



**FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y  
URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA  
ELÉCTRICA**

**TESIS**

**DISEÑO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL  
ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS 1 – V  
DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE  
CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD  
SEÑOR DE SIPÁN**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO  
MECÁNICO ELÉCTRICISTA**

**Autor:**

**Bach. Febres Flores Marcos Erikson**  
<https://orcid.org/0000-0002-7786-5163>

**Asesor:**

**Mg. Carlos Alexis Alvarado Silva**  
<https://orcid.org/0000-0002-3588-8869>

**Línea de Investigación:  
Infraestructura, Tecnología y Medio Ambiente**

**Pimentel – Perú  
2021**

**DISEÑO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS 1 – V DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN**

---

MG. VIVES GARNIQUE JUAN CARLOS  
**PRESIDENTE**

---

MG. GASTIABURÚ MORALES SILVIA YVONE  
**SECRETARIO**

---

MG. ALVARADO SILVA CARLOS ALEXIS  
**VOCAL**

## **DEDICATORIA**

Mi tesis la dedico con todo amor y cariño a mis padres; Marcos Febres y Esther Flores, por su sacrificio y esfuerzo, por darme una carrera para mi futuro y por creer en mi capacidad, aunque hemos pasado momentos difíciles siempre han estado brindándome su comprensión, cariño y amor.

A mi esposa María Elizabeth y mi hija Nahomy Daniela por ser mi fuente de inspiración e motivación para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

A mi hermana Erika Febres y mi abuelita celinda Cordova que con sus palabras de aliento no me dejaban decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante y cumpla con mis ideales y metas.

## **AGRADECIMIENTO**

Mi agradecimiento se dirige a quien me ha forjado mi camino y me ha guiado por el sendero correcto, a Dios, el que en todo momento está conmigo ayudándome y bendiciéndome.

Agradecer a la Universidad Señor de Sipán, con su plana docente de excelente nivel, y en especial, a su apoyo incondicional a mi asesor por brindarme sus conocimientos y orientación durante mi formación profesional.

# **PROPUESTA DE DESARROLLO DE GUI PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR**

## **Resumen**

El presente Proyecto de investigación conlleva por nombre “PROPUESTA DE DESARROLLO DE GUI PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR” y se planteó con el objetivo de establecer una base de estudio en la especialidad de los sistemas fotovoltaicos dentro de la universidad Señor de Sipán. Se realizó entonces una propuesta de Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) basada en algoritmos genéricos de trabajo para calcular las curvas características de Paneles Fotovoltaicos basado en parámetros dados por el fabricante. Se establecieron condiciones de simulación variables a fin de modificar los parámetros como Irradiancia, Ángulo de incidencia y temperaturas de trabajo y, en tiempo real, verificar como estos cambios alteran las gráficas obtenidas para el panel solar de estudio.

Para la simulación se planteó además un modelo de carga capacitiva, por lo que se tuvieron que plantear y desarrollar las Ecuaciones Diferenciales correspondientes a los tiempos de carga de este, por lo que se logró modelar las curvas  $I_{vst}$  y  $V_{vst}$  del capacitor simulado, siendo estas una ventana añadida a la GUI propuesta.

Se comparó finalmente los resultados obtenidos por la GUI con resultados experimentales obtenidos de la bibliografía revisada encontrándose una cercanía en los resultados, por lo que se estableció la viabilidad de la misma con esto.

La GUI se desarrolló mediante la herramienta GUIDE (Matlab) encontrándose facilidades para el desarrollo y, sobre todo, para el análisis de los cálculos planteados.

Palabras Clave: GUI, MATLAB, Curvas I-V, Panel Solar.

# **GUI DEVELOPMENT PROPOSAL FOR THE GENERATION OF I-V CHARACTERISTIC CURVES OF SOLAR PANELS FOR THE ELECTRICAL CIRCUIT LABORATORY OF SEÑOR DE SIPÁN UNIVERSITY**

## **Abstract**

This research project is called “GENERIC ALGORITHMS FOR THE DESIGN OF A MINI WIND POWER PLANT USING A PROGRAMMING INTERFACE”. So, it tries to contribute on a small and large scale, encouraging future students to promote alternative sources since, due to the progress consumption of non-renewable energies, it greatly affects the deterioration of the planet caused by its polluting toxic tributaries. A Graphical User Interface (GUI) based on generic algorithms was carried out that provides dimensioning of the mini wind power plant system based on information sources statistics to determine input and output parameters using speeds from solar wind map sources. Therefore, it can be improved in future research, but this research can be applied in different areas depending on the power of loads due to a use factor and different speeds.

The research project begins with the phases to determine a Mini Wind Power Station

Through mathematical models and recognizing the input parameters. The GUI was developed by the GUIDE (MATLAB) command, which is why the working algorithm was mainly developed. Finally, the results of the program will be demonstrated.

Key Words: GUI, MATLAB,

## ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>13</b>
1.1. REALIDAD PROBLEMÁTICA.....	14
1.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	18
1.3. TEORÍAS RELACIONADAS AL TEMA.....	22
1.3.1. Energía.....	22
1.3.1.1. Eficiencia energética.....	23
1.3.1.2. Potencia y Energía.....	24
1.3.1.3. Fuentes de Energía .....	24
1.3.2. La Energía Solar Fotovoltaica .....	29
1.3.2.1. Subsistema de captación .....	30
1.3.2.2. Subsistema de almacenamiento .....	31
1.3.2.3. Subsistema de regulación.....	31
1.3.2.4. Subsistema convertidor de corriente.....	32
1.3.3. Circuito Equivalente de la Celda Solar.....	32
1.3.4. Condiciones Estándar de Prueba .....	33
1.3.5. Curva Característica del Módulo Fotovoltaico.....	35
1.3.5.1. Ecuación Característica .....	37
1.3.6. Caracterización de paneles solares .....	40
1.3.6.1. Métodos para caracterización de paneles solares.....	41
1.3.6.2. Caracterizadores comerciales de paneles solares.....	47
1.3.7. Softwares de Ingeniería .....	49
1.3.7.1. Matlab.....	49
1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA .....	51
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO .....	51
1.5.1. Justificación Tecnológica. ....	51
1.5.2. Justificación Económica.....	51
1.5.3. Justificación Social.....	52
1.5.4. Justificación Educativa.....	52
1.6. HIPÓTESIS.....	52
1.7. OBJETIVOS.....	53
1.7.1. Objetivo General.....	53

1.7.2.	Objetivos Específicos. ....	53
<b>2.</b>	<b>MATERIAL Y MÉTODO .....</b>	<b>54</b>
2.1.	TIPO Y DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	55
2.2.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	56
2.3.	VARIABLES Y OPERACIONALIZACIÓN.....	56
2.3.1.	Variable de definición del problema: .....	57
2.3.2.	Variables Independientes:.....	57
2.3.3.	Variables Dependientes: .....	57
2.3.4.	Variables intervinientes .....	57
2.3.5.	Caja negra para variables.....	59
2.4.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS, VALIDEZ Y CONFIABILIDAD .....	61
2.4.1.	Técnicas de recolección de datos.....	61
2.4.1.1.	<i>Recopilación de Información bibliográfica .....</i>	<i>61</i>
2.4.1.2.	<i>Análisis de documentos.....</i>	<i>61</i>
2.4.2.	Validación y confiabilidad.....	62
2.5.	PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS DE DATOS .....	62
2.6.	CRITERIOS ÉTICOS .....	63
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>65</b>
3.1.	ESTRUCTURA DE LA GUI.....	66
3.2.	MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE PANEL FOTOVOLTAICO.....	67
3.3.	CARACTERIZACIÓN DE CURVAS EN BASE A CARGA CAPACITIVA .....	68
3.4.	DESARROLLO DE ALGORITMOS Y VENTANAS DE TRABAJO DE GUI.....	70
3.4.1.	Desarrollo de Algoritmos y ventanas de trabajo de GUI.....	70
3.4.2.	Diagramas para las ventanas gráficas individuales .....	71
3.5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	78
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>82</b>
4.1.	CONCLUSIONES.....	83
4.2.	RECOMENDACIONES .....	83
<b>5.</b>	<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>85</b>



## INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.- CLASIFICACIÓN DE LAS FUENTES ENERGÉTICAS. FUENTE: LIBRO. CENTRALES DE ENERGÍA RENOVABLE. (CARTA GONZÁLEZ, CALERO PÉREZ, COLMENAR SANTOS, & CASTRO GIL, 2009). .....	25
FIGURA 2.- ESQUEMA CONCEPTUAL DE UNA INSTALACIÓN SOLAR FOTOVOLTAICA.....	30
FIGURA 3.- COMPONENTES DE UN PANEL FOTOVOLTAICO. FUENTE: LIBRO. (CARTA GONZÁLEZ, CALERO PÉREZ, COLMENAR SANTOS, & CASTRO GIL, 2009).....	31
FIGURA 4.- CIRCUITO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE LA CELDA SOLAR. FUENTE: TRABAJO DE GRADO. (GUACHIMBOZA DÁVALOS, 2011) .....	32
FIGURA 5.- ESQUEMA ELÉCTRICO EQUIVALENTE. ....	33
FIGURA 9.- VARIACIÓN EXISTENTE DE LA MASA DE AIRE SEGÚN LA HORA Y FECHA DEL AÑO FUENTE: LIBRO: ENERGÍAS RENOVABLES: CONCEPTOS Y APLICACIONES (SÁNCHEZ MIÑO, 2003).....	34
FIGURA 10.- CURVA CORRIENTE VS VOLTAJE; POTENCIA VS VOLTAJE PARA UNA CELDA FOTOVOLTAICA. FUENTE: WEBSITE (SUNFIELDS EUROPE, 2016).....	36
FIGURA 11.- EJEMPLO DE FICHA TÉCNICA DE PANEL SOLAR BAJO STC. FUENTE: WEBSITE. (SUNFIELDS EUROPE, 2016) .....	37
FIGURA 12.- ESQUEMA DE CONEXIÓN DE CÉLULAS SOLARES QUE CONFORMAN UN PANEL SOLAR FOTOVOLTAICO. FUENTE: TESIS DE GRADO. (FERNÁNDEZ FERICHOLA, 2009) .....	39
FIGURA 13. CURVAS CARACTERÍSTICAS PARA LOS PANELES FOTOVOLTAICOS PRESENTADOS EN LA TABLA 2. FUENTE: TESIS DE GRADO. (FERNÁNDEZ FERICHOLA, 2009) .....	40
FIGURA 14.- ESQUEMA DE CONEXIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO POR MÉTODO DE CARGA CAPACITIVA. FUENTE: TESIS DE GRADO (FERNÁNDEZ FERICHOLA, 2009).....	41
FIGURA 15.- ESQUEMA DE CONEXIÓN PARA CARACTERIZACIÓN DE PANEL FOTOVOLTAICO POR MÉTODO DE CARGA RESISTIVA. FUENTE: PAPER. (MENDES CASARO & CRUZ MARTINS, 2008) .....	42
FIGURA 16.- CONEXIÓN DE UN PANEL SOLAR A UN CONVERSOR DC/DC. (ANDÚJAR MÁRQUEZ, ENRIQUE GÓMEZ, DURÁN ARANDA, & MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ, 2004) 43	

FIGURA 17.- A) CONVERTOR DC/DC APLICADO COMO REDUCTOR; B) RESISTENCIA DE ENTRADA VS $\delta$ EN CONDUCCIÓN CONTINUA. FUENTE: PAPER. (ANDÚJAR MÁRQUEZ, ENRIQUE GÓMEZ, DURÁN ARANDA, & MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ, 2004).....	45
FIGURA 18.- A) CONVERTOR DC/DC APLICADO COMO ELEVADOR; B) RESISTENCIA DE ENTRADA VS $\delta$ EN CONDUCCIÓN CONTINUA. FUENTE: PAPER. (ANDÚJAR MÁRQUEZ, ENRIQUE GÓMEZ, DURÁN ARANDA, & MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ, 2004).....	45
FIGURA 19.- A) CONVERTOR DC/DC APLICADO COMO REDUCTOR-ELEVADOR; B) RESISTENCIA DE ENTRADA VS $\delta$ EN CONDUCCIÓN CONTINUA. FUENTE: PAPER. (ANDÚJAR MÁRQUEZ, ENRIQUE GÓMEZ, DURÁN ARANDA, & MARTÍNEZ BOHÓRQUEZ, 2004).....	47
FIGURA 20.- MÓDULO DE CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS DE LA EMPRESA ABET TECHNOLOGIES. FUENTE: <a href="http://abet-technologies.com/pv-iv-measurement-systems/pv-iv-solutions/">HTTP://ABET-TECHNOLOGIES.COM/PV-IV-MEASUREMENT-SYSTEMS/PV-IV-SOLUTIONS/</a> .....	48
FIGURA 22.- LOGO DEL SOFTWARE MATLAB. FUENTE: <a href="https://www.mathworks.com/products/matlab.html">HTTPS://WWW.MATHWORKS.COM/PRODUCTS/MATLAB.HTML</a> .....	49
FIGURA 23.- ANÁLISIS DE CURVAS CON SOFTWARE MATLAB. FUENTE: <a href="https://www.mathworks.com/products/matlab.html">HTTPS://WWW.MATHWORKS.COM/PRODUCTS/MATLAB.HTML</a> .....	50
FIGURA 25.- CARACTERIZADOR GRÁFICO DE PANELES FOTOVOLTAICOS (GUI) MEDIANTE EL SOFTWARE LABVIEW MOSTRANDO LA CURVA CARACTERÍSTICA DE UN PANEL DE 25W. FUENTE: TESIS DE GRADO. (GUACHIMBOZA DÁVALOS, 2011).....	56
FIGURA 27.- CAJA NEGRA DE CONTROL DE VARIABLES PARA GUI CARACTERIZADORA DE PANELES FOTOVOLTAICOS. FUENTE: PROPIA.....	59
FIGURA 28.-ESQUEMA DE TRABAJO PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LA GUI PARA CARACTERIZACIÓN DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	66
FIGURA 29.-MODELO ELÉCTRICO EQUIVALENTE DE UN PANEL FOTOVOLTAICO.....	67
FIGURA 30.-CONEXIÓN DEL PANEL FOTOVOLTAICO A LA CARCA CAPACITIVA.....	69
FIGURA 31.-EVOLUCIÓN DEL VOLTAJE Y CORRIENTE EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.....	70
FIGURA 32.-DIAGRAMA GENERAL DE FUNCIONAMIENTO DE LA GUI PARA CARACTERIZACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DE PANELES FOTOVOLTAICOS. ...	71
FIGURA 33.-PORTADA DE LA GUI PARA LA GENERACIÓN DE CURVAS CARACTERITICAS I-V DE PANELES FOTOVOLTAICOS.....	72
FIGURA 34.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA VENTANA GUI_SOLAR_01.....	72

FIGURA 35.-VENTANA GUI_SOLAR_02 PARA LA INSERCIÓN DE DATOS DE FABRICANTE PARA EL PANEL FOTOVOLTAICO A ESTUDIAR.....	73
FIGURA 36.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA VENTANA GUI_SOLAR_02.....	74
FIGURA 37.-VENTANA GUI_SOLAR_02 PARA CÁLCULO DE CURVAS IVT Y VVT PARA LA CARGA CAPACITIVA ESTUDIADA.....	75
FIGURA 38.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA VENTANA GUI_SOLAR_03.....	76
FIGURA 39.-VENTANA GUI_SOLAR_04 PARA EL CÁLCULO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V DEL PANEL FOTOVOLTAICO ANALIZADO BAJO LAS CONDICIONES Y CARGA PROPUESTA.....	77
FIGURA 40.-DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA VENTANA GUI_SOLAR_04.....	78
FIGURA 41.-MONTAJE EXPERIMENTAL DEL PANEL CONECTADO A LA CARGA CAPACITIVA.....	79
FIGURA 42.-EVALUACIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE PARA LA CARGA CAPACITIVA EXPERIMENTAL.....	80
FIGURA 43.-EVALUACIÓN DE TENSIÓN Y CORRIENTE PARA LA CARGA CAPACITIVA CALCULADA.....	80
FIGURA 44.-CURVA CARACTERÍSTICA I-V Y P-V CALCULADA POR LA GUI PARA EL PANEL FOTOVOLTAICO SELECCIONADO.....	81
FIGURA 45.- CURVA CARACTERÍSTICA V-I OBTENIDA DE RESULTADOS EXPERIMENTALES COMPARATIVOS.....	81

## INDICE DE TABLAS

TABLA 1 CONDICIONES ESTÁNDAR DE MEDIDA .....	34
TABLA 2 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN DE DISTINTOS PANELES FOTOVOLTAICOS COMPUESTOS. ....	39
TABLA 3 RELACIONES ENTRE $R_I$ Y $R_C$ PARA LAS APLICACIONES PRINCIPALES DE UN CONVERSOR DC/DC .....	44
TABLA 4 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES PARA GUI DE CÁLCULO DE CURVAS CARACTERÍSTICAS I-V PARA PANELES FOTOVOLTAICOS .....	60

# **1. INTRODUCCIÓN**

## **1.1. Realidad Problemática**

El desarrollo humano ha estado siempre limitado por la disponibilidad de fuentes de energía; de esta depende el acceso a servicios tan esenciales como la medicina y la educación, además, las capacidades productivas de industrias y empresas se ven gravemente limitadas por la existencia de restricciones energéticas. El desarrollo económico y la disponibilidad de empleos en naciones enteras está ligado a la capacidad de inversión e innovación de las grandes industrias, quienes a su vez se encuentran sometidas a las capacidades de energía del país. (Banco Mundial, 2019)

A pesar de esto, es conocido que cerca de mil millones de personas no disponen de acceso a la electricidad y que otros tres mil millones de personas utilizan combustibles contaminantes para la calefacción o la cocina, lo que origina para ellos un problema serio de salud debido a la contaminación que generan en sus hogares. (Banco Mundial, 2019)

Además, la utilización de fuentes primarias del tipo fósil ha generado un deterioro ambiental global que podría llegar a niveles incorregibles si no se toman las medidas correctivas necesarias. Entre las evidencias del mencionado deterioro de los ecosistemas pueden reconocerse: el aumento de la temperatura promedio global, los daños a la capa de ozono, la contaminación y los problemas en la calidad del aire y en casos más extremos, la presencia de lluvia ácida en las ciudades más industrializadas, las cuales son generalmente las más pobladas. (Posso, 2002)

Estas dificultades generan la necesidad de promover la utilización de alternativas más eficaces para la generación de energía que sirvan como reemplazo a los combustibles sólidos tradicionales al tener poco impacto ambiental, ser renovables y/o inagotables. Dichas fuentes alternativas están generalmente basadas en la radiación solar, de manera directa o indirecta y son conocidas como Fuentes de Energía Renovables (FER), las cuales pueden describirse como cualquier recurso sobre el cual la velocidad de consumo no supere su velocidad natural de regeneración y de toda la materia prima utilizada en su proceso de aprovechamiento. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

Durante los últimos años se ha fomentado la utilización de este tipo de energía, buscando que poco a poco queden desplazadas las fuentes convencionales a fin de reducir la dependencia energética de los países y permitirles autonomía y confiabilidad energética, y es que, los combustibles fósiles y sólidos no son renovables, tendiendo inevitablemente a agotarse en algún momento. Evidencia del gran interés por las FER son los proyectos en diferentes países a nivel mundial que buscan incluirlas como parte importante de su matriz energética nacional; China, siendo el primer país productor de energía a través de FER tuvo para el 2018 un 38,8% de su capacidad energética con este tipo de energía, equivalente a 728 GW de potencia instalada (Pilipey, 2018); Estados Unidos con un 17,6% de su generación basada en energías renovables, instalando para el 2017 una potencia nueva de 12,3 MW en FER (Fernández Munguía, 2018).

Así, para el 2016, el 3% del consumo global de energía primaria se originó en energías renovables. Sin incluir la energía hidroeléctrica (la cual en muchos países constituye desde hace tiempo el elemento principal de su matriz energética, junto al uso de combustibles sólidos) el uso de fuentes renovables creció un 14.1% en el 2016, por debajo del promedio que generalmente llevaba, pero registrando el mayor crecimiento absoluto hasta el momento, del cual la energía eólica significó más de la mitad, mientras que la energía solar casi un tercio. (González, y otros, 2017)

Y es que, ya sea utilizando de manera directa la radiación solar con el uso de equipos térmicos y paneles fotovoltaicos, o aprovechando la energía eólica debido al movimiento del viento generado por las diferencias de temperaturas que la radiación solar provoca; el Sol se vislumbra como nuestro benefactor principal en cuanto a energía se refiere, de manera permanente y prácticamente inagotable, siendo entonces una obviedad el querer aprovechar tanto como sea posible su existencia. Por ello, se vislumbra que el desarrollo de este tipo de tecnologías de generación presenten un gran beneficio a largo plazo, proporcionando de seguridad energética a todos los países que la desarrollen, dando una solución sostenible y mitigando el impacto medioambiental del proceso de generación de energía; esta gran cantidad de ventajas son el sustengo suficiente como para que se incentiven las inversiones y difusión de las distintas soluciones de energía solar (International Energy Agency, 2011).

De las tecnologías solares mencionadas, la más directa es la de paneles fotovoltaicos, elementos conformados por una determinada cantidad de celdas fotovoltaicas encargadas de convertir directamente la radiación solar fotovoltaica en corriente continua a un determinado voltaje, para posteriormente ser aprovechado por algún dispositivo que requiera ser energizado. La principal ventaja de estos sistemas es que pueden emplearse en una gran variedad de aplicaciones, yendo desde instalaciones independientes de bajo consumo hasta grandes parques solares de varios MW de potencia.

Una de las soluciones más importantes basadas en paneles fotovoltaicos son los denominados Sistemas Fotovoltaicos Aislados (SFVA), que son instalaciones independientes de la Red Eléctrica Nacional que buscan satisfacer la demanda de pequeños sectores con un nivel de consumo moderado, como comunidades aisladas con problemas de accesibilidad energética, todo esto a precios accesibles y sin la necesidad de depender de proyectos o infraestructuras que planteen un gran impacto a la zona de instalación, en comparación a centrales hidráulicas o térmicas, y, además, que requieren de un equipo de supervisión y mantenimiento mínimo en comparación. (Salas Reyes, Gómez Blanco, Vanegas Chamorro, Valencia Ochoa, & Villicaña Ortiz, 2018)

El impacto de los SFVA es tal que se estima que para 2030 podrían estarse generando aproximadamente 2.600 TWh de electricidad con este tipo de instalación en todo el mundo, lo que podría representar suficiente energía como para alimentar el cincuenta por ciento de las necesidades eléctricas actuales de la Unión Europea, o como para reemplazar 450 plantas de combustión a carbón (con un tamaño aproximado de 750MW c/u). (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

A nivel nacional, en Perú, existía para el 2004 una capacidad fotovoltaica instalada de aproximadamente 3,73 MW, en donde 44.772 SFV eran utilizados en sistemas de comunicaciones y 17.448 SFV tenía como objetivo demandas domiciliarias. Muchos de estos sistemas se utilizaban también en aplicaciones agrarias, siendo muy comunes al norte y en la selva del país. Por otro lado, ONG'S, ministerios, y organizaciones como el Fondo de Cooperación para el Desarrollo Social (FENCODES) en conjunto con Gobiernos regionales han desarrollado proyectos energéticos basados en SFVA con



objeto a sistemas de telecomunicaciones, electrificación rural, refrigeración de vacunas, sistemas de iluminación pública, entre otros. (Horn, 2006)

Es entendible entonces que los SFVA son una estrategia ideal para el suministro energético en sectores aislados, con poca centralización o que tienen una accesibilidad reducida ante instalaciones eléctricas convencionales, siendo este último una situación común en el territorio nacional debido a las irregularidades geográficas de sectores como la sierra o la selva. Otro motivo que genera relevancia a esta estrategia de generación eléctrica, es que, a nivel regional, la energía solar se encuentra altamente disponible, siendo tal su magnitud que en el año 2003 el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) hizo público como recurso electrónico el Atlas Solar del Perú, en el cual figuran los datos promedio de irradiancia por departamento, variando desde 4.5kWh/día en la Amazonía hasta 6.5kWh/día en la zona sur del país, siendo estos valores promedio altos al compararlo con países europeos líderes en proyectos de generación eléctrica fotovoltaica, como Alemania, cuyo promedio anual de radiación alcanza un promedio de 3.01kWh/día (DeltaVolt, 2012). Aun así, para el 2019 los índices de producción de energía muestran que el impacto no ha sido tal, pues la producción total de energía en Perú asciende a 4,860 GWh, del cual 1.18% corresponde a fuentes solares, el 2.94% eólicas, 33.86% térmicas y 60.02% hidroeléctricas (Sector Energía, 2019) en donde, uno de los proyectos solares de mayor envergadura es la Central Solar Fotovoltaica Rubí, ubicada en Moquegua y con una capacidad instalada de 180 MW (ENEL, 2018)

Por esto, es necesario ampliar el margen de investigaciones en relación a este tipo de tecnología a fin de seguir incrementando su aplicación, y es tarea, además, de las instituciones educativas superiores formar profesionales con conocimientos teóricos prácticos que satisfagan este crecimiento. El análisis de nuevos materiales más eficientes para la producción de celdas solares, el desarrollo de configuraciones para la adaptación de circuitos solares a sistemas interconectados, el desarrollo de implementación para medición de sus características y la formación de centros investigativos de energías renovables son las principales formas en que las universidades a nivel nacional están planteando fortalecer sus cualidades académicas. Un ejemplo es la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI) con su Laboratorio de Energía Solar CER-UNI con proyectos de impacto social como “emergiendo con el Sol” y “Sé verde: Energías Renovables en el

Perú” en donde además de desarrollar investigación en energía solar en convenio con universidades de España, se realiza divulgación científica a fin de promover su aplicación. (CER-UNI, 2018)

Bajo este contexto, la Universidad Señor de Sipán no puede quedarse de brazos cruzados. El desarrollo de propuestas tecnológicas en torno a la generación de energía solar y otras FER debe ser prioridad en las líneas investigativas. Una forma directa para promover la investigación es mediante las tesis de grado, el problema principal es la falta de instrumentación existente en los laboratorios para el estudio de sistemas de generación renovable. Por ende, se reconoce este como el punto de inicio que se debe trabajar. El desarrollo de dispositivos que permitan el estudio de equipos de energía renovable, permitirá posteriormente ahondar más en estas tecnologías. Entre una de las características más importantes de estudio para la generación de energía solar, es la caracterización de las curvas I-V de los paneles solares, pues de esta forma se puede mediante un análisis y cálculo, posterior predecir de manera adecuada el comportamiento de este en las condiciones de campo a las que será sometida.

Con esta premisa, un módulo de caracterización solar, al menos en su etapa de diseño, se proyecta como la mejor tecnología de inicio en el mundo de las energías renovables, y más específicamente de generación solar, después de todo, a nivel regional no existen tecnologías similares pudiendo ser entonces la Universidad Señor de los pioneros en dicha área.

## **1.2. Antecedentes de la Investigación**

Guachimboza D. (2011) en su investigación “Diseño e implementación de un módulo didáctico y software de simulación para visualizar la curva y características de celdas y paneles solares” desarrolló un módulo para caracterizar paneles solares de hasta 100W y 12 V para el laboratorio de Energías Alternativas y Eficiencia Energética de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional en Ecuador. La metodología de caracterización se basó en la utilización de una resistencia electrónica variable con control lineal de MOSFETs a fin de conseguir todos los valores necesarios para graficar la curva I-V- en las condiciones ambientales de estudio. Las condiciones ambientales que

se evaluaban era la temperatura y el ángulo de incidencia de la radiación solar sobre el panel, que estudiaron con la implementación de un módulo de sensado adicional. Posteriormente, desarrollaron una GUI con el software LabVIEW a fin de condensar los datos que recibían del módulo didáctico la cual fue testeada con tres paneles comerciales diferentes demostrando un adecuado funcionamiento. Las ventajas principales de esta investigación son el demostrar el MOSFET lineal puede utilizarse de manera adecuada para la caracterización de los paneles solares y el desarrollo de las características mínimas de una buena GUI. Por otro lado, entre las limitaciones se encontró la falta de un dispositivo de regulación de iluminación, lo que no permitía la caracterización a diferentes escalas de irradiación, y la falta de diseño previo del dispositivo en software CAD de las estructuras de soporte.

Mullo K. & Herrera M. (2015) desarrollaron un módulo didáctico para el estudio de un generador híbrido de energía solar y eólica para la Universidad de las Fuerzas Armadas de Latacunga, Ecuador. El dispositivo tiene la característica de estar diseñado para un módulo generador híbrido fijo de dos paneles solares con estructura de orientación al sol, un generador eólico con torre de 6 metros de alto y la instrumentación de control eléctrico común como controlador de carga, batería e inversor. Las variables a medir consistían en voltaje, corriente y velocidad de viento para desarrollar las curvas características en una GUI desarrollada con LabVIEW. Para la adquisición de datos se utilizó un microcontrolador con adaptación usb DAQ6009 que demostró trabajar de manera satisfactoria con el circuito diseñado. Este proyecto buscó evaluar las condiciones de trabajo realistas de los generadores eólico y solar a fin de constatar el comportamiento real de estos. Se realizó un diseño estructural de la estructura móvil para los paneles solares y la torre de soporte del aerogenerador. La evaluación económica que realizaron dio un valor final al módulo de 4,936.92 dólares, que comparados con módulos comerciales que rondan los 10,000 dólares representa una gran ventaja. Además de otras libertades de estudio que los módulos comerciales no permiten, favorecen a la factibilidad del desarrollo propio de este.

Márquez J. & otros (2004) desarrollaron un paper con el título “Sistema para la Generación Automática de curvas I-V-, P-V y monitorización de los módulos fotovoltaicos”. Tal investigación tiene la ventajosa aplicación de una metodología

económica y factible para la obtención de las Curvas I-V y P-V de los paneles fotovoltaicos basado en el uso de convertidores DC/DC controlados. Estos generan ciclos de trabajo variables en todo el rango de estudio del dispositivo, de esta forma se puede reducir el tamaño de los módulos de análisis y su coste además de poder monitorizar posibles fallos de la instalación. Se desarrolla además un análisis teórico sustentado mediante el software PSpice que permite su fácil parametrización en entornos gráficos de usuario. Las principales ventajas de esta metodología a nivel técnico fueron disminución de la pérdida de potencia en otros métodos como la resistencia variable y una adaptación automática del intervalo de interpolación. Se entiende entonces como una propuesta tentativa para su utilización en nuevos módulos de estudio, por ejemplo, el desarrollado en esta investigación.

M.A. Muñoz & otros (2011) presentan en su paper “Medición en campo de la potencia máxima entregada por paneles fotovoltaicos bajo condiciones estándar de medida” presenta el diseño de un equipo de medición basado en PC para paneles fotovoltaicos in situ bajo las denominadas “condiciones estándar de medida (STC). El objetivo principal es determinar fallas o mal funcionamiento de paneles que están en utilización a fin de asegurar que la garantía dada por los fabricantes (de 20 a 30 años) se está cumpliendo. La ventaja principal es la utilización de esquemas eléctricos simplificados que permiten su replicación y la utilización de una GUI simple y amigable. La desventaja principal es la necesidad de tener dispositivos en funcionamiento estándar para la calibración del equipo diseñado, lo cual presenta cierta desventaja para su uso. El circuito está basado en medida por condensador y requiere su calibración con un equipo de funcionamiento similar; el utilizado por los autores es el PVPM6020C el cual utilizan para la calibración. Entre las recomendaciones obtenidas de esta investigación está el peculiar cuidado que se debe tener en el efecto por la resistencia en serie interna del panel a medir que en ocasiones es difícil de medir y promueve la medición de valores incorrectos. Además, los circuitos de medida y de contacto al no ser diseñados de manera adecuada pueden aumentar tal valor. Por otro lado, la desventaja principal es que, al ser un instrumento para medición in situ, se presentan efectos negativos debido a condiciones ambientales y sombras, existiendo la necesidad de mantener el proceso de medición durante un tiempo prolongado a fin de obtener resultados confiables. La conclusión final es que, a pesar de no ser un instrumento

de precisión industrial, permitió determinar si algún fallo del módulo fotovoltaico era el responsable de las pérdidas de rendimiento en el sistema solar evaluado.

Fernández J. (2015) en su proyecto de grado “Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil” diseña y elabora un dispositivo económico capaz de caracterizar módulos fotovoltaicos a fin de medir la curva I-V y todos los parámetros concernientes a esta. El módulo tiene un coste de 300 euros aproximadamente y permite comprobar que el funcionamiento del panel solar evaluada concuerda con las características ofrecidas por el fabricante. Una de las características más importantes de este proyecto es la utilización de una metodología para extrapolar y corregir los datos analizados por el módulo hacia las denominadas condiciones estándar de medida (STC) a fin de que los resultados puedan contrastarse correctamente con los datos ofrecidos por el fabricante. Además, se desarrolla para el panel solar un circuito de protección de diodos a fin de evitar averías durante su manipulación. La ventaja del dispositivo es que es de carácter portátil, pero ofrece las mismas desventajas que investigaciones anteriores al ser de evaluación in situ, que son los problemas por variaciones en las condiciones ambientales y de irradiación. Una ventaja adicional que el dispositivo permite disponer de un osciloscopio que pueda reconocer y evaluar el comportamiento de la corriente eléctrica, a fin de evaluar parámetros adicionales durante el proceso de medición.

Robayo C. & Serna S. (2015) publicaron un artículo con el título de “System for characterization of photovoltaic panels”. En esta investigación proponen el diseño de un sistema automático para la caracterización eléctrica de paneles fotovoltaicos a fin de obtener las curvas típicas de V-I y P-V; utilizan una carga electrónica controlada por puerto serie, una tarjeta de adquisición de datos y una GUI desarrollada en LabVIEW. Dicho sistema les permite la caracterización de paneles que trabajan hasta con 18V y una intensidad máxima de 5<sup>a</sup>. Presentan además un algoritmo que permite condicionar inicialmente las condiciones de entorno bajo las cuales el panel será testeado. Las pruebas que se realizaron demostraron un distanciamiento de solo el 5% de la información obtenida por la hoja de datos del fabricante demostrando la calidad del dispositivo realizado.

Álvarez López & García Angarita (2014), publicaron en la revista Ingeniería Energética una investigación con el título “Parámetros comparativos de células fotoeléctricas para generación de energía: implementación de banco de pruebas usando DSP”. El objetivo principal de los investigadores es utilizar un sistema basado en procesadores digitales de depuración a fin de generar la carga variable para el circuito de control del panel solar, que en general, son tecnologías más precisas pero de mayor coste. Aún así, utilizan un modelo denominado DSP TMS320F28335 de gran utilidad y bajo coste. Esta investigación tiene un enfoque más a la rama electrónica, pero permite a los investigadores evaluar otras metodologías para la generación de cargas variables al momento de testear los paneles fotovoltaicos, que pueden ser de igual forma rentables económicamente, y quizás, más sensibles y precisas.

González, Farfán, & Zamora (2015), en su investigación “Diseño de un banco de pruebas para paneles solares fotovoltaicos, mediante un convertidor reductor-elevador” desarrollaron un sistema para la obtención automática de curvas características de un panel solar utilizando un convertidor DC-DC reductor elevador. El objetivo principal de este convertidor es modificar de manera sencilla el punto de trabajo del panel solar, entregando la energía a una carga resistiva con el fin de exponer el panel solar a un amplio rango de operación. La conexión entre el panel y el convertidor se hizo mediante un condensador a fin de disminuir el rizado de la corriente y mejorar el sensado. En esta investigación, la cual posee también un enfoque centrado a la electrónica, solo se desarrolla a nivel teórico y es simulada posteriormente con el software Psim, de esta forma, propone una metodología para evaluar el funcionamiento del sistema desarrollado sin tener que proceder a su construcción, la cual puede ser reutilizada en la investigación aquí propuesta al tener un alcance similar.

### **1.3. Teorías Relacionadas al tema**

#### **1.3.1. Energía**

La energía es un fenómeno complejo de interpretar, del cual en un marco general se conocen y comprenden sus efectos, pero su naturaleza como tal sigue siendo inexplicable. Aún así, a nivel conceptual, en el campo de la física la energía es definida como una propiedad inherente a los cuerpos o sistemas materiales, que permite que estos

puedan sufrir transformaciones modificando así su estado, o permitiéndoles interactuar sobre otros cuerpos y ejerciendo transformaciones sobre ellos. En pocas palabras, la energía indica la capacidad que tiene un cuerpo o sistema de tener o producir transformaciones. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

Por otro lado, a nivel analítico puede relacionarse a la energía con un concepto físico denominado “trabajo”, que es definido como la fuerza necesaria para mover un objeto una distancia definida, descrito por la siguiente ecuación:

$$W = Fxd \quad (1)$$

Donde:

W = Trabajo [J]

F = Fuerza [N]

d = Distancia [m]

De esta forma, la energía puede ser definida como la capacidad de un cuerpo de producir trabajo, y está definida con la misma unidad, el Joule [J]; a mayor fuerza ejercida por un cuerpo, se requiere mayor energía; a mayor tiempo sea sostenida dicha fuerza, se demanda igualmente una mayor energía, por ello, para realizar cualquier tipo de trabajo se requiere entonces liberar una cantidad determinada de energía. (Sánchez Miño, 2003)

### **1.3.1.1. Eficiencia energética**

Uno de los conceptos más importantes en la física, más específicamente en la Termodinámica, corresponde a una de las leyes básicas de esta, la primera Ley o Ley de conservación de energía, que describe: “La energía no se pierde ni se destruye, solo se transforma”. Bajo esta regla, puede entenderse que una forma de energía puede transformarse en otra a consecuencia de algún proceso o influencia externa, pudiendo ser la acción de alguna máquina o la interacción con otro cuerpo.

En dicho proceso de transformación el balance energético debe ser cero, por lo que toda energía que ingresa al proceso debe ser igual a la energía que se produce. De esta forma, nace un concepto importante denominado eficiencia energética, relacionado a la reversibilidad del proceso de transformación, si un proceso energético puede ir de un lado

a otro del mismo sin modificarse la energía total involucrada, la eficiencia es del 100%, aunque esto solo ocurre en un caso idealizado.

Se sabe entonces que en la vida real existen pérdidas por distintos motivos, pero finalmente, la eficiencia de un proceso de transformación energético nunca es 100%. En el mundo real todo proceso de transformación energética es irreversible, por lo que el término de la eficiencia energética cobra particular relevancia al estudiar la eficacia de tales procesos, descrito analíticamente por la siguiente ecuación: (Sánchez Miño, 2003)

$$\eta = \frac{W}{E} \quad (2)$$

Donde:

$\eta$  = Eficiencia (adimensional)

W = Trabajo resultante del proceso [J]

E = Energía introducida en el proceso [J]

### 1.3.1.2. Potencia y Energía

Luego de describir analíticamente la energía y lo que esta representa a nivel conceptual, es necesario concretar otro concepto importante denominado Potencia, que no es más que la cantidad de energía generada en un instante de tiempo, planteado en la siguiente ecuación:

$$P = \frac{E}{t} \quad (3)$$

Donde:

P = Potencia [W]

E = Energía [J]

t = Tiempo [s]

### 1.3.1.3. Fuentes de Energía



Una fuente de energía corresponde a la construcción de origen natural de la que el ser humano puede extraer energía de forma directa o indirecta. Según la capacidad de auto recuperación de dicha fuente, pueden dividirse en dos grupos, fuentes de Energías renovables y no renovables. Todos los tipos de fuente disponibles en la actualidad son resumidos en la figura siguiente:

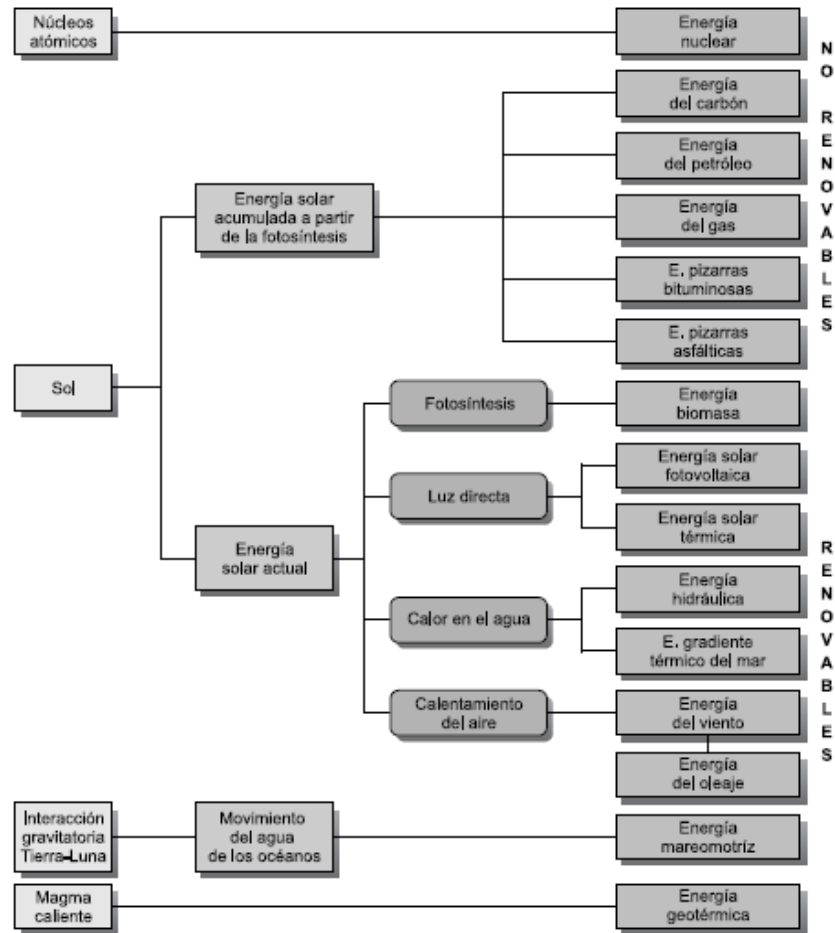


Figura 1.- Clasificación de las fuentes energéticas. Fuente: Libro. Centrales de Energía Renovable. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009).

### 1.3.1.3.1. Fuentes de energía no renovable

En cuanto a las fuentes de energía no renovables, estas están conformadas por combustibles extraíbles de la tierra y, debido a que generalmente son recursos limitados o con una velocidad de regeneración muy lenta, estos se están agotando. Entre este tipo

de combustibles se encuentra: el carbón, el petróleo, el gas natural. Otra fuente de energía del tipo no renovable, pero con un mayor alcance corresponde a la del tipo nuclear (Sánchez Miño, 2003).

#### *1.3.1.3.2. Fuentes de energía renovable*

Las fuentes renovables son todas aquellas que de manera natural o artificial son regeneradas y se consideran virtualmente inagotables, por lo que su totalidad no disminuye o, por lo menos, lo hace de forma mínima en el tiempo. Otro nombre muy usado en la literatura para este tipo de energía es “Energía alternativas” por su capacidad de reemplazar aquellas fuentes convencionales basadas en combustibles fósiles. Sánchez Miño (2003) describe las principales formas de energía renovable a continuación:

##### **Hidroelectricidad**

En esta fuente energética se aprovecha la energía potencial del agua. Para esto, se recurre a la construcción de represas artificiales forzando una diferencia de altura que permite dejar caer el agua sobre tuberías y forzarlas a alimentar turbinas a una gran velocidad, posteriormente, este movimiento de rotación es transformado en electricidad mediante generadores, un sistema que será común en la mayoría de los medios de generación de energía. Finalmente, el agua es derivada río abajo para que siga su caudal común.

##### **Energía solar**

La energía solar obtenida de la radiación electromagnética emanada del Sol puede ser aprovechada para la generación de electricidad y otros tipos de energía. Se requieren para esto algún sistema de captación como colectores y paneles solares que pueden posteriormente generar electricidad de forma directa o suministrar calor puntual mediante la concentración de los rayos solares.

##### **Energía eólica**

El sol, además de proveer de forma directa energía aprovechable por la radiación emitida, produce de forma indirecta el movimiento de los vientos a nivel global debido al

calentamiento de las corrientes de aire. De esta forma, el movimiento del viento es aprovechado para la generación eléctrica de una forma muy similar a la hidroeléctrica, pues también se dispone de un generador rotatorio que es accionado por aerogeneradores.

## **Biomasa**

La biomasa es todo aquel recurso orgánico proveniente del mar o la tierra del cual se puede extraer energía. Las principales fuentes de biomasa son tres:

- Desechos y basura industrial,
- Residuos de cultivos agropecuarios, y
- Cultivos y plantaciones con propósitos energéticos.

Esta materia orgánica devuelve al ambiente la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que adquirió durante su desarrollo, por lo que a pesar de emanar al ambiente este contaminante, es considerado un ciclo neutro y la biomasa se considera una fuente renovable de impacto positivo.

## **Energía geotérmica**

En este tipo de sistemas se busca aprovechar la energía térmica almacenada en la corteza terrestre para la generación de calor. Una central geotérmica funcionaría igual que cualquier otra planta de generación térmica, solo que el vapor que alimenta las turbinas es obtenido directamente desde la tierra y no mediante la quema de combustibles fósiles.

Este tipo de instalaciones debe ubicarse sobre alguna fuente de vapor o agua caliente que posteriormente es desviado hacia una turbina conectada a un generador principal. Finalmente, el vapor o agua utilizado es devuelto a la tierra a fin de modificar lo menor posible el ecosistema.

## **Energía mareomotriz**

La idea de utilizar fuentes renovables es que su disponibilidad sea permanente o auto regenerativa. Para el caso de las mareas, estas constituyen un fenómeno permanente, originados por la fuerza gravitacional ejercida por la luna sobre el océano. Hoy en día existen muchas estructuras para el aprovechamiento de esta energía, desde estructuras completas similares a una central hidroeléctrica que mediante turbinas aprovecha el vaivén del oleaje, hasta sistemas puntuales que generan mediante sistemas de boyas energía puntual mediante la activación de generadores rotatorios.

Todas estas fuentes de energía han sido estudiadas con gran ímpetu en las últimas décadas, brindando una gran cantidad de soluciones y alternativas tecnológicas que, bajo ciertas condiciones, son más o menos factibles a nivel comercial. Uno de los sistemas

más estudiados y ampliamente aplicados, sobre todo en sistemas que requieren cierta independencia para satisfacer demandas relativamente bajas o medianas, corresponde a los sistemas fotovoltaicos, un medio de aprovechamiento de energía solar que produce electricidad directamente de la radiación solar mediante celdas unitarias que reaccionan y generan voltaje al contacto. Por esto, esta es el recurso energético a estudiar en el presente informa, describiéndose a detalle en los puntos siguientes.

### **1.3.2. La Energía Solar Fotovoltaica**

La energía solar se basa en la utilización de células de silice, por su capacidad semiconductor, las que, por efecto fotovoltaico, logran generar electricidad mediante la incidencia de radiación solar. Esta energía es utilizada para distintas aplicaciones; por un lado, la aplicación más tradicional busca aprovechar la capacidad de independencia que brindan los sistemas fotovoltaicos para alimentar zonas aisladas con problemas en el abastecimiento eléctrico convencional; en segundo lugar, está la creación de grandes parques solares para la generación e inyección de energía eléctrica en algún sistema interconectado; tercero, la utilización particular para aplicaciones específicas, en la alimentación de sistemas automóbiles, relojes, calculadoras, hasta el abastecimiento energético permanente de satélites o radares (Carta González et al., 2009).

Para un sistema fotovoltaico general, puede reconocerse a siguiente configuración común de instalación:

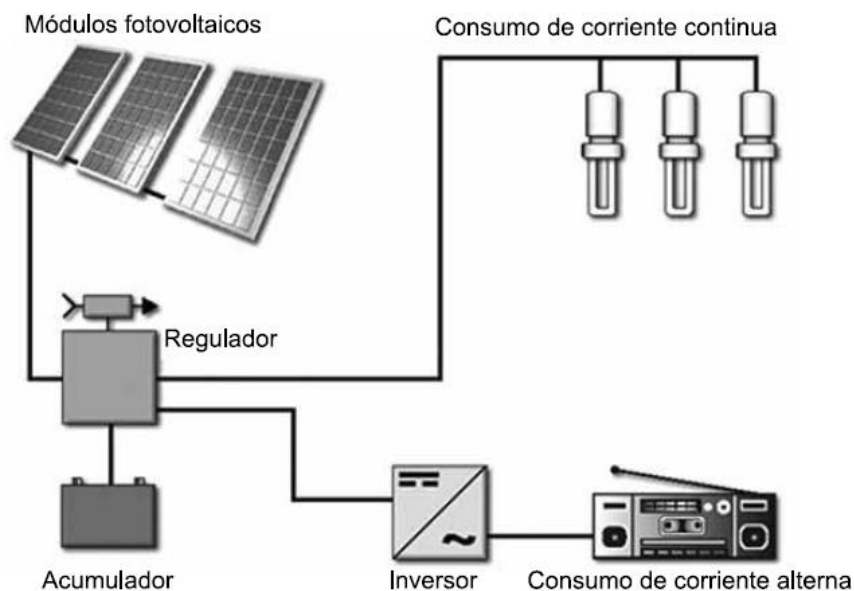


Figura 2.- Esquema Conceptual de una instalación solar fotovoltaica.

Fuente: Carta González et al., (2009)

Como puede apreciarse, los sistemas de generación basados en módulos fotovoltaicos requieren interconexión con redes más grandes, permitiéndoles independencia, y la capacidad de generar en formato continuo, o mediante la utilización de algún sistema inversor, de forma alterna. Esto los hace particularmente útiles en aplicaciones específicas o en zonas rurales o aisladas sin red eléctrica convencional.

### 1.3.2.1. Subsistema de captación

Para el sistema de generación fotovoltaica, el elemento de captación consta de un panel fotovoltaico, que transforma la incidencia de radiación solar sobre él en electricidad. Para estos paneles las medidas comunes rondan los 0.5m<sup>2</sup> y 0.8m<sup>2</sup>, pero según la aplicación esto puede variar, estando constituido por un grupo de células fotovoltaicas conectadas en serie y/o paralelo diseñados para generar un voltaje específico con una intensidad establecida para un nivel de radiación dado (Carta González et al., 2009).

El agrupar las células fotovoltaicas en una sola estructura no solo tiene de objeto la generación específica de un voltaje y corriente, sino además, darle soporte y resistencia a la estructura, junto a estanqueidad al grupo de células, facilitando consigo la evacuación de calor al ambiente, pues a mayor temperaturas estos elementos generan menos energía

ante la misma radiación, optimizando con esto la captación de energía (Carta González et al., 2009).

En la figura 3 puede verse un esquema de un panel fotovoltaico común y las diferentes partes de su estructura.

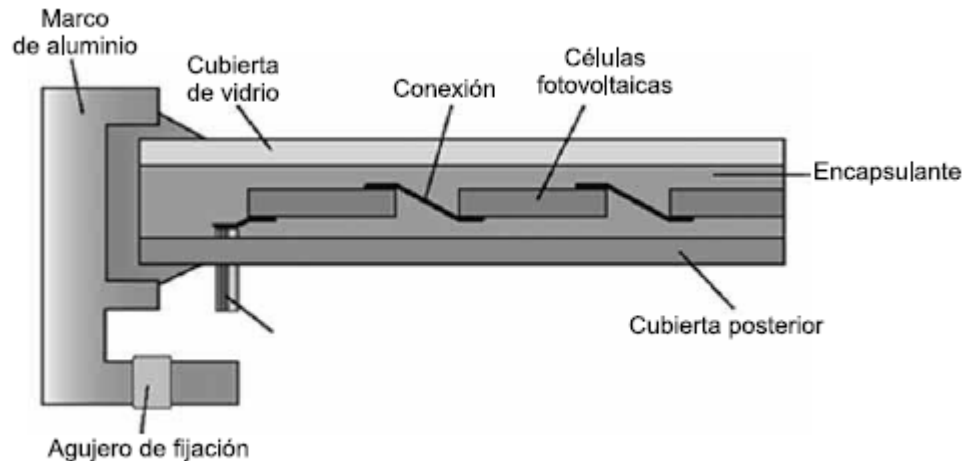


Figura 3.- Componentes de un panel fotovoltaico. Fuente: Libro. (Carta González, Calero Pérez, Colmenar Santos, & Castro Gil, 2009)

### 1.3.2.2. Subsistema de almacenamiento

Debido a que los niveles de radiación varían según la hora y condición climatológica del día, debe diseñarse alguna solución de almacenamiento que se asegure de recuperar energía en los momentos en los que el sistema no es utilizado, para que, en los momentos en que los niveles de radiación no logren satisfacer la demanda, estos puedan suplir la energía requerida; este sistema está compuesto de baterías configuradas en serie o paralelo para brindar el voltaje de trabajo y, en general, los tipos de batería más utilizados son las de plomo ácido al punto en que el 90% de baterías del mercado corresponden a este tipo (Carta González et al., 2009).

### 1.3.2.3. Subsistema de regulación

Debido a la presencia de un sistema de almacenamiento basado en baterías, debe evitarse la sobrecarga y el mal hábito de consumo que terminaría acabando con los ciclos de vida de estas, por ello, generalmente se utiliza algún sistema que regule la energía que llega a las baterías (Carta González et al., 2009).

#### 1.3.2.4. Subsistema convertidor de corriente

Debido a que el sistema fotovoltaico y el conjunto de baterías está configurado para un tipo de corriente y un voltaje específico, hace falta la presencia de un sistema intermediario con la carga que se encargue de corregir el voltaje o de cambiar el tipo de corriente a alterno de requerirse (Carta González et al., 2009).

Estos cuatro partes para el sistema de generación fotovoltaica generalmente están presentes siempre, pero, uno o dos de ellos cambiaran en función de las configuraciones existentes. Existen, además, dos tipos de instalación fotovoltaica, las autónomas o las interconectadas a la red (Carta González et al., 2009).

#### 1.3.3. Circuito Equivalente de la Celda Solar

Para fines analíticos, el sistema fotovoltaico puede representarse como un circuito eléctrico compuesto por un conjunto de resistencias, que representan las pérdidas de transformación, y un diodo, que representa el flujo e corriente unidireccional. Este circuito equivalente es presentado en la figura 7.

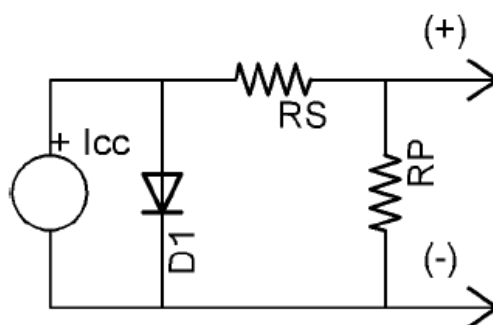


Figura 4.- Circuito Eléctrico equivalente de la celda solar. Fuente: Trabajo de Grado. (Guachimboza Dávalos, 2011)

Para este circuito equivalente, las células solares constituyen un sistema intermedio, el cual produce niveles de voltaje y corriente muy limitados en comparación con lo requerido por el usuario final. El número utilizado en un panel fotovoltaico compuesto varía según el voltaje a producir esperado por dicho panel, sin embargo, las dimensiones



generales de un panel fotovoltaico ronda de los 0.8m<sup>2</sup> a los 2m<sup>2</sup>, con un aproximado de 40-80 células conectadas eléctricamente en serie (Cabré, 2012).

Si quisiéramos realizar un circuito equivalente de las celdas unitarias, podría tomarse como ejemplo el propuesto en la figura 8, en este caso, cada célula de 150x150 mm<sup>2</sup> se encuentra generando una corriente de 3.05 a un voltaje fijo de 0.5V, con una potencia unitaria de 3.5W. Hay que tener en cuenta que, para la toma de los valores de generación de las células fotovoltaicas, y para el testeo y especificación de paneles completos, se suelen utilizar condiciones específicas conocidas como condiciones estándar de prueba.

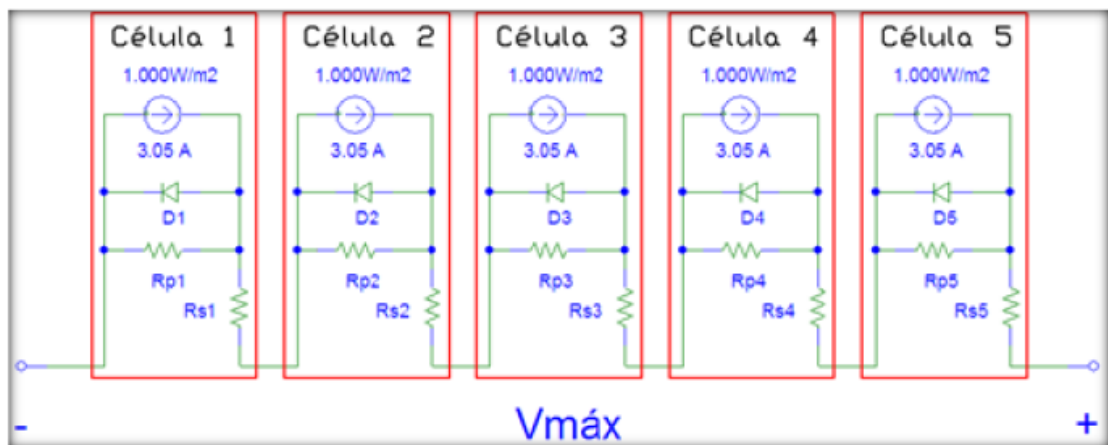


Figura 5.- Esquema Eléctrico Equivalente.

Fuente: Investigación (Cabré, 2012)

### 1.3.4. Condiciones Estándar de Prueba

Para la realización de pruebas o test sobre paneles fotovoltaicos, es común la utilización de estándares o condiciones preestablecidas para las pruebas de funcionamiento a fin de poder replicar y comparar correctamente una serie de módulos de diferentes fabricantes correctamente. Estas Condiciones Estándar de Prueba (STC o Standard Test Conditions) para equipos fotovoltaicos (tanto para paneles como colectores solares) se encuentran listadas en la tabla siguiente:

Tabla 1

*Condiciones Estándar de Medida*

<b>Condiciones Estándar de Medida de Características de Módulos Fotovoltaicos</b>	
Irradiancia	1000 W / m <sup>2</sup>
Distribución espectral	AM 1,5
Incidencia	Normal
Temperatura de la célula	25°C

Fuente:

[http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home\\_main\\_frame/08\\_lecciones/02\\_leccion/www/Modulo\\_fotovoltaico.htm](http://www.ujaen.es/investiga/solar/07cursosolar/home_main_frame/08_lecciones/02_leccion/www/Modulo_fotovoltaico.htm)

Para la variable de masa de aire (comúnmente abreviada como AM por su representación en inglés “air mass”) corresponde a la distancia desde el suelo a la parte exterior de la atmosfera en dirección directa al sol.

Si saliéramos al exterior de la atmosfera terrestre, la masa de aire sería cero (AM0). Cuando el sol se encuentra de forma perpendicular a la superficie del suelo, corresponde a AM1, situación que es poco común porque según la hora del día, la estación o fecha del año, la masa se ve incrementada de tal forma que los rayos solares deben recorrer una distancia mayor para llegar a la superficie terrestre.

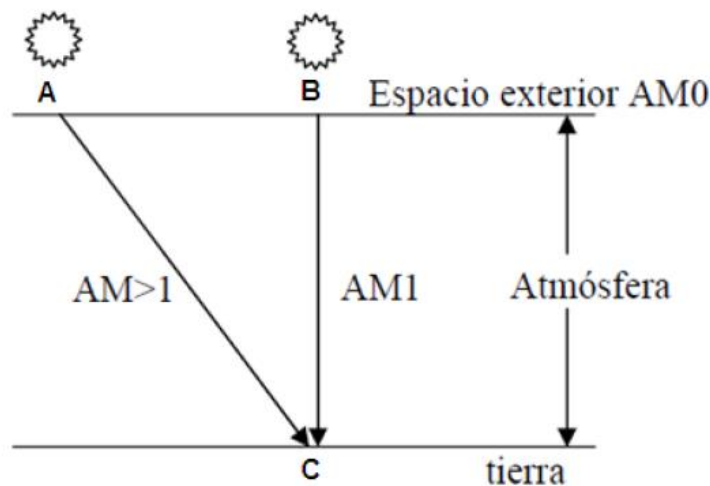


Figura 6.- Variación existente de la masa de aire según la hora y fecha del año

Fuente: Libro: Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones (Sánchez Miño, 2003)

El valor de la masa de aire puede ser calculado con la siguiente relación:

$$AM = \frac{1}{\cos \alpha} \quad (4)$$

En donde  $\alpha$  corresponde al ángulo formado por la posición actual del sol y el cénit en el momento de análisis.

Al obtenerse valores de AM mayores a la unidad se entiende que la radiación proveniente del sol debe transcurrir una distancia aún mayor dentro de la atmosfera terrestre, por lo que, de esta manera, para los STC un am con valor de 1,5 corresponde a un valor de  $\alpha$  igual a 48°; por otro lado, cuando el sol se está ocultando el valor de  $\alpha$  se encuentra próximo a 90° por lo que el am correspondiente sería de alrededor de 57.

Algo importante a tener en cuenta es que existen otros estándares utilizados en la industria fotovoltaica, siendo para algunos fabricantes de mayor relevancia, como las Condiciones Normales de Operación (Normal Operating Cell Temperature ratings, NOCT) que buscan establecer condiciones más realistas que las STC ya explicadas y corresponden a:

- AM: 1,5
- Radiación incidente: 800W/m<sup>2</sup>
- Temperatura ambiente de operación: 20°C
- Velocidad del viento: 1m/s

### **1.3.5. Curva Característica del Módulo Fotovoltaico**

Cuando un panel fotovoltaico se encuentra conectado a una carga y es iluminado, comienza a funcionar como un generador de energía otorgando a la carga conectada determinados valores de voltaje y corriente variables en relación a la temperatura del ambiente, los valores de irradiancia incidentes en el instante evaluado y del tipo de carga (esto sucede porque el voltaje de trabajo de la carga puede limitar al voltaje entregado por el panel).

A nivel gráfico, la carga generada por el funcionamiento de una celda solar se muestra a continuación:

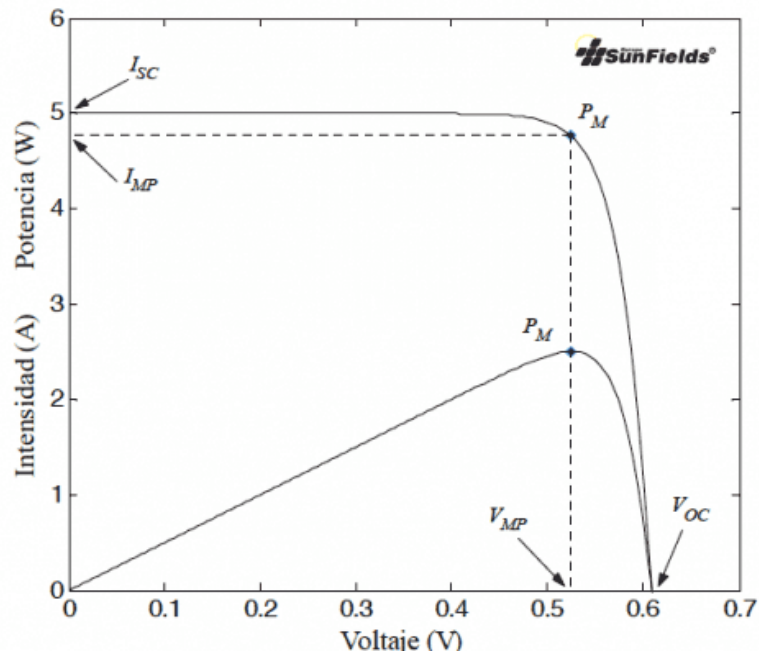


Figura 7.- Curva Corriente vs Voltaje; Potencia vs Voltaje para una celda fotovoltaica. Fuente: WebSite (SunFields Europe, 2016)

De la gráfica mostrada pueden derivarse los parámetros más importantes que caracterizan una celda y un panel fotovoltaico (SunFields Europe, 2016):

- La corriente de cortocircuito (ISC): corresponde a aquel nivel de corriente que podría obtenerse en un caso ideal cuando el voltaje en los terminales de la placa solar es cero.
- La tensión de circuito abierto (VOC): corresponde al mayor voltaje obtenible en un caso ideal cuando la corriente del circuito es igual a cero.
- El punto de máxima potencia (PM): corresponde al punto en donde la potencia entregada a la carga tiene su máximo valor. Teniendo en cuenta la definición de la potencia y la existencia de los puntos VM e IM correspondientes a la intensidad en el punto de potencia máxima, se tiene:

$$PM = VM * IM$$

Teniendo en cuenta que VM e Im son diferentes a ISC y VOC.

- El factor de forma (FF, del inglés, Fill Factor): corresponde a una forma de evaluar el nivel de calidad de la celda. Viene dado por la ecuación:

$$FF = \frac{P_{max}}{VOC * ISC}$$

Como puede notarse, a más alto es el FF más altos son los valores correspondientes a la potencia máxima alcanzados con los mismos valores de Isc y Voc. Una celda de buena calidad posee un FF mayor a 0.70.

- La eficiencia: corresponde a la capacidad de transformar con la menor pérdida posible la energía obtenida por la radiación incidente en energía eléctrica. Un nivel de eficiencia común en celdas fotovoltaicas se encuentra alrededor de 15-16% mientras que una celda o panel e alta eficiencia estaría iniciando en un valor de 19-20%

Estas son las características principales que caracterizan un panel solar y son tomadas de la curva de caracterización antes mostrada. Dicha curva, debe ser trazada en base a los STC antes mencionados y son las condiciones que deben tenerse en cuenta al momento de evaluar los valores nominales presentados en las fichas técnicas de un panel solar comercial.

Por ejemplo, se puede determinar al revisar la siguiente ficha técnica del panel solar SolarWorld SW 260 Poly que sus valores nominales fueron evaluados bajo las STC.

PERFORMANCE UNDER STANDARD TEST CONDITIONS (STC)*				
		SW 250	SW 255	SW 260
Maximum power	$P_{max}$	250 Wp	255 Wp	260 Wp
Open circuit voltage	$U_{oc}$	37.6 V	38.0 V	38.4 V
Maximum power point voltage	$U_{mp}$	30.5 V	30.9 V	31.4 V
Short circuit current	$I_{sc}$	8.81 A	8.88 A	8.94 A
Maximum power point current	$I_{mp}$	8.27 A	8.32 A	8.37 A
Module efficiency	$\eta_m$	14.91 %	15.21 %	15.51 %

Measuring tolerance ( $P_{max}$ ) traceable to TUV Rheinland: +/- 2% (TUV Power controlled)

\*STC: 1000W/m<sup>2</sup>, 25°C, AM 1.5

Figura 8.- Ejemplo de Ficha Técnica de Panel Solar bajo STC. Fuente: Website.

(SunFields Europe, 2016)

### 1.3.5.1. Ecuación Característica

La curva característica para un panel solar fotovoltaico como la antes mostrada puede ser expresada por la siguiente ecuación:

$$I = I_1 - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + IR_s}{mv_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (5)$$

Donde:

- $I_1$  es la corriente fotogenerada,
- $I_0$  es la corriente inversa de saturación del diodo,
- $V_t$  es el voltaje térmico ( $v_t = KT/e$ , siendo  $K$  la constante de Boltzman,  $T$  la temperatura en grados Kelvin y  $e$  la carga del electrón),
- $m$  es el factor de idealidad del diodo,
- $R_s$  es la resistencia serie y
- $R_p$  la resistencia paralela.

Para un determinado panel fotovoltaico, sus propiedades y capacidad eléctrica dependerán del número de células en serie y en paralelo que este posea, de esta manera, si planteáramos que todas las celdas de un módulo son idénticas, podríamos obtener los valores de corriente y voltaje multiplicando sus valores individuales de corriente y voltaje por el número de células en paralelo o en serie respectivamente, tal y como se expresa en las siguientes ecuaciones:

$$I_{MOD} = I_C * N_p \quad (6)$$

$$V_{MOD} = V_C * N_s \quad (7)$$

En donde  $N_p$  y  $N_s$  corresponden al número de células en paralelo y en serie respectivamente que conforman el módulo fotovoltaico empleado, tal y como se muestra en la siguiente figura:

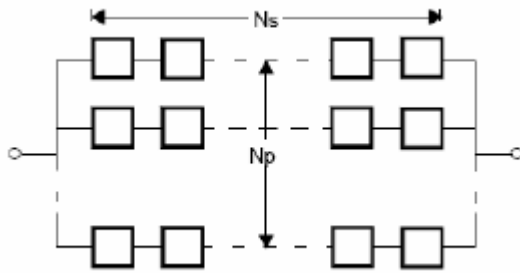


Figura 9.- Esquema de conexión de células solares que conforman un panel solar fotovoltaico. Fuente: Tesis de Grado. (Fernández Ferichola, 2009)

Se pueden combinar las ecuaciones anteriores para obtener una curva característica para un panel fotovoltaico cuyas células solares tengan todas las mismas propiedades, quedando como se expresa a continuación:

$$I = I_1 - I_0 \left( \exp \left( \frac{V + \frac{IR_s}{N_p}}{\frac{N_s + N_p}{m v_t}} \right) - 1 \right) - \frac{V + \frac{IR_s}{N_p}}{R_p} \quad (8)$$

Esta relación, cuyas variables ya fueron descritas con anterioridad, muestra el comportamiento de la curva de caracterización intensidad vs voltaje para un panel fotovoltaico compuesto, y a nivel práctico, cuando se mencionan ecuaciones características no se hace en referencia a la célula solar, sino al panel solar en su totalidad junto a todos sus parámetros característicos ( $I_1$ ,  $I_0$ ,  $m$ ,  $R_s$ ,  $R_p$ ). (Fernández Ferichola, 2009)

Para entender mejor estos conceptos, en la tabla y figura siguientes se muestran los parámetros relevantes de una serie de paneles fotovoltaicos junto a sus respectivas curvas características, en donde se aprecian diferentes comportamientos e relación al número de células presentes e serie y en paralelo.

Tabla 2

*Parámetros de caracterización de distintos paneles fotovoltaicos compuestos.*

Configuración	Isc(A)	Voc(V)	Pmax(W)	Vpmp (V)	Ipmp(A)
36s	2.8	21.6	46	17.7	2.6
36s x 2p	5.6	10.8	46	8.8	5.1
13s x 3p	8.5	7.2	46	5.9	7.7

Fuente: Tesis de Grado. (Fernández Ferichola, 2009)

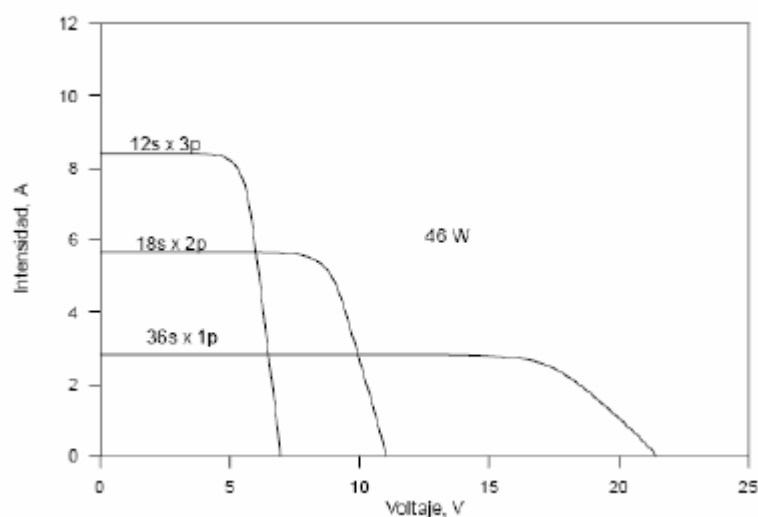


Figura 10. Curvas características para los paneles fotovoltaicos presentados en la tabla 2. Fuente: Tesis de Grado. (Fernández Ferichola, 2009)

### 1.3.6. Caracterización de paneles solares

A fin de certificar las capacidades de generación de energía de un panel fotovoltaico, es necesario realizar una serie de pruebas bajo las STC mencionadas anteriormente. Este tipo de procedimientos consiste en una caracterización de la curva Intensidad vs Voltaje del panel, y es de vital importancia tanto a nivel investigativo como a nivel práctico, para que los diseñadores y encargados de proyectos puedan validar la calidad y confiabilidad de una instalación.

Este procedimiento se realiza mediante equipos denominados caracterizadores de celdas solares, y consiste en someter al panel fotovoltaico a todas las condiciones de carga posibles en el menor tiempo que se pueda a fin de evitar que los cambios en las condiciones externas influyan en el proceso. Durante este proceso, se deben medir el voltaje y corriente entregados por el panel solar, y se debe ir desde el estado de cortocircuito (mínimo voltaje y máxima corriente) hasta llegar al punto de circuito abierto (máximo voltaje y mínima corriente).



### 1.3.6.1. Métodos para caracterización de paneles solares

El procedimiento de caracterización puede realizarse de diferentes formas, entre estas están:

- Método de carga capacitiva
- Método de carga resistiva
- Método de carga electrónica

#### 1.3.6.1.1. Método de carga capacitiva

Puesto que un panel fotovoltaico puede ser simulado como una fuente de corriente continua, es posible forzar todos los estados posibles con la adición de una carga capacitiva en paralelo al módulo. El tiempo del proceso puede ser modificado con la variación de la carga capacitiva, a fin de prevenir que las variables meteorológicas como la radiación y la temperatura pueda interferir o afectar las curvas obtenidas. Finalmente, durante el proceso de carga es necesario evaluar de forma constante los valores del voltaje y la corriente, y mantener un registro para formar la curva característica del panel fotovoltaico estudiado. (Fernández Ferichola, 2009)

La configuración eléctrica utilizada generalmente en este método se da en la siguiente figura:

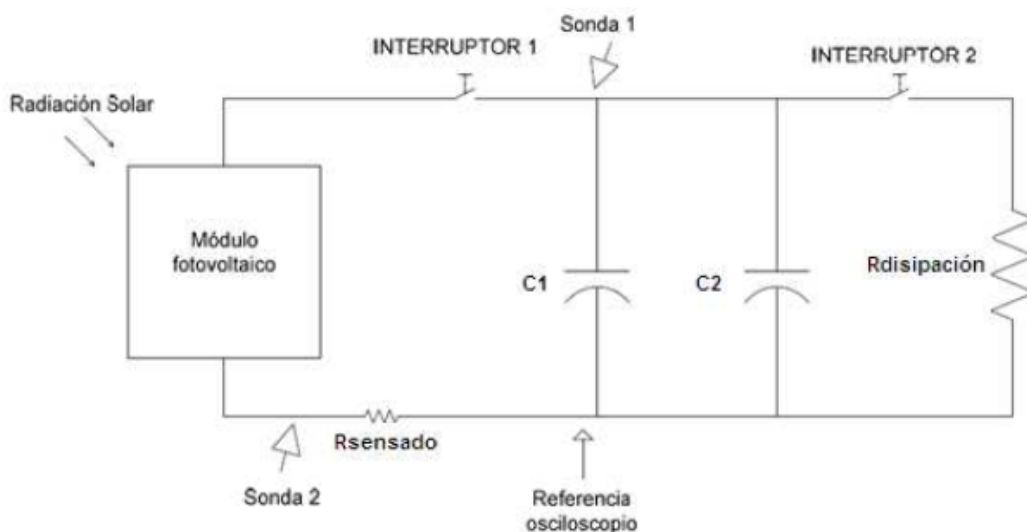


Figura 11.- Esquema de conexión para caracterización de panel fotovoltaico por método de carga capacitiva. Fuente: Tesis de grado (Fernández Ferichola, 2009)

La ecuación para calcular el valor de la capacitancia es la siguiente:

$$C = \frac{I_c \times t}{V} \quad (9)$$

En donde:

V = Voltaje del panel en circuito abierto.

I<sub>c</sub> = Corriente de la carga.

t = Tiempo de carga del condensador.

C = Capacitancia.

Para la descarga del condensador y evitar posibles fallos eléctricos, se acopla un circuito de descarga accionado por interruptor con la utilización de una resistencia de potencia. Al finalizar la descarga puede utilizarse nuevamente el módulo solar.

#### 1.3.6.1.2. Método de carga resistiva

Al igual que el método capacitivo, este método es sumamente simple, pues solo se requiere conectar al panel solar y en paralelo un potenciómetro de potencia con gran valor de resistencia y variar secuencialmente su valor desde donde aparece el voltaje e circuito abierto hasta la corriente de cortocircuito.

El esquema de montaje es el que se presenta a continuación:

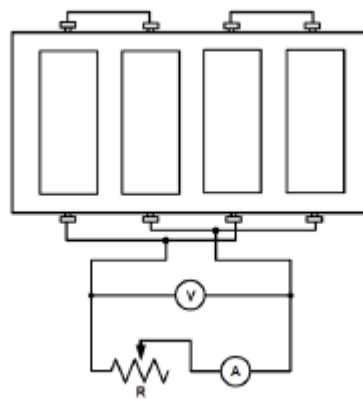


Figura 12.- Esquema de conexión para caracterización de panel fotovoltaico por método de carga resistiva. Fuente: Paper. (Mendes Casaro & Cruz Martins, 2008)

Posteriormente, es necesario la toma constante de los valores de voltaje y corriente durante el procedimiento de graduación del potenciómetro para ir formando en el transcurso la curva característica del panel solar.

#### 1.3.6.1.3. Método de carga electrónica

Hoy en día existen elementos denominados conversores DC/DC que permiten la obtención de una tensión media a la salida diferente a la de entrada, lo que se logra manejando el interruptor principal del mismo para controlar los tiempos en que se permite o no la conducción de electricidad (denominado PWM) a una frecuencia fija. Un aspecto importante de estos conversores es el ciclo de trabajo ( $\delta$ ) que no es más que la relación entre el lapso en que el interruptor se encuentra cerrado ( $T_{on}$ ) y el periodo en que ocurre la conmutación ( $T$ ).

De esta forma, estos elementos pueden acoplarse a los módulos solares para el proceso de caracterización mediante dos modos de funcionamiento: conducción continua (Continuous Conduction Mode, CCM); conducción discontinua (Discontinuous Conduction Mode, DCM), que pueden ser simuladas como un transformador de corriente continua, para el cual la relación de transformación es controlada de forma electrónica al variar el ciclo de trabajo del convertidor. (Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004).

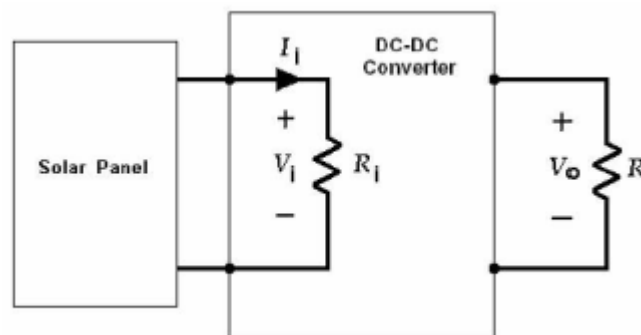


Figura 13.- Conexión de un panel solar a un conversor DC/DC. (Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

La figura anterior presenta el circuito correspondiente a la conexión de un panel solar y un convertidor DC/DC; para el caso, la resistencia  $R_i$  corresponde a la resistencia de entrada al convertidor ( $R$  representa la resistencia de la carga).

Al evaluar un convertidor ideal, es decir, sin pérdidas, se pueden establecer las relaciones entre la resistencia de entrada y la carga conectada a la salida del convertidor, tanto para conducción continua como discontinua, y se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3

*Relaciones entre  $R_i$  y  $R_{carga}$  para las aplicaciones principales de un conversor DC/DC*

<b>Conversor</b>	<b>K Crítico</b>	<b><math>R_i</math> (CCM)</b>	<b><math>R_i</math> (DCM)</b>
<b>Reductor</b>	$1 - \delta$		$\frac{R}{4} X \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4 x K}{(\delta)^2}}\right)^2$
<b>Elevador</b>	$\delta x (1 - \delta)^2$	$R x ((1 - \delta)^2$	$\frac{4 X R}{(1 + \sqrt{1 + \frac{4 x (\delta)^2}{K}})^2}$
<b>Reductor- Elevador</b>	$(1 - \delta)^2$	$\frac{R x (1 - \delta)^2}{(\delta)^2}$	$\frac{K x R}{(\delta)^2}$

Con  $K = \frac{2xL}{RxT}$  el modo de conducción discontinuo ocurre para  $K < K_{crítico}$

Fuente: Paper. (Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

Entonces, para detallar mejor los esquemas de las tres formas de aplicación del convertidor DC/DC y las relaciones antes descritas, serán explicados puntualmente cada uno de estos casos junto a una representación gráfica de la función del ciclo de trabajo  $\delta$  para conducción continua:

- **Resistencia de entrada en un conversor DC/DC reductor**

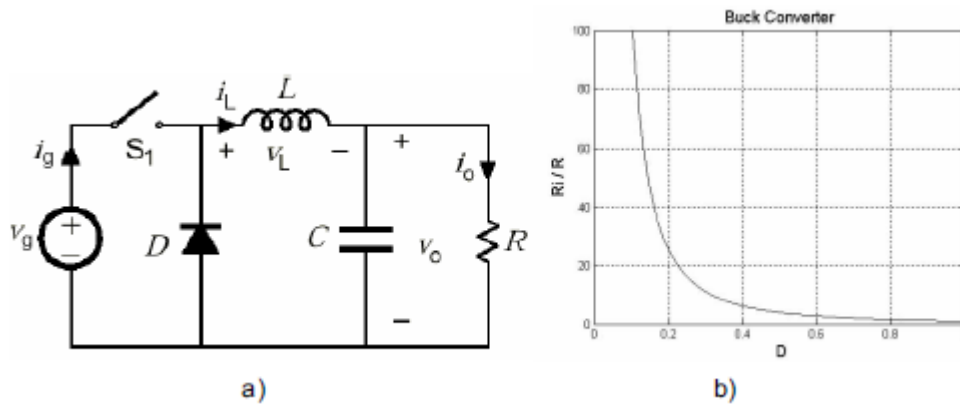


Figura 14.- a) Conversor DC/DC aplicado como reductor; b) Resistencia de entrada vs  $\delta$  en conducción continua. Fuente: Paper. (Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

Para el procedimiento de caracterización de panel solar, el conversor reductor es incapaz de reflejar impedancias menores que la carga en su punto de entrada, por lo que no es viable alcanzar valores cercanos a la corriente de cortocircuito del módulo solar.

- **Resistencia de entrada en un conversor DC/DC elevador**

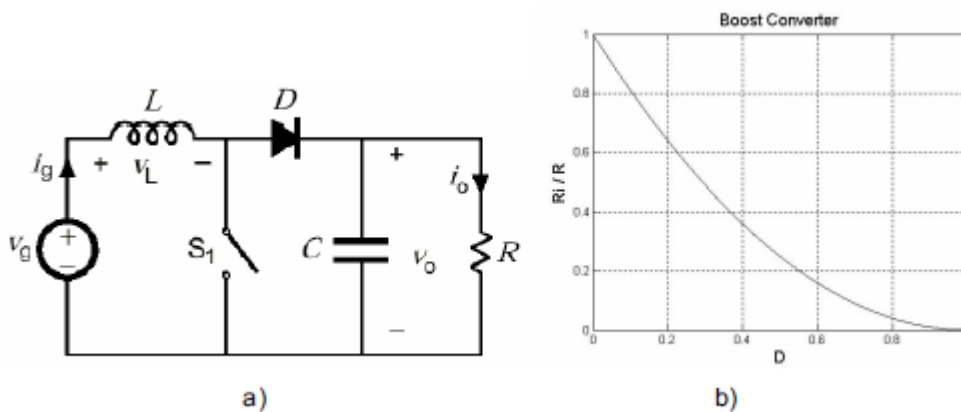


Figura 15.- a) Conversor DC/DC aplicado como elevador; b) Resistencia de entrada vs  $\delta$  en conducción continua. Fuente: Paper. (Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

En caso contrario a un convertidor reductor, el conversor elevador no puede mostrar en la entrada impedancias mayores a la carga, haciéndole imposible la capacidad de dar valores próximos a la corriente de cortocircuito del panel solar.

- **Resistencia de entrada en un conversor DC/DC reductor-elevador**

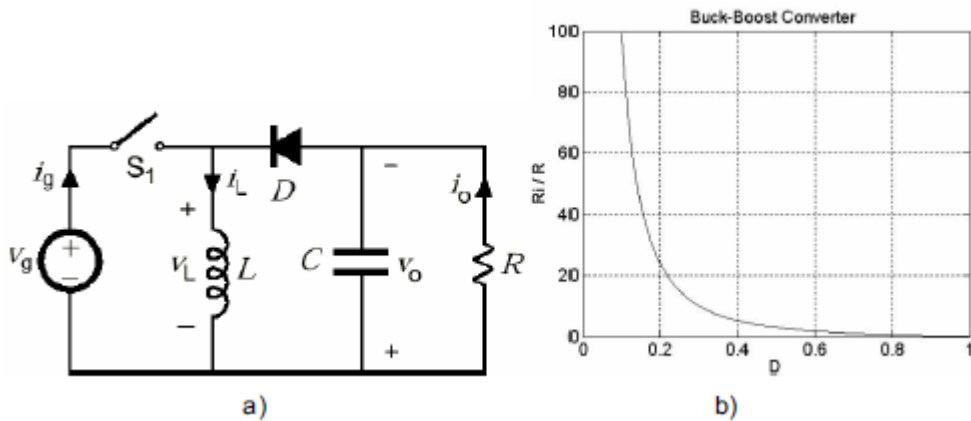


Figura 16.- a) Conversor DC/DC aplicado como reductor-elevador; b) Resistencia de entrada vs  $\delta$  en conducción continua. Fuente: Paper. (Andújar Márquez, Enrique Gómez, Durán Aranda, & Martínez Bohórquez, 2004)

Existen conversores con topología reductor-elevador conocidos a nivel comercial, como el Zeta, Cuk y Sepic, estos no proporcionan variaciones en la resistencia de entrada lo que les da la capacidad, a diferencia de las topologías conversoras presentadas anteriormente, de caracterizar la curva completa de intensidad vs voltaje para un módulo solar en corriente continua, llevando el abanico de aplicación completo, desde la corriente de cortocircuito hasta la tensión de circuito abierto.

### 1.3.6.2. Caracterizadores comerciales de paneles solares

Hoy en día existe un gran abanico de empresas que proporcionan equipos y herramientas dedicadas a la investigación y caracterización de sistemas y módulos fotovoltaicos.

Los equipos modernos y más completos corresponden a sistemas de pruebas completos, que además del sistema e caracterización poseen una interfaz gráfica para visualización de resultados y un sistema de simulación y control solar, para configurar los distintos niveles de radiación y temperatura a las que estará sometido el panel solar evaluado, permitiendo al investigador manejar solo las variables que necesita y tener con ello un amplio margen de prueba, a fin de construir completamente la curva intensidad vs voltaje del panel solar y evaluar su comportamiento ante distintas variables ambientales que en otro contexto o sistema no podrían ser controladas.

Entre las características y herramientas principales dentro de un caracterizador comercial se encuentran:

- Disponibilidad de bases de datos para todo tipo de medición.
- Medición rigurosa y exacta de todos los parámetros eléctricos estudiados.
- Análisis completo de los parámetros eléctricos obtenidos.
- Sistema de protección ante sobrevoltaje, sobrecorriente y excesos de temperatura.
- Tiempos de barrido cortos, inferiores a 10 segundos.
- Medición ante condiciones de oscuridad (difícil de obtener en otro tipo de sistemas)
- Medición de coeficientes de temperatura.
- Aplicación de mediciones basada en normativa, especialmente:
  - ASTM E948-95(2005): Standard Test Method for Electrical Performance of Photovoltaic Cells Using
  - IEC 60904-1 2006: Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics



Figura 17.- Módulo de caracterización de paneles fotovoltaicos de la empresa Abet Technologies. Fuente: <http://abet-technologies.com/pv-iv-measurement-systems/pv-iv-solutions/>



### 1.3.7. Softwares de Ingeniería

#### 1.3.7.1. Matlab

Este software fue fundado por Clever Moler en el año de 1984, es una herramienta matemática que nos da acceso a programar en un lenguaje propio denominado “.m” dentro de su propia interfaz de desarrollo, cuyos usos básicos se encuentra en: las manipulaciones de matrices, la implementación de algoritmos, la representación de datos y funciones, el diseño e implementación de interfaces gráficas de usuario y la intercomunicación con softwares basados en diferentes tecnologías, lenguajes de programación y hardware. Matlab es muy utilizado en centros de investigación y desarrollo a tal punto que para el año 2004 se tasaba que el software era utilizado por más de un millón de usuarios en los diferentes campos ya sean empresariales como académicos.



Figura 18.- Logo del Software Matlab. Fuente:

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

El objetivo principal de este software es alimentar de conocimiento básicos a los interesados para hacer uso de la plataforma y las felicidades de programación. El cálculo numérico de forma rápida y con mucha precisión es su característica básica, otra de ellas es la capacidad de manejo matemático de forma simbólica con funciones para graficar de una forma avanzada tal y como se representa en la figura 22, contando, además, con un lenguaje de programación de gran capacidad y una biblioteca extensa de funciones y complementos. (The MathWorks Inc., 2019)

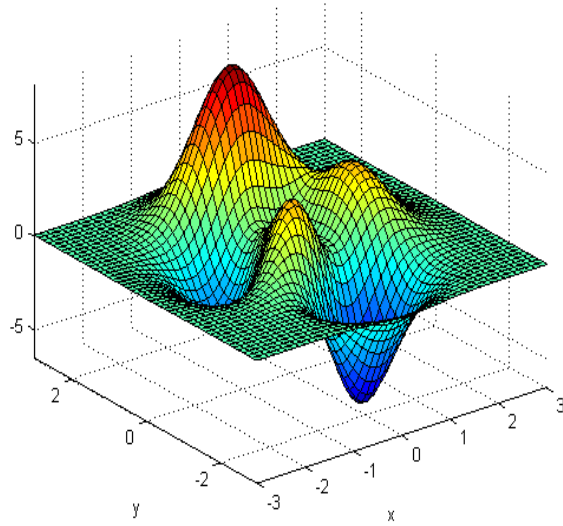


Figura 19.- Análisis de Curvas con Software Matlab. Fuente:

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

#### **1.4. Formulación del Problema**

¿Cuáles serán las variables a medir y los estándares a utilizar en el diseño del módulo fotovoltaico y de qué manera se hará el registro y síntesis de información para que el usuario final pueda utilizarla de manera adecuada y, de esta forma, sirva para un posterior análisis y estudio?

#### **1.5. Justificación e Importancia del Estudio**

Este informe de investigación plantea como objetivo principal el diseño de un módulo un módulo didáctico para el estudio de las curvas de caracterización e Intensidad vs Voltaje para paneles solares a fin de ser posteriormente aplicado en los laboratorios de Ingeniería Mecánica Eléctrica de la Universidad Señor de Sipán. De tal forma, la realización de la investigación se sustenta en los siguientes puntos:

##### **1.5.1. Justificación Tecnológica.**

Los caracterizadores de paneles solares no se encuentran en disponibilidad a nivel regional, solo elementos portátiles que permiten crear con las condiciones ambientales las curvas I-V- de paneles en trabajo. La idea de tener un sistema fijo que permita controlar las diferentes variables que interfieren en el funcionamiento del panel solar, permitirán el desarrollo de investigaciones exhaustivas acerca de cómo estas afectan su funcionamiento.

##### **1.5.2. Justificación Económica.**

Se buscará diseñar un módulo de características técnicas adecuadas y de electrónica sencilla con tecnología Arduino y Matlab, además, se buscarán características estructurales lo suficientemente simples como para facilitar su fabricación y de esta forma, se espera mantener un margen de costos considerablemente más bajo que el de caracterizadores comerciales de módulos fotovoltaicos.

Desde otra perspectiva, se puede pensar que empresas regionales que se dediquen a la fabricación de paneles fotovoltaicos podrían hacer uso del módulo que se busca diseñar. De esta manera, podrían sustentar las características de funcionamiento de sus

propios productos, presentándose así una oportunidad de posibles ingresos para la universidad en dado caso se proponga su fabricación.

### **1.5.3. Justificación Social.**

En el 2015 por parte de acuerdo general por la ONU y sus países miembros, se planteó una Agenda de Desarrollo 2030 en la que se presentaron los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) con el objetivo de eliminar la pobreza mundial, promover el bienestar de las personas, proteger el medioambiente y además, combatir el cambio climático a nivel mundial. Entre estos objetivos, concierte hacer énfasis en el séptimo, que plantea la búsqueda del acceso a la energía segura y sostenible para todos los individuos. (ONU, s.f.)

De esta forma, y al estar Perú dentro de tal agenda, se hace necesario el desarrollo de investigación en las diferentes FER para promover así su aplicación como tecnología segura, moderna y sostenible. Además, de todas las FER disponibles, la energía solar es la propuesta más rentable debido a las condiciones óptimas de irradiación que se presentan en el país.

### **1.5.4. Justificación Educativa.**

Se busca proporcionar un diseño que pueda ser fabricado en investigaciones posteriores de la universidad para que sea utilizado como módulo didáctico por los estudiantes de la Universidad Señor de Sipán en los cursos de Centrales de Energía y Circuitos Eléctricos, con el objetivo de que reconozcan de manera práctica el funcionamiento de estos sistemas y, además, puedan realizar posteriores investigaciones con él.

## **1.6. Hipótesis**

Esta investigación no tiene Hipótesis aplicable.

## **1.7. Objetivos**

### **1.7.1. Objetivo General.**

- Proponer el desarrollo de una GUI para el estudio de las curvas características I-V de paneles solares para el laboratorio de circuitos eléctricos de la Universidad Señor de Sipán

### **1.7.2. Objetivos Específicos.**

- Establecer los modelos matemáticos característicos para un panel fotovoltaico.
- Establecer los parámetros físicos del panel fotovoltaico requeridos para los cálculos.
- Establecer los parámetros condicionantes para la simulación.
- Diseñar los diagramas de trabajo para la GUI propuesta.
- Diseñar una Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) mediante la plataforma MATLAB para el cálculo de las curvas características I-V de un panel fotovoltaico.
- Comparar el funcionamiento de la Interfaz Gráfica de Usuario propuesta con un análisis experimental presente en la bibliografía.

## **2. MATERIAL Y MÉTODO**

## 2.1. Tipo y Diseño de Investigación

El tipo de investigación corresponde, en base al tipo de variables manejadas, a una investigación cuantitativa, pues todos los datos que serán manejados son medibles, desde los parámetros eléctricos hasta los cálculos resultantes obtenidos por la interfaz propuesta.

Por otro lado, el alcance de la investigación reúne todas las características del tipo aplicado, puesto que se busca implementar los conocimientos obtenidos de ingeniería con el objeto de encontrar un algoritmo útil para el cálculo y caracterización matemática de las curvas Intensidad vs Voltaje de un panel solar.

Finalmente, en cuanto al manejo y tratamiento de las variables esta tiene un carácter pre-experimental, no se cuenta con un grupo de control definido y solo se realizará una evaluación de post-prueba en la interfaz gráfica diseñada mediante la simulación de escenarios reales a fin de validar los resultados.

En cuanto a la metodología se plantea seguir los siguientes pasos durante el desarrollo de la investigación:

1ra etapa: Recopilación de información y modelos matemáticos a trabajar.

2da etapa: Desarrollo de los algoritmos de funcionamiento para cada ventana gráfica.

3ra etapa: Programación la GUI mediante el software MATLAB y desarrollo de la conexión MATLAB-ARDUINO

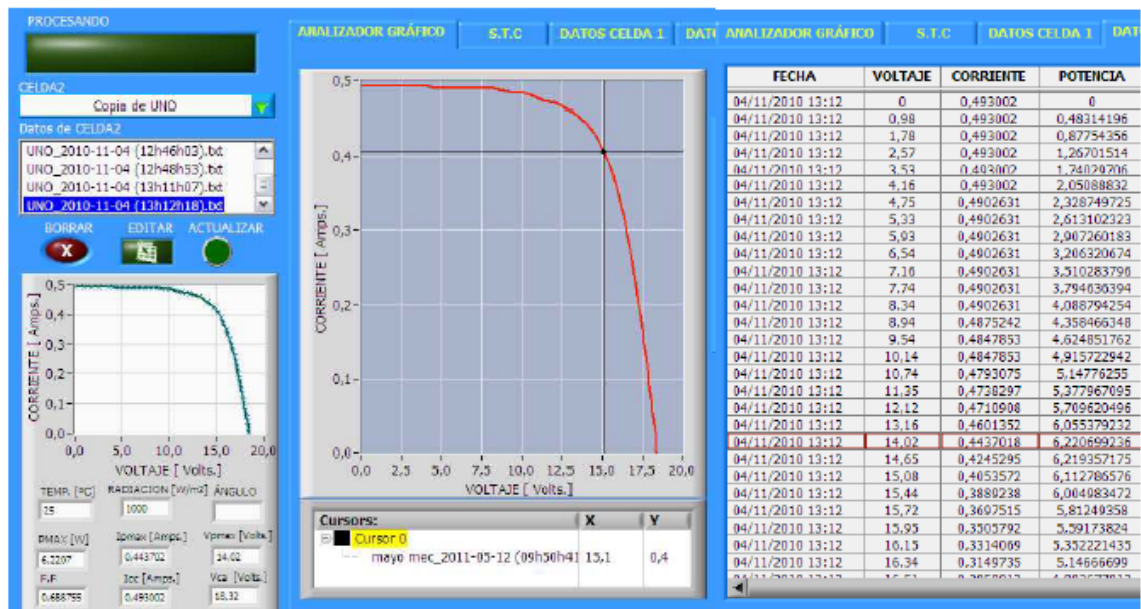


Figura 20.- Caracterizador gráfico de Paneles fotovoltaicos (GUI) mediante el software LabVIEW mostrando la curva característica de un panel de 25W. Fuente: Tesis de Grado. (Guachimboza Dávalos, 2011)

## 2.2. Población y Muestra

No aplicable para este tipo de investigación.

## 2.3. Variables y Operacionalización

Al ser un trabajo de diseño de ingeniería aplicada, la presente investigación requiere seguir el planteamiento de alguna metodología enfocada al diseño. Para esto, se empleará una metodología de manejo de variables sustentada en el trabajo de los profesionales el área de diseño en ingeniería Eggert (2010) y Dieter (2013) que proponen la discretización de las variables en cuatro grupos principales:

- Variables de Diseño
- Variables de Solución
- Parámetros de definición el problema
- Variables intervinientes



### **2.3.1. Variable de definición del problema:**

- Parámetros de la carga analizada
  - Capacitancia (uF)

### **2.3.2. Variables Independientes:**

- Parámetros característicos del Panel fotovoltaico
  - Potencia Máxima (W)
  - Tensión de Máxima de Potencia (V)
  - Corriente de Máxima Potencia (A)
  - Tensión de Circuito Abierto (V)
  - Corriente de Corto Circuito (A)
  - Coeficiente de Temperatura Voc(V/K)
  - Coeficiente de Temperatura Isc (A/K)
  - Resistencia en Serie y en Paralelo (OHM)

### **2.3.3. Variables Dependientes:**

- Parámetros de curva I-V
  - $I_{cc}$
  - $V_{ca}$
  - $P_{max}$
  - $I_{pmp}$
  - $V_{pmp}$

### **2.3.4. Variables intervinientes**

- Parámetros de Simulación
  - Irradiancia
  - Temperatura
  - Ángulo de incidencia Solar

Los diagramas de caja negra de este módulo se pueden apreciar en las figuras N° 27 y N°28

### 2.3.5. Caja negra para variables

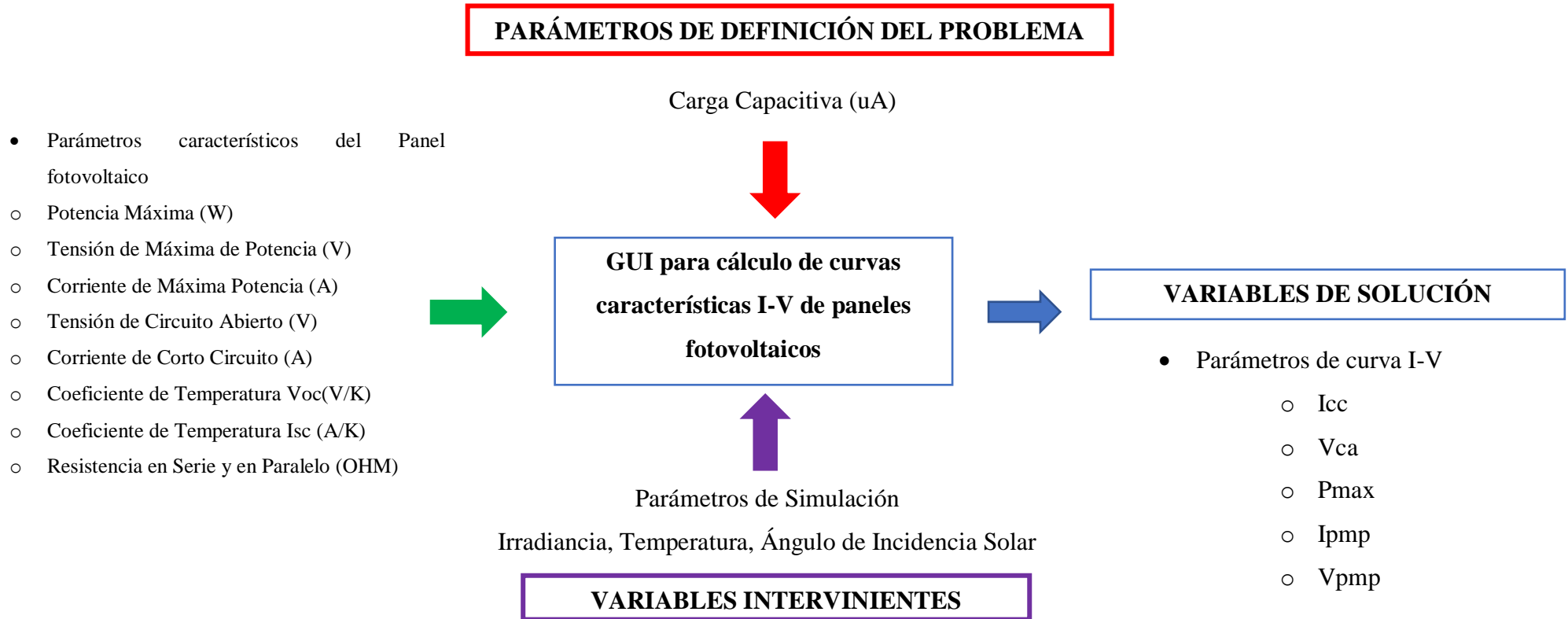


Figura 21.- Caja negra de control de variables para GUI caracterizadora de paneles fotovoltaicos. Fuente: Propia

## 2.2.2 Operacionalización de variables

Tabla 4

*Operacionalización de variables para GUI de cálculo de curvas características I-V para paneles fotovoltaicos*

VARIABLES		DEFINICIÓN	INDICADOR	ESCALA
<b>VARIABLES DE DISEÑO</b>	Parámetros Característicos del Panel fotovoltaico	Son las especificaciones técnicas de los paneles solares dados por el fabricante los cuales condicionaran los rangos de medición y control.	Potencia Máxima (W)	Watts (W)
			Tensión de Máxima de Potencia (V)	Voltaje (V)
			Corriente de Máxima Potencia (A)	Intensidad (A)
			Tensión de Circuito Abierto (V)	Volt(V)
			Corriente de Corto Circuito (A)	Intensidad (A)
			Coeficiente de Temperatura Voc(V/K)	Volt/Kelvin (V/K)
			Coeficiente de Temperatura Isc (A/K)	Amper/Kelvin (A/K)
		Resistencia en Serie y en Paralelo (OHM)	Ohmios (Ohm)	
<b>VARIABLES DE SOLUCIÓN</b>	Parametros de Curva I-V	Son aquellas características obtenidas luego de procesar la información obtenida por la curva I-V y definen los parámetros de trabajo del panel fotovoltaico. Se vislumbrarán en la GUI para el usuario.	Icc	Ampere (A)
			Vca	Volt (V)
			Pmax	Watts (W)
			Ippm	Ampere (A)
			Vppm)	Volt (V)

Fuente: elaboración propia.

## 2.4. Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad

### 2.4.1. Técnicas de recolección de datos

A fin de obtener toda la información necesaria para el correcto cumplimiento de los objetivos de investigación, se utilizarán como estrategias de recolección de datos dos técnicas planteadas y descritas a continuación:

#### 2.4.1.1. Recopilación de Información bibliográfica

La recopilación de bibliografía es una técnica básica en todo proceso de investigación. Las fuentes más usuales para esto son revistas, libros, leyes, fuentes de internet correctamente verificadas y diversas publicaciones de entidades e instituciones de gran relevancia en el mundo académico e investigativo. Con esta estrategia, se buscó encontrar todas las variables implicadas en el proceso de caracterización de paneles solares, que sirvieron como sustento para el desarrollo y construcción de los algoritmos de trabajo.

#### 2.4.1.2. Análisis de documentos

El siguiente paso natural del proceso de recopilación consiste en el análisis correcto de toda la información recopilada. Toda la documentación es sintetizada y correctamente filtrada a fin de contar con una base sólida y clara con respecto al tema de estudio, y de esta forma, obtener una conclusión certera para el desarrollo de los algoritmos y la información requerida en las ventanas gráficas desarrolladas, teniendo en cuenta que se cumpla con el propósito de tener un impacto y generar un sustento para investigaciones futuras.

Tabla 5

*Instrumentos y técnicas de recolección de datos a aplicar*

<b>Técnicas</b>	<b>Instrumento</b>	<b>Validez</b>
Información Bibliográfica	Internet, libros	Especialista
Análisis de datos	MATLAB	Especialista

Fuente: Propia

### **2.4.2. Validación y confiabilidad**

Ambas técnicas e instrumentos para la recolección de datos serán validados por un asesor experto de la rama profesional de Ingeniería respectiva, que sea reconocido como investigador y un grado académico adecuado que lo respalde.

## **2.5. Procedimiento de análisis de datos**

### **Paso 1: Elaboración de encuestas**

Se elaborará algunas preguntas a los docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica en la Universidad Señor de Sipán a fin de abarcar todas las variables y configuraciones necesarias para la buena caracterización de los paneles fotovoltaicos.

### **Paso 2: Determinación del cronograma de encuestas**

Se pactará con la escuela las fechas para llevar a cabo las encuestas a los docentes, tomando un tiempo aproximado de hasta 5 días.

### **Paso 3: Identificar la muestra del cronograma de encuestas**

Debido a que la plana docente no es tan extensa, se realizará la encuesta a todos los especialistas en la rama eléctrica a fin de obtener una opinión acertada y eficaz.

### **Paso 4: Ejecución de la encuesta**

Se realizará la encuesta a los docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica que se desempeñan como docentes, principalmente en los cursos relacionados a la rama de electricidad para determinar su opinión sobre los alcances del proyecto.

### **Paso 5: Identificación de las opiniones de los docentes**

Se determinará las opiniones óptimas que puedan ser aplicables y sirvan como mejora en el proyecto a desarrollar.

### **Paso 6: Evaluación Geográfica**

Se realizará una visita de campo a la Universidad Señor de Sipán a fin de reconocer el estado actual de los laboratorios y equipos de medición eléctrica, reconociendo así qué equipos se pueden utilizar y los espacios de trabajo para posible aplicación del módulo solar.

### **Paso 7: Evaluación de las condiciones de estudio en los cursos de la Universidad**

Se evaluará la metodología que se utiliza en los cursos de centrales de energía y circuitos eléctricos a fin de reconocer de qué manera este módulo puede implementarse en el sílabo de estudio.

#### **2.6. Criterios éticos**

Como principales bases éticas para el desarrollo de esta investigación se tuvieron en cuenta el código de ética de la Universidad Señor de Sipán y los aspectos éticos profesionales del Colegio de Ingenieros del Perú (CIP) descritos a continuación:

#### **CODIGO DE ETICA DEL COLEGIO DE INGENIEROS DEL PERÚ (CIP) APROBADO EN LA III SECCIÓN ORDINARIA DEL CONGRESO NACIONAL DE CONSEJOS DEPARTAMENTALES DEL PERIODO 1998 – 1999 EN LA CIUDAD DE TACNA 22, 23 Y 24 DE ABRIL 1999.**

**Art. 4** – Los ingenieros reconocerán que la seguridad de la vida, la salud, los bienes y el bienestar de la población y del público en general, así como el desarrollo tecnológico del país dependen de los juicios, decisiones incorporadas por ellos o por su consejo, en dispositivos, edificaciones, estructuras, maquinas, productos y procesos. Por ninguna razón pondrán sus conocimientos al servicio de todo aquello que afecta la paz y la salud.

**Art. 12** – Los ingenieros expresaran opiniones en temas de ingeniería solamente cuando ellas se basen en un adecuado análisis y conocimiento de los hechos, en competencia técnica suficiente y convicción sincera.

#### **CÓDIGO DE ÉTICA DE LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN ELABORADO POR LA DIRECCIÓN DE INVESTIGACIÓN, REVISADO POR EL ÁREA DE PLANIFICACIÓN Y DESARROLLO INSTITUCIONAL – ASESORÍA LEGAL. RATIFICADO POR EL ACUERDO DE CONSEJO UNIVERSITARIO CON RESOLUCIÓN RECTORAL N° 0851 – 2017/USS**

**Art. 7°:** Son deberes éticos de los investigadores:

- Autonomía.
- Responsabilidad.
- Profesionalismo.
- Compromiso con la sociedad.
- Supervisión.
- Desarrollo profesional.

**Art. 14º:** Respeto de los investigados y de lo investigado:

- Respetar las condiciones de salud, de integridad física, psicológica y moral de las personas o grupos que participan en el estudio.
- Solicitar y obtener el consentimiento expresado e informado de las personas sujetos investigación.
- Respetar la idiosincrasia y la cultura de los participantes en la investigación.
- Garantizar el bienestar de las personas, animales y plantas, como objeto de investigación.
- Garantizar el almacenamiento adecuado de la información obtenida para el estudio.
- Aplicar en todo momento los criterios de confidencialidad y anonimato.
- Presentar los resultados respetando las normas de Propiedad Intelectual.



### **3. RESULTADOS**

### 3.1. Estructura de la GUI

La estructura con la que se espera trabajar y realizar las simulaciones para el análisis de las curvas características V-I es el siguiente:

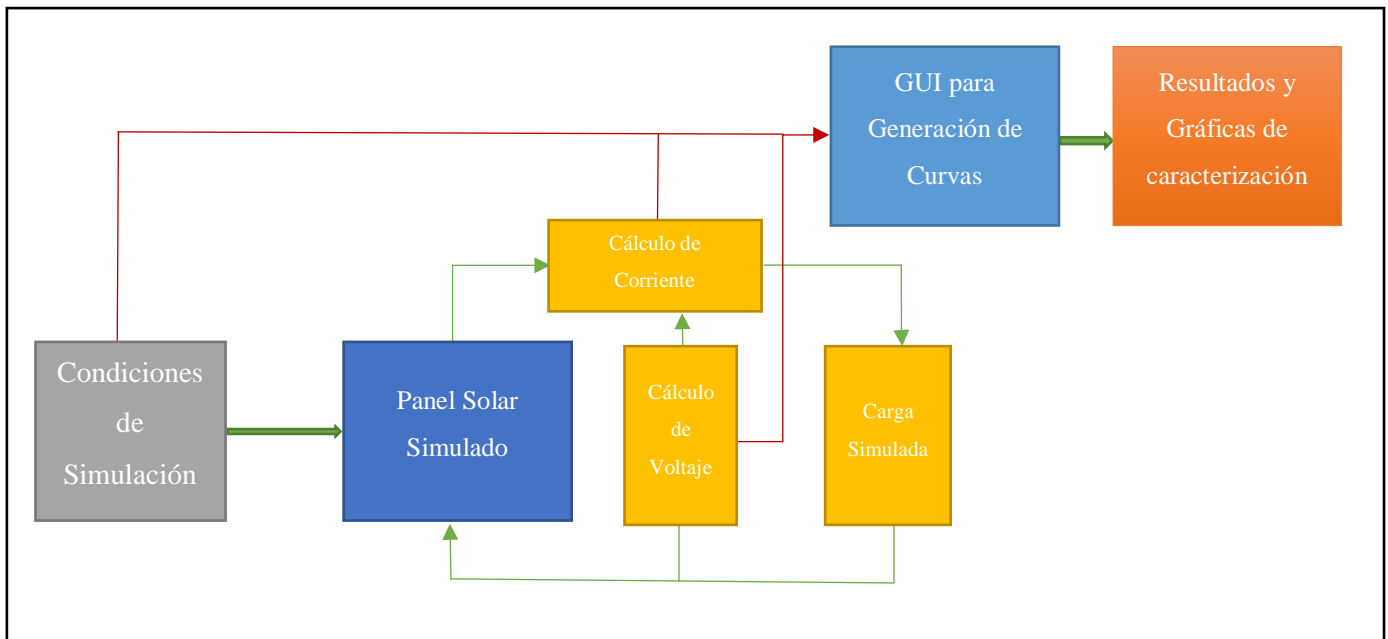


Figura 228.-Esquema de trabajo para el funcionamiento de la GUI para caracterización de paneles fotovoltaicos

Fuente: Propia

Para el sistema, el tipo de carga simulada será del tipo capacitiva, requiriendo además modelar las ecuaciones diferenciales correspondientes al análisis de carga y descarga del elemento capacitivo.

En este sistema se basa el proyecto, de esta forma se plantean los cálculos para la obtención de voltaje y corriente necesarios para trazar la curva característica del panel fotovoltaico a las condiciones y carga simuladas. Se plantearán a continuación, los modelos matemáticos que definirán el comportamiento del panel solar, con los cuales además serán calculados el voltaje e intensidad correspondiente, además del modelo de carga estudiado.

### 3.2. Modelo Eléctrico Equivalente De Panel Fotovoltaico

La figura 30 representa el modelo eléctrico equivalente de un panel fotovoltaico. Buhler (2007) describe este modelo compuesto por una fuente de corriente, un diodo y resistencias en serie y paralelo. La corriente  $I_{PV}$  está directamente relacionada con la generación de corriente eléctrica debido a la radiación solar incidente, por medio del efecto fotovoltaico. El diodo modelado tiene un voltaje de conducción igual al voltaje de circuito abierto  $V_{OC}$ , eliminando la corriente en la carga cuando se alcanza este valor. La resistencia  $R_S$  equivale a las pérdidas por conexión y resistencia de la unión semiconductor, mientras que  $R_P$  se refiere a las pérdidas por corrientes de fuga. Estos dos valores de resistencia son estimados por medio de la metodología propuesta por Villalva (2010), debido a que esos parámetros no son establecidos por los fabricantes.

Este algoritmo se basa en el hecho de que debe existir un único par ( $R_S$  y  $R_P$ ) para que el modelo matemático genere la máxima potencia en condiciones de prueba estándar (Standard Test Conditions – STC, 1000 W/m<sup>2</sup>, 25°C y 1.5AM).

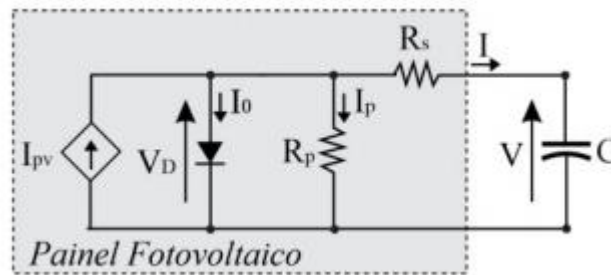


Figura 23.-Modelo eléctrico equivalente de un panel fotovoltaico.

Fuente: Buhler (2007)

Según Reinhold (1980), la corriente  $I$  que alimenta la carga puede ser descrita por un conjunto de ecuaciones plasmadas a continuación:

- Corriente que Alimenta la carga:

$$I = I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + R_S I}{V_t a}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_S I}{R_P} \quad (10)$$

- Corriente generada por efecto fotovoltaico:

$$I_{PV} = I_{SC} + \alpha_{ISC}(T - T_R) \frac{G}{G_R} \quad (11)$$

- Corriente de saturación reversa del diodo:

$$I_0 = \frac{I_{SC} + \alpha_{ISC}(T - T_R)}{\exp\left\{\frac{V_{OC} + \beta_{VOC}(T - T_R)}{aV_T}\right\} - 1} \quad (12)$$

- Tensión térmica del panel:

$$V_t = \frac{N_S k T}{q} \quad (13)$$

Dónde I y V son respectivamente las corrientes y tensión entregadas a la carga por el panel fotovoltaico,  $I_{PV}$  la corriente generada por el efecto fotovoltaico,  $I_0$  la corriente de saturación reversa del diodo,  $V_t$  la tensión térmica del panel,  $\alpha_{ISC}$  y  $\beta_{VOC}$  son respectivamente los coeficientes de temperatura para corriente y tensión,  $T$  y  $T_R$  son las temperaturas del panel de referencia, así como  $G$  y  $G_R$  representan la irradiancia incidente de referencia. Las constantes  $E_G$  y  $A$  son la energía de la banda de agotamiento del material semiconductor y el factor de idealidad del diodo. Son también constantes la carga del electrón  $q$  y la constante de Boltzman  $k$ .  $N_s$  es el número de celdas en serie del panel.

### 3.3. Caracterización De Curvas En Base A Carga Capacitiva

Según (Brito, 2014), la caracterización se define como un instrumento, tecnología o algoritmo que permiten definir las funciones de un sistema específico, para el caso, el trazo de las curvas de un sistema fotovoltaico. El principio básico se basa en el control de la corriente de salida  $I$  del panel desde su punto de cortocircuito,  $I_{SC}$  inicial a cero, alcanzando la condición de circuito abierto. El voltaje de salida  $V$  también es monitoreado de cero a  $V_{OC}$ .

Existen diferentes técnicas para llevar a cabo dicha tarea, como la resistencia variable, carga electrónica, convertidores DC/DC estáticos y cargas capacitivas (Duran, Piliouline, Sidrach-de-Cardona, Galan, & Márquez, 2008). Este último método será evaluado en el presente trabajo.

El uso de carga capacitiva para la caracterización de curvas de paneles fotovoltaicos es un método más eficiente y con costos más bajos, en comparación con los otros métodos mencionados anteriormente, en caso de que quieran realizarse comparaciones con experimentos en físico. Su principio básico de funcionamiento consiste en el uso de un condensador alimentado por el panel, que se cargará hasta la tensión máxima aplicada ( $V_{OC}$ ). Durante este proceso de carga, el condensador, al ser un elemento pasivo de almacenamiento de energía, evita variaciones bruscas de tensión y a medida que esta cantidad aumenta, se dibuja la curva obteniendo los puntos de voltaje y corriente. La figura 31 muestra la conexión del panel a la carga capacitiva mientras que la figura 32 detalla la evolución de voltaje y corriente en función del tiempo.

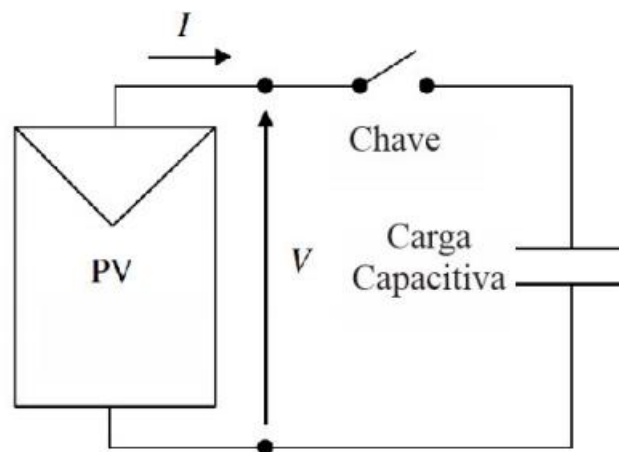


Figura 24.-Conexión del panel fotovoltaico a la carga capacitiva.

Fuente: Muñoz & Lorenzo, 2004

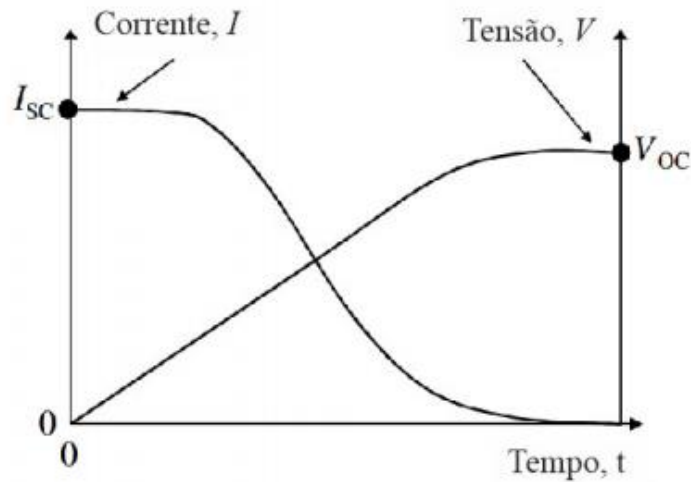


Figura 25.-Evolución del voltaje y corriente en función del tiempo.

Fuente: Muñoz & Lorenzo, 2004

### 3.4. Desarrollo de Algoritmos y ventanas de trabajo de GUI

#### 3.4.1. Desarrollo de Algoritmos y ventanas de trabajo de GUI

La investigación tiene como inicio el desarrollo de un Algoritmo genérico a fin de que la GUI se pueda utilizar para el estudio de cualquier modelo de panel fotovoltaico y bajo las condiciones de carga y de estudio (nivel de irradiancia, temperatura, entre otros) que se requieran, y que estas puedan ser alteradas en tiempo real a fin de determinar como cada cambio afecta a las gráficas obtenidas.

De esta forma, la GUI se establece como una interfaz asistente para que el usuario pueda alterar valores y determinar los puntos específicos de trabajo que más le convienen al equipo estudiado.

De esta forma, el diagrama de trabajo general para la GUI es el siguiente:

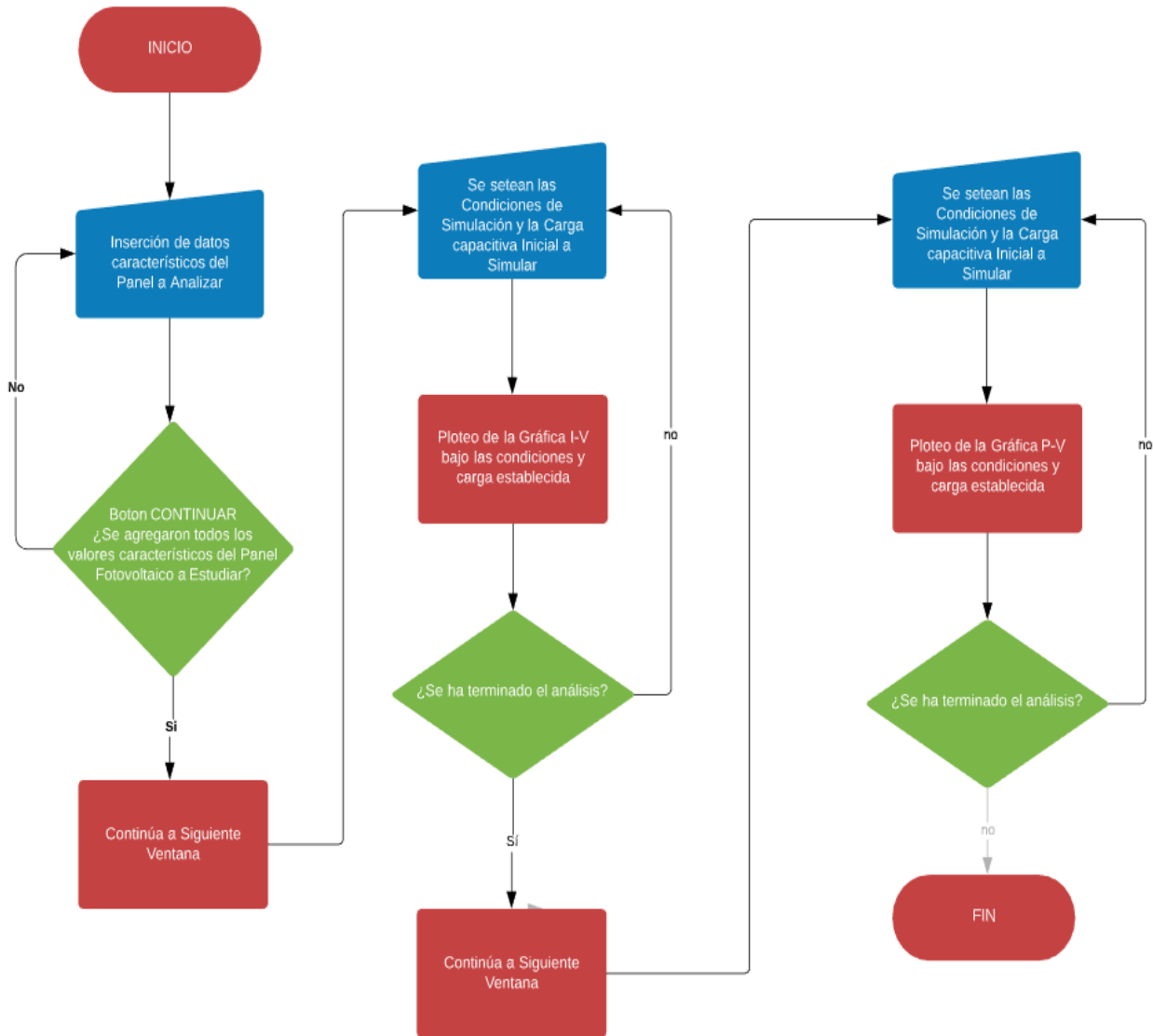


Figura 26.-Diagrama general de funcionamiento de la GUI para caracterización de curvas características de paneles fotovoltaicos.

Fuente: Elaboración propia

### 3.4.2. Diagramas para las ventanas gráficas individuales

Para el correcto funcionamiento de la GUI se pensó en la utilización de varias ventanas gráficas, un total de 4, las cuales se les dio el nombre de “GUI\_Solar”, y se componen como sigue a continuación:

- GUI\_Solar\_01: es la ventana de presentación del programa, se encuentra la información de la tesis y se puede dar inicio o cierre a la aplicación, en esta ventana solo figuran dos botones, de inicio y fin, con el siguiente formato:



Figura 27.-Portada de la GUI para la generación de Curvas Caracteriticas I-V De paneles fotovoltaicos

Fuente: Elaboración propia



Figura 28.-Diagrama de flujo para ventana GUI\_Solar\_01

Fuente: Elaboración propia



- GUI\_Solar\_02: corresponde a la ventana de inserción de datos característicos del panel solar a analizar. Estos datos serán obtenidos por el fabricante del mismo, y permiten al usuario caracterizar las curvas de diferentes modelos de paneles fotovoltaicos sin importar sus características. Los datos a ingresar son:
  - Potencia Máxima (W)
  - Tensión de Máxima de Potencia (V)
  - Corriente de Máxima Potencia (A)
  - Tensión de Circuito Abierto (V)
  - Corriente de Corto Circuito (A)
  - Coeficiente de Temperatura Voc(V/K)
  - Coeficiente de Temperatura Isc (A/K)
  - Resistencia en Serie y en Paralelo (OHM)

La configuración de la ventana gráfica es la siguiente:

Parámetro	Valor
Potencia Máxima (W)	48
Tensión de Máxima Potencia (V)	18.6
Corriente de Máxima Potencia (A)	2.59
Tensión de Circuito Abierto (V)	22.1
Corriente de Corto Circuito (A)	2.89
Coeficiente de Temperatura Voc (V/K)	-0.07
Coeficiente de Temperatura Isc (A/K)	0.00166
Resistencia en Serie (OHM)	0.2144
Resistencia en Paralelo (OHM)	108.9

Figura 29.-Ventana GUI\_Solar\_02 para la inserción de datos de fabricante para el Panel Fotovoltaico a Estudiar

Fuente: Elaboración propia

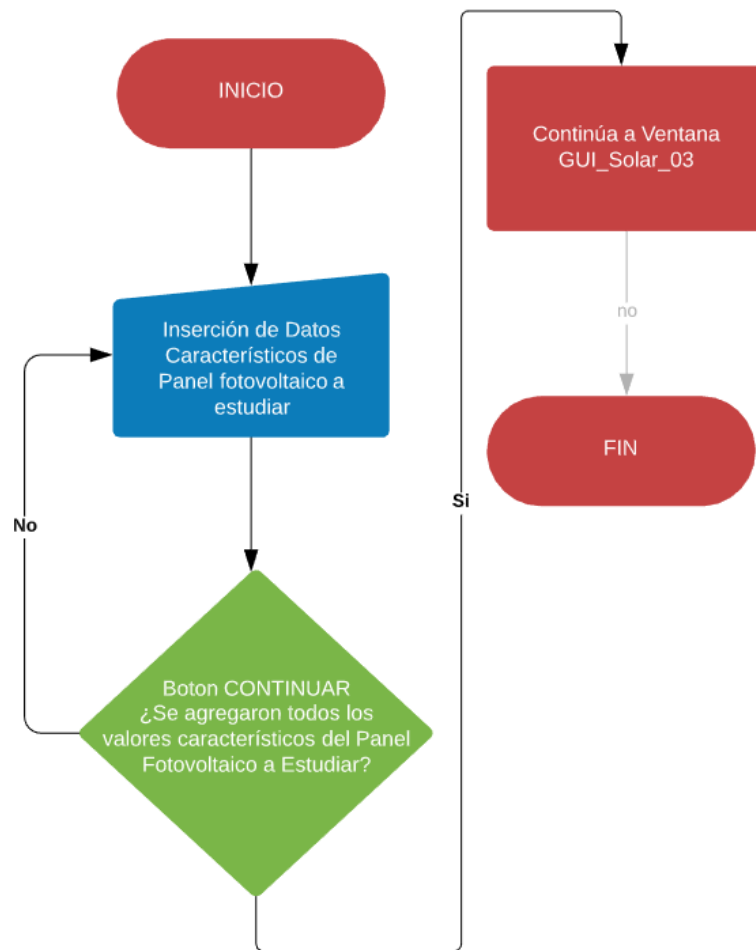


Figura 30.-Diagrama de Flujo para ventana GUI\_Solar\_02

Fuente: Elaboración propia

- GUI\_Solar\_03: en esta ventana empieza el análisis en sí del panel fotovoltaico. Mediante la Selección de los parámetros de simulación y la carga capacitiva a simular, se calculan las ecuaciones diferenciales correspondientes a los tiempos de carga en capacitancia y se obtienen las curvas y datos de corriente y voltaje con respecto al tiempo. Esta curva corresponde directamente al comportamiento de la carga capacitiva ante la conexión con el panel fotovoltaico en las condiciones establecidas, que dicho sea de paso el usuario puede modificar en tiempo real para ver de qué forma estas afectan la curva en cuestión.

Los datos a ingresar son los siguientes:

- Temperatura ambiental (° Celsius)

- Irradiancia (W/M2)
- Ángulo de Incidencia (°)
- Carga Capacitiva (uF)

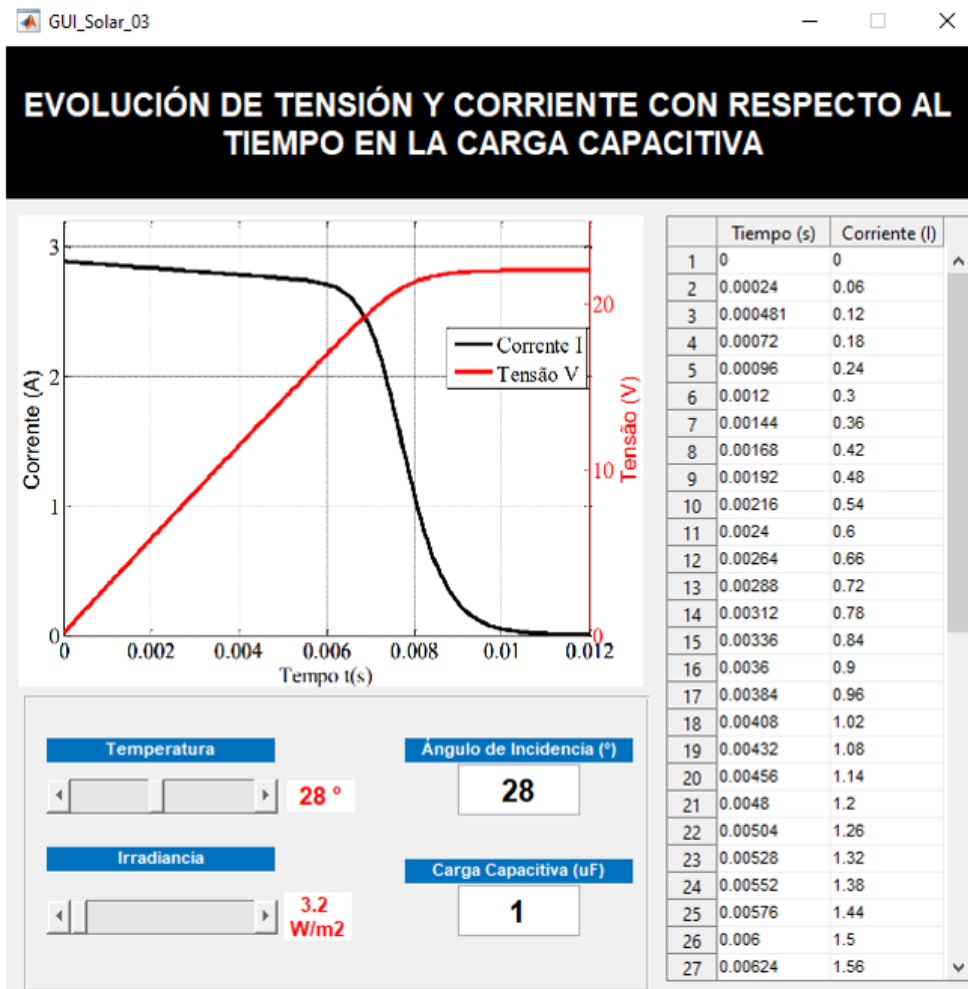


Figura 31.-Ventana GUI\_Solar\_02 para cálculo de curvas  $I_{vt}$  y  $V_{vt}$  para la carga capacitiva estudiada

Fuente: Elaboración propia

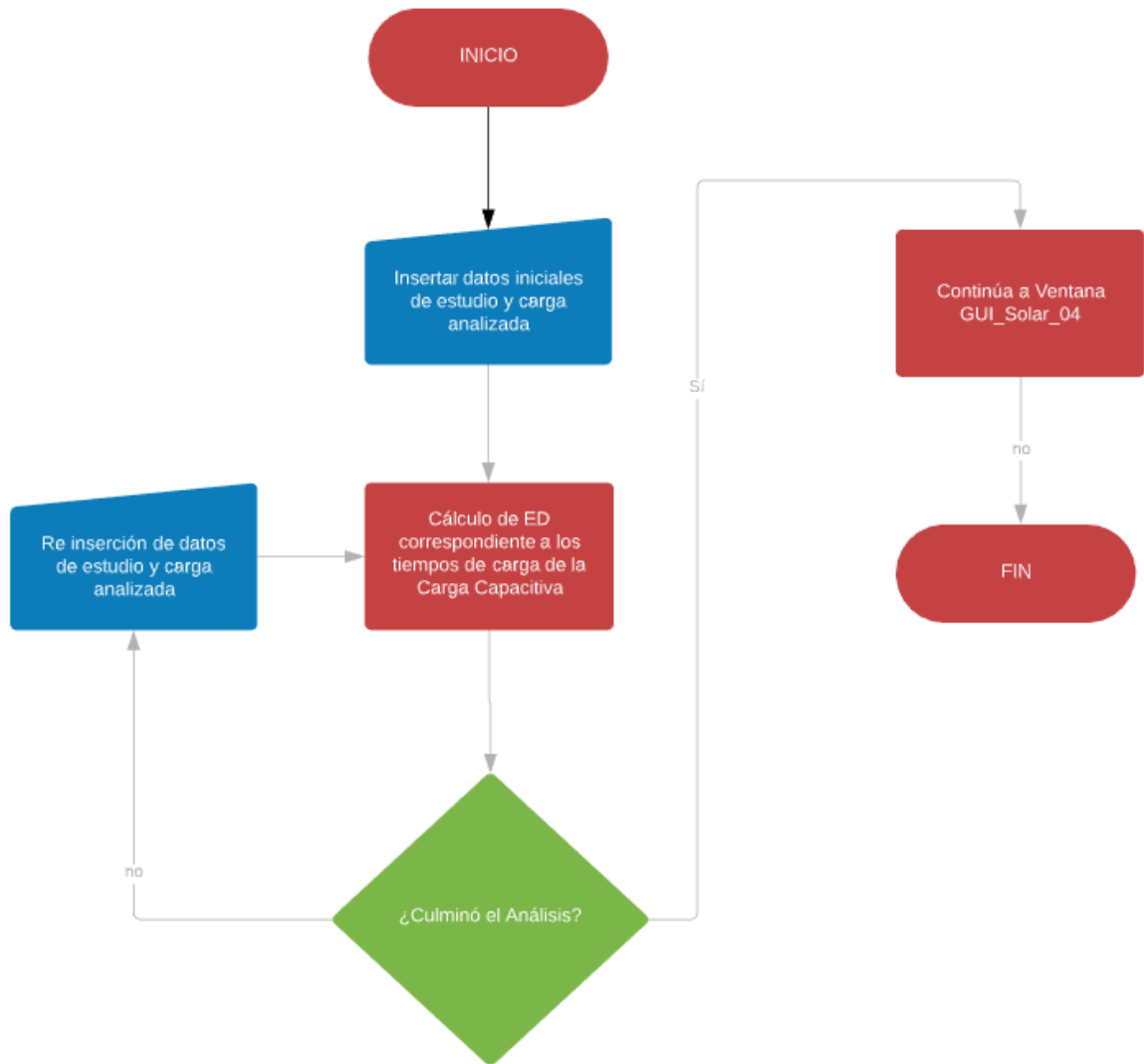


Figura 32.-Diagrama de flujo para Ventana GUI\_Solar\_03

Fuente: Elaboración propia

- GUI\_Solar\_04: la ventana final de la GUI propuesta establece, con los cálculos preestablecidos en la ventana anterior, la curva característica I-V, además de presentar en una tabla numérica los datos de muestreo (se calculan un total de 100 puntos para la curva formada).

Además, el usuario también puede modificar los datos de simulación y la carga en cuestión para verificar de que forma afectan el comportamiento de la curva, siendo este el análisis final de la GUI propuesta. Al igual que en la ventana anterior los datos modificables son:

- Temperatura ambiental (° Celsius)

- Irradiancia (W/M2)
- Ángulo de Incidencia (°)
- Carga Capacitiva (uF)

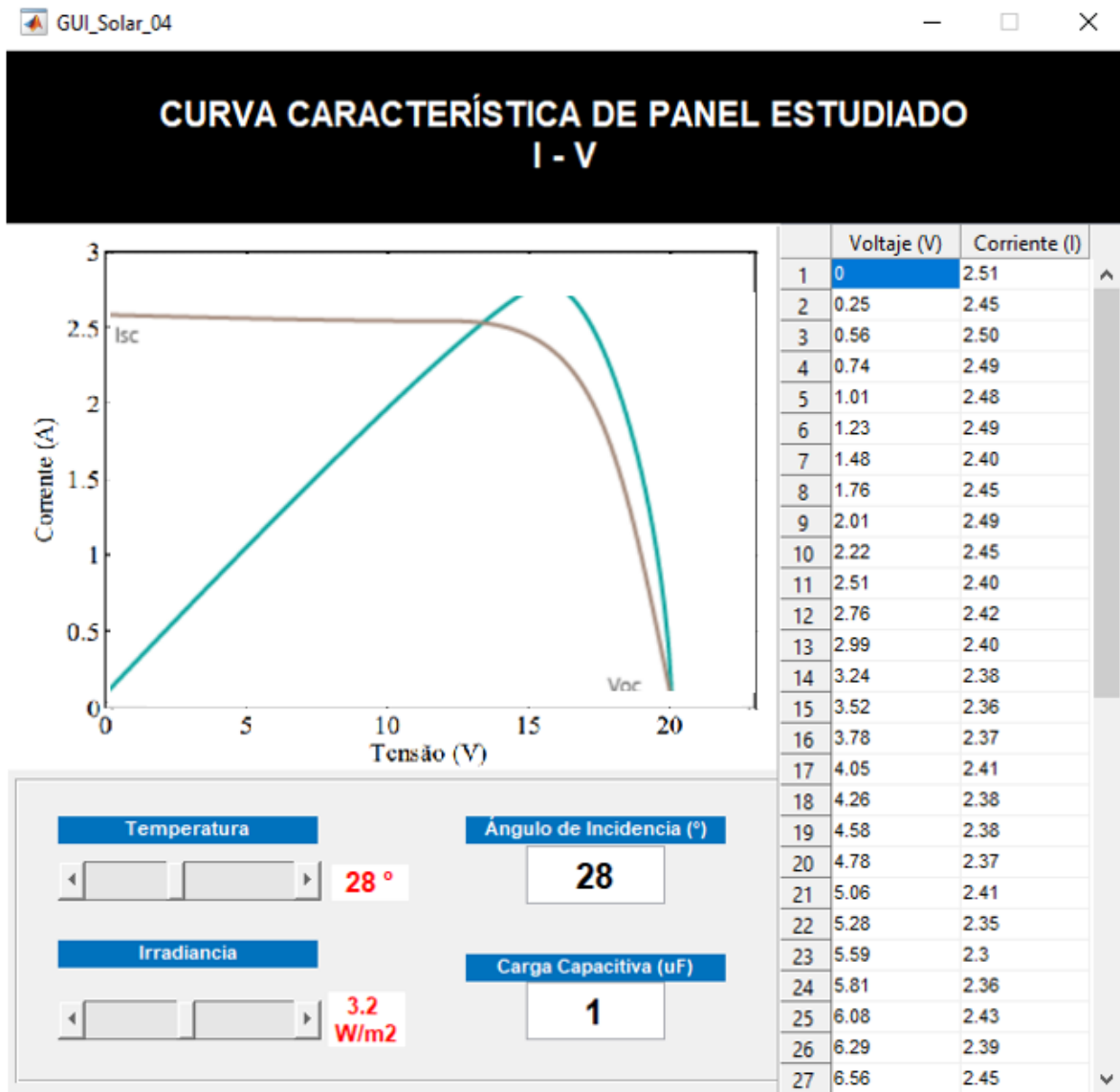


Figura 33.-Ventana GUI\_Solar\_04 para el cálculo de las curvas características I-V del panel fotovoltaico analizado bajo las condiciones y carga propuesta

Fuente: Elaboración propia

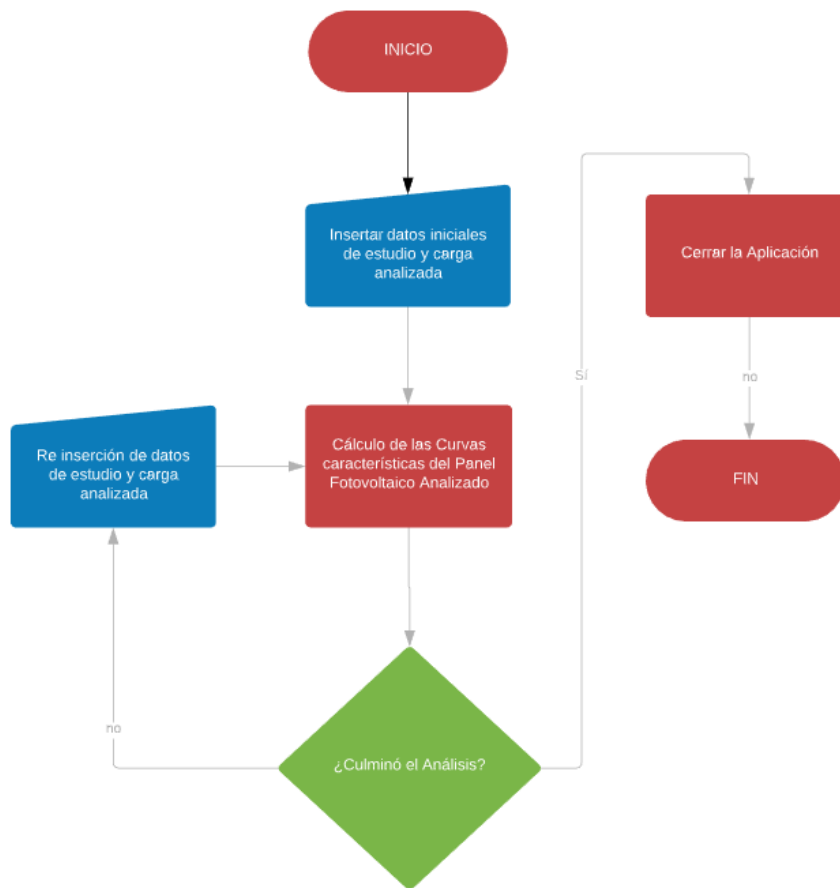


Figura 34.-Diagrama de Flujo para la ventana GUI\_Solar\_04

Fuente: Elaboración propia

### 3.5. Discusión de Resultados

Para validar el funcionamiento de la GUI planteada, se presenta un caso de aplicación presente en la bibliografía, en donde se analiza un panel fotovoltaico bajo una carga capacitiva de 1mf, se plantearan diferencias en las curvas obtenidas y los resultados presentados.

El panel fotovoltaico estudiado presentaba las siguientes características:

Tabla 6

*Parámetros del panel fotovoltaico a utilizar en la comparativa*

PARÁMETRO DEL PANEL	VALOR
POTENCIA MÁXIMA	48
TENSIÓN DE POTENCIA MÁXIMA	18.6
CORRIENTE DE POTENCIA MÁXIMA	2.59
TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO	22.1
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO	2.89
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE VOC	-0.07
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE ISC	0.00166
RESISTENCIA EN SERIE	0.2144
RESISTENCIA EN PARALELO	108.9

Fuente: Brito E. & otros (2016)

Para el montaje, los investigadores utilizaron la siguiente configuración:

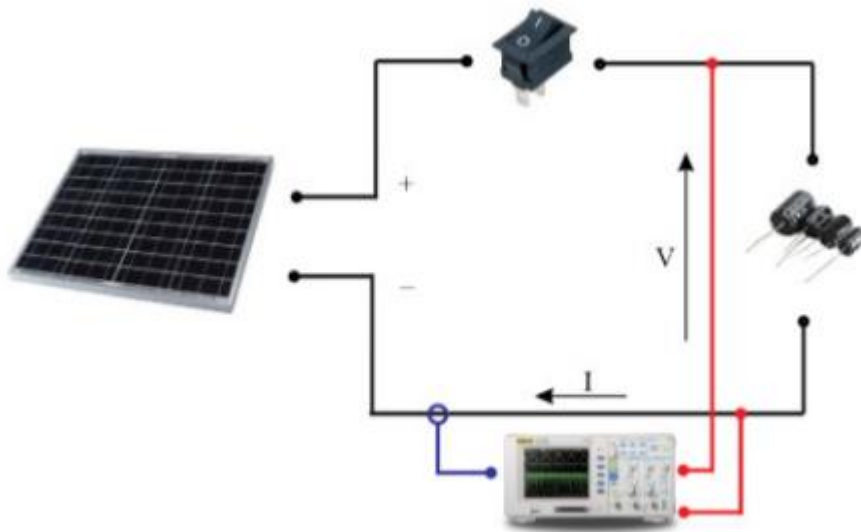


Figura 35.-Montaje Experimental del panel conectado a la carga capacitiva

Fuente: Brito E. & otros (2016)

Finalmente, se encontraron los siguientes resultados gráficos, tanto para la experimentación como para el cálculo realizado por la GUI propuesta:

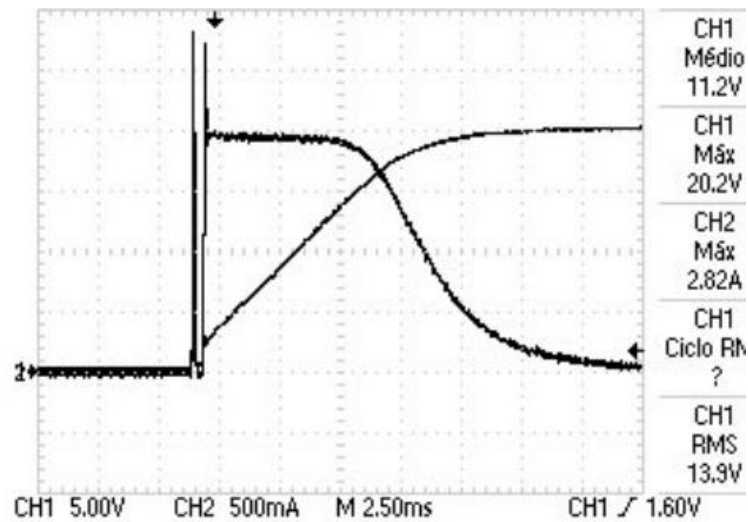


Figura 36.-Evaluación de tensión y corriente para la carga capacitiva experimental

Fuente: Brito E. & otros (2016)

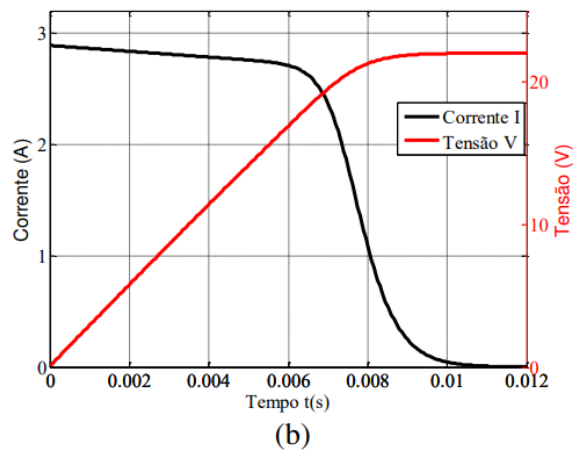


Figura 37.-Evaluación de tensión y corriente para la carga capacitiva calculada

Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se testaron varias cargas capacitivas para calcular los tiempos de carga, encontrándose los siguientes:

Tabla 7

*Comparación de cálculos obtenidos con comparativa experimental*

Capacitancia ( $\mu\text{F}$ )	Tiempo (ms)	
	Simulado	Experimental
100	0.95	2.75
330	3.15	4.75
680	6.5	10.625

Fuente: Elaboración Propia



Finalmente, se calculó la curva característica del panel fotovoltaico seleccionado y se comparó con la curva encontrada experimentalmente, presentadas a continuación:

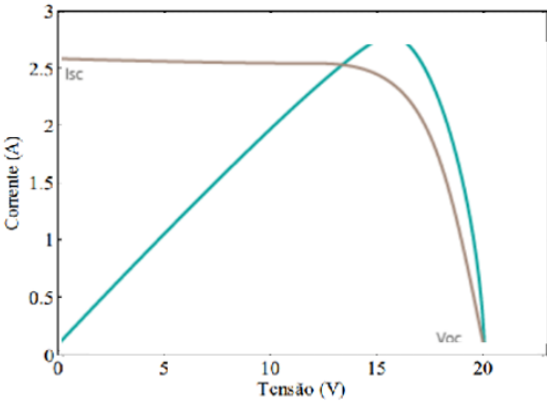


Figura 38.-Curva Característica I-V y P-V calculada por la GUI para el panel fotovoltaico seleccionado

Fuente: Elaboración propia

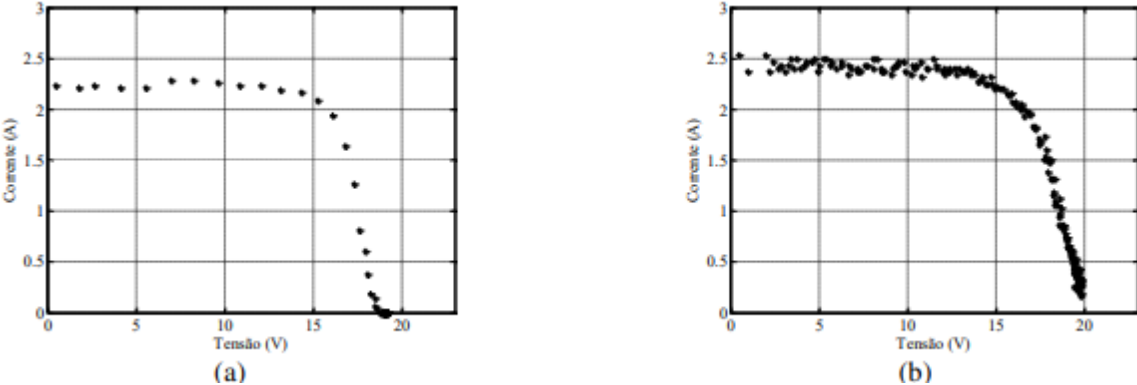


Figura 39.- Curva característica V-I obtenida de resultados experimentales comparativos.

Fuente: Brito E. & otros (2016)

## **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

#### **4.1. Conclusiones**

Para el correcto desarrollo de la GUI propuesta se tuvieron que identificar todas las variables y parámetros que influían en el cálculo de las curvas características I-V para los paneles fotovoltaicos, esto se tomó como punto de partida para las consideraciones de diseño y características del proyecto.

Se resolvieron de forma eficaz las ED para los modelos matemáticos que determinaban los tiempos de carga de la carga capacitiva, de esta forma se pudieron presentar, adicional a las gráficas esperadas, las gráficas  $I_{vst}$  y  $V_{vst}$  para el capacitor simulado.

Los tiempos de carga del capacitor se encontraron proporcionales al valor de la capacitancia simulada y se estimó, además, que estas varían notoriamente con las fluctuaciones de irradiancia y temperatura a la que es sometido. Si la radiación cae o aumenta la variación de temperatura, hay una repentina caída de la corriente generada provocando consigo un mayor tiempo de carga para el capacitor.

Se encontró además que, el calcular de forma correcta el tiempo de carga del capacitor, es requerido en dado caso se quiera diseñar un módulo experimental con las condiciones establecidas a fin de que no haya alteraciones en los datos obtenidos.

Finalmente, al comparar las simulaciones con resultados experimentales obtenidos de la bibliografía, se encontraron diferencias menores al 10% entre estos, deduciendo que, la GUI desarrollada junto a los modelos matemáticos utilizados funcionan a un nivel práctico adecuado para la estimación de curvas características de paneles fotovoltaicos.

#### **4.2. Recomendaciones**

Entre las recomendaciones que se plantean para futuras investigaciones están:

- La implementación de otros modelos para cargas a analizar, como una carga resistiva extra para análisis individual o en conjunto al modelo de carga capacitiva. Cabe recordar que muchos de los equipos que plantean ser alimentados por sistemas fotovoltaicos están compuestos de elementos

resistivos y capacitivos, por lo que podrían ser ideal a futuro hacer simulaciones con cargas compuestas.

- La GUI podría ampliarse para la caracterización de conjuntos de paneles fotovoltaicos, a fin de simular el comportamiento no de un solo panel a plena carga, si no de una playa de paneles solares, de esta manera, podría determinarse previamente las curvas de trabajo para pequeñas centrales solares y hacer estimaciones previas de proyectos de ingeniería completos.
- El diseño de un módulo experimental en físico sería una propuesta acertada para futuras investigaciones que complementen la aquí presentada. De esta forma, los resultados hechos por mediciones propias pueden compararse con los cálculos presentados en la GUI, y optimizarse para disminuir los errores presentados.
- Puede establecerse en futuros proyectos la intercomunicación entre un módulo físico experimental y la GUI, a fin de establecer un modelo completo de trabajo experimental y simulado en tiempo real.

## 5. Referencias


- Álvarez López, R. A., & García Angarita, M. A. (2014). Parámetros comparativos de células fotoeléctricas para generación de energía: implementación de banco de pruebas usando DSP. *Ingeniería Energética Vol. XXXV*, 193-201.
- Andújar Márquez, J. M., Enrique Gómez, J. M., Durán Aranda, E., & Martínez Bohórquez, M. A. (2004). Sistema para la Generación automática de curvas I-V-, P-V y Monitorización de Módulos Fotovoltaicos. *XXVI Jornadas de Automática*, 405-410.
- Banco Mundial. (03 de 10 de 2019). *Energía - Panorama General*. Obtenido de Banco Mundial Web site: <https://www.bancomundial.org/es/topic/energy/overview>
- Cabré, J. P. (2012). *Estudio de la afectación de las sombras en un panel fotovoltaico*. España: Universitat Rovira I Virgili.
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). *Centrales de Energías Renovables. Generación Eléctrica con Energías Renovables*. Madrid, España: Pearson.
- CER-UNI. (2018). *Proyectos*. Obtenido de CER-UNI Website: <http://cer.uni.edu.pe/index.php/proyectos/#>
- DeltaVolt. (2012). *Energía Solar Fotovoltaica*. Obtenido de DeltaVolt: <https://deltavolt.pe/energia-renovable/energia-solar>
- ENEL. (2018). *Rubí Solar Plant: Peru's Largest Solar Plant*. Obtenido de ENEL Website: <https://www.enel.pe/en/sustainability/rubi-solar-plant-peru-largest-solar-plant.html>
- Fernández Ferichola, J. (2009). *Caracterización de Módulos Fotovoltaicos con Dispositivo Portátil*. Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Fernández Munguía, S. (19 de 01 de 2018). *Energías Renovables*. Obtenido de DiarioRenovables: <https://www.diariorenovables.com/2018/01/el-94-de-la-nueva-potencia-instalada-en.html>
- Gonzáles, E., Castro, V., Crisóstomo, H., Navarro, G., Olivos, B., Palomino, M., . . . Soria Dall'Orso, C. (2017). *La matriz energética global y sus tendencias*. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- González, L. G., Farfán, E., & Zamora, H. (2015). Diseño de un banco de pruebas para paneles solares fotovoltaicos, mediante un convertidor reductor-elevador. *Avances en Ciencias e Ingenierías*, C14-C19.

- Guachimboza Dávalos, J. I. (2011). *Diseño e Implementación de un Módulo Didáctico y Software de Simulación para visualizar la curva característica de Celdas y Paneles Solares*. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- Horn, M. (2006). El estado actual del uso de la energía solar en el Perú. *PerúEconómico*, 10-11.
- International Energy Agency. (2011). *Solar Energy Perspectives*. Paris: OECD/IEA.
- Mendes Casaro, M., & Cruz Martins, D. (2008). Modelo de Arranjo fotovoltaico destinado a análisis em electrónica de potência via simulacao. *Electrónica de Potencia*, Vol 13, No. 3.
- Mullo Tarco, K. M., & Herrera Moreno, K. W. (2015). *Diseño e Implementación de un Módulo Didáctico para pruebas de un Generador Híbrido a Base de Energías Renovables no Convencionales (Generador Eólico-Fotovoltaico) para la Universidad de las Fuerzas Armadas - Espe Extensión Latacunga*. Latacunga, Ecuador: Universidad De las Fuerzas Armadas.
- Muñoz, M. A., Cabrera, P., Moreda, G., & Chenlo, F. (2011). *Medición en campo de la potencia máxima entregada por paneles fotovoltaicos bajo condiciones estándar de medida*. Évora, Portugal: Universidad de Évora.
- Pilipey, R. (05 de 10 de 2018). *Energía*. Obtenido de EFEVERDE: <https://www.efeverde.com/noticias/en-china-las-renovables-alcanzan-el-383-de-la-capacidad-energetica-en-2018/>
- Posso, F. (2002). Energía y Ambiente: Pasado, Presente y Futuro. Parte dos: Sistema energético basado en energías alternativas. *Geoenseñanza*, 54-73.
- Robayo L., C., & Serna G., S. (2015). System for characterization of photovoltaic panels. *Actas de Ingeniería*, 42-46.
- Salas Reyes, Y., Gómez Blanco, H., Vanegas Chamorro, M., Valencia Ochoa, G., & Villicaña Ortiz, E. (2018). Diseño técnico y económico de un banco de prueba solar fotovoltaico para generación de energía eléctrica de forma aislada. *PROSPECTIVA*, 82-88.
- Sánchez Miño, S. (2003). *Energías Renovables: Conceptos y Aplicaciones*. Quito, Ecuador: Fundación Natura.
- SolidBi. (2019). *SolidWorks ¿Qué es y para qué sirve?* Obtenido de SolidBi WebSite: <https://solid-bi.es/solidworks/>

SunFields Europe. (27 de Mayo de 2016). *Módulo Fotovoltaico: Listado de Parámetros Fundamentales*. Obtenido de Sunfields Website: <https://www.sfe-solar.com/noticias/articulos/modulo-fotovoltaico-parametros-fundamentales/>

The MathWorks Inc. (2019). *Acerca del Software Matlab*. Obtenido de MathWorks Website: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>

## ANEXOS

 UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN	SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD - USS		
		Código	F-FC-USS
		Versión	00
		Hoja	1 de 1

### AUTORIZACION PARA EL RECOJO DE INFORMACION

Chiclayo 15 de setiembre del 2021

Quien suscribe:

Mg. Ing. Juan Carlos Vives Garnique

Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica

Universidad Señor de Sipán

**AUTORIZA:** Permiso para recojo de información pertinente en función del proyecto de investigación, denominado: **DISEÑO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS 1 - V DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN**

Por el presente, el que suscribe, Mg. Ing. Juan Carlos Vives Garnique, Director de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica - Universidad Señor de Sipán, autorizo a los alumnos Febres Flores Marcos Erikson, identificados con DNI: 47228084, respectivamente, estudiantes de la escuela profesión de INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA y autores de del trabajo de investigación denominado: **DISEÑO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS 1 - V DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN**, al uso al uso de dicha información que conforma el expediente técnico, así como hojas de memorias, cálculos entre otros como planos para efectos exclusivamente académicos de la elaboración de tesis de **DISEÑO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL ESTUDIO DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS 1 - V DE PANELES SOLARES PARA EL LABORATORIO DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS EN LA UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN**, enunciada líneas arriba de quien solicita se garantice la absoluta confidencialidad de la información solicitada.

Atentamente.



  
Mg. Ing. Juan Carlos Vives  
Director de la Escuela Profesional  
de Ingeniería Mecánica Eléctrica  
UNIVERSIDAD SEÑOR DE SIPÁN S.A.C.  
M. LNE: 41524552