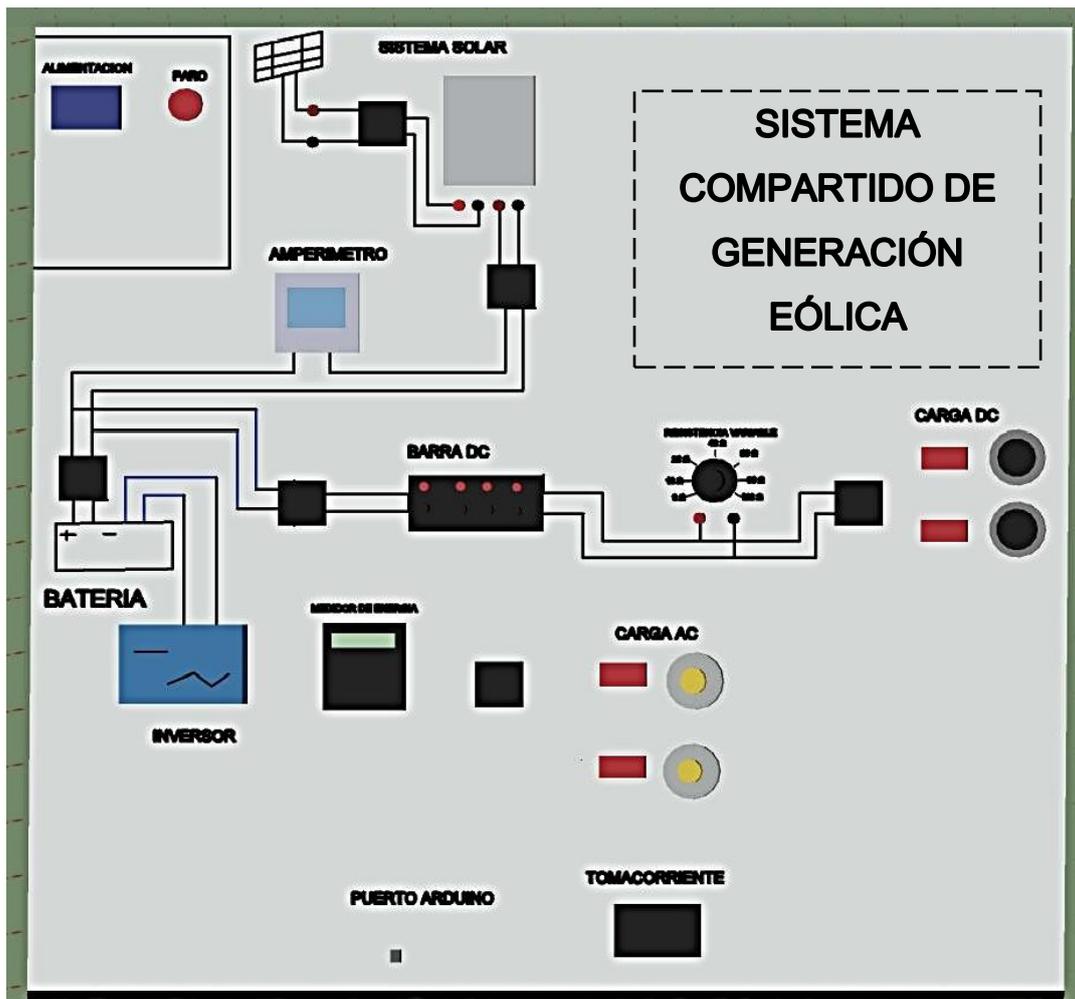


Fig. 32. Distribución de elementos del módulo  
Fuente: Autor

En la Figura. 33 se detalla la estructura en donde están fijados los componentes encargados de la generación de la irradiación, siendo estos las lámparas halógenas, panel solar y el piranómetro.

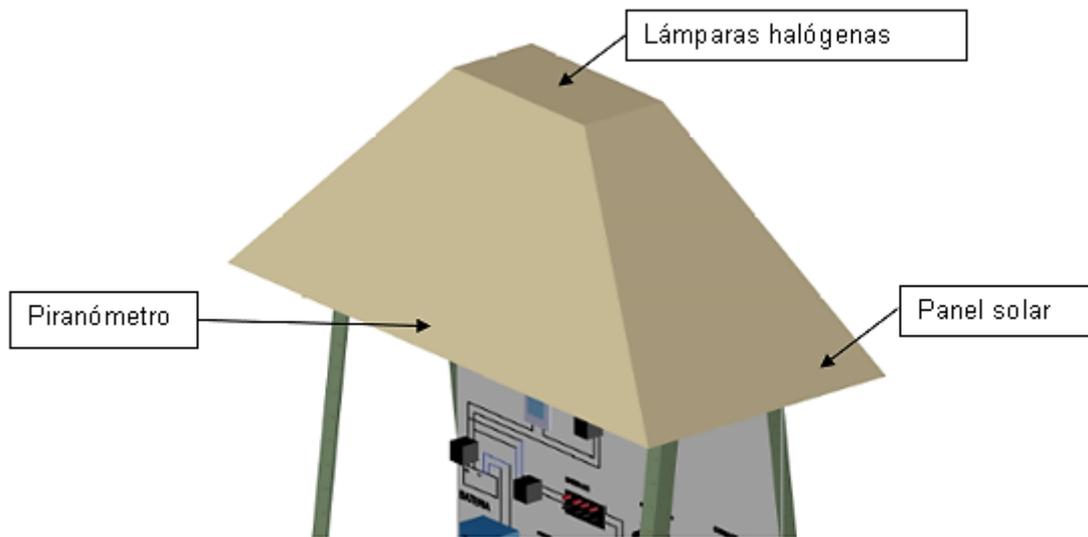


Fig. 33. Diseño de la cubierta de las luminarias y el panel solar  
Fuente: Autor

La Figura. 34 muestra el diseño final del módulo ya implementado.



Fig. 34. Diseño de todo el módulo en AUTOCAD 3D  
Fuente: Autor

## 2.2.2. Diagramas de conexiones

En la Figura. 35 se detalla el diagrama de conexión unifilar del sistema de generación solar, en donde se aprecia la conexión de los componentes para su funcionamiento. El sistema empieza por el panel solar que tiene un máximo de 17.5 VDC en conexión directa a un regulador de carga solar mediante un disyuntor de 10 A. El regulador se encarga de recibir el voltaje generado y reducirlo a 12VDC constante hacia una barra de distribución.

La barra DC alimenta dos puntos de derivación, la primera es un circuito de prueba de carga que consta de una resistencia variable y cargas resistivas para iluminación. La segunda derivación se encarga de suministrar energía a una pila de combustible de 12VDC y hacia un inversor 12VDC/120AC, además integra un medidor de energía y puntos de carga para realizar pruebas.

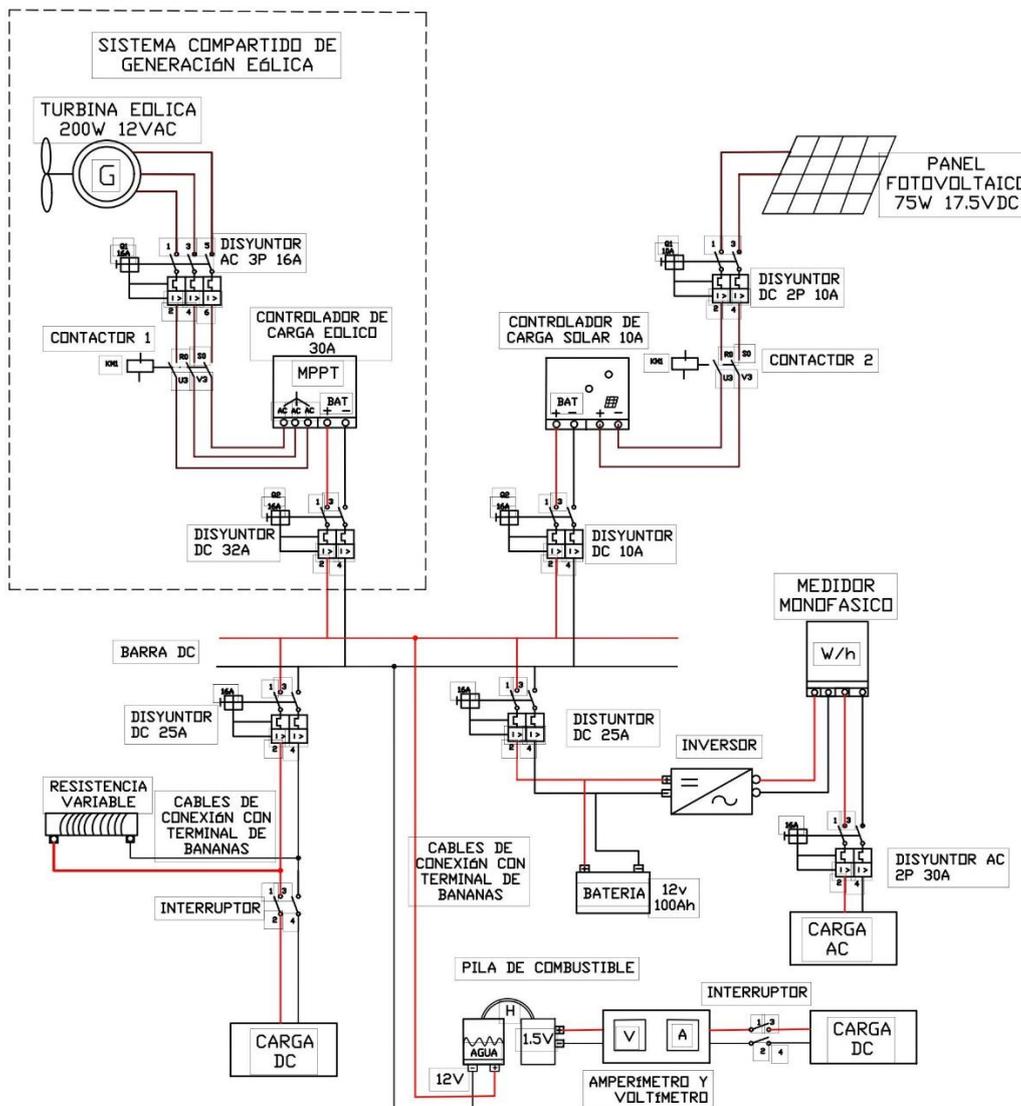


Fig. 35. Diagrama de conexión unifilar del módulo de generación solar  
Fuente: Autor

El sistema cuenta con un mecanismo que permite seleccionar el tipo de energía con el que trabajará, esto mediante un selector de dos posiciones en la primera opción mediante energía solar, accionando un contactor y mostrándose una luz señalizadora que indican que el sistema está listo para operar. La segunda opción permite la alimentación a través del sistema de generación eólica como se detalla en la Figura. 36.

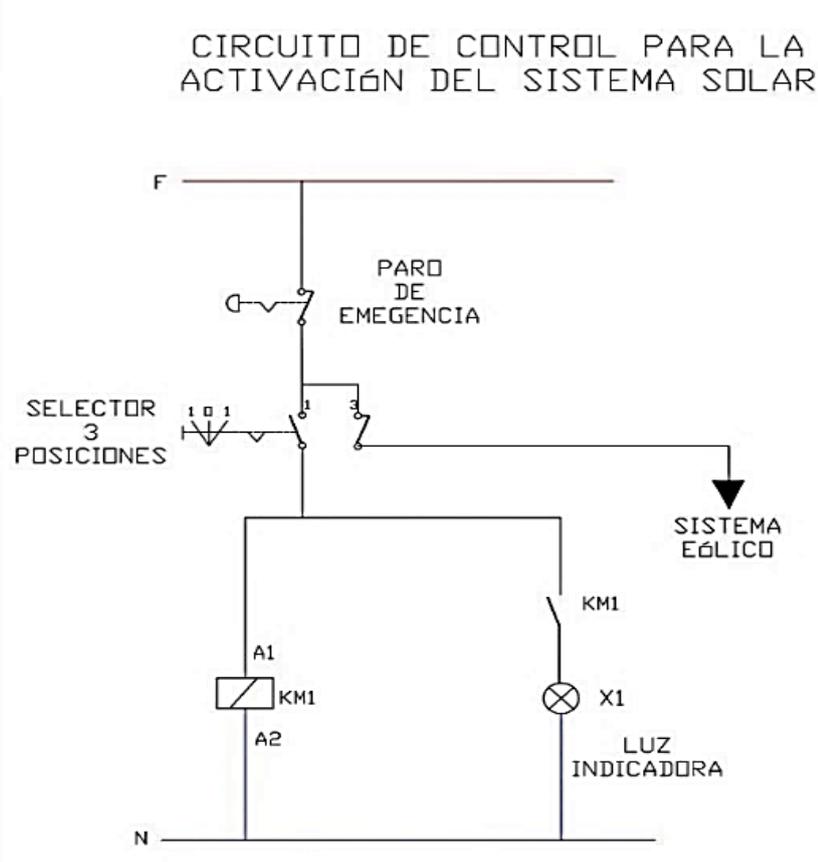


Fig. 36. Diagrama de control para la generación solar  
Fuente: Autor

Al seleccionar el sistema de energización del módulo se puede controlar la cantidad de radiación que llega al panel solar esto es debido a que se habilita un circuito que incorpora 4 lámparas halógenas independientes, cada una con una luz indicadora, como se observa en la Figura. 37.

## CIRCUITO DE FUERZA DEL SISTEMA SOLAR

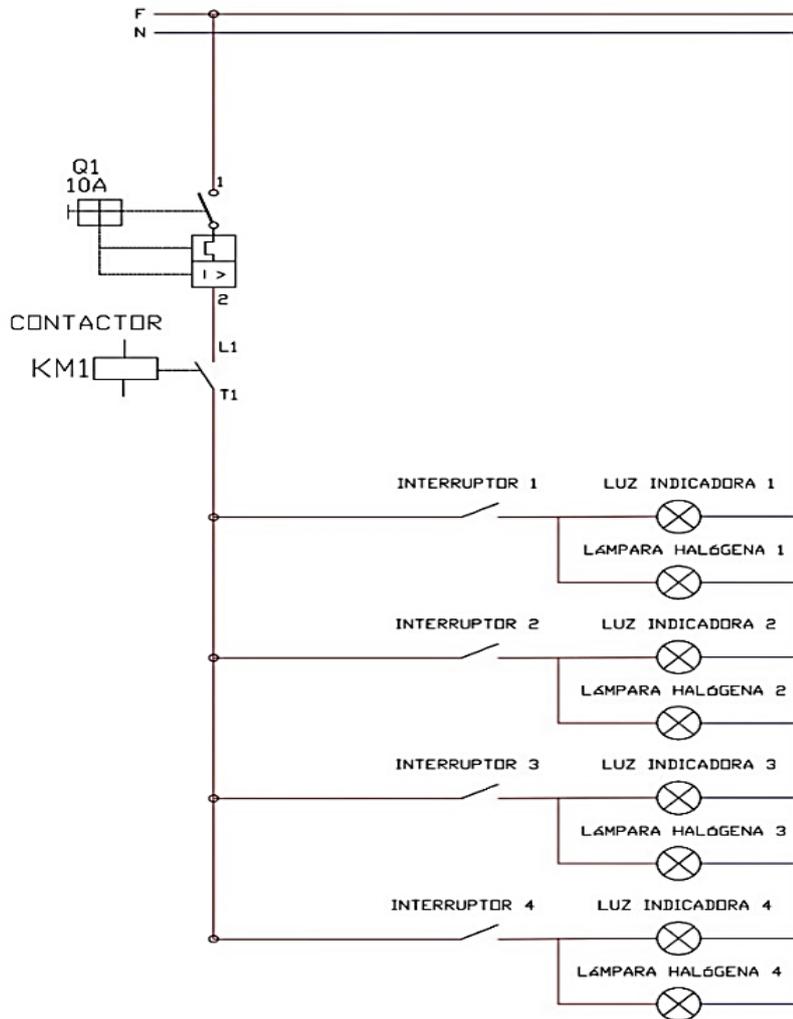


Fig. 37. Diagrama de fuerza para la generación solar  
. Fuente: Autor

### 2.2.3. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema

En el siguiente diagrama de flujo se describe el funcionamiento del módulo de pruebas a nivel de laboratorio. Las luminarias halógenas se alimentan con un voltaje monofásico (120V) para generar la radiación que será captada por el panel solar, donde se pueda realizar las pruebas en vacío. Luego pasa al regulador de carga que se encarga de estabilizar la alimentación hacia las baterías (Pila de Combustible y Batería de almacenamiento) así también a la barra de Bus DC para sus respectivas pruebas de carga.

Por el otro lado tenemos la salida de la batería de almacenamiento que alimenta al inversor DC/AC, que convierte la corriente para poder usar cargas AC, conectado a un medidor para visualizar el consumo de energía en la barra de bus AC de 120V.

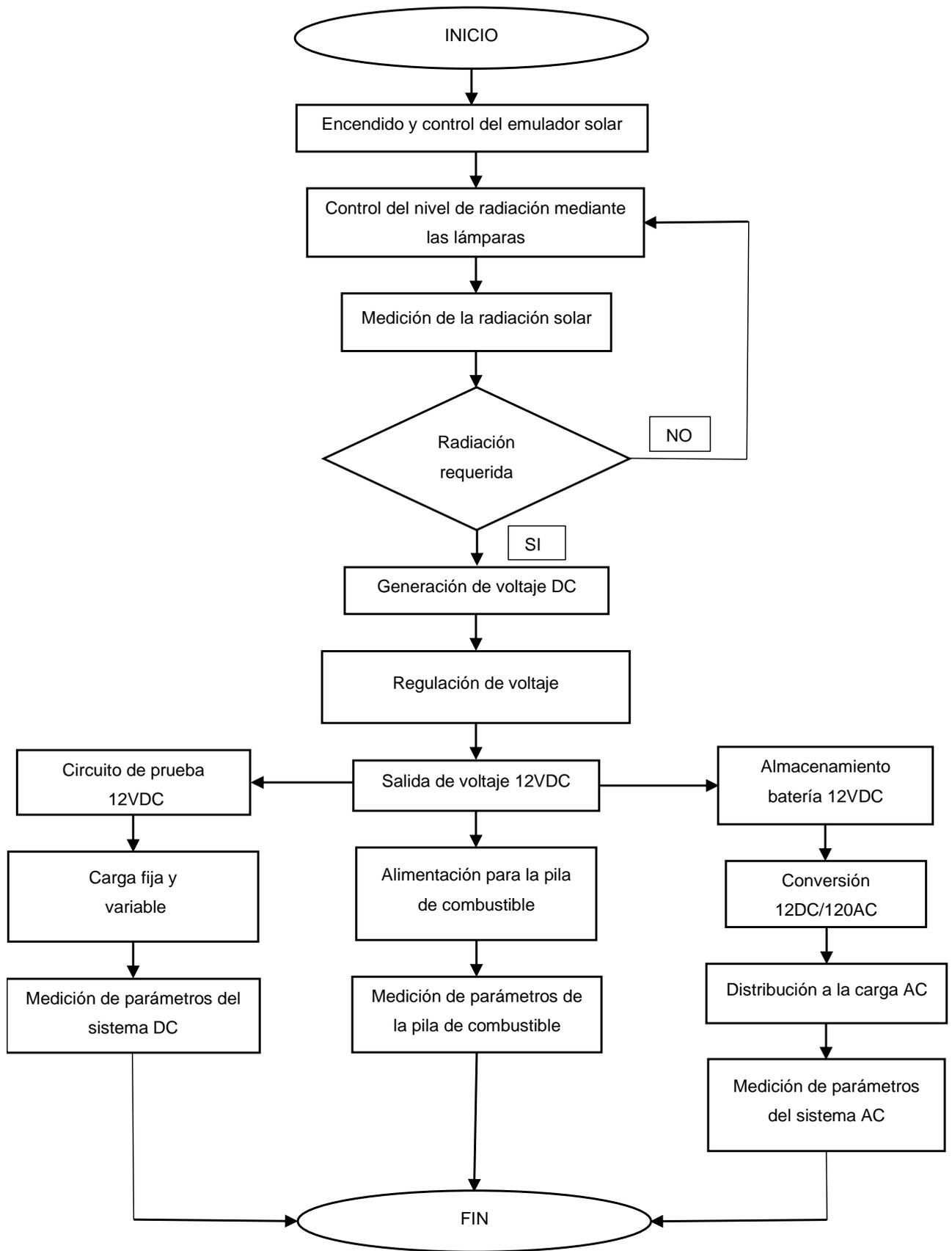


Fig. 38. Diagrama de flujo del funcionamiento  
Fuente: Autor

## 2.2.4. Diagrama para la adquisición de datos

En la Figura. 39 se describe el proceso que tiene que seguir para la adquisición de datos. Empezando por el piranómetro que mide la radiación solar y los muestra en su propio software llamado HOBOWare y estos datos serán enviados a la tarjeta de programación Arduino que a su vez exporta los datos al software LabView para su procesamiento, así mostrando el comportamiento del sistema mediante una interfaz gráfica diseñada en el mismo software.

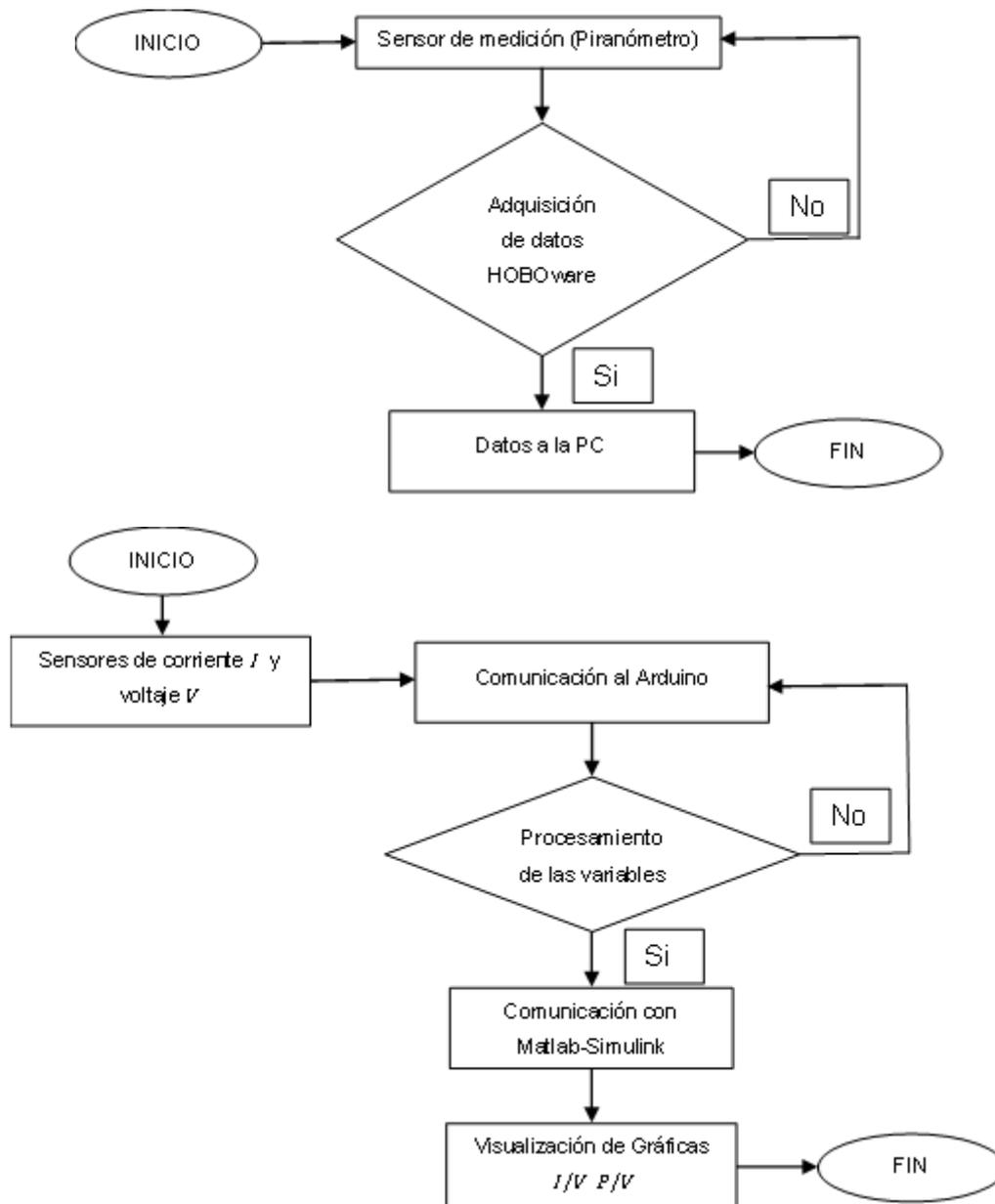


Fig. 39. Diagrama de flujo de la adquisición de datos  
Fuente: Autor

### **2.3. Selección de los elementos para un sistema solar y almacenamiento con pila de combustible**

En la siguiente sección se detallan los elementos usados y las características de estos para el diseño del módulo a nivel de laboratorio, donde se valoran los parámetros más importantes para el correcto funcionamiento de todo el sistema en general.

Los componentes usados son:

- Lámparas halógenas
- Panel solar
- Regulador de carga
- Batería
- Pila de combustible
- Inversor
- Piranómetro
- Arduino
- Sensor de Corriente para Arduino
- Sensor de Voltaje para Arduino
- Reóstato

#### **2.3.1. Lámparas halógenas**

Para generar la radiación solar a escala de laboratorio en el panel fotovoltaico se utilizaron estas lámparas halógenas que generan la energía necesaria para que opere el panel solar. Se usaron cuatro lámparas que cuentan con las siguientes características:

- Entrada de voltaje de 120V
- Potencia de 300 (W)
- Longitud de 118 mm
- Casquillo R7S



Fig. 40. Lámparas halógenas  
Fuente: Fotografía del Autor

### 2.3.2. Panel solar

El panel solar utilizado para la implementación del módulo está constituido por silicio monocristalino como se muestra en la Figura. 41 y sus especificaciones técnicas se detallan en la Tabla 2.1.



Fig. 41. Panel solar monocristalino  
Fuente: Fotografía del Autor

TABLA 2.1  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PANEL SOLAR

<b>Módulo Fotovoltaico modelo HJMO75M-12</b>	
Clasificación Eléctrica	$STC(AM1.55, 1000 W/m^2, 25^{\circ}C)$
Potencia máxima	$75W_p$
Voltaje en circuito abierto ( $V_{oc}$ )	$21.7V$
Corriente de cortocircuito ( $I_{cc}$ )	$4.72A$
Voltaje máximo ( $V_{mp}$ )	$17.4V$
Corriente máxima ( $I_{mp}$ )	$4.35A$
Tolerancia de potencia	$\pm 5\%$
Temperatura nominal de la celda	$45 \pm 3^{\circ}C$

Fuente:(Tecnosol, 2019)

### 2.3.3. Regulador de carga

La selección del controlador de carga se calcula en función de la corriente máxima que pasa por los conductores. Si tenemos un panel de  $75W$  y una batería de  $12V$ , la corriente será calculada por medio de la Ecuación.1.

$$I = \frac{\text{Potencia del panel}}{\text{Voltaje de la batería}} \quad (1)$$

$$I = \frac{75W}{12V} = 6.25 A$$

La corriente calculada es la corriente mínima por lo que se seleccionó el controlador que se muestra en la Figura. 42, que tiene un rango de medición de 5A hasta 20A que cumple con los parámetros mínimos necesarios como se muestra en la siguiente Tabla 2.2 de las especificaciones técnicas del regulador.



Fig. 42. Regulador de carga  
Fuente: Fotografía del Autor

TABLA 2.2  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL REGULADOR DE CARGA

Voltaje nominal	12 / 24V, reconocimiento automático
Voltaje de carga profunda	14.5 / 29.0V (25°C), 2 h
Voltaje de flotación	13.7 / 27.4V (25°C)
Función de desconexión por Bajo Voltaje	11.4 – 11.9 / 22.8 – 23.8V controlado por el estado de carga, 11.0 / 22.0V controlado por el voltaje
Voltaje de reconexión de carga	12.8 / 25.6V
Máx. corriente del panel solar	5 / 8 / 10 / 15 / 20A
Máx. corriente de carga	5 / 8 / 10 / 15 / 20A
Dimensiones	80x100x32 mm (Ancho x Altura x Distancia)
Peso	180gr
Máx. tamaño del cable	16mm <sup>2</sup> (AWG # 6)
Autoconsumo	4mA
Escala de temperatura ambiental	-40 a + 50°C
Caja de protección	IP22

Fuente: (Phocos, 2018)

#### 2.3.4. Batería

Dentro de la selección del banco de baterías se tomaron algunas consideraciones como la estimación de uso energético y la autonomía del voltaje de trabajo. Así también su largo

periodo de tiempo de carga. Para el cálculo de la carga extraíble se la realizó mediante la Ecuación.2.

Donde:

$C$  = Cantidad de carga extraíble en  $Ah$

$E$  = Consumo energético diario en  $W/h$

$d$  = días de autonomía

$V_{sistema}$  = Voltaje de trabajo

$PD$  = Porcentaje de descarga de la batería

$$C = \frac{E*d}{V_{sistema}*PD} \quad (2)$$

Si consideramos un consumo energético diario de  $110W/h$  con 2 días de uso continuo, la batería durará 20h de carga extraíble como se demuestra a continuación:

$$C = \frac{110 * 2}{12V * 0.55} = 33.33Ah$$

De acuerdo con lo calculado, se elige una batería recargable compuesta por ácido de plomo, con un voltaje de  $12V$  y un amperaje de  $35Ah$ , mostrado en la Figura. 43.



Fig. 43 Banco de batería de 12V, 35Ah,20HR  
Fuente: Fotografía del Autor

### 2.3.5. Pila de combustible

Para la selección de la pila de combustible se debe tener en cuenta la salida de voltaje del regulador de carga que es de  $12V$ , ya que necesita este nivel de voltaje en las borneras para iniciar la electrolisis en el recipiente que se muestra en la Figura. 44, la carga la realiza mediante la reacción que tiene con el agua, separando el oxígeno del hidrógeno.

Una consideración que se debe tener en cuenta es que la pila de combustible necesita un mínimo de 2 minutos con la alimentación de  $12V$  en los terminales para realizar la electrolisis.

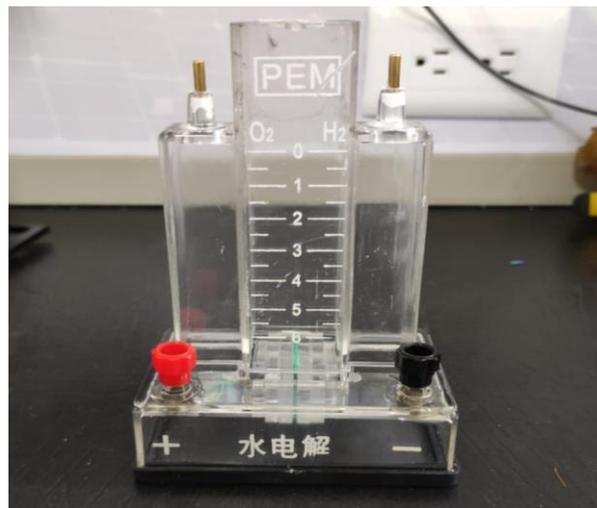


Fig. 44. Recipiente para el agua  
Fuente: Fotografía del Autor

El hidrógeno es el que va a la pila de combustible mostrada en la Figura. 45, mediante un conductor de plástico de  $0.05mm$  de diámetro, y es aquí donde la pila de combustible suministrará energía hasta que el agua se evapore por completo.

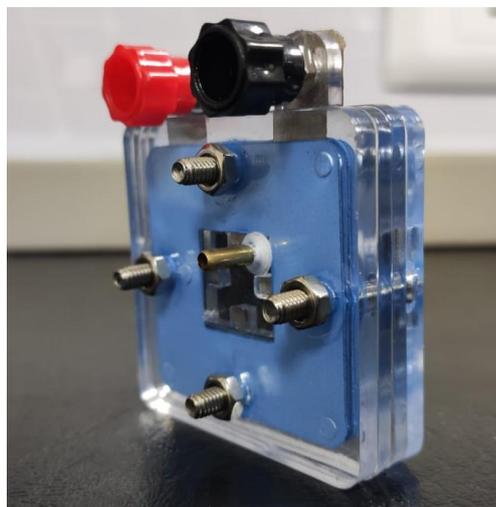


Fig. 45. Pila de combustible  
Fuente: Fotografía del Autor

Mediante este proceso se obtiene un voltaje de 1.5V que alimenta a una carga predefinida en el prototipo, además cuenta con un voltímetro y amperímetro analógicos para una visualización de los valores del consumo de la carga.

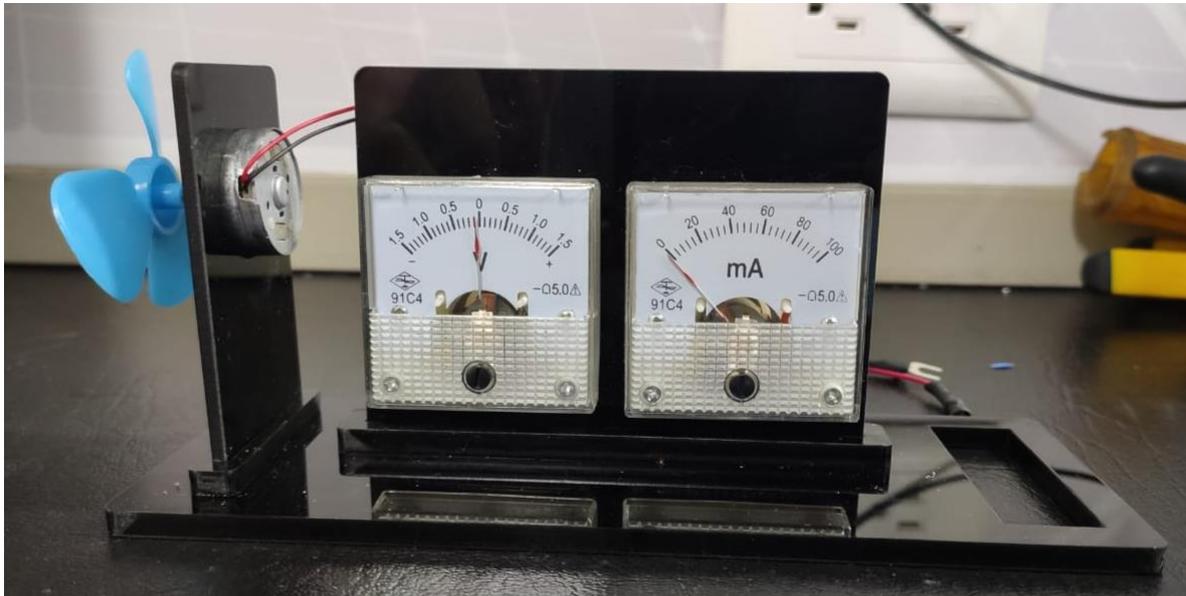


Fig. 46. Voltímetro y Amperímetro analógicos  
Fuente: Fotografía del Autor

### 2.3.6. Inversor

Para la selección del inversor se debe considerar la potencia instalada del panel solar, que es de 75W y se realiza el cálculo de la potencia del inversor mediante la Ecuación.3. Considerando que 1.25 es el factor de seguridad para evitar daños ocasionales al regulador.

$$S_{carga} = FS * Pi \quad (3)$$

Dónde:

$$S_{carga} = \text{Potencia del inversor}$$

$$FS = \text{Factor de seguridad (1.25)}$$

$$Pi = \text{Potencia instalada}$$

$$S_{carga} = 1.25 * 75W = 93.75W$$

Adicionalmente se cuenta con una turbina eólica de 250W, entonces la potencia del inversor será:

$$S_{carga} = \text{Potencia del panel solar} + \text{Potencia de la turbina eólica} \quad (4)$$

$$S_{carga} = 93.75W + 250W$$

$$S_{carga} = 343.75W$$

Con estos cálculos y las características mostradas en la Tabla 2.3, el regulador que se muestra a continuación, se selecciona el inversor COTECK que suministra hasta 350W.

TABLA 2.3  
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL INVERSOR COTECK

<b>Inversor COTECK modelo SK350-112</b>	
Voltaje de entrada	10.5 – 15VDC, 39A
Voltaje de salida	120VAC
Frecuencia	50/60 Hz
Salida de Potencia	350W

Fuente: (Buitrón & Encalada, 2012)

### 2.3.7. Piranómetro

Para detectar la radiación solar que influye en el panel solar por medio de las lámparas halógenas se usa el Piranómetro S\_LIB-M003 que existe en los laboratorios de la Carrera de Ingeniería en Electricidad (CIELE). Este sensor de radiación solar es de la marca HOBO y su rango de medida es de 0 a 1280W/m<sup>2</sup>, valor que no va a ser superado por la radiación que emiten las lámparas halógenas.



Fig. 47. Piranómetro S\_LIB-M003  
Fuente: (DARRERA, 2021)

Además, cuenta con un registrador de datos HOBO Micro Station para un monitoreo multicanal como se muestra en la Figura. 48.



Fig. 48. HOBO Micro Station  
Fuente: (DARRERA, 2021)

Las características del piranómetro se detallan en la siguiente Tabla 2.4.

TABLA 2.4.  
CARACTERÍSTICAS DEL PIRANÓMETRO

Temperatura de operación	-40° a 75°C
Rango de operación	-20° a 50°C
Precisión	$\pm 10W/m^2$ o $\pm 5\%$ .
Puerto serie	3.5 mm para su comunicación

Fuente:(DARRERA, 2021)

### 2.3.8. Arduino

Para la selección del Arduino se hace una comparativa entre varios modelos de Arduino como se detallan en la siguiente Tabla 2.5.

TABLA 2.5.  
COMPARATIVA DE VARIOS ARDUINO DEL MERCADO

Detalles	Micro	UNO	Mega	Leonardo
Microcontrolador	Atmega32U4	Atmega328P	ATmega2560	ATmega32U4
Voltaje de operación	5	5	5	5
Pines digitales	20	14	54	20
Pines PWM	7	6	15	7
Pines de entradas analógicas	12	6	16	12
Corriente DC por cada pin I/O [mA]	20	20	40	40
Corriente DC por cada pin de 3.3V [mA]	50	50	50	50
Memoria Flash [Kb]	32	32	256	32



teniendo un rango de medición de 0-24 VDC que será conectado a la salida del voltaje del panel solar, y este sensor se alimenta con una entrada de 5VDC.



Fig. 50. Sensor de voltaje para Arduino  
Fuente: (Goilav, 2016)

### 2.3.10. Selección del sensor de corriente

Para la obtención de datos de la corriente que suministra el panel solar se usará un sensor de corriente Acs712 30A, que se conectará a las entradas analógicas del Arduino, cuenta con un rango de medición de 0-20A, que será conectado a 5V para su respectivo funcionamiento. El dispositivo se muestra en la Figura. 51.

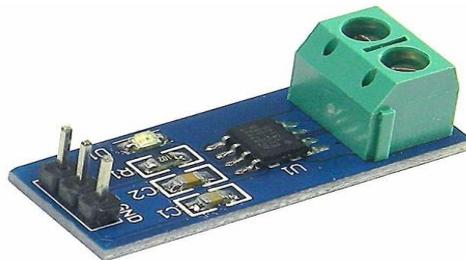


Fig. 51. Sensor de corriente para Arduino  
Fuente: (Goilav, 2016)

### 2.3.11. Selección del Reóstato

Para tener una variación en las curvas características del panel solar, es debe tener una carga variable, pero con el reóstato se consigue esta variación de carga debido a que posee una resistencia ajustable de manera manual.



Fig. 52. Reóstato manual de carga variable  
Fuente: (Glennapts, 2020)

## 2.4. Puesta a tierra del módulo

Para cualquier tipo de instalación eléctrica una parte fundamental es el sistema de puesta a tierra, que limita la tensión que presentan las masas metálicas, este sistema elimina o disminuye el riesgo de descargas eléctricas en el panel solar o en el circuito de control de la generación fotovoltaica.

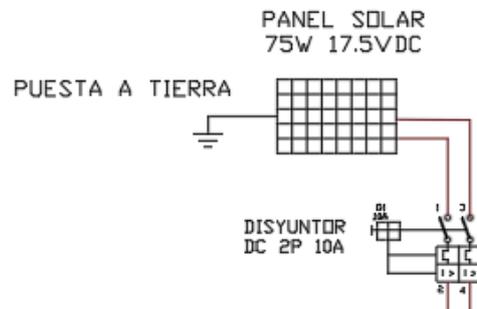


Fig. 53. Puesta a tierra del panel solar en diagrama unifilar  
Fuente: Autor

## CAPÍTULO 3

### EVALUACIÓN DEL MÓDULO DE PRUEBAS

En el presente capítulo se detalla el proceso para la construcción del módulo didáctico y los resultados de las pruebas de funcionamiento del sistema con base al dimensionamiento del sistema fotovoltaico instalado.

También se cuenta con un manual de usuario, manual de mantenimiento, prácticas de laboratorio y uso de los programas necesarios para la comunicación de los sensores instalados en el módulo de pruebas.

#### 3.1. Implementación del módulo

Para la implementación del módulo se tuvo en cuenta los estudios previos realizados en los capítulos anteriores, donde se realizó la selección de los materiales que permitan diseñar un módulo seguro, confiable y eficiente para el uso didáctico de los estudiantes. A continuación, se describe el procedimiento que se siguió para la construcción del módulo de pruebas.

##### 3.1.1. Construcción de la estructura

Con los diseños presentados en la Figura. 34, en primera instancia se procede a la construcción de la mesa de trabajo y la estructura soporte donde se realizó el montaje de los equipamientos necesarios para la generación de energía fotovoltaica. En la Figura. 54 se muestra la parte estructural del módulo de pruebas.



Fig. 54. Estructura del módulo de pruebas  
Fuente: Fotografía del Autor

### 3.1.2. Instalación del panel solar y lámparas halógenas

Al seleccionar el panel solar, en función de las características de generación de este equipo se realizó la selección de las luminarias que cumplan con los requerimientos de trabajo para el módulo, posteriormente se realizó el montaje de estos. En el caso del panel solar fue facilitado por los laboratorios de CIELE de la Universidad Técnica del Norte. Lo siguiente en instalarse fueron las lámparas halógenas encargadas de emular la radiación solar. En la Figura. 55 se puede visualizar los resultados obtenidos después de la instalación del panel solar y las luminarias.

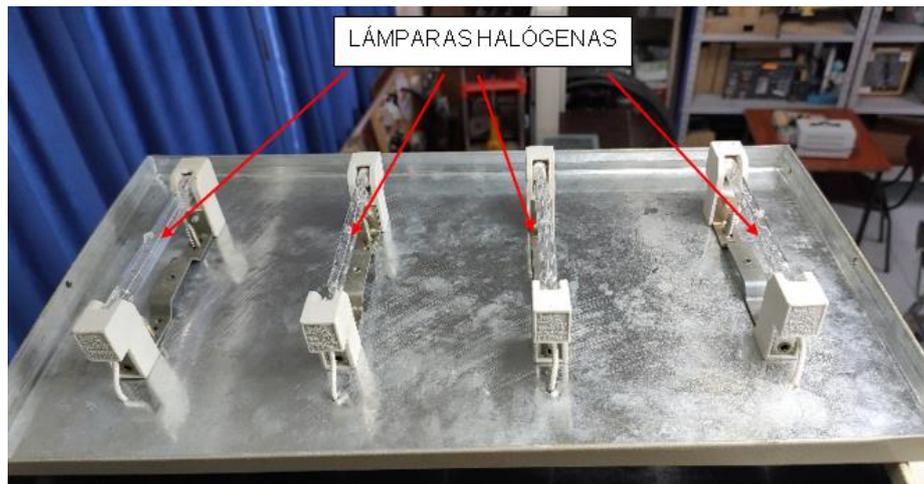


Fig. 55. Montaje de lámparas halógenas en el módulo  
Fuente: Fotografía del Autor

Uno de los problemas que surgieron fue la acumulación de calor generado entre las lámparas alógenas y la superficie del panel solar, ya que el panel solo requiere cierta temperatura para su correcto funcionamiento y de excederse este valor produciría una reducción de la eficiencia del mismo. La solución aplicada fue la de la implementación de un sistema de recirculación de aire para realizar un enfriamiento por convección, esto mediante el montaje de un ventilador para ejecutar este trabajo, en la Figura. 56 se observa la ubicación del equipo.

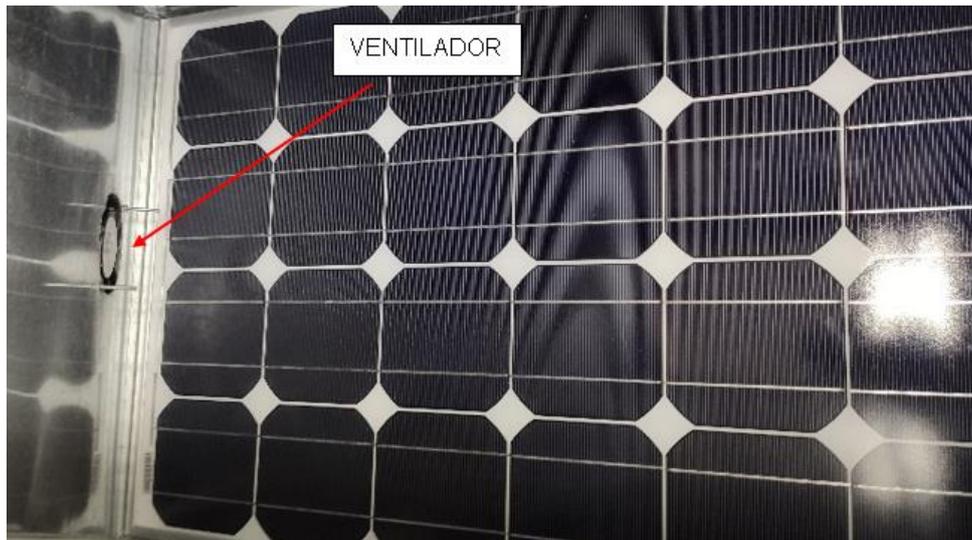


Fig. 56. Montaje de ventilador para el enfriamiento del panel solar  
Fuente: Fotografía del Autor

La medición de la radiación generada por este sistema se lo realizó mediante el piranómetro, el cual está ubicado en la parte superior del panel solar, esto le permite al módulo regulador tener una lectura de los valores, en la Figura. 57 se visualiza como se incorporó el piranómetro al sistema.

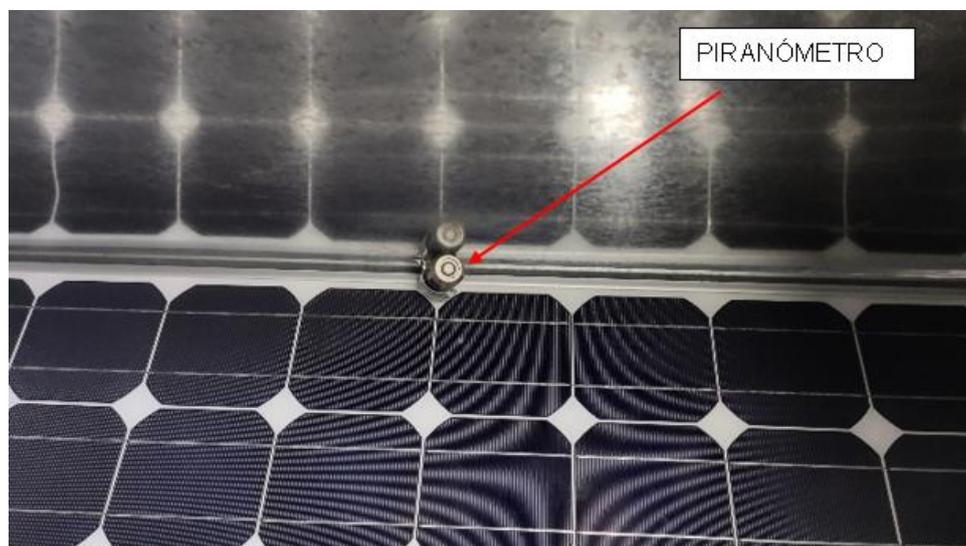


Fig. 57 Montaje del piranómetro en el panel solar  
Fuente: Fotografía del Autor

Debido a que el sistema instalado en el módulo genera cierta cantidad de radiación solar y calor esto conlleva al incremento de la temperatura en la superficie de los componentes, es necesario la implementación de un indicador para evitar daños por este efecto. Para ello se implementó un circuito sensor de temperatura el cual mide en tiempo real las variaciones que ocurren. El circuito está conformado por un sensor de temperatura BC547 que mide los

cambios generados en un intervalo de 0 a 65°C que es el valor de seguridad para evitar daños en los equipos, además se incorporó una luz señalizadora que se activa si el valor asignado se sobrepasa, en la Figura. 58 se observa el circuito en una placa electrónica.

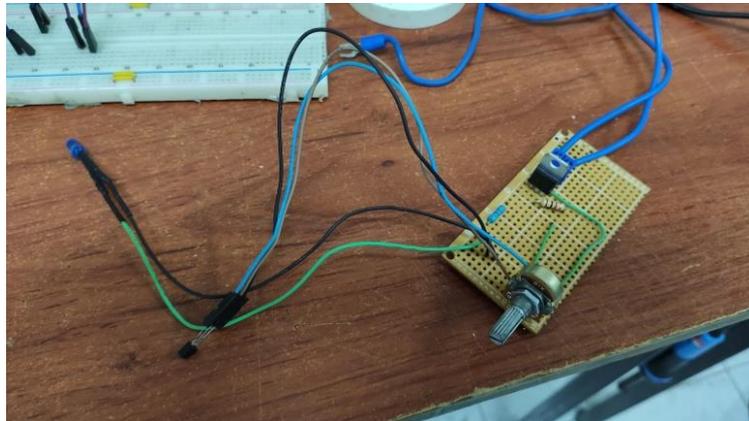


Fig. 58. Circuito sensor de temperatura  
Fuente: Autor

Con el acoplamiento de los componentes se realizó pruebas de funcionamiento para comprobar la correcta operación de cada uno de ellos, se procede a realizar el encendido de las lámparas halógenas las cuales generaron la radiación sobre el panel el cual se obtuvo como resultado un determinado valor de voltaje de 20.19V en circuito abierto. En la Figura. 59 se visualiza el voltaje generado por el sistema.



Fig. 59. Montaje del panel solar y luminarias halógenas  
Fuente: Autor

### 3.1.3. Instalación de los componentes del panel frontal

Con el diseño realizado en la Figura. 32, se realizó la instalación de cada uno de los elementos que componen a un sistema fotovoltaico, para la distribución y almacenamiento de energía. Una vez adquirido todos los materiales necesarios, en la Figura. 60 se observa el proceso de montaje sobre la base de cada uno estos.

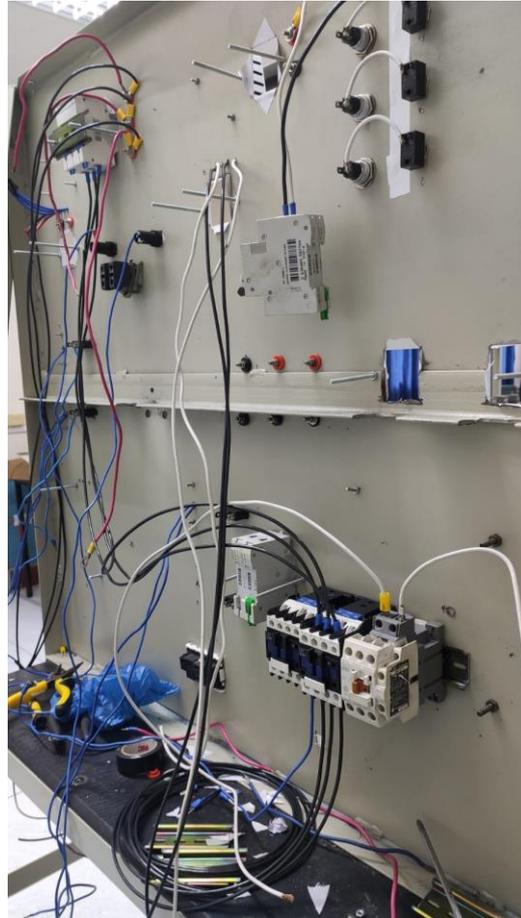


Fig. 60. Conexiones del módulo de pruebas  
Fuente: Autor

Al complementar el montaje se realizó la sujeción de cables y colocación en las correspondientes canaletas, de esta manera se consigue que se encuentre más ordenado y de rápida identificación en el caso de requerirse realizar alguna modificación en algunos de los sistemas, la Figura. 61 muestra el resultado final.

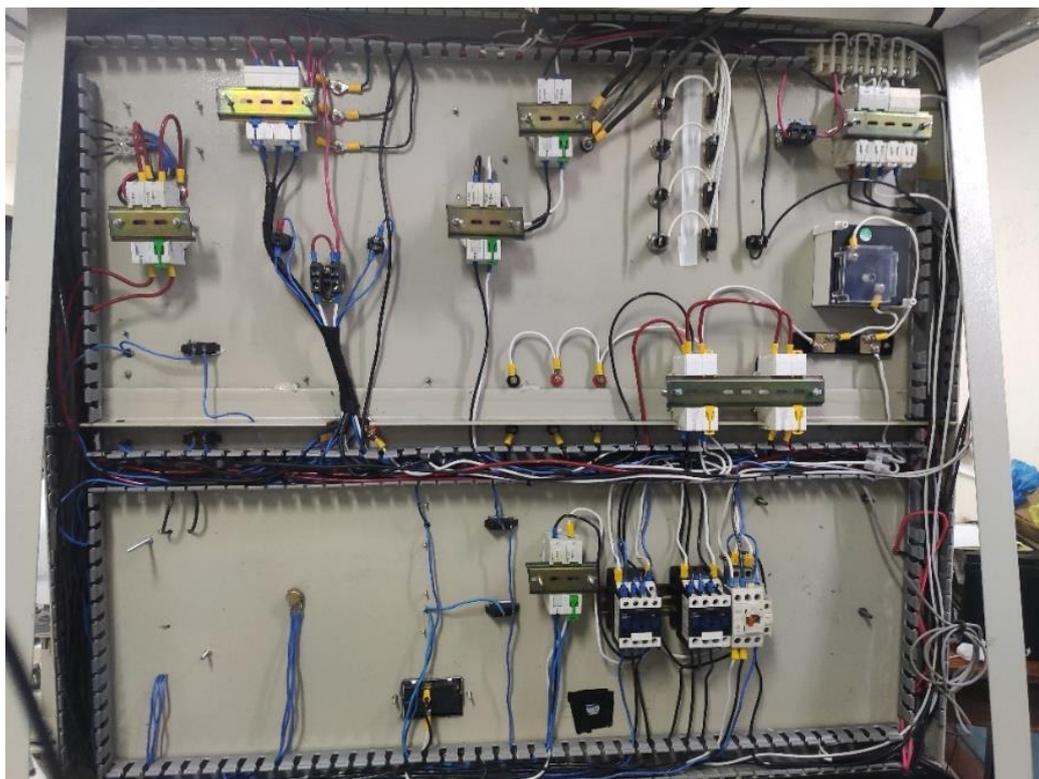


Fig. 61 Montaje de componentes y fijación de cables

Fuente: Autor

El módulo final queda implementado en base a los diseños previamente detallados, además, se incorporaron las identificaciones correspondientes para que cada una de las partes sea fácilmente reconocible para su operación y puesta en marcha. La Figura. 62 muestra el resultado final.



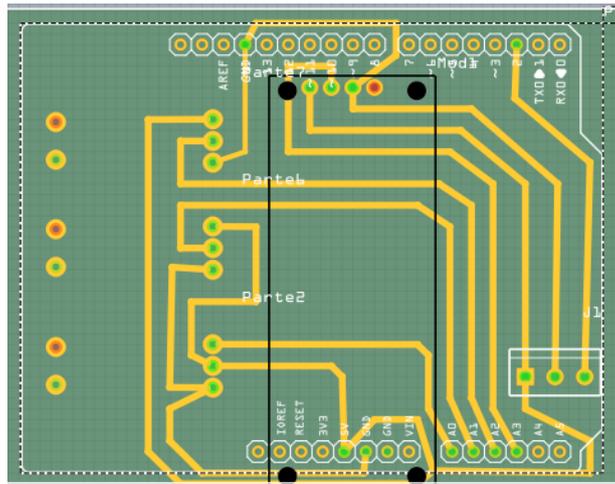


Fig. 63. Placa PCB para la comunicación entre el microcontrolador y los sensores  
Fuente: Autor

### 3.2.2. Instalación de los sensores

A continuación, se muestra los sensores de corriente y voltaje colocados en la placa PCB impresa, además los terminales para su respectiva adquisición de datos.



Fig. 64. Instalación de los sensores de medición  
Fuente: Autor

Una vez obtenido las salidas de señal de los sensores se conectaron al microcontrolador de Arduino para realizar su programación para la visualización de estos valores que envían al puerto serial que serán recibidos por el software de LabVIEW.

### 3.2.3. Configuración y comunicación entre Arduino y LabVIEW

En esta parte se indica el proceso realizado para la comunicación de softwares y obtener los valores medidos en tiempo real.

- **Comunicación serial**

Para la lectura del puerto serial se instaló el controlador NI-VISA que lee el puerto USB que conecta al Arduino, luego se realizó la configuración que activa el puerto serial como se

muestra en la Figura. 65, ya que el Arduino envía datos en bytes y estos valores se transforman en variables numéricas.

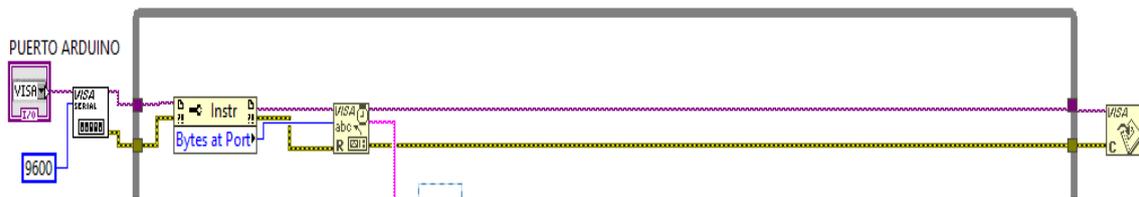


Fig. 65. Activación del puerto serial  
Fuente: Autor

- **Obtención de variables y gráficas**

Una vez realizada la configuración del puerto serial se procedió a la configuración que nos permita llamar las variables desde el puerto COM de Arduino a cada apartado configurado en el software de LabVIEW como se observa en la siguiente Figura. 66.

Con los datos obtenidos de las variables de medición se procedió a configurar el arreglo de estos datos para obtener las curvas características que se necesita conocer. También se muestra la configuración realizada para obtener las curvas con las variables obtenidas de los sensores instalados a la salida del controlador de carga, ya que es aquí donde se necesita saber su comportamiento.

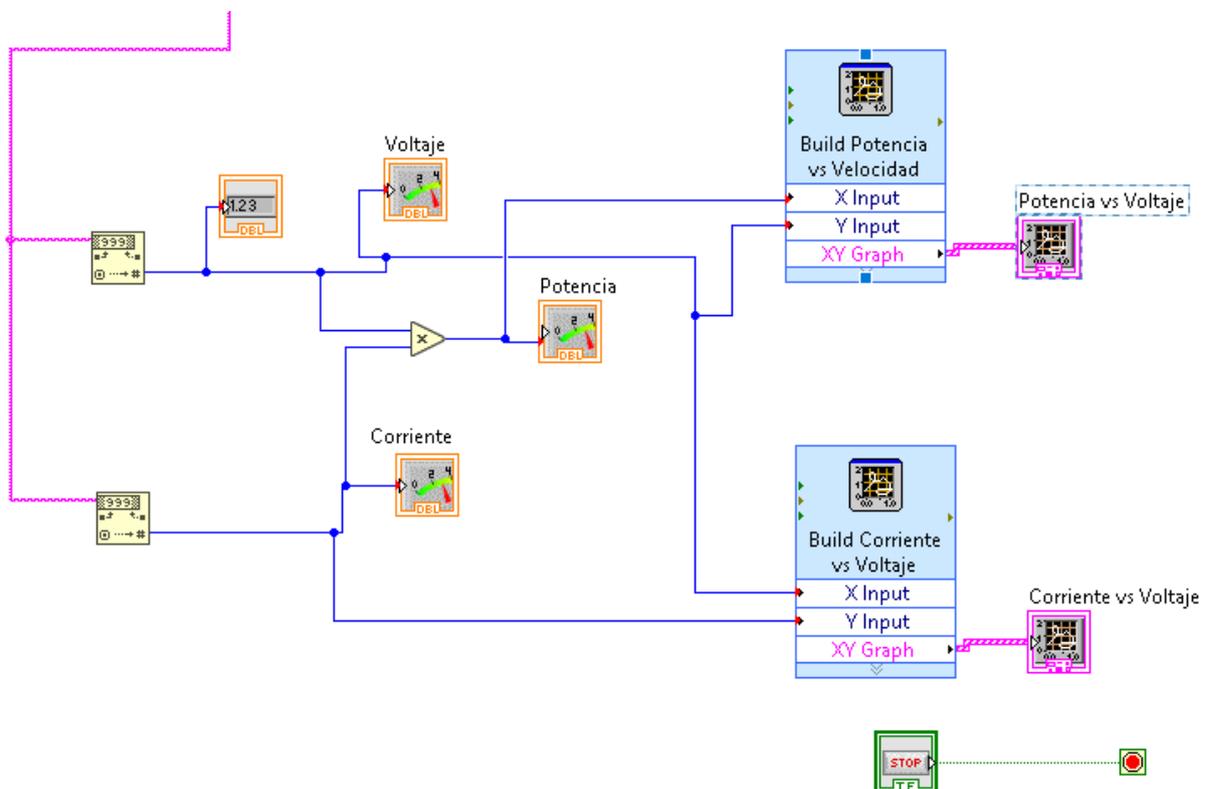


Fig. 66. Adquisición de datos del puerto COM de Arduino  
Fuente: Autor

- **Diseño de la interfaz usuario-máquina**

Para mostrar los datos obtenidos de las variables que llegan de los sensores de medición, se diseñó una pantalla grafica en la cual se observa el comportamiento y graficar sus curvas características del panel solar.

En la siguiente Figura. 67 se observa la interfaz realizada en LabVIEW donde se tienen varias variables para mostrarse como: voltaje, corriente y potencia.

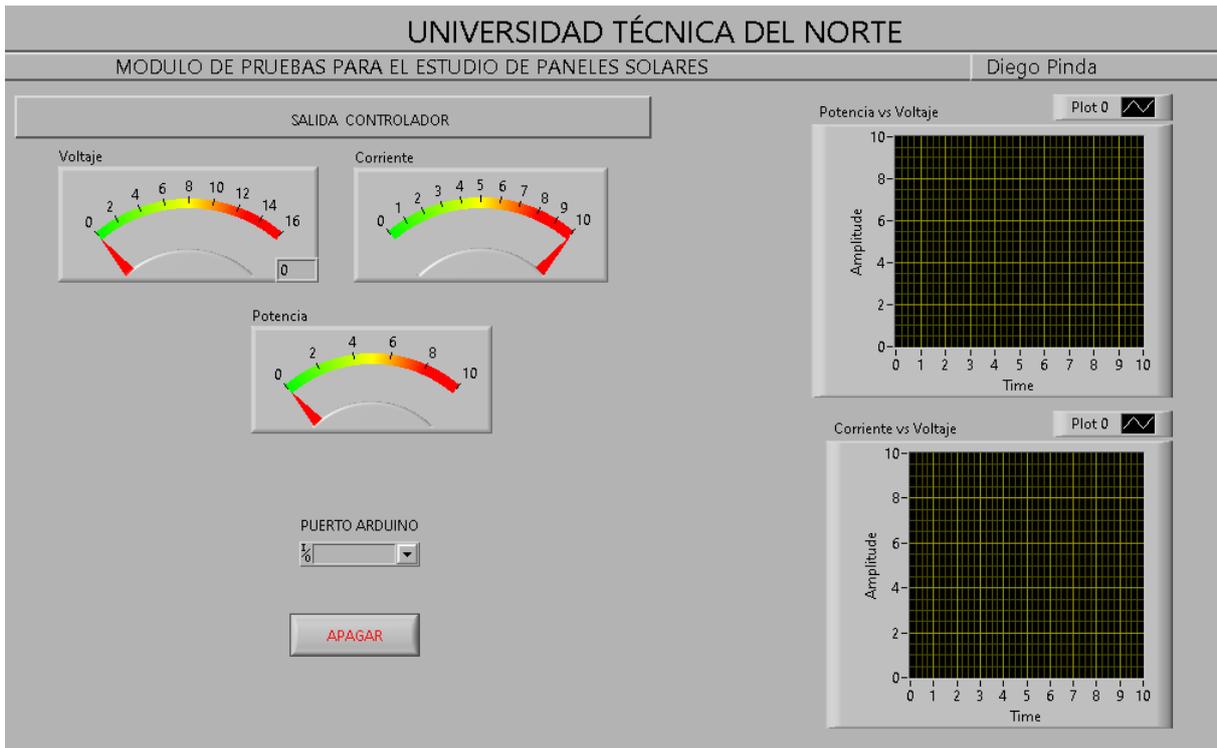


Fig. 67. Interfaz del muestreo de datos  
Fuente: Autor

### 3.3. Pruebas de funcionamiento del módulo fotovoltaico

En la siguiente sección se detalla todas las pruebas realizadas, una vez terminada la construcción del módulo de pruebas, para así medir los parámetros más importantes y mediante eso ver los resultados detallados a continuación.

#### 3.3.1. Análisis de parámetros de salida del módulo solar

La cantidad de radiación generada sobre el panel solar está condicionada por el número de lámparas alógenas que se activen simultáneamente, la Tabla 3.1 registra los valores que se obtuvieron en las pruebas de operación, al representarse en una gráfica se puede analizar la tendencia y la forma de incremento con la que trabaja el equipo, la Figura. 68 muestra a detalle este proceso.

TABLA 3.1  
DATOS OBTENIDOS DEL PIRANÓMETRO DE ACUERDO CON EL NÚMERO DE LÁMPARAS

Número de lámparas	Nomenclatura	Radiación solar [ $W/m^2$ ]
1	R1	145.6
2	R2	365.6
3	R3	533.1
4	R4	669.4

Fuente: Autor

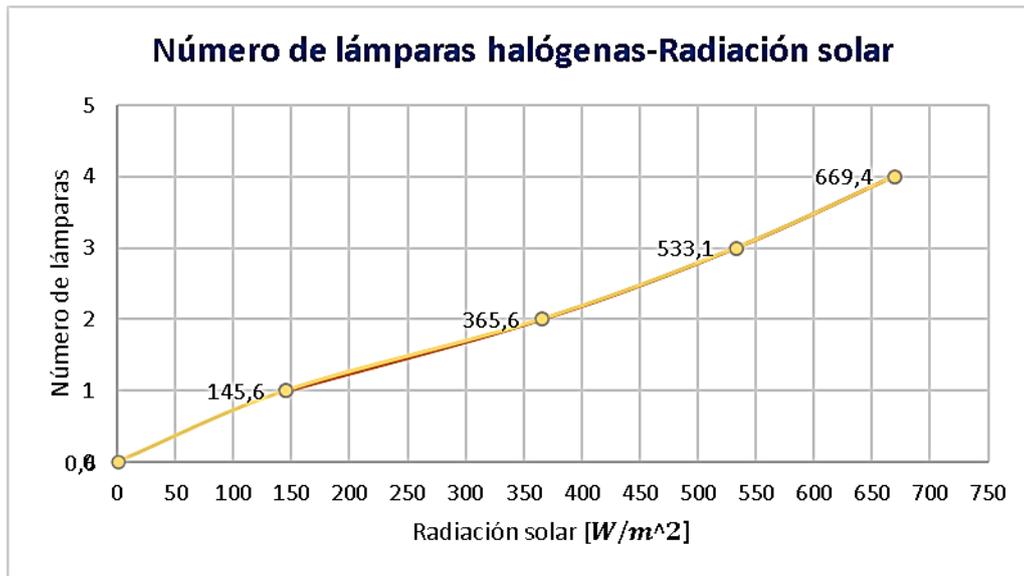


Fig. 68. Gráfica de la radiación solar vs número de lámparas  
Fuente: Autor

### 3.3.2. Datos de salida del módulo solar en vacío

Al realizarse las pruebas de funcionamiento del módulo se obtuvieron diversos valores, esto en función de las condiciones de operación que se detallan en cada caso. En la Tabla 3.2 se muestran los valores generados en el módulo con la aplicación del sistema de ventilación y durante un intervalo de tiempo de 15 min, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 3.2  
DATOS MEDIDOS DEL VOLTAJE INICIAL Y VOLTAJE FINAL CON VENTILACIÓN AL PANEL SOLAR

Lámparas	Temperatura inicial [°C]	Voltaje inicial [V]	Tiempo [min]	Temperatura final [°C]	Voltaje final [V]
1	20	19.95	15	30	18
2	20	20.21	15	39	18.43
3	20	20.29	15	47	18.70
4	20	21.35	15	58	18.71

Fuente: Autor

En todos los casos de prueba, el panel debe empezar con una temperatura inicial de 20 °C para generar un voltaje estable de 19 - 20V, durante el tiempo que se mantiene en operación el sistema dependiendo del número de lámparas se genera un incremento en el valor de la temperatura y esto influye en el valor del voltaje, entre mayor sea la temperatura existe una caída en el voltaje. Esto determina que el rendimiento del panel es inversamente proporcional a la temperatura sobre su superficie. La Figura. 69 establece esa relación siendo R el número de radiación aplicada sobre el panel.

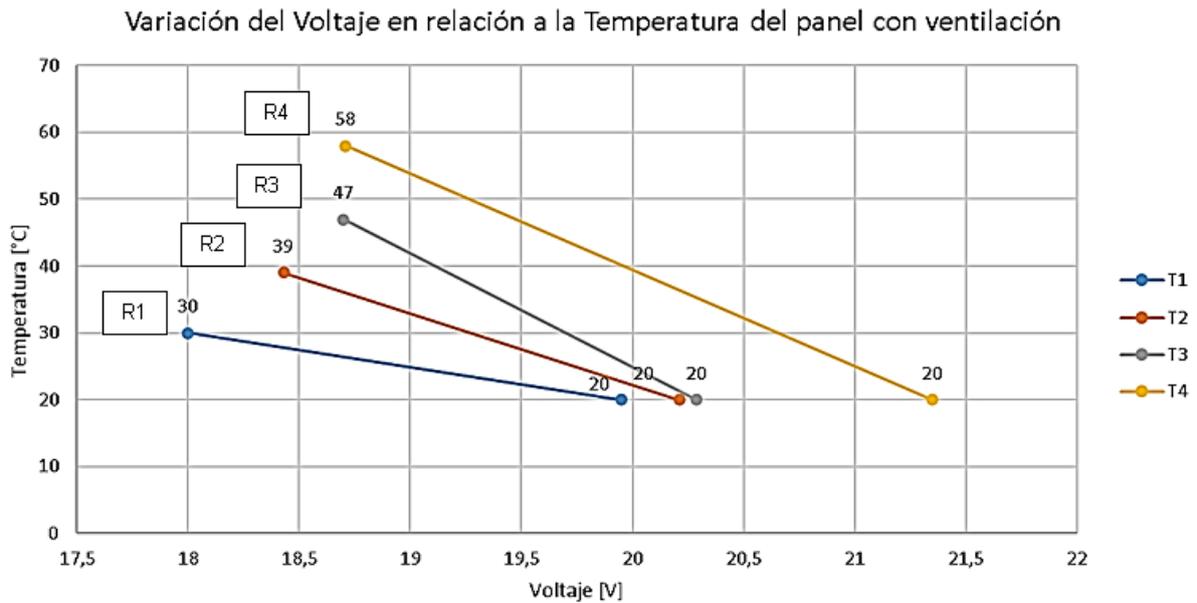


Fig. 69. Comparación del Voltaje - Temperatura con ventilación en el panel solar  
Fuente: Autor

Los valores que se aprecian en la Tabla 3.3 se registraron con el módulo trabajando sin la ventilación con lo cual la temperatura alcanza un mayor valor en la misma cantidad de tiempo, además, el valor de voltaje generado se ve afectado, siendo notable la caída de tensión que presenta.

TABLA 3.3  
DATOS MEDIDOS DEL VOLTAJE INICIAL Y VOLTAJE FINAL SIN VENTILACIÓN AL PANEL SOLAR

Lámparas	Temperatura inicial [°C]	Voltaje inicial [V]	Tiempo [min]	Temperatura final [°C]	Voltaje final [V]
1	22	19.92	15	38	17.93
2	22	20.32	15	49	18.17
3	22	21.00	15	56	18.70
4	22	21.35	15	67	18.25

Fuente: Autor

En el panel solar según los datos de placa, la temperatura ideal de trabajo se encuentra en un rango inferior a los 65°C y de sobrepasarse empieza a perder rendimiento, en la Figura. 70 se muestra esta relación.

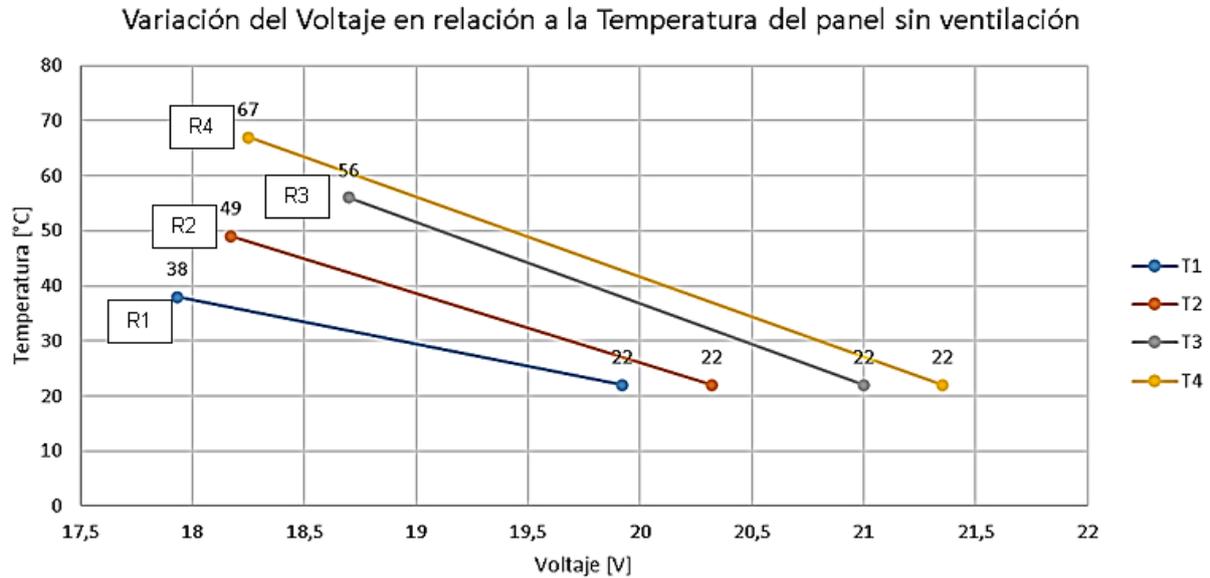


Fig. 70. Comparación del Voltaje - Temperatura sin ventilación en el panel solar  
Fuente: Autor

### 3.3.3. Medición de tensión en vacío del panel solar con ventilación

La medición de la tensión en vacío sirve para ver el estado de las variables antes de acoplar la carga, en la Tabla 3.4 se detallan las mediciones obtenidas.

TABLA 3.4  
VALORES DE LAS MEDICIONES REALIZADAS EN VACÍO CON VENTILACIÓN

Número de luminarias	Radiación solar [ $W/m^2$ ]	Voltaje del panel [V]
1	150.6	18
2	313.1	18.43
3	536.9	18.7
4	681.9	18.71

Fuente: Autor

Como se puede notar en la Tabla 3.4, los valores del voltaje obtenidos del panel solar dependen del número de luminarias que emiten radiación, el voltaje máximo alcanzado fue de 18.71V. Esto con las 4 luminarias encendidas que generan una radiación solar de  $681.9W/m^2$ , este valor fue medido con un piranómetro a través de su software para computadora, que se comunica con el programa HOBOWare. Para poder visualizar la relación que tiene la radiación solar con el voltaje entregado a la salida del panel, en la Figura. 71, donde se puede observar dicha relación de una forma más didáctica.

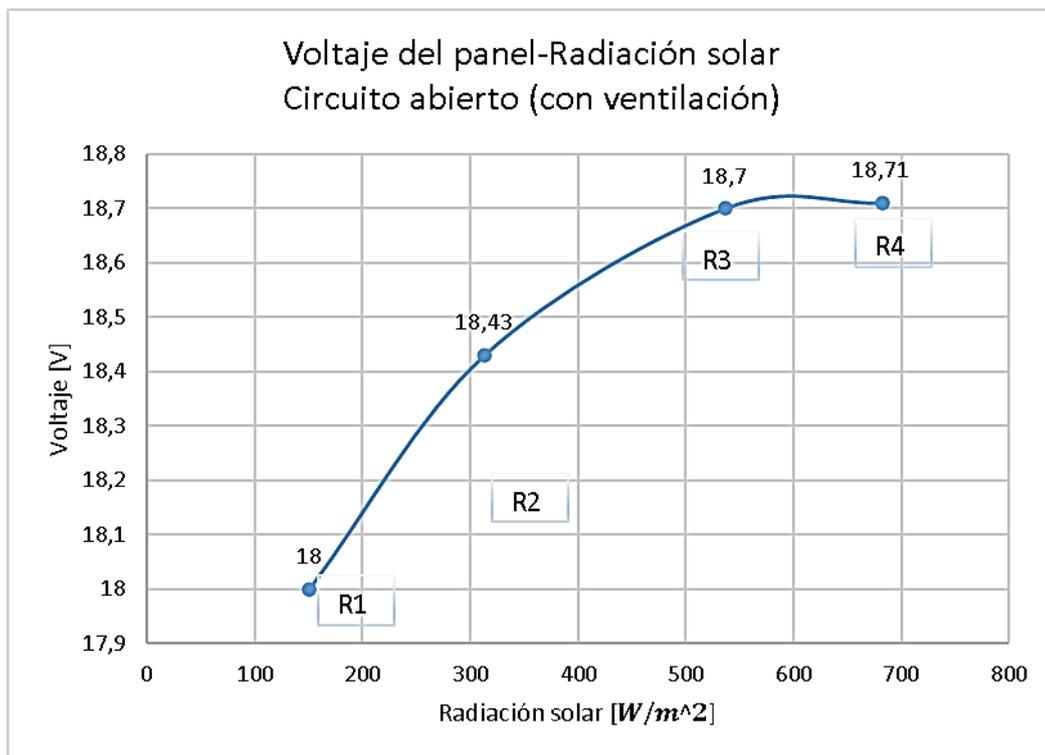


Fig. 71. Curva de la radiación en función del voltaje de circuito abierto con ventilación  
Fuente: Autor

### 3.3.4. Medición de tensión en vacío del panel solar sin ventilación

Al realizar una segunda etapa de pruebas se realizó la medición de los valores obtenidos al mantenerse desactivado el sistema de ventilación, la Tabla 3.5 muestra los resultados obtenidos.

TABLA 3.5  
VALORES DE LAS MEDICIONES REALIZADAS EN VACÍO SIN VENTILACIÓN

Número de luminarias	Radiación solar [W/m <sup>2</sup> ]	Voltaje del panel [V]
1	150.6	17.93
2	313.1	18.17
3	536.9	18.7
4	681.9	18.25

Fuente: Autor

En la Figura. 72 se observa la forma en la que interactúa el voltaje al variar la temperatura, se puede constatar que el valor de la temperatura incrementa a una mayor velocidad, esto provoca de igual manera que exista una caída de voltaje, esta condición evita usar el módulo por un tiempo extendido, siendo necesario que se mantenga constante el sistema de ventilación en todas las practicas realizadas.

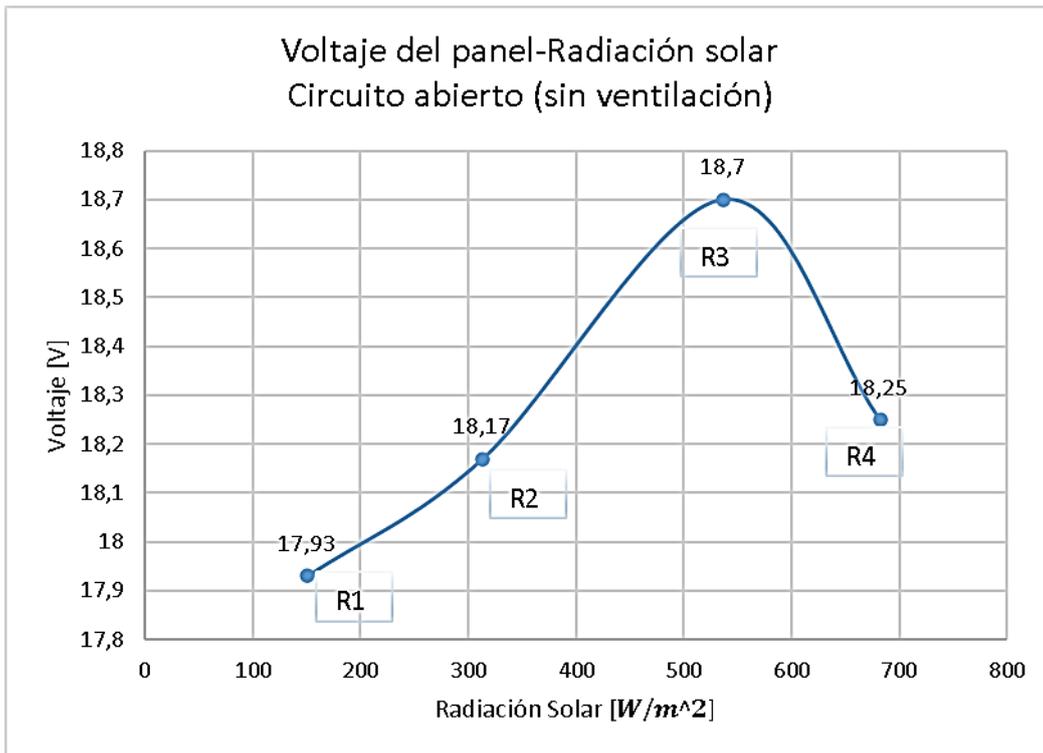


Fig. 72. Curva de la radiación en función del voltaje sin ventilación  
Fuente: Autor

### 3.3.5. Medición de tensión con carga

Para la obtención de estos datos se utilizó unos focos leds de 12V a 12 -18W como se puede observar en la Figura. 73.



Fig. 73. Focos de 12 y 18W respectivamente  
Fuente: Autor

Al realizar la medición de voltaje se obtuvieron los siguientes resultados como se muestra en la Tabla 3.6. La medición se la toma directamente de la carga de 12W, además se calcula la potencia entregada por el panel, para esto se usa la siguiente fórmula.

$$P = V * I \tag{5}$$

TABLA 3.6  
VALORES MEDIDOS CON UNA CARGA DE 12W

Número de luminarias	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
1	10.6	0.4	4.24
2	14.6	0.48	7.01
3	18.3	0.51	9.33
4	19.3	0.54	10.48

Fuente: Autor

La Figura. 74 describe el comportamiento del panel solar en relación con el voltaje y corriente en función de la variación de la radiación aplicada mientras la carga se mantiene constante.

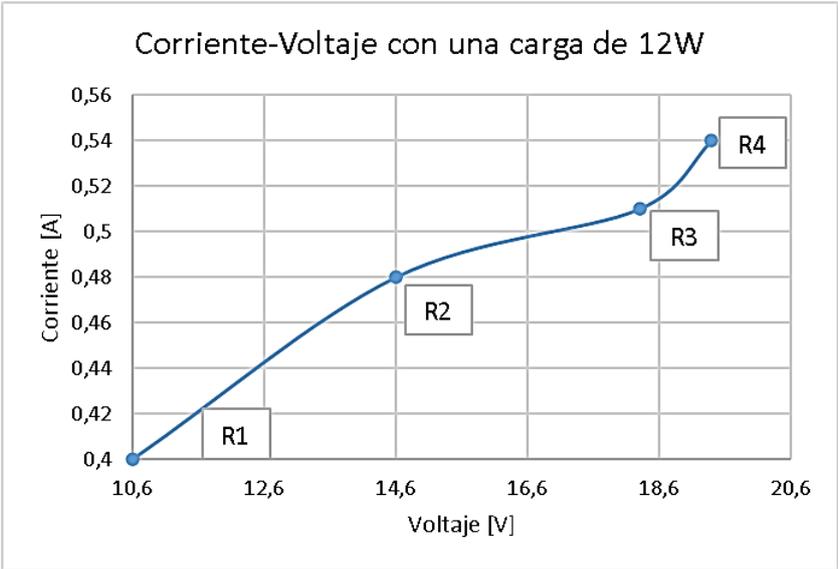


Fig. 74. Curva de I-V con una carga de 12W  
Fuente: Autor

La variación de potencia obtenida se visualiza en la Figura. 75, notándose que, aunque se aplica el máximo de radiación que puede entregar el módulo, la potencia generada no alcanza el máximo requerido por la carga, pero que es bastante aproximado.

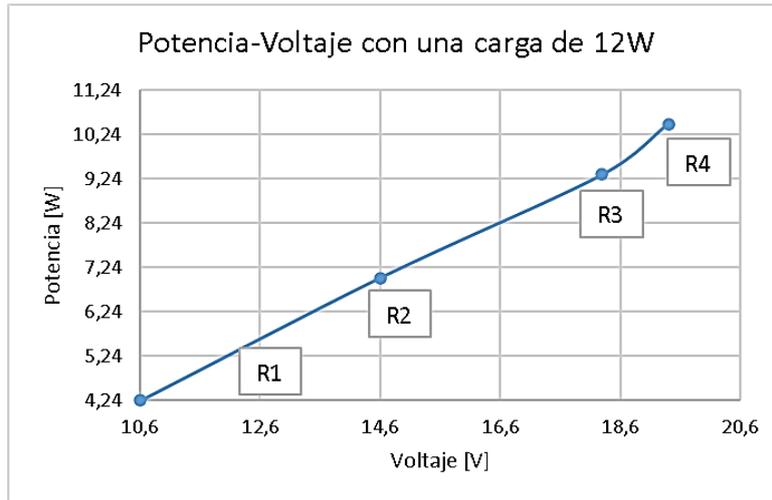


Fig. 75. Curva de P-V a una carga de 12W  
Fuente: Autor

Al variarse la carga en el módulo de prueba se puede observar como todos los parámetros también cambian. La Tabla 3.7 registra los valores obtenidos. Al graficarse estos datos se obtiene una gráfica que se muestra en la Figura. 76.

TABLA 3.7  
VALORES MEDIDOS CON UNA CARGA DE 18W

Número de luminarias	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
1	9.9	0.4	3.96
2	11.2	0.71	7.95
3	16.6	0.72	11.29
4	18.02	0.73	13.15

Fuente: Autor

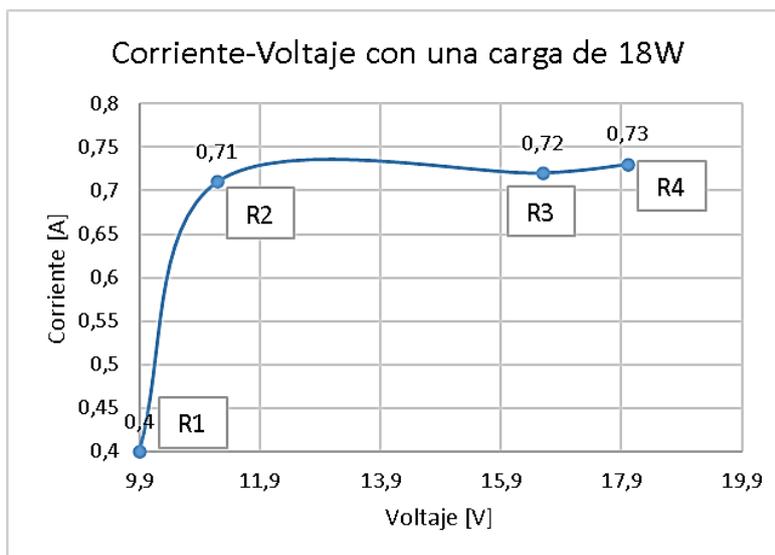


Fig. 76. Curva de I-V a una carga de 18W  
Fuente: Autor

La variación de la potencia se muestra en la Figura. 77, notándose que en el nivel máximo de potencia entregado por el panel hacia la carga es de 13.15W.

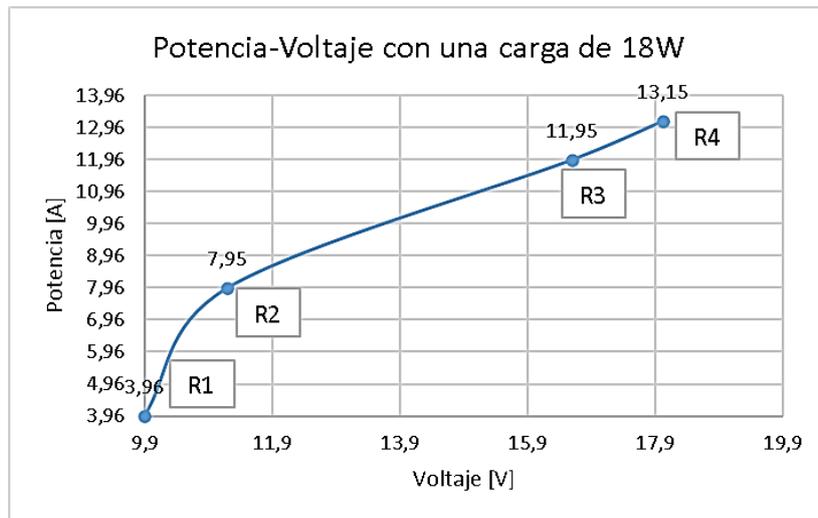


Fig. 77. Curva de P-V a una carga de 18W  
Fuente: Autor

### 3.3.6. Caracterización de los paneles con carga

Para comparar la relación y la naturaleza de trabajo del módulo solar se procede a registrar el comportamiento de los parámetros bajo ciertas condiciones, se ajusta una resistencia variable mediante un reóstato y se mide los valores producidos en voltaje y corriente y sus cambios correspondientes, se realiza las mediciones correspondientes con las condiciones de ventilación activa, no se toma en consideración el análisis de los datos sin aplicarse la ventilación debido a que la variación entre estas dos es mínima en lo que corresponde a mediciones, siendo la mayor diferencia el tiempo en el cual el módulo puede mantenerse activo. En la Tabla 3.8 se registra los datos producidos al aplicarse 1 lámpara y el sistema de enfriamiento activo.

TABLA 3.8  
MEDICIONES REALIZADAS CON UN VOLTÍMETRO Y UN AMPERÍMETRO – 1 LÁMPARA

Mediciones	Resistencia [ $\Omega$ ]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
1	0.06	4.24	0.42	1.74
2	3	5.11	0.42	2.10
3	5	5.19	0.42	2.18
4	7.1	5.23	0.42	2.20
5	8.9	5.42	0.42	2.28
6	10	5.47	0.42	2.30
7	11.7	5.81	0.42	2.44
8	16	6.72	0.42	2.82
9	20	7.8	0.41	3.04

10	25	9	0.39	3.24
11	30	9.9	0.33	3.27
12	350	10.5	0.03	0.32

Fuente: Autor

La Figura. 78 representa los cambios producidos en las variables de corriente y voltaje en donde se puede observar que la curva obtenida se aproxima a la forma de la curva característica del panel. La forma curva obtenida de la potencia generada se puede observar a detalle en la Figura. 79, este comportamiento corresponde a el incremento de la resistencia en cada una de las mediciones realizadas, pudiéndose visualizar que a medida que incrementa este valor, las medidas de corriente y potencia empiezan a disminuir, ya que al haber alcanzado el punto de máximo rendimiento todo valor a partir de allí presenta una caída en el rendimiento del panel, aunque el valor de voltaje se mantiene en el rango deseado.

La curva mostrada en la Figura. 78 detalla que el máximo punto de corriente se encuentra en 0.42 A cuando se aplica una lámpara y una resistencia variable. El voltaje de trabajo se establece en el rango de 4.24 – 6.72 V, a partir de este punto se empieza a reducir el valor de corriente que genera el panel hacia la carga.

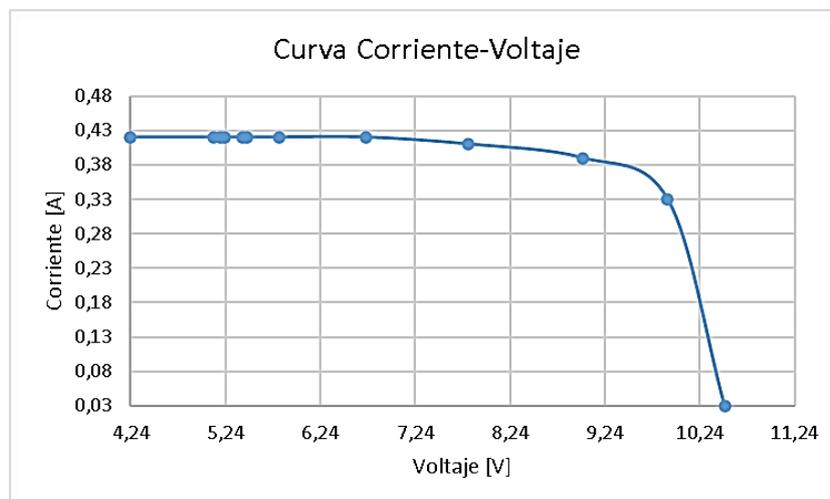


Fig. 78. Curva de I-V con una lámpara y enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

La máxima potencia generada por el panel se encuentra en 3.27 W a 9.9 V, en este punto si se aumenta el voltaje el valor de la potencia cae significativamente, esto también tiene relación con la carga variable aplicada, ya que en base al máximo valor encontrado se reduce en pasos pequeños su magnitud, mostrándose que aun valor de 350 ohm el valor de potencia llega a ser aproximadamente 0, como se muestra en la Figura. 79.

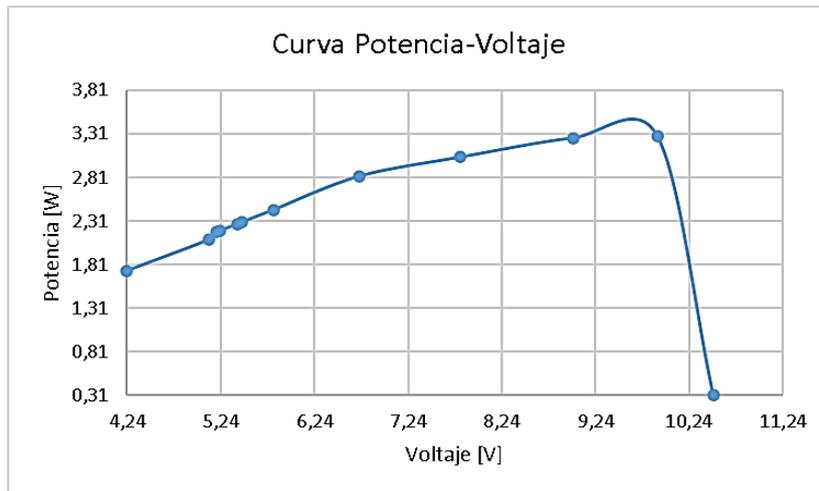


Fig. 79. Curva de P-V con una lámpara y enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

Para realizar una comparación más específica se requirió ir incrementando la cantidad de lámparas aplicadas en cada muestreo, la Tabla 3.9 registra los valores obtenidos al activarse 2 de las lámparas al módulo con el sistema de enfriamiento.

TABLA 3.9  
MEDICIONES REALIZADAS CON UN VOLTÍMETRO Y UN AMPERÍMETRO – 2 LÁMPARAS

Mediciones	Resistencia [ $\Omega$ ]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
1	0.06	4.29	0.74	3.13
2	3	5.19	0.74	3.89
3	5	5.3	0.74	3.92
4	7.1	5.59	0.74	4.14
5	8.9	6.72	0.74	4.91
6	10	7.45	0.74	5.44
7	11.7	8.89	0.74	6.9
8	16	10	0.74	8.1
9	20	11	0.69	7.2
10	25	12	0.55	6.1
11	30	13	0.33	4.1
12	350	14	0.03	0.02

Fuente: Autor

La Figura. 80 y Figura. 81 muestran las curvas generadas, al aplicarse el nivel de radiación fijado sobre el panel la relación voltaje-corriente y voltaje-potencia empiezan a mostrar un comportamiento en donde a medida que la resistencia incrementa, aunque el valor de voltaje se mantiene en el valor requerido, las medidas de corriente y por consecuente el valor de la potencia empieza a disminuir, esta forma es muy cercana a la curva característica del panel.

La corriente generada por el sistema al cual se aplica 2 lámparas con la resistencia variable muestra un comportamiento en el cual el punto máximo de corriente se ubica en 0.74 A cuando

el valor de voltaje se mantiene en el rango de 4.29 – 10 V, en este punto cualquier incremento de resistencia aplicado produce una reducción del valor de la corriente, la Figura. 80 detalla este comportamiento.

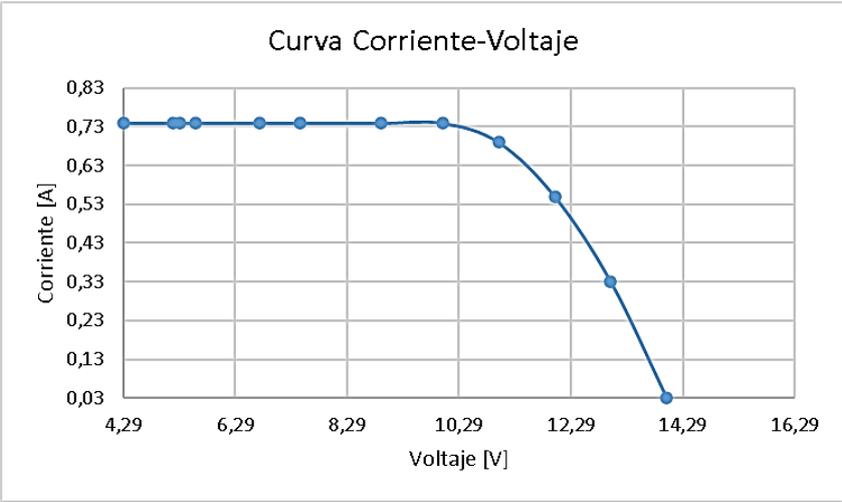


Fig. 80. Curva de I-V con dos lámparas y con enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

El sistema produce una potencia máxima de 8.1 W cuando el panel se encuentra en unos valores de generación de 10 V a 0.74 A, el crecimiento de la curva característica de carga hasta antes de este punto es constante, pero al llegar a ese valor empieza a bajar debido a que la irradiación aplicada al panel no abastece para mantener un valor constante, la Figura. 81 muestra este comportamiento:

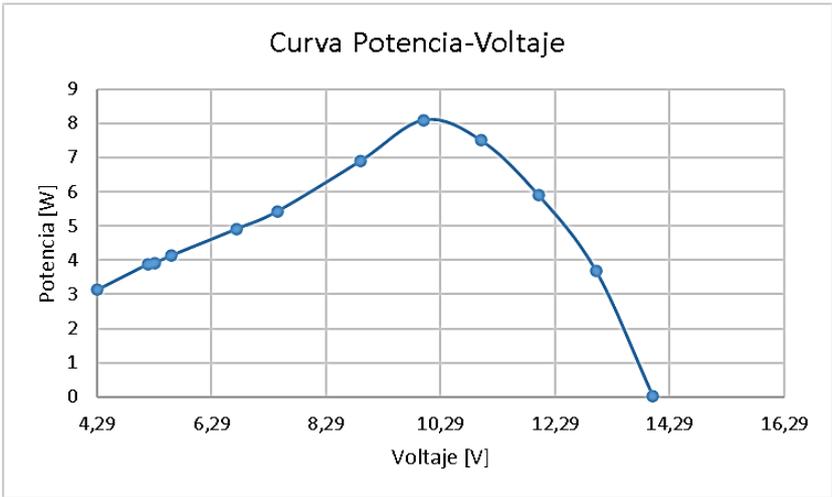


Fig. 81. Curva de P-V con dos lámparas y con enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

La Tabla 3.10 contiene los datos registrados al aplicarse 3 de las lámparas y el sistema de enfriamiento activo, obteniéndose los siguientes resultados:

TABLA 3.10  
 MEDICIONES REALIZADAS CON UN VOLTÍMETRO Y UN AMPERÍMETRO – 3 LÁMPARAS

Mediciones	Resistencia [ $\Omega$ ]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
1	0.06	4.46	1.36	6.11
2	1.3	5.17	1.36	7.13
3	3	5.38	1.36	7.37
4	5	6.73	1.36	9.15
5	7.1	9.58	1.36	12.61
6	8.9	11.75	1.29	14.1
7	10.4	13.99	1.21	16.51
8	11.7	15.6	1.16	17.94
9	12.5	16.55	1.12	18.54
10	14	17.12	1.09	16.9
11	16	17.8	0.89	13
12	28	18.3	0.03	0.55

Fuente: Autor

La Figura. 82 y Figura. 83 muestran las relaciones de voltaje, corriente y potencia obtenidas, se puede evidenciar que los resultados se asemejan en gran medida a la forma de la curva característica que presenta el panel solar. Al llegar al punto de trabajo ideal, el valor de corriente empieza a decaer a medida que la resistencia incrementa, manteniéndose constante el voltaje. Para poder mantener un valor constante de corriente se requiere implementar un panel de mayor capacidad.

Al aplicarse tres lámparas sobre el panel solar se consigue que el límite de voltaje que se puede generar aumente y a su vez también la corriente, notándose que al aplicar una resistencia de 0.06 ohm, se tiene un voltaje de 4.46 V con una corriente máxima de 1.36 A, y que el límite de voltaje obtenido fue de 18.3 V, notándose que desde el punto máximo toda variación de resistencia hace caer la corriente producida, la Figura. 82 muestra esta relación:

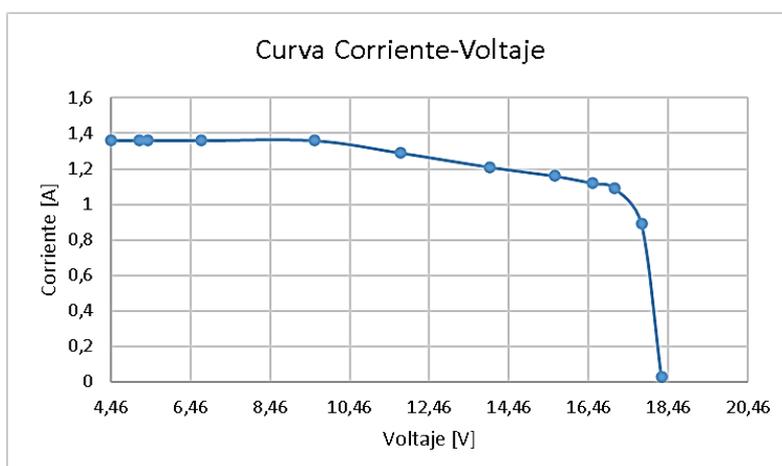


Fig. 82. Curva de I-V con tres lámparas y con enfriamiento en el panel solar  
 Fuente: Autor

Con la aplicación del nivel de irradiación producido por las tres lámparas se pudo notar que la potencia máxima obtenida se halla en un valor de 18.54 W a un voltaje de 16.55 V, en este punto, aunque se incrementa el valor de voltaje la potencia obtenida empieza a disminuir ya que la corriente no abastece para mantener la carga, en la Figura. 83 se muestra este comportamiento:

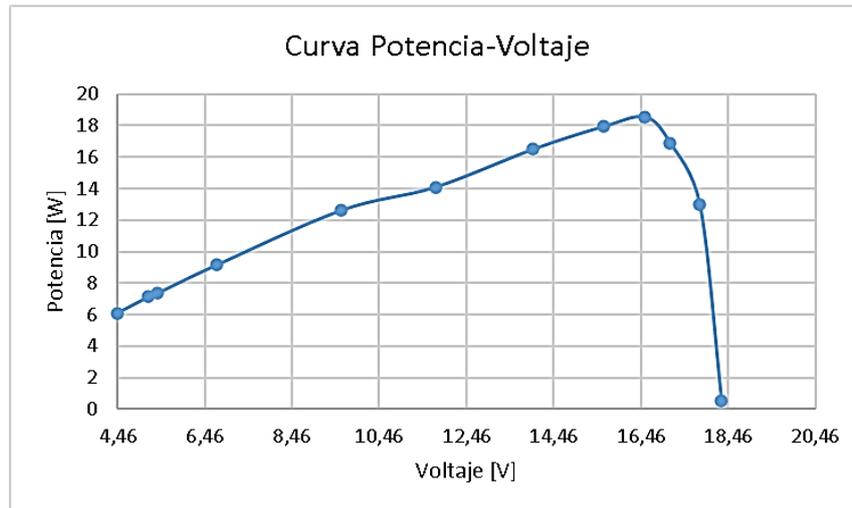


Fig. 83. Curva de P-V con tres lámparas y con enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

La Tabla 3.11 muestra los datos obtenidos en la prueba del módulo con 4 lámparas halógenas con enfriamiento, siendo los siguientes:

Tabla 3.11  
MEDICIONES REALIZADAS CON UN VOLTÍMETRO Y UN AMPERÍMETRO – 4 LÁMPARAS

Mediciones	Resistencia [ $\Omega$ ]	Voltaje [V]	Corriente [A]	Potencia [W]
1	0.06	0.07	1.8	0.13
2	1.9	2.51	1.81	4.54
3	3	4.67	1.8	8.41
4	4.9	7.66	1.81	13.86
5	6	10.58	1.8	19.04
6	7.1	12.19	1.81	22.06
7	8	13.73	1.8	24.71
8	8.9	15	1.8	27
9	10	16.26	1.71	27.8
10	11.3	16.77	1.56	26.16
11	12	16.8	1.46	24.53
12	12.5	16.89	1.34	22.63
13	15	17	1.11	16.11
14	20	17.3	0.91	12.01
15	25	17.8	0.53	7.5

16	30	18.25	0.31	3.97
17	35	18.51	0.01	1.81

Fuente: Autor

La Figura. 84 y Figura. 85 muestran las curvas generadas en la relación voltaje, corriente y potencia, pudiéndose apreciar que son las más aproximadas a la curva característica que posee el panel. La imagen permite observar que a medida que se aumenta la resistencia la potencia comienza a decaer, esto sucede aun cuando el valor de voltaje no tiene tendencia a bajar, pudiéndose encontrar el punto ideal donde existe el máximo aprovechamiento del panel.

La última etapa de pruebas se la realizó aplicando las 4 luminarias, es decir con la capacidad máxima de generación del módulo de pruebas, observando que el límite de voltaje se encuentra en 18.51 V, valor similar a las otras pruebas, la diferencia radica que el límite de potencia se aumenta. La Figura. 84 se observa como la corriente se mantiene constante llegando a un valor máximo de 1.81 A con un voltaje de 15 V, mostrándose como empieza a disminuir este valor en función del aumento de la resistencia.

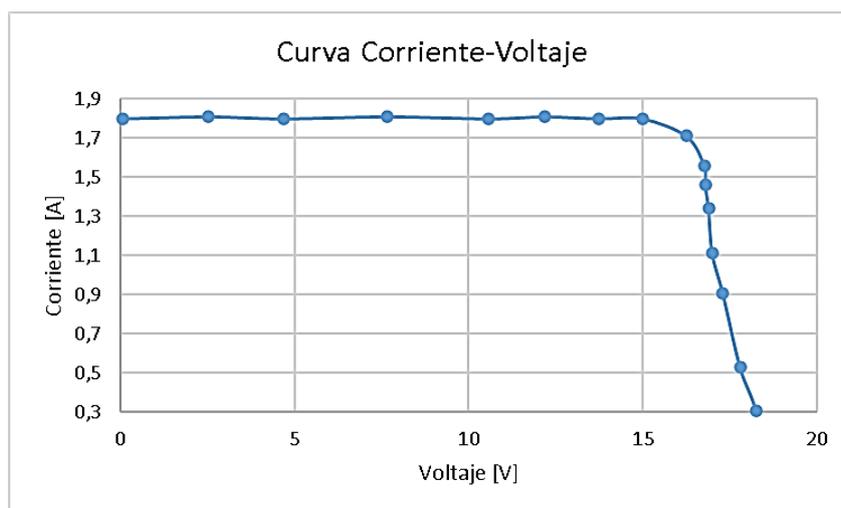


Fig. 84. Curva de I-V con cuatro lámparas y con enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

En referencia a la potencia obtenida se pudo constatar que el panel entregó una potencia máxima de 27.8 W siendo el valor máximo que el módulo puede generar, cualquier variación de resistencia en este punto hizo que la potencia comience a caer mostrando una pendiente pronunciada como se observa en la Figura. 85.

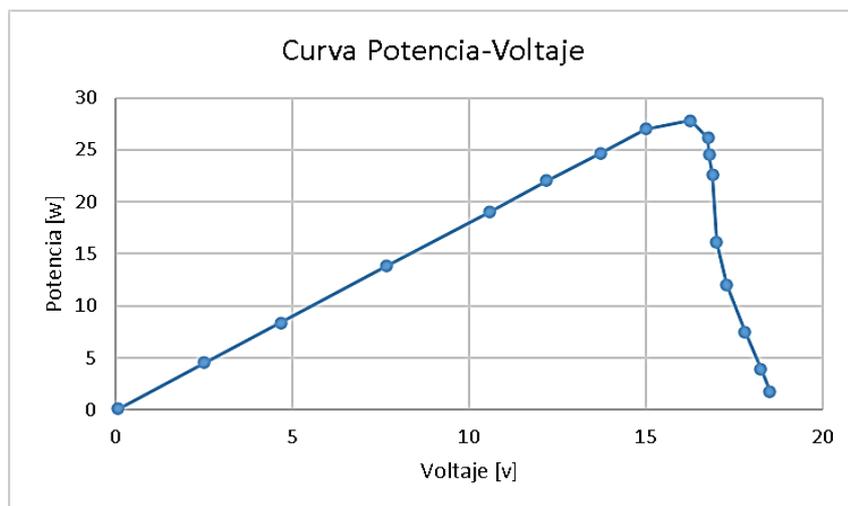


Fig. 85. Curva de P-V con cuatro lámparas y con enfriamiento en el panel solar  
Fuente: Autor

### 3.4. Curva característica de la pila de combustible

Con un voltaje de 12V que se obtiene a la salida del regulador del panel solar se alimenta al recipiente para el agua desionizada que realiza la electrolisis que irá a la pila de combustible, se realizó las siguientes mediciones, donde se muestra cómo varían las magnitudes de los parámetros que esta genera. la Tabla 3.12 se detalla estos datos:

TABLA 3.12  
ADQUISICIÓN DE DATOS DE LA PILA DE COMBUSTIBLE

Mediciones	Voltaje [V]	Corriente [mA]	Potencia [mW]
1	0	0	0
2	0.3	4	1.2
3	0.6	8	4.8
4	0.9	12	10.8
5	1.2	16	19.2
6	1.4	20	28

Fuente: Autor

Las curvas generadas entre las magnitudes de voltaje, corriente y potencia de la pila de combustible se pueden visualizar en las Figura. 86 y Figura. 87 respectivamente.

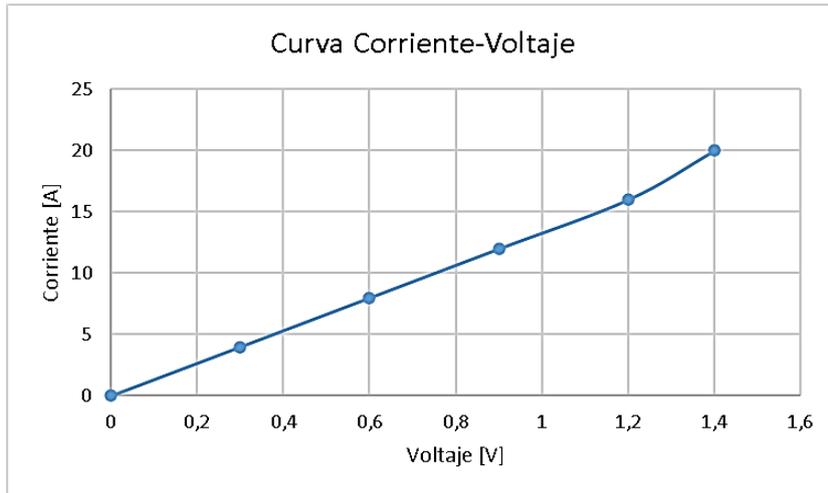


Fig. 86. Curva característica I-V de una pila de combustible  
Fuente: Autor

La Figura. 87 muestra la curva característica de potencia, teniéndose una pendiente creciente marcándose el nivel máximo de potencia en 28 mW a 1.4 V que es el límite de generación de la pila de combustible.

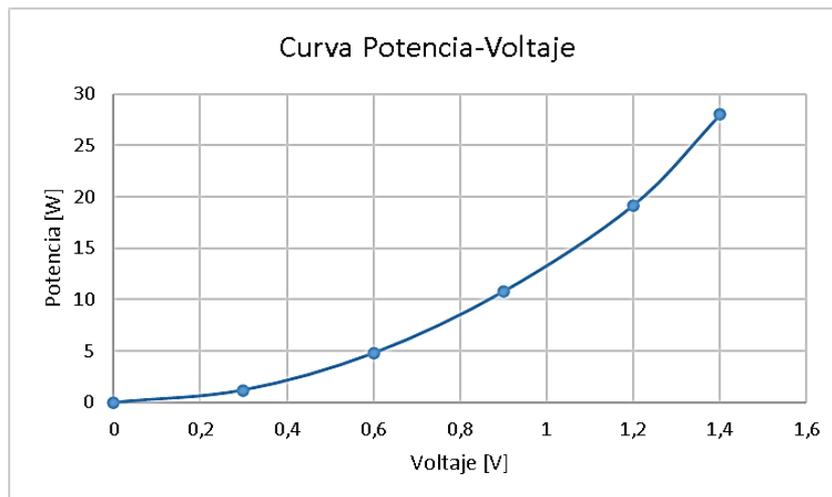


Fig. 87. Curva característica P-V de una pila de combustible  
Fuente: Autor

## Conclusiones

- Existen diversas tecnologías para la elaboración de paneles solares entre las cuales la de cristales monocristalinos son las más eficientes en cuanto al rendimiento (20-24%), ya que en la práctica se pudo constatar que tienen un buen nivel de eficiencia aún bajo sombra, además que son de fácil adquisición en el país, presentando el único inconveniente que, a partir de cierto nivel de radiación aplicado, el panel empieza a bajar su rendimiento.
- El módulo diseñado presenta ventajas con los modelos de módulos didácticos referenciales en el mercado, ya que se incorporaron una mayor cantidad de sensores que permiten tener una lectura en tiempo real de diversos datos como los de temperatura, voltaje, corriente y radiación convirtiéndose de esta manera en una herramienta práctica para la simulación y estudio de este tipo de generación, equiparándose a sistemas profesionales de costosa adquisición.
- Los datos obtenidos en la etapa de pruebas muestran que el sistema responde de manera muy cercana a la curva ideal de caracterización del panel, al tener las 4 lámparas halógenas encendidas que emiten una radiación solar de  $681.9 W/m^2$ . Generando así un voltaje de 18.71 V y al aplicar una resistencia de 10 ohm se consiguió alcanzar una potencia máxima de 27.8 W, pudiéndose notar que entre los sistemas aplicados con y sin ventilación existe una diferencia del 1% entre los valores obtenidos, con la diferencia del tiempo que pueden mantenerse activos hasta llegar al punto de temperatura máxima admisible.
- Las pilas de combustible presentan una opción viable para la implementación de nuevas tecnologías de generación renovable, ya que con pequeñas cantidades de agua desionizada empieza a generar un voltaje correspondiente a su capacidad.

## Recomendaciones

- Es importante utilizar varios tipos de paneles solares y realizar las pruebas de funcionamiento reales ya que según las condiciones de trabajo estos parámetros tienden a variar y puede encontrarse un tipo diferente que se ajuste más a las necesidades requeridas por el módulo y que no se esté considerando.
- Se necesita implementar un mejor sistema de generación de radiación solar, ya que, aunque las lámparas halógenas presentan una buena alternativa, presentan un inconveniente importante que es el calor generado y que no permite que el módulo funcione por un tiempo prolongado, limitando su tiempo de uso.
- Se recomienda realizar un sistema de control regulable para la regulación de la radiación que se aplica sobre el panel. Lo cual permitiría tener un control más exacto de la energía generada.
- Realizar un diseño de una pila de combustible de mayor capacidad, ya que las que se pueden adquirir no cumplen con los requerimientos necesarios para poder realizar pruebas con una carga considerable y los resultados obtenidos sean más notorios.

## Bibliografía.

- Abdullah, M. O. (2012). Applied Energy. *Applied Energy*, 3, 67331510. <https://doi.org/10.1201/b12758>
- Agila, W. (2013). *Detección y control del estado de una pila PEM para funcionamiento óptimo: Arquitectura de agentes de percepción y control*. Univesidad Carlos III de Madrid.
- ARCONEL. (2019). *Agencia de Regulación y Control de Electricidad*. <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/>
- Autosolar. (2020). *Paneles Solares Monocristalinos | En AutoSolar al mejor precio*. <https://autosolar.es/paneles-solares/paneles-solares-monocristalinos>
- Ballesteros, C. O. (2012). *Proyecto fin de carrera análisis comparativo de inversores fotovoltaicos de conexión a red con potencia igual o superior a 100 kW* [Universidas Carlos III Madrid]. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15497/PFC\\_Clara\\_Ormaechea\\_Ballesteros.pdf](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/15497/PFC_Clara_Ormaechea_Ballesteros.pdf)
- Bellini E. (2019). *Latinoamérica alcanza una potencia fotovoltaica instalada de 10 GW – pv magazine Latin America*. <https://www.pv-magazine-latam.com/2019/04/02/latinoamerica-alcanza-potencia-fv-instalada-de-10-gw/>
- Blas Martínez, D., & Ángel Torres, M. (2010). *Instalacion de paneles fotovoltaicos en bosal s.a.*
- BOSCH. (1996). *Manual de la Técnica del Automóvil* (Tercera Ed). Editorial Reverté S.A., <https://juliorestorepo.files.wordpress.com/2013/08/bosch-manual-de-la-tecnica-del-automovil-tercera-edicion.pdf>
- Bosch, R. (2003). *Manual de la técnica del automóvil* (Alemana (ed.); 4th ed.). <https://books.google.es/books?id=lvDitKKI1SAC&pg=PA732&lpg=PA732&dq=Pila+de+combustible&source=bl&ots=FeQfPUy3VK&sig=uBqOMkVt6fUiklt4-ukFxr-mFvo&hl=es&sa=X&ei=Qa47UPKYN6ek0QWB6YHwDQ#v=onepage&q=Pila+de+combustible&f=false>
- Buitrón, L., & Encalada, D. (2012). *Construcción de un tablero didáctico para la obtención de energía eléctrica alternativa fotovoltaica apropiado para realizar prácticas en el laboratorio de electricidad de la universidad técnica del norte*. Universidad técnica del norte.
- Calderón A., M., & Mesa-Palacio, L. (2004). Principios De Funcionamiento Y Construcción De Una Celda De Combustible De Àcido Fosfòrico (Pafc). *Scientia et Technica*, 2(25), 125–130. <https://doi.org/10.22517/23447214.7209>
- Castrillón, L. (2018). *Implementación y análisis de un sistema energético fotovoltaico interconectado a red de 20 kw con soporte de almacenamiento*. Universidad Tecnológica

- de Pereira.
- Chacón, P. (2019). *Diferencia entre los paneles solares monocristalinos, policristalinos y de película delgada - E&R Solar*. <https://solar.eyr.mx/diferencia-entre-los-paneles-solares-monocristalinos-policristalinos-y-de-pelicula-delgada/>
- Chao, U. (2017). *Modelado térmico de una pila de combustible PEM de alta temperatura* [Universidad de Barcelona]. [http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/113962/1/TFM\\_MERSE\\_Uxía\\_Reija\\_Chao.pdf](http://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/113962/1/TFM_MERSE_Uxía_Reija_Chao.pdf)
- Chávez, M. (2012). *Proyecto de factibilidad para uso de paneles solares en generación fotovoltaica de electricidad en el complejo habitacional "san antonio" de riobamba*. Escuela superior politécnica de chimborazo.
- DARRERA. (2021). *Piranómetro de Silicio*. <https://www.darrera.com/wp/es/producto/s-lib-m003-piranometro-silicio/>
- EcoInventos. (2019). *Diferencia entre paneles solares monocristalinos y policristalinos*. <https://ecoinventos.com/diferencia-paneles-solares-monocristalinos-policristalinos/>
- EG, & Services. (2004). *Manual de Pila de Combustible*.
- ENDEF. (2019). *Panel solar híbrido - Qué es, qué ventajas tiene y para qué sirve*. <https://endef.com/paneles-solares-hibridos/>
- Esquiú, F. (2011). *Energetika - Curva I-V de un panel fotovoltaico*. [http://www.energetika.com.ar/Curva I-V.html](http://www.energetika.com.ar/Curva-I-V.html)
- Festo. (2020). *Sistemas de entrenamiento de la serie Festo Didactic*. Obtenido de Festo Didactic: [https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/56765\\_lvseries\\_a4\\_es.pdf](https://www.festo-didactic.com/ov3/media/customers/1100/56765_lvseries_a4_es.pdf)
- Flisom, S. (2014). *Células solares de cobre y seleniuro de indio y cobre – HiSoUR Arte Cultura Historia*. <https://www.hisour.com/es/copper-indium-gallium-selenide-solar-cells-39668/>
- Glennapts, R. (2020). *Materiales utilizados para reóstatos*. <https://riverglennapts.com/es/uses-of-engineering-materials/940-materials-used-for-rheostats.html>
- Goilav, N. (2016). *Arduino Aprender a desarrollar para crear objetos inteligentes*. <https://www.ediciones-eni.com/open/mediabook.aspx?idR=8d182e726219b5c89e24125beb9c5494>
- González, O. (2017). *Estudio de la influencia de las condiciones atmosféricas en el rendimiento de pilas de combustible de baja temperatura (PEMFC y DMFC) para su aplicación en aeronaves no tripuladas*. Universidad politécnica de madrid.
- Lindao, W. (2020). *Propuesta de Diseño de un Sistema de Energía Solar Fotovoltaica. Caso de Aplicación en Casa Comunal de Cooperativa Los Paracaidistas en la Ciudad de Guayaquil* [universidad católica de santiago de guayaquil]. <http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/14365/1/T-UCSG-PRE-TEC-IEM-248.pdf>

- López, A. (2011). *Gestión térmica y del agua en una pila de combustible tipo PEM. Diseño y fabricación de pilas*. Universidad de Zaragoza.
- López, H., & Puente, R. (2014). *Diseño de un sistema fotovoltaico integrado a la a la red para el área de estacionamiento de la Universidad Tecnológica de Salamanca*. Universidades Tecnológicas y Politécnicas.
- Luis, & Espinoza. (2015). *Energía solar en el Ecuador* (Primera Ed).
- Macancela, L. (2012). *Diagnóstico de la implementación de los sistemas fotovoltaicos correspondientes a la primera etapa del proyecto YANTSA ii ETSARI*. Universidad de Cuenca.
- Macías, B., & Ramírez, L. (2019). *Construcción de una pila de combustible partiendo de un electrolito de membrana polimérica usando como combustible etanol para generar electricidad*.
- Mendoza, J. (2018). *Análisis y perspectivas de la aplicación de las pilas de combustible en autos fcv, funcionamiento básico y otros usos*. Universidad nacional del altiplano.
- Moro, M. (2010). *Instalaciones solares fotovoltaicas* (Primera Ed). Editorial Paraninfo.  
[https://books.google.com.ec/books?id=X22Ctl-VomgC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=X22Ctl-VomgC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- Novillo, Hernández, Mazón, Molina, C. (2018). *Arduino y el Internet de las cosas*.  
<https://www.3ciencias.com/libros/libro/arduino-y-el-internet-de-las-cosas/>
- Phocos. (2018). *Charge Controller*. [http://www.codesolar.com/Energia-Solar/DOWNLOAD/Codesolar\\_Phocos\\_Charge\\_Controller\\_CML\\_CMNL.pdf](http://www.codesolar.com/Energia-Solar/DOWNLOAD/Codesolar_Phocos_Charge_Controller_CML_CMNL.pdf)
- Pizano, R. (2016). *Celdas solares más eficientes gracias al telurio de cadmio – Proyecto FSE*.  
<http://www.proyectorfse.mx/2016/04/04/celdas-solares-telurio-de-cadmio/>
- PNGEGG. (2018). *Proceso de deposición química de vapor czts cobre indio galio selenuro de células solares, ángulo, célula solar png | PNGEgg*. <https://www.pngegg.com/es/png-pnkny>
- Pulido, L. (2005). *Celda de Combustible Económica* [Universidad de Los Andes].  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22638/u270890.pdf?sequence=1>
- Ramírez, N., Izaguirre, G., & Trujillo, N. (2010). *Modelado de una celda de combustible tipo pem*.
- Roca, J. (2018). *Arseniuro de galio en las pilas de combustible*.  
<https://elperiodicodelaenergia.com/tag/arseniuro-de-galio/>
- Roca, J. (2019). *La pila de combustible de metanol iguala la autonomía de los coches de combustión*. <https://elperiodicodelaenergia.com/la-pila-de-combustible-de-metanol-igual-a-la-autonomia-de-los-coches-de-combustion/>

- Ruiz, G. (2020). *¿Cómo funcionan los paneles solares?* <https://erenovable.com/como-funcionan-los-paneles-solares/>
- S., E., D., B., C., T., & P., L. (2015). *Evaluación del ciclo de vida de un sistema de celdas de combustible de membrana electrolítica de polímero para vehículos de pasajeros*. Universidad de Londres.
- Tecnosol. (2019). *Características eléctricas de los paneles solares*. Energía Solar y Sistemas de Riego. <https://tecnosolab.com/noticias/caracteristicas-electricas-de-los-paneles-solares/>
- Tipán, L. (2015). *Diseño y construcción de un prototipo de celda de combustible*. Escuela politécnica nacional.
- Tobajas, c. (2014). *Instalaciones solares fotovoltaicas*. <https://elibro.net/es/ereader/utnorte/43053>
- UNED. (2016). *Energía y desarrollo sostenible :: Sostenibilidad*. <https://www2.uned.es/biblioteca/energiarenovable3/sostenibilidad.htm>
- Vera, L. (2016). *Transmisores de Condiciones Climáticas*. <https://docplayer.es/2034164-Transmisores-de-condiciones-climaticas-salida-4-20ma.html>
- Zúñiga, A., & Granda, J. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo medidor de radiación Ultra Violeta alimentado por paneles solares*. Universidad Politecnica Salesiana sede Guayaquil.

# Anexos

## ANEXO A: Manual de funcionamiento del módulo de pruebas

### Introducción

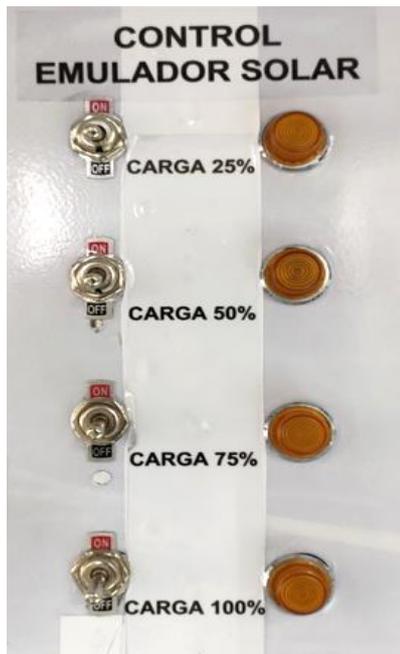
El manual de funcionamiento se tiene como objetivo, describir la operabilidad del módulo de pruebas y la manipulación de cada uno de los elementos que componen el sistema de generación fotovoltaica, con la finalidad de socializar al usuario el uso de este. Seguidamente, se indica las instrucciones que permitirán al estudiante desarrollar las prácticas de laboratorio del módulo de pruebas.

A continuación, se procede a indicar paso a paso el funcionamiento del módulo desde el encendido del módulo y como se debe ir operando hasta su respectiva conexión y ejecución de los programas que se usan para su respectiva adquisición de datos.

### 1. Puesta en marcha del emulador fotovoltaico

	<p><b>Alimentación:</b> El módulo de pruebas se debe conectar a una fuente de alimentación de 120VAC. Esto permitirá energizar el sistema de control y generación de radiación por medio de las lámparas halógenas.</p>
	<p><b>Selector de posición:</b> El módulo consta de dos sistemas de generación: sistema fotovoltaico y sistema eólico. Se debe colocar el selector de posiciones en el sistema fotovoltaico.</p>
	<p><b>Puesta en marcha:</b> Se debe habilitar la alimentación del emulador solar, mediante el breaker mostrado en la imagen. Esto permite que se puedan encender las lámparas halógenas colocadas en la parte superior del módulo y se produzca la generación de radiación hacia el panel solar.</p>

## 2. Control del emulador solar



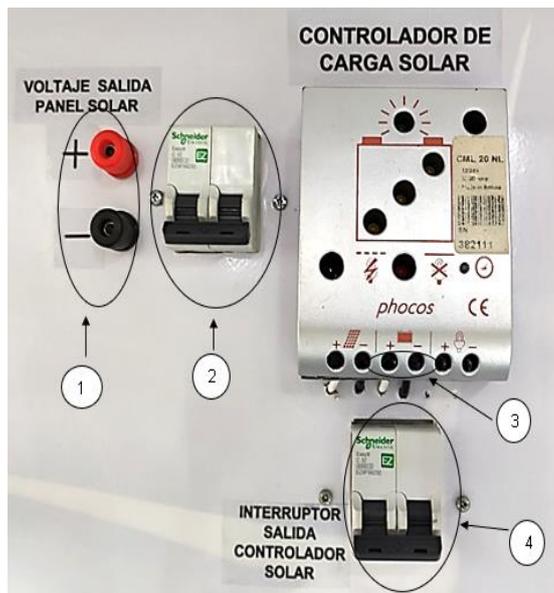
La generación de radiación solar se la realiza mediante las lámparas halógenas, que se encuentran distribuidas por medio de 4 interruptores, energizándose una lámpara por interruptor con la finalidad de tener un control más estable de la radiación. Cuenta con una luz indicadora para señalar que lámpara se encuentra activa, permitiendo que el nivel de radiación aplicado sea manejado.



Para obtener los datos de radiación solar se conecta el puerto USB del Datalogger a una computadora mediante el software HOBOWare, ya que este dispositivo está conectado con el piranómetro instalado junto al panel solar en la parte superior, obteniendo así los datos en tiempo real.

## 3. Funcionamiento de los componentes del sistema fotovoltaico

Para comprender el funcionamiento de cada componente del módulo de pruebas, se detalla la función que tiene cada componente y las instrucciones de su uso.



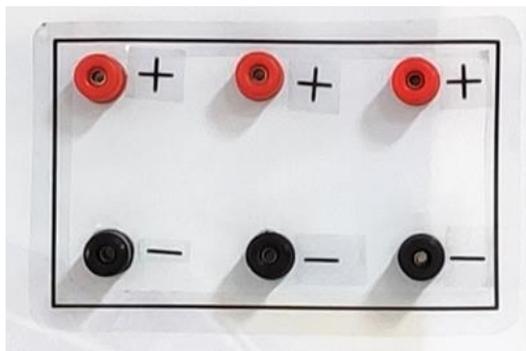
- 1) **Salida de voltaje del panel solar:** Estos conectores sirven de puntos de medida de tensión a la salida o conexión de cargas externas de 18V en DC.
- 2) **Breaker del panel solar:** Tiene la función de energizar el controlador de carga solar, además de ser una protección del controlador en caso de sobrecarga.
- 3) **Salida del controlador:** Sirve como punto de medición de voltaje DC reducido a 12V para la alimentación de las baterías y cargas DC a 12V.
- 4) **Breaker de salida del controlador:** Tiene la función de conectar y desconectar a las cargas DC además de impedir que el controlador interfiera en el funcionamiento del controlador eólico que se encuentra implementado en el módulo de pruebas.



- 5) **Breaker de la batería:** Desde aquí se puede controlar la alimentación de la batería. Ya sea la que proviene del sistema de generación fotovoltaico o del sistema eólico independientemente.



6) **Breaker de cargas DC:** Este breaker tiene la función de proteger las cargas de 12V en DC, además de conectar y desconectar toda la red DC.



7) **Borneras de alimentación DC:** Estas borneras sirven para la conexión de cargas externas para realizar las pruebas de funcionamiento, además de utilizarse para alimentar las borneras del contenedor de electrolisis de la pila de combustible.



8) **Reóstato:** Más conocido como resistencia variable, se utiliza para regular la carga, es de 0 a 12 ohmios.



9) **Interruptores de conexión:** Los interruptores 1 y 2 nos permiten el encendido y apagado de los focos DC de 12 y 18W respectivamente.



10) **Switch del inversor:** Desde aquí se controla el encendido y apagado del inversor, este dispositivo convierte el voltaje de 12VDC a 120VAC.



11) **Medidor de energía:** Es un visualizador del consumo de energía de las cargas de 120VAC.



12) **Breaker de carga AC:** Sirve para conectar y desconectar las cargas en AC, además de protección de sobrevoltajes.



13) **Interruptor de cargas AC:** Estos interruptores 1 y 2 sirven para conectar y desconectar las cargas AC.



14) **Tomacorriente AC:** Aquí se podrán conectar cargas externas de 120VAC.



15) **Borneras de la pila de combustible:** Las borneras marcadas son las que se alimentan a 12V por al menos 2min para poder empezar a realizar la electrolisis en el recipiente de agua para atravesar por la manguera pequeña que está conectado a la pila de combustible.

#### 4. Lista y marca de componentes del módulo

Cant.	Equipo	Marca	Modelo	Características
1	Panel solar	HENGJI SOLAR	HJMO75M-12	75Wp
4	Lamparas halógenas	Cetronic	R7S	300W
1	Piranometro	HOBO	S_LIB-M003	0-1280W/m <sup>2</sup>
1	Datalogger	HOBO	Onset computer corporation	Datalogger
1	Arduino	Arduino	Atmega328P	UNO
1	Sensor de voltaje	Arduino	25PIC Avr 25v	0-24V
1	Sensor de corriente	Arduino	Acs712 30A	0-20A
1	Reostato		25W	12ohm
1	Breaker	EBASEE	EBS6BN	16A
1	Controlador de carga	PHOCOS	CML20ML	12/24V
1	Amperímetro DC	Camsco	CP-96	50A DC
1	Inversor	COTEK		120V AC – 350W
1	Medidor	STAR	DDS26B	Monofásico de 3 hilos
3	Interruptores	Schneider	EZ9F56232	12A DC
1	Bateria	POWEST	FL12350	12V – 35Ah / 20h
1	Kit de la Pila de combustible	Jiangsu Slit	0512-86420520	12V – 1,5V
2	Focos	LumenBasic	Warm white	12V / 12W 18W

## 5. Adquisición de datos

Para realizar la adquisición de datos se debe saber los pines asignados de los sensores al microcontrolador de Arduino. A continuación, se detalla los puertos utilizados en el Arduino y las salidas de los sensores de corriente y voltaje.

Sensor	Pin asignado	Alimentación
Sensor de corriente AC	Pin analógico A1	5V
Sensor de corriente DC	Pin analógico A2	5V
Sensor de voltaje AC	Pin analógico A3	5V
Sensor de voltaje DC	Pin analógico A4	5V

Además, se detalla las instrucciones para comunicar y ejecutar el programa LabVIEW para su respectiva adquisición de datos, para las practicas planteadas.

### Descargar e instalar los siguientes programas en el ordenador personal:

- **Software LabVIEW.**

Se lo puede descargar directamente desde la página oficial de LabVIEW. Donde nos permite seleccionar el software dependiendo a las características de nuestro computador.

LabVIEW

LabVIEW es un software de ingeniería de sistemas que requiere pruebas, medidas y control con acceso rápido a hardware e información de datos.

[+ Mostrar Más](#)

**DESCARGAS**

SO Soportado <sup>?</sup> Windows  [Ver Archivo ReadMe](#)

Versión <sup>?</sup> 2020 SP1

Ediciones Incluidas <sup>?</sup>  
 Base, Completo, Profesional  
 Comunidad  
 Runtime

Valor de Bits de la Aplicación <sup>?</sup> 32 bits

Idioma <sup>?</sup> Inglés

Incluye Software Controlador <sup>?</sup> Sí

LabVIEW 2020 SP1 y Controladores

Fecha de Lanzamiento  
8/1/21

Versiones Incluidas  
2020 SP1

> SO Soportado  
> Idioma  
> Suma de Verificación

DESCARGAR INSTALL OFFLINE

Tamaño del Archivo  
5.89 MB

- **Controlador NI-VISA**



## NI-VISA

NI-VISA ofrece soporte para clientes que utilizan GPIB, serial, PXI y otros tipos de instrumentos.

[+ Mostrar Más](#)

**i** Nota: Instale los entornos de programación como NI LabVIEW o Microsoft Visual Studio® antes de instalar este producto.

### DESCARGAS

<b>SO Soportado</b> ⓘ	Windows ▼	<a href="#">Ver Archivo ReadMe</a>
<b>Versión</b> ⓘ	21.0 ▼	
<b>Ediciones Incluidas</b> ⓘ	Completo	
<b>Valor de Bits de la Aplicación</b> ⓘ	32 bits y 64 bits	
<b>Idioma</b> ⓘ	Alemán, Chino, Coreano, Francés, Inglés, Japonés	

### NI-VISA 21.0

**Fecha de Lanzamiento**  
3/8/21

**Versiones Incluidas**  
21.0.0

> **SO Soportado**

> **Idioma**

> **Suma de Verificación**

DESCARGAR

INSTALL OFFLINE

**Tamaño del Archivo**  
6.44 MB

Después de realizar la instalación de estos programas, ya podemos ejecutar el archivo desarrollado para este módulo de pruebas.

## ANEXO B: Manual de mantenimiento del módulo de pruebas

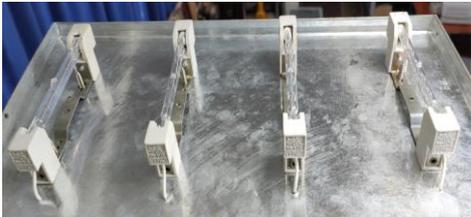
### Introducción

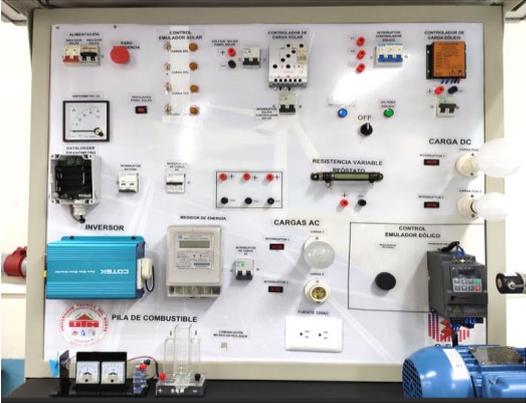
Para el correcto funcionamiento del sistema, se debe tener en cuenta algunas actividades de mantenimiento a realizarse en el módulo, de esta manera se evitarán fallas en los componentes del sistema fotovoltaico. En el presente manual se detallan las actividades a realizarse con cada uno de los equipos y componentes del módulo de pruebas.

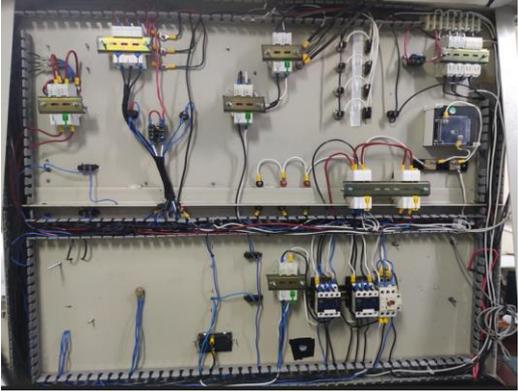
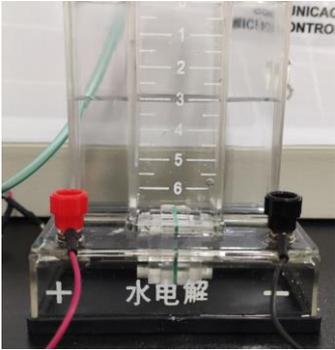
#### 1. Mantenimiento preventivo

Este tipo de mantenimiento se realiza cada cierto periodo de tiempo para evitar que el módulo presente fallas a futuro y así alargar la vida útil del mismo, dando como resultado una perfecta operación de los equipos, y los sensores puedan tener una medición de datos más exactos.

Los principales elementos se detallan a continuación:

Componente	Actividad	Periodo
<b>Panel solar</b> 	Realizar una limpieza del panel, retirando el polvo.	Semestral
	Comprobar el voltaje de salida del panel solar mediante equipos de medición (multímetro).	Semestral
<b>Lámparas halógenas</b> 	Realizar una limpieza del polvo con una franela suave en los cristales de las lámparas, evitando el contacto con la piel, ya que la contaminación superficial producirá daño al encender las lámparas.	Anual

	Verificar la sujeción en el soporte y los contactos de las lámparas halógenas.	Anual
<p style="text-align: center;"><b>Datalogger</b></p> 	Verificar el estado de las pilas (batería baja), también se puede visualizar el estado por unos indicadores led del dispositivo.	Semestral
	Revisar integridad física de los cables y la comunicación con el software HOBOWare.	Trimestral
<p style="text-align: center;"><b>Equipos y componentes del módulo lado frontal</b></p> 	Con la total ausencia de alimentación, verificar continuidad en cada uno de los puntos de medición del módulo.	Anual
	Verificar la sujeción de los componentes en el módulo, realizar reajuste de ser necesario.	Semestral
<p style="text-align: center;"><b>Conexiones y componentes del módulo lado posterior</b></p>	Verificar sujeción de los componentes eléctricos.	Semestral
	Limpiar los contactores.	Mensual

	<p>Revisar el aislamiento de los conductores.</p>	<p>Semestral</p>
	<p>Revisar continuidad entre los componentes y la estructura del módulo para evitar algún cortocircuito.</p>	<p>Mensual</p>
<p><b>Pila de combustible</b></p> 	<p>Limpiar y secar el recipiente contenedor de agua, para evitar corrosión en los terminales que están sumergidos.</p>	<p>Después de cada uso</p>
	<p>Limpiar el polvo y humedad que se genera después del uso.</p>	<p>Después de cada uso</p>
<p><b>Ventilador para el enfriamiento del panel solar</b></p> 	<p>Limpiar polvo que obstruya las hélices del ventilador.</p>	<p>Trimestral</p>
<p><b>Batería</b></p> 	<p>Limpiar el polvo de las borneras para evitar un mal contacto en los terminales.</p>	<p>Semestral</p>

**Nota:** Las actividades planteadas se deben realizar con el módulo totalmente desenergizado y desconectado.

## 2. Mantenimiento correctivo

A continuación, se menciona las actividades correctivas en caso de presentarse algún fallo a la hora del funcionamiento.

Componente	Falla	Posible causa	Actividad de corrección
Panel solar	No genera voltaje a la salida del panel	Se aflojaron los terminales que vienen del panel solar.	Ajustar los terminales que llegan del panel.
Lámparas halógenas	No encienden	Desconexión de la base soporte de las lámparas.	Verificar si no están quemadas las lámparas o si están bien ajustadas a la base.
Datalogger	No envía señal o no reconoce el programa HOBOWare	Pilas descargadas	Cambiar de pilas.
		Desconexión de algún cable.	Ajustar las uniones del dispositivo.
Controlador de carga solar	No enciende o titilan las luces	No está llegando el voltaje requerido.	Revisar los terminales que alimentan al regulador.
Inversor	No enciende o suena	Descarga de la batería.	Medir el voltaje de la batería (12V).
			Medir el voltaje que está llegando al inversor desde el controlador de carga (12V).
Focos de 12 y 18W en DC	No encienden	No están haciendo contacto con las boquillas.	Ajustar bien los focos a las boquillas.

### **3. Normas de seguridad**

Para realizar alguna actividad se debe tener en cuenta las reglas de oro para mantener la seguridad del operario.

- Cuando se realice cualquier actividad de mantenimiento eléctrico se debe desconectar las partes que no influyan en las actividades de corrección.
- Se debe solicitar los equipos y herramientas adecuadas para la manipulación de cualquier elemento o componente del módulo.
- Para cualquier tipo de mantenimiento se debe usar equipos de protección personal como: guantes, gafas, casco, etc.

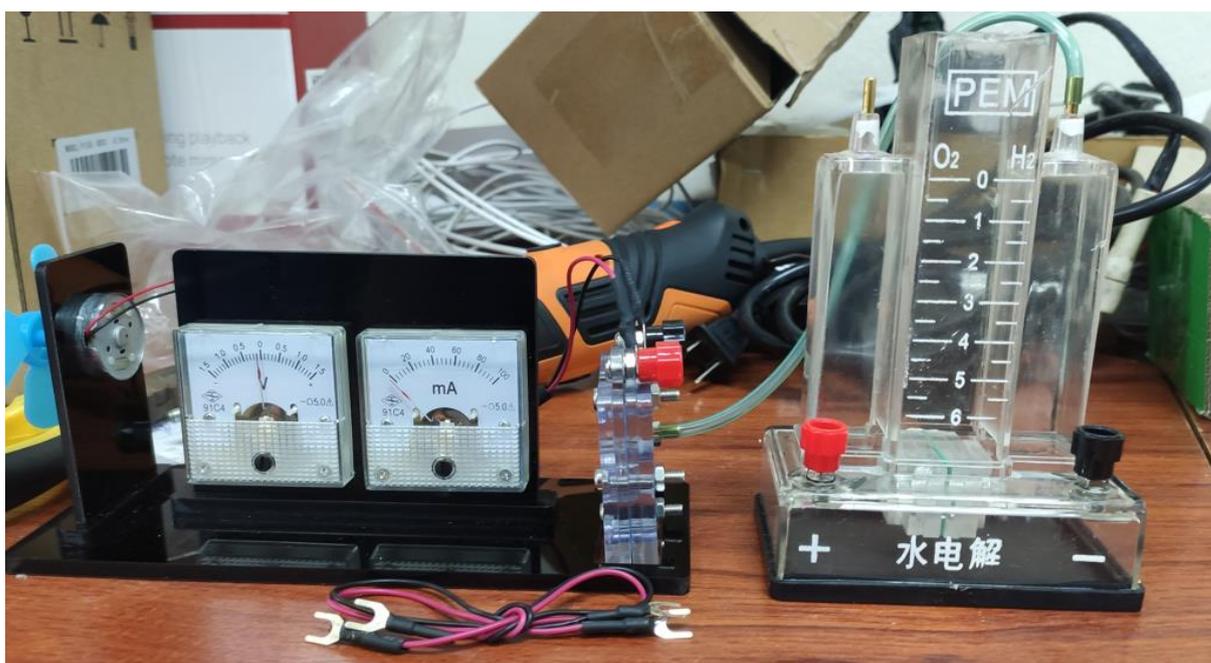
## Manual de la pila de combustible

De acuerdo con los requisitos de la “Norma para equipos de enseñanza de ciencias para estudiantes” se ha desarrollado una celda de combustible de hidrógeno químico para institutos técnicos, universidades y laboratorios. Los componentes principales de la membrana de intercambio de protones, electrodos y catalizadores son de materias primas importadas. El rendimiento de este instrumento es estable y los resultados experimentales son obvios y especialmente para enseñanza.

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que puede convertir la energía química del hidrógeno y el oxígeno en energía eléctrica y no tiene contaminación ni emisiones de sustancias nocivas. La pila de combustible PEM consta de dos electrodos (cátodo y ánodo) conectadas por una membrana de polímero.

El hidrógeno gaseoso se envía al ánodo de la membrana y el aire se envía al cátodo. Los átomos de hidrógeno son despojados de los electrones en el lado del ánodo y los protones cargados positivamente atraviesan la membrana para llegar al cátodo. Para que esta sección ocurra se debe usar un catalizador de platino, a través del cual pasan los electrones de hidrógeno.

Desde el ánodo al cátodo, el circuito externo genera una corriente eléctrica. En el cátodo, los electrones, protones y oxígeno en el aire se combinan para producir agua, que es el principal subproducto de la pila de combustible, como se muestra en la figura



Ocurre la siguiente reacción:

Ánodo (electrodo negativo):  $2H_2O - 4e^- = 4H^+$

Cátodo (electrodo positivo):  $O_2 + 4e^- + 4H^+ = 2H_2O$

El demostrador consta principalmente de cuatro partes:

1. Parte eléctrica: motor con ventilador, amperímetro, voltímetro
2. Pila de combustible de hidrogeno
3. Electrolizador de agua PEM
4. Base orgánica

Los dos electrodos de membrana de intercambio de protones de este conjunto de demostradores son de  $35mm * 35mm$ .

### **Pasos experimentales:**

Agregar agua, no debe ser demasiada para evitar que el agua fluya hacia la batería.

Después de agregar agua, conecte la salida de gas hidrógeno en el electrolizador de agua con la entrada de gas hidrógeno en la batería con una tubería de gas y luego conecte la fuente de alimentación de 12V CC a los terminales positivo y negativo de la parte de electrolizador de agua, después de 2 a 3 minutos conecte el cableado de la parte eléctrica a la batería, el motor pequeño comienza a funcionar y los valores de corriente y voltaje se muestran en el amperímetro y voltímetro.

### **Precauciones:**

1. No aplique voltaje externo al terminal de la salida de voltaje, de lo contrario dañara la pila de combustible.
2. Guarde la pila de combustible PEM en un recipiente sellado
3. Cuando conecte con mangueras, asegurarse de que todas las piezas de conexión y las mangueras no estén mojadas
4. No desmonte la pila de combustible PEM, de lo contrario puede causar daños

### **Recordatorio especial:**

La polaridad positiva y negativa del electrolizador de agua PEM no se puede conectar incorrectamente, la batería y el electrolizador se dañador o incluso quedaran inutilizables.

## Obtención de datos con el piranómetro

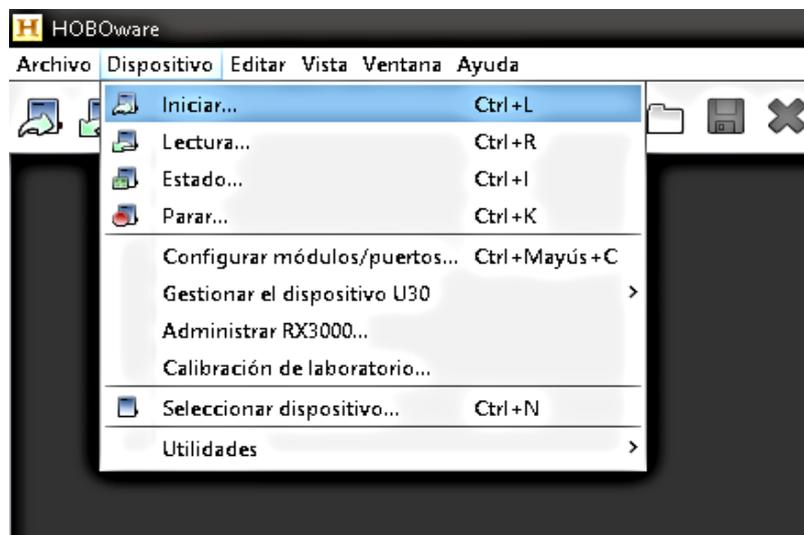
Después de instalar el software HOBOWare



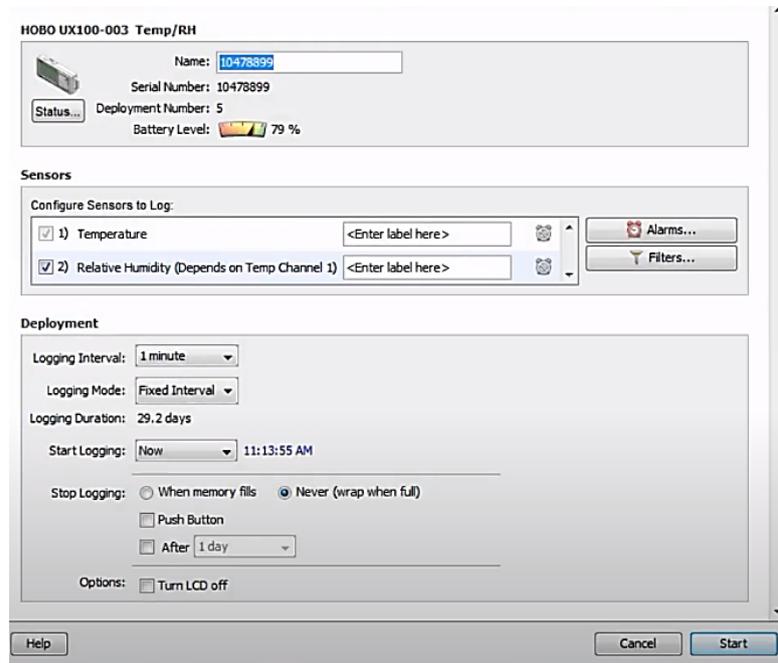
Abrimos el software y nos muestra la siguiente interfaz



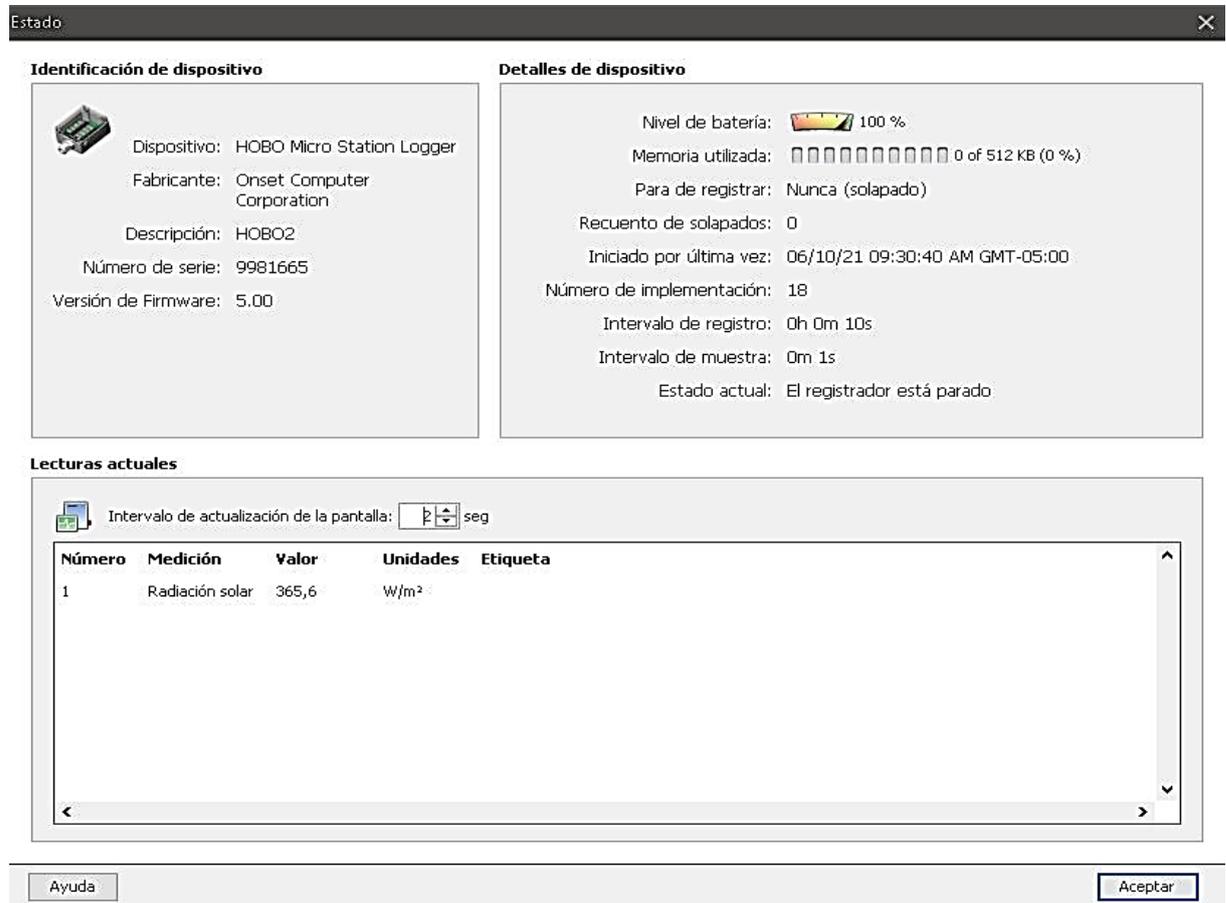
Conectamos el Datalogger del piranómetro y nos vamos a las opciones superiores, en Dispositivo seleccionamos en INICIAR



Luego de esto nos saldrá una ventana para la configuración de parámetros de medición en la que seleccionamos el tiempo de medición y le damos INICIO



Y nos saldrá la siguiente ventana en la que se muestra la radiación solar medida por el piranómetro en tiempo real, y esta se muestra de la siguiente manera



Para la obtención de datos del Arduino se utilizaron los siguientes códigos

### Sensor de voltaje

```
int analogInput = A1;
float vout = 0.0;
int voltaje = 0;
float R1 = 30000.0;
float R2 = 7500.0;
int value =0;
void setup() {
  pinMode(analogInput, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  value= analogRead(analogInput);
  vout=(value*5.0)/1024.0;
  voltaje=vout/(R2/(R1+R2));
  Serial.println(voltaje);
  Serial.print (" ");
}
```

```
int analogInput = A1;
float vout = 0.0;
int voltaje = 0;
float R1 = 30000.0;
float R2 = 7500.0;
int value =0;
void setup() {
  pinMode(analogInput, INPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop() {
  value= analogRead(analogInput);
  vout=(value*5.0)/1024.0;
  voltaje=vout/(R2/(R1+R2));
  Serial.println(voltaje);
  Serial.print (" ");
}
```

## Sensor de Corriente

```
void setup () {  
  Serial.begin (9600);  
}  
void loop () {  
  int SensorValue = analogRead (A2);  
  int OutputValue = map (SensorValue, 0, 1023, -30, 30);  
  Serial.print ("Sensor: ");  
  Serial.print (SensorValue);  
  Serial.print (" Valor en Amperios: ");  
  Serial.println (OutputValue);  
  retardo (100);  
}
```

```
void setup () {  
  Serial.begin (9600);  
}  
void loop () {  
  int SensorValue = analogRead (A2);  
  int OutputValue = map (SensorValue, 0, 1023, -30, 30);  
  Serial.print ("Sensor: ");  
  Serial.print (SensorValue);  
  Serial.print (" Valor en Amperios: ");  
  Serial.println (OutputValue);  
  retardo (100);  
}
```



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE ELECTRICIDAD

## GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Docente:

Práctica #: 1

Tema:

Identificación de los componentes de un sistema de generación fotovoltaica.

Fecha de realización de la práctica:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

Observaciones: \_\_\_\_\_

Fecha de entrega del informe:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

Observaciones: \_\_\_\_\_

Periodo:

Abril – Agosto

Octubre – Febrero



**Tema:** identificación de los componentes que conforman el módulo de un sistema de generación fotovoltaico.

## 1. Objetivo General

- ❖ Identificar desde el punto de vista técnico cada uno de los componentes del módulo de un sistema de generación solar, mediante la placa de características de cada dispositivo, para así tener una visión general de las partes que conforman un sistema fotovoltaico.

## 2. Objetivos Específicos.

- ❖ Observar y entender la configuración del sistema fotovoltaico implementado en el módulo.
- ❖ Analizar y describir el funcionamiento de cada uno de los equipos y componentes que conforma la configuración del módulo.

## 3. Introducción.

Para entender el funcionamiento de un sistema de generación fotovoltaica, se requiere un amplio análisis del proceso que se realiza desde que se capta la radiación solar desde las lámparas incandescentes, hasta que se produce la electricidad, para su uso y almacenamiento.

La función de un panel fotovoltaico es captar la energía solar a través de sus celdas fotovoltaicas y generar energía eléctrica mediante dispositivos integrados en el panel.

La energía eléctrica generada puede ser almacenada o puede ser transformada de corriente continua a corriente alterna para luego ser distribuida a una red.

La presente práctica permitirá a los estudiantes adquirir y fundamentar sus conocimientos sobre el estudio de paneles solares mediante la identificación de elementos reales que se pueden encontrar en un sistema fotovoltaico, esto se realizará mediante la observación e identificación del funcionamiento de cada uno de los elementos del módulo, teniendo en cuenta las precauciones necesarias para la manipulación de los equipos y evitar cualquier accidente.

## 4. Trabajo Preparatorio.

- Revisión del módulo de pruebas.
- Explicar el funcionamiento de un panel solar.
- Explicar cuáles son los componentes de un sistema fotovoltaico y del panel solar.
- Realizar una limpieza al lugar del trabajo.

## 5. Equipos y Materiales.

- Módulo de pruebas del panel solar
- Hoja de Trabajo Preparatorio
- Hoja de observaciones

## 6. Desarrollo.

- 6.1. El módulo de pruebas debe estar apagado o desconectado para ser manipulado.
- 6.2. Identifique el módulo y explique con sus propias palabras el funcionamiento del sistema fotovoltaico implementado.



Interprete y describa el funcionamiento

- 6.3. Observe cada uno de los equipos y componentes que conforma el módulo y describir a continuación el funcionamiento y características de los siguientes elementos.

Elemento	Nombre	Funcionamiento	Características y Parámetros






6.4. Realice la conexión general unifilar del sistema fotovoltaico de los componentes principales.

**Observaciones:**

**Cuestionario:**

- ¿Cuáles son las características principales que presenta el panel solar en circuito abierto?
- ¿Cuál es la función principal del controlador de carga una vez que se ha llenado completamente la batería?
- ¿Desde su punto de vista cree usted que es un método eficiente simular la radiación solar utilizando lámparas halógenas?
- ¿Cuáles son las diferencias en la conexión hacia una carga AC y una carga DC?

**7. Informe.**

El informe para presentar por el/los estudiantes deben contener al menos las siguientes consideraciones



- Complementar la fundamentación teórica contenida en la etapa de Introducción. Se deberá utilizar bibliografía adecuada (libros, manuales, artículos científicos, etc.)
- Cuestionario: Se responderán a las preguntas planteadas referentes al tema de práctica que permitirán verificar el entendimiento de la misma.
- Conclusiones: Deben contener al menos tres conclusiones. Estas deben ser simples y concisas. Se deberá hacer comparaciones entre los resultados de la práctica y los conceptos teóricos. Los resultados obtenidos deben ser presentados y se debe hacer inferencias a partir del análisis de resultados.
- Recomendaciones: Deben contener al menos tres recomendaciones. Se proponen ideas que contribuyan a mejorar los resultados, así como también el procedimiento de la práctica.

## 8. Bibliografía y/o Linkografía.

Manual de usuario del Módulo de pruebas para el estudio de paneles solares.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE ELECTRICIDAD

## GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

**Docente:**

**Práctica #: 2**

**Tema: Mediciones en circuito abierto del sistema fotovoltaico**

**Fecha de realización de la práctica:**

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

**Observaciones:** \_\_\_\_\_

**Fecha de entrega del informe:**

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

**Observaciones:** \_\_\_\_\_

**Periodo:**

Abril – Agosto

Octubre – Febrero



**Tema:** Mediciones en circuito abierto del sistema fotovoltaico.

## 1. Objetivo General.

- ❖ Realizar las mediciones en circuito abierto del sistema fotovoltaico mediante la variación de la intensidad de luz de las lámparas halógenas, para así obtener los valores de voltaje DC del panel solar sin conectar ninguna carga.

## 2. Objetivos Específicos.

- ❖ Determinar el voltaje generado por el panel solar al conectar cada una de las lámparas halógenas.
- ❖ Determinar los voltajes producidos en base a la propagación de luz de las lámparas hacia el panel solar, mediante las mediciones de la radiación producida mediante el piranómetro

## 3. Introducción.

Para comprobar el funcionamiento de un panel solar es importante realizar las pruebas de voltaje correspondientes a la salida del panel solar y del controlador de carga solar que tiene una salida de 12V necesarios ya sea para alimentar un circuito DC o para almacenar en una batería, de igual manera se puede determinar cuál es voltaje máximo que puede producir el panel solar con la máxima intensidad de radiación solar que generan las lámparas halógenas.

La presente práctica permitirá a los estudiantes analizar el principio de funcionamiento del sistema fotovoltaico.

## 4. Trabajo Preparatorio.

- Revisión del módulo de pruebas y manual de usuario
- Realizar la conexión del Datalogger para la obtención de datos de la radiación solar por medio del piranómetro para la presente práctica
- Realizar una limpieza al lugar del trabajo

## 5. Equipos y Materiales.

Módulo de pruebas del sistema fotovoltaico compuesto por:

- Un panel solar
- Un banco de lámparas incandescentes de 120V a 300W.
- Un regulador de carga de la batería
- Multímetro
- Sensores de medición (piranómetro, amperímetro y voltímetro).

## 6. Desarrollo.

- 6.1. Verificar que las cargas DC Y AC del módulo de pruebas estén desconectadas, para que el panel se encuentre en circuito abierto.
- 6.2. Conectar el voltímetro a las terminales de salida del voltaje DC del panel solar y luego del controlador de carga solar.
- 6.3. Mediante los interruptores de encendido colocar las lámparas halógenas a la escala 25% y encenderlas una por una hasta llegar al 100%.
- 6.4. Medir los valores de radiación solar con el piranómetro y ver los valores de voltaje a la salida del panel solar con un voltímetro, para así comprender la relación entre ambos parámetros.

Escala de radiación (lámparas)	Radiación solar [ $W/m^2$ ]	Voltaje [V]
1		
2		
3		
4		

- 6.5. Con los datos obtenidos en la tabla representar en una gráfica la curva de voltaje-radiación solar.

### Observaciones:

### Cuestionario:

¿Cuál es la radiación de las lámparas a la que se empieza a generar voltaje en el panel solar?

¿Qué nos muestra la gráfica obtenida de la curva voltaje-radiación solar?

## 7. Informe.

El informe para presentar por el/los estudiantes deberán tener al menos las siguientes consideraciones:



- Complementar la fundamentación teórica contenida en la etapa de Introducción. Se deberá utilizar bibliografía adecuada (libros, manuales, artículos científicos, etc.)
- Cálculos: Se presentará una etapa de comparación de datos de acuerdo con la fundamentación teórica que permitan ser comparados con los valores obtenidos en la experimentación (determinación de errores).
- Análisis de Resultados: Se realizará una evaluación crítica de los resultados obtenidos y se compararán con los valores calculados.
- Cuestionario: Se presentarán cuestiones referentes al tema y se responderá las preguntas planteadas al final de la práctica que permitirán verificar el entendimiento de la misma.
- Conclusiones: Deben contener al menos tres conclusiones. Estas deben ser simples y concisas. Se deberá hacer comparaciones entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos. Los resultados obtenidos deben ser presentados y se debe hacer inferencias a partir del análisis de resultados.
- Recomendaciones: Deben contener al menos tres recomendaciones. Se proponen ideas que contribuyan a mejorar los resultados, así como también el procedimiento de la práctica.

#### **8. Bibliografía y/o Linkografía.**

Textos, notas de clase, catálogos, sitios web, etc. que han sido usadas en el documento.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE ELECTRICIDAD

## GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

**Docente:**

**Práctica #:3**

**Tema:** Obtención de las curvas características de voltaje, corriente y potencia para un panel solar con varias cargas.

**Fecha de realización de la práctica:**

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_  
año mes día

**Observaciones:** \_\_\_\_\_

**Fecha de entrega del informe:**

\_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_  
año mes día

**Observaciones:** \_\_\_\_\_

**Periodo:**

Abril – Agosto

Octubre – Febrero

**Tema:** Obtención de las curvas características de voltaje, corriente y potencia para un panel solar con varias cargas.

## 1. Objetivo General.

- ❖ Obtener la curva característica de voltaje-corriente y voltaje-potencia del panel solar, variando la carga con un reóstato.

## 2. Objetivos Específicos.

- ❖ Obtener los datos de corriente-voltaje y potencia-voltaje del panel solar para varias radiaciones aplicando diferentes cargas.
- ❖ Determinar el punto de potencia máxima de un panel solar.

## 3. Introducción.

Para entender un sistema de generación fotovoltaica como fuente de alimentación es necesario calcular la curva característica de funcionamiento corriente-voltaje, de esa manera será posible poder compararla con las características de otras fuentes de alimentación y elegir la mejor alternativa.

Para determinar el rendimiento de un panel solar es importante determinar dos puntos muy importantes la corriente de cortocircuito y la tensión en circuito abierto como se muestra en la figura, que de igual manera nos permitirá determinar de punto de potencia máxima.

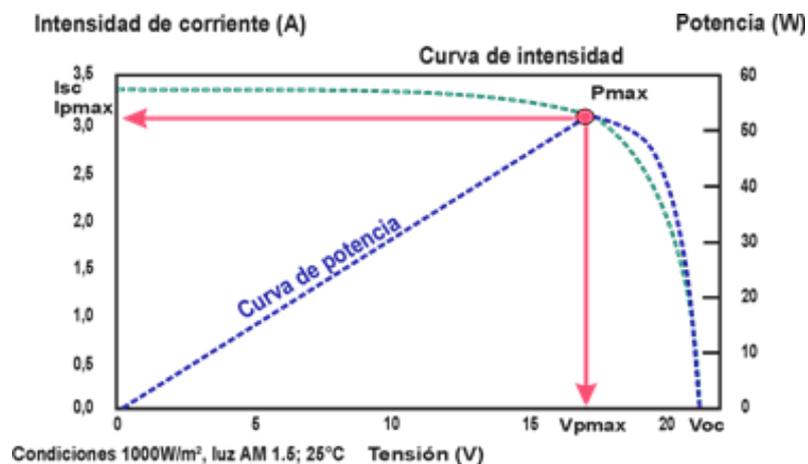


Fig. 1 Curva característica de corriente-voltaje y potencia máxima

### Intensidad de cortocircuito (Icc o Isc)

Se produce a tensión 0 voltios y se puede medir directamente con un amperímetro, sus valores varían en función de las condiciones atmosféricas de medida.



### **Tensión de circuito abierto ( $V_{ca}$ o $V_{oc}$ )**

Es la tensión máxima del panel, se puede medir sin carga con un voltímetro y su valor varía de acuerdo con las condiciones atmosféricas.

### **Potencia máxima ( $P_{max}$ )**

Medición dada en vatios pico ( $W_p$ ). Es la potencia máxima que puede suministrar el panel fotovoltaico, en otras palabras, es el punto donde el producto intensidad y tensión es máxima, bajo condiciones estándar de medida.

### **Corriente en el punto de máxima potencia ( $I_{mp}$ )**

Viene a ser la corriente producida cuando la potencia es máxima en condiciones estándares de medida.

### **Voltaje en el punto de máxima potencia ( $V_{mp}$ )**

Viene a ser la tensión producida cuando la potencia es máxima en condiciones estándares de medida.

### **Eficiencia (%)**

Define la eficiencia de conversión ( $\eta$ ), es la cantidad de potencia de radiación incidente sobre el panel solar que es capaz de convertirse en potencia eléctrica.

$$\text{Rendimiento o eficiencia} = W_p/W_r$$

### **Tolerancia (%)**

Representa una pequeña dispersión de la potencia del módulo que está dentro de una banda  $63\%, 65,0 \pm 3\%$ . Siendo lo ideal que estas tolerancias sean positivas.

### **TONC( $^{\circ}C$ ), temperatura nominal de operación de la célula**

Es la temperatura que alcanzan las células cuando se someten a irradiación de  $800W/m^2$ , temperatura ambiente de  $20^{\circ}C$ , una velocidad del viento de  $1m/s$  y una distribución espectral AM 1.5.

#### 4. Trabajo Preparatorio.

- Revisión del módulo de pruebas y manual de usuario
- Realizar la toma de datos de voltaje y corriente con un multímetro, aplicando varias cargas con el reóstato, además obtener los datos de corriente de cortocircuito y voltaje de circuito abierto
- Realizar una limpieza al lugar del trabajo

#### 5. Equipos y Materiales.

Módulo de pruebas del módulo solar compuesto por:

- Un panel solar
- Banco de lámparas incandescentes (para simular la radiación solar)
- Un piranómetro
- Un controlador de carga de la batería
- Multímetro
- Amperímetro
- Carga DC (Resistencia variable)

#### 6. Desarrollo.

- 1) Apagar la carga DC como se muestra en la imagen, con el interruptor en (O) ya que estas cargas harán que se pierda corriente y voltaje al momento de conectar la carga variable.



- 2) Encender las lámparas halógenas desde el control de emulador solar, y encender el sistema de ventilación solar.
- 3) Conectar la resistencia variable (reóstato)
  - a. Conectar el multímetro en los bornes de la carga (resistencia variable) y ajustar la escala deseada.



- b. Comenzar empleando la carga más baja en la resistencia variable (cortocircuito  $R_{\text{carga}} = 0\Omega$ ) para lo cual regular la resistencia a la posición cero.
- c. Incrementar el valor de la carga por medio de la resistencia variable como se indica en la Tabla 1.1 y anotar los valores obtenidos de corriente-voltaje y la potencia.

Resistencia ohm	Voltaje (V)	Corriente (I)	Potencia (W)
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
Vacío			

- d. Con los datos obtenidos en la tabla representar en una gráfica la curva de Intensidad con respecto al voltaje (I-V) y la curva de potencia máxima con respecto al voltaje (P-V).

**Observaciones:**

**Questionario:**

¿Cuál es la corriente a la que se produce el cortocircuito cuando se varia la carga?



¿Las curvas características de los paneles solares son similares a las curvas obtenidas?

¿Cuál es el punto máximo de potencia?

## 7. Informe.

El informe para presentar por el/los estudiantes deberán tener al menos las siguientes consideraciones:

- Complementar la fundamentación teórica contenida en la etapa de Introducción. Se deberá utilizar bibliografía adecuada (libros, manuales, artículos científicos, etc.)
- Cálculos: Se presentará una etapa de cálculos de acuerdo con la fundamentación teórica que permitan ser comparados con los valores obtenidos en la experimentación (determinación de errores).
- Análisis de Resultados: Se realizará una evaluación crítica de los resultados obtenidos y se compararán con los valores calculados.
- Conclusiones: Deben contener al menos tres conclusiones. Estas deben ser simples y concisas. Se deberá hacer comparaciones entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos. Los resultados obtenidos deben ser presentados y se debe hacer inferencias a partir del análisis de resultados.
- Recomendaciones: Deben contener al menos tres recomendaciones. Se proponen ideas que contribuyan a mejorar los resultados, así como también el procedimiento de la práctica.

## 8. Bibliografía y/o Linkografía.

Textos, notas de clase, catálogos, sitios web, etc. que han sido usadas en el documento.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE ELECTRICIDAD

## GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

**Docente:**

**Práctica #: 4**

**Tema: Efectos de la temperatura sobre el panel solar.**

**Fecha de realización  
de la práctica:**

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

**Observaciones:** \_\_\_\_\_

**Fecha de entrega del  
informe:**

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

**Observaciones:** \_\_\_\_\_

**Periodo:**

Abril – Agosto

Octubre – Febrero



**Tema:** Efecto de la temperatura sobre el panel solar.

## 1. Objetivo General.

- ❖ Analizar el rendimiento del panel solar a medida que aumenta la radiación solar, generada por las lámparas halógenas.

## 2. Objetivos Específicos.

- ❖ Analizar y realizar el estudio del comportamiento del voltaje a medida que sube la temperatura de radiación en el panel.
- ❖ Determinar la potencia máxima y nominal del panel solar a ciertas temperaturas.

## 3. Introducción.

La curva de potencia de un panel solar es uno de los parámetros principales ya que nos indica cuál será la potencia eléctrica disponible en el panel solar a medida que aumenta la radiación recibida.

En la presente practica se realizará el estudio del rendimiento máximo del panel solar a medida que sube la temperatura.

## 4. Trabajo Preparatorio.

- Revisión del módulo de pruebas y manual de usuario
- Toma de datos de temperatura, voltaje y corriente
- Realizar una limpieza al lugar del trabajo

## 5. Equipos y Materiales.

Módulo de pruebas del panel solar compuesto por:

- Panel solar
- Banco de lámparas incandescentes (para simular la radiación solar)
- Multímetro digital
- Amperímetro (Multímetro tipo pinza)
- Termómetro infrarrojo

## 6. Desarrollo.

- 1) Seleccionar el sistema fotovoltaico desde el selector de posiciones.
- 2) Activar la alimentación del emulador solar.



- 3) Desde el control de emulador solar, vamos subiendo la carga desde el 25% hasta el 100% de carga. Se tomarán las cinco mediciones para llenar la Tabla 1.1.

Tener en cuenta no exceder la temperatura máxima que soporta el panel, para eso está colocada una luz indicadora que se activará y se deberá desconectar todo el sistema de generación fotovoltaica para evitar daños en el panel.

Carga [%]	Temperatura del panel	Voltaje	Corriente	Radiación
25				
50				
75				
100				

- 4) Con los valores medidos se saca el valor de la potencia, es decir  $P=V \cdot I$ , para cada carga.

Carga [%]	Potencia
25	
50	
75	
100	

**Observaciones:**

**Cuestionario:**

¿Hubo variación significativa en la potencia en cada carga?

¿A que temperatura hubo mayor potencia?

¿Qué pasa si se excede la temperatura máxima que soporta un panel solar?



## 7. Informe.

El informe para presentar por el/los estudiantes deberán tener al menos las siguientes consideraciones:

- Complementar la fundamentación teórica contenida en la etapa de Introducción. Se deberá utilizar bibliografía adecuada (libros, manuales, artículos científicos, etc.)
- Cálculos: Se presentará una etapa de cálculos de acuerdo con la fundamentación teórica que permitan ser comparados con los valores obtenidos en la experimentación (determinación de errores).
- Análisis de Resultados: Se realizará una evaluación crítica de los resultados obtenidos y se compararán con los valores calculados.
- Cuestionario: Se presentarán cuestiones referentes al tema de práctica que permitirán verificar el entendimiento de la misma.
- Conclusiones: Deben contener al menos tres conclusiones. Estas deben ser simples y concisas. Se deberá hacer comparaciones entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos. Los resultados obtenidos deben ser presentados y se debe hacer inferencias a partir del análisis de resultados.
- Recomendaciones: Deben contener al menos tres recomendaciones. Se proponen ideas que contribuyan a mejorar los resultados, así como también el procedimiento de la práctica.

## 8. Bibliografía y/o Linkografía.

Textos, notas de clase, catálogos, sitios web, etc. que han sido usadas en el documento.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE ELECTRICIDAD

## GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Docente:

Práctica #:5

Tema: Obtención de las curvas características del panel solar  
mediante el software de comunicación Arduino-  
LabVIEW

Fecha de realización  
de la práctica:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

Observaciones: \_\_\_\_\_

Fecha de entrega del  
informe:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

Observaciones: \_\_\_\_\_

Periodo:

Abril – Agosto

Octubre – Febrero



**Tema:** Obtención de las curvas características del panel solar mediante el software de comunicación Arduino-LabVIEW.

### 1. Objetivo General.

- ❖ Mediante la comunicación de los softwares Arduino y LabVIEW obtener las curvas características del panel solar

### 2. Objetivos Específicos.

- ❖ Con los sensores de corriente y voltaje instalados en el módulo, realizar la adquisición de datos y las curvas características.

### 3. Introducción.

Mediante la presente práctica se podrá realizar la adquisición de datos de corriente y voltaje, con el software de comunicación Arduino-LabVIEW.

### 4. Trabajo Preparatorio.

- Revisión del módulo de pruebas y manual de usuario
- Tener instalado el Software de Arduino y LabVIEW
- Realizar una limpieza al lugar del trabajo

### 5. Equipos y Materiales.

Módulo de pruebas del sistema fotovoltaico compuesto por:

- Panel solar
- Banco de lámparas incandescentes (para simular la radiación solar)
- Multímetro digital
- Un controlador de carga solar
- Carga DC (Resistencia variable o reóstato)
- Sensores de medida (corriente, voltaje)
- Tarjeta de adquisición de datos

### 6. Desarrollo.

- 1) Seleccionar el sistema fotovoltaico y encender la alimentación del emulador solar
- 2) Mediante el software de Arduino, configurar los sensores para la obtención de datos de corriente y voltaje (Véase el manual de usuario)
- 3) Ejecutar el software portable de LabVIEW para el muestro de datos y para la comunicación con Arduino



- 4) Desde el control de emulador solar encender las cargas una por una.
- 5) Desde el software obtener los datos de corriente y voltaje que genera el controlador de carga solar
- 6) Conectar el reóstato en varios valores de la resistencia y ver el comportamiento de la corriente y voltaje mediante el software de LabVIEW.

### **Observaciones:**

### **Cuestionario:**

¿Qué sucede con los valores de corriente y voltaje al subir la radiación emitida por cada lámpara halógena?

¿Cuáles el comportamiento de la corriente y voltaje al aplicar varias cargas del reóstato?

¿En qué ayuda la visualización de estos valores adquiridos?

### **7. Informe.**

El informe para presentar por el/los estudiantes deberán tener al menos las siguientes consideraciones:

- Complementar la fundamentación teórica contenida en la etapa de Introducción. Se deberá utilizar bibliografía adecuada (libros, manuales, artículos científicos, etc.)
- Cálculos: Se presentará una etapa de cálculos de acuerdo con la fundamentación teórica que permitan ser comparados con los valores obtenidos en la experimentación (determinación de errores).
- Análisis de Resultados: Se realizará una evaluación crítica de los resultados obtenidos y se compararán con los valores calculados.
- Cuestionario: Se presentarán cuestiones referentes al tema de práctica que permitirán verificar su entendimiento.
- Conclusiones: Deben contener al menos tres conclusiones. Estas deben ser simples y concisas. Se deberá hacer comparaciones entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos. Los resultados obtenidos deben



ser presentados y se debe hacer inferencias a partir del análisis de resultados.

- Recomendaciones: Deben contener al menos tres recomendaciones. Se proponen ideas que contribuyan a mejorar los resultados, así como también el procedimiento de la práctica.

## **8. Bibliografía y/o Linkografía.**

Textos, notas de clase, catálogos, sitios web, etc. que han sido usadas en el documento.



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS  
CARRERA DE ELECTRICIDAD

## GUÍA DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Docente:

Práctica #:6

Tema: Pruebas de funcionamiento de una pila de combustible

Fecha de realización  
de la práctica:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

Observaciones: \_\_\_\_\_

Fecha de entrega del  
informe:

\_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_  
año mes día

Observaciones: \_\_\_\_\_

Periodo:

Abril – Agosto

Octubre – Febrero



**Tema:** Pruebas de funcionamiento de una pila de combustible.

### 1. Objetivo General.

- ❖ Desarrollar pruebas de funcionamiento aplicadas a una pila de combustible

### 2. Objetivos Específicos.

- ❖ Entender los componentes principales de una pila de combustible.
- ❖ Comprender el funcionamiento de una pila de combustible

### 3. Introducción.

Mediante la presente práctica se podrá aprender sobre los componentes principales de la membrana de intercambio de protones, electrodos y los catalizadores.

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que puede convertir energía química del hidrógeno y el oxígeno en energía eléctrica y no tiene contaminación ni emisiones de sustancias nocivas. La pila de combustible consta de dos electrodos (cátodo y ánodo) conectados por una membrana de polímero.

El hidrógeno gaseoso se envía al ánodo de la membrana y el aire se envía al cátodo. Para que esta reacción ocurra, se debe usar un catalizador de platino, a través del cual pasan los electrones de hidrógeno. Desde el ánodo al cátodo, el circuito externo genera una corriente eléctrica.

### 4. Trabajo Preparatorio.

- Revisión del módulo de pruebas y manual de usuario
- Revisión del kit de prueba de la pila de combustible
- Realizar una limpieza al lugar del trabajo

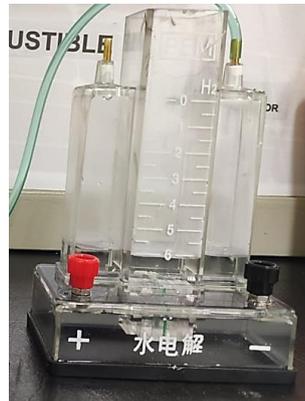
### 5. Equipos y Materiales.

Módulo de pruebas con la pila de combustible:

- Parte eléctrica: motor con ventilador, amperímetro y voltímetro
- Pila de combustible de hidrogeno
- Electrolizador de agua PEM
- Base orgánica.
- Conectores
- Fuente de alimentación de 12V DC (sacar del módulo)

## 6. Desarrollo.

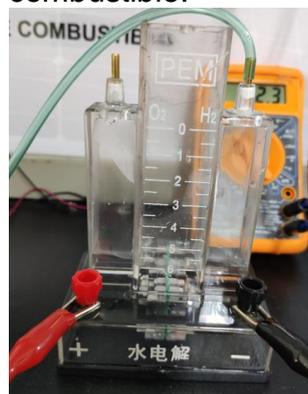
- 1) Agregar agua desionizada al nivel de agua en el electrolizador de agua PEM. La cantidad de agua no debe exceder a la indicada en el recipiente, para evitar que el agua fluya hacia la pila de combustible



- 2) Después de agregar agua en el electrolizador, conectar la salida de gas hidrógeno en el electrolizador de agua con la entrada de gas de hidrogeno en la pila de combustible mediante la tubería de gas.



- 3) Conectar la fuente de alimentación de 12V DC a los terminales positivo y negativo de la parte del electrolizador de agua, después de 2-3 minutos conecte el cableado de la parte eléctrica a la pila de combustible.



- 4) El motor pequeño comenzara a funcionar y los valores de corriente y voltaje se mostrarán en el voltímetro y amperímetro analógico del mismo.



### PRECAUCIONES:

- No aplicar voltaje externo al terminal de salida de voltaje, de lo contrario dañara la pila de combustible
- Guardar la pila de combustible en un recipiente sellado
- Cuando conecte la manguera asegúrese de que no este con agua o mojada,
- No desarmar la pila de combustible, puede causar daños.
- **Las polaridades positiva y negativa del electrolizador de agua PEM y de la pila de combustible no se puede conectar incorrectamente, se dañarían y quedarán inutilizables.**

### Observaciones:

### Cuestionario:

- ¿Qué es una pila de combustible?
- ¿Se podrían agrupar varias pilas de combustible?
- ¿Cuántos tipos de pilas de combustible existen?



¿Por qué usar las pilas de combustible?

¿Cómo se produce el hidrogeno para el funcionamiento de la pila de combustible?

¿Por qué se usa hidrogeno y no otros combustibles?

## **7. Informe.**

El informe para presentar por el/los estudiantes deberán tener al menos las siguientes consideraciones:

- Complementar la fundamentación teórica contenida en la etapa de Introducción. Se deberá utilizar bibliografía adecuada (libros, manuales, artículos científicos, etc.)
- Cálculos: Se presentará una etapa de cálculos de acuerdo con la fundamentación teórica que permitan ser comparados con los valores obtenidos en la experimentación (determinación de errores).
- Análisis de Resultados: Se realizará una evaluación crítica de los resultados obtenidos y se compararán con los valores calculados.
- Cuestionario: Se presentarán cuestiones referentes al tema de práctica que permitirán verificar el entendimiento de esta.
- Conclusiones: Deben contener al menos tres conclusiones. Estas deben ser simples y concisas. Se deberá hacer comparaciones entre los resultados experimentales y los conceptos teóricos. Los resultados obtenidos deben ser presentados y se debe hacer inferencias a partir del análisis de resultados.
- Recomendaciones: Deben contener al menos tres recomendaciones. Se proponen ideas que contribuyan a mejorar los resultados, así como también el procedimiento de la práctica.

## **8. Bibliografía y/o Linkografía.**

Textos, notas de clase, catálogos, sitios web, etc. que han sido usadas en el documento.