

Evaluation of Variations in the Efficiency of Electrical Energy Generation in Isolated Photovoltaic Systems Caused by Changes in Ambient and Solar Panel Surface Temperatures in the Historic Center of the City of Popayán

Evaluación de las Variaciones en la Eficiencia en la Generación de Energía Eléctrica en Sistemas Fotovoltaicos Aislados Causadas por Cambios en la Temperatura Ambiente y la Temperatura en Superficie de Panel Solar en el Centro Histórico de la Ciudad de Popayán

Julián Andrés Mejía Montoya ¹ , Jhon Alexander Guerrero Narvaez ² 

Citación: Mejía Montoya, J.; Guerrero Narvaez, J. Evaluación de las Variaciones en la Eficiencia en la Generación de Energía Eléctrica en Sistemas Fotovoltaicos Aislados Causadas por Cambios en la Temperatura Ambiente y la Temperatura en Superficie de Panel Solar en el Centro Histórico de la Ciudad de Popayán. I + T + C Investigación, Tecnología y Ciencia. Vol 1. Num. 17. 2023.

¹ Corporación Universitaria Comfacauca ; julianmejia@unicomfacauca.edu.co

² Corporación Universitaria Comfacauca ; jguerrero@unicomfacauca.edu.co

Resumen: La demanda energética a nivel mundial ha conllevado a los gobiernos a diversificar la matriz energética con energías renovables, además de integrar mejoras tecnológicas en las ya existentes como la energía solar fotovoltaica, en este tipo de generación de energía, se ha observado en diferentes estudios que existe una influencia significativa por parte de las variaciones de temperaturas ambiente y en la superficie del panel solar que afectan directamente a la eficiencia en la generación de energía eléctrica fotovoltaica. Por lo tanto, esta investigación experimental, propone abordar la eficiencia de este tipo de energía, bajo las condiciones ambientales de temperatura en el centro histórico de Popayán. Debido a los escasos estudios de la temática en la región, la presente investigación basada en la metodología V-Shape ,evalúa las diferentes características eléctricas en paneles solares policristalinos, mediante el desarrollo de un componente hardware conformado por un sistema embebido e instrumentación electrónica y el componente software mediante un desarrollo de una aplicación que permite el procesamiento de la información recolectada para realizar los cálculos en los parámetros necesarios para su posterior registro y análisis, dándole un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo la investigación.

Palabras clave: Eficiencia energética; energía fotovoltaica; condiciones ambientales; temperatura superficie panel, características eléctricas (Paneles fotovoltaicos).

Abstract: Global energy demand has led governments to diversify the energy matrix with renewable energies, in addition to integrating technological improvements in existing ones such as photovoltaic solar energy; in this type of energy generation, it has been observed in different studies that There is a significant influence from variations in ambient temperatures and on the surface of the solar panel that directly affect the efficiency in the generation of photovoltaic electrical energy. Therefore, this experimental research proposes to address the efficiency of this type of energy under the environmental temperature conditions in the historic center of Popayán. Due to the few studies on the subject in the region, the present research based on the V-Shape methodology evaluates the different electrical characteristics in polycrystalline solar panels through the development of a hardware component made up of an embedded system and electronic instrumentation and the software component through the development of an application that allows the processing of the information collected to perform calculations on the necessary parameters for subsequent recording and analysis, giving the research a quantitative approach and a descriptive scope.

Keywords: Energy efficiency; photovoltaic energy; environmental conditions; panel surface temperature, electrical characteristics (photovoltaic panels)



Derechos de autor: © 2023 por los autores. Presentado para posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY NC SA) (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es_ES)

Nota del editor: El Sello editorial Unicomfacauca se mantiene neutral con respecto a los reclamos que se generen en esta publicación.

1. Introducción

La demanda energética y el daño ambiental a nivel mundial a consecuencia de las energías convencionales, han llevado a los gobiernos e investigadores a enfocarse en las energías alternativas. De todas estas, la energía solar es la más conocida, pues es el recurso renovable más abundante en el planeta y, la energía fotovoltaica, el tipo más utilizado, la cual consiste en transformar la radiación solar directamente en energía eléctrica a través de las celdas fotovoltaicas [1]. Sin embargo, en [2] se relata cómo el rendimiento de estos dispositivos depende principalmente del tipo de tecnología fotovoltaica y las condiciones climáticas que pueden aumentar su desempeño (iluminación, radiación solar), así como otras que lo pueden reducir (temperatura en la celda) siendo así, que un panel fotovoltaico típico puede llegar a convertir entre un 6-20% de la radiación solar en electricidad, el resto se convierte en energía calórica, esto último representa uno de los principales problemas en el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos. Diversos investigadores han demostrado que parte del calor que genera el panel es devuelto al ambiente, incrementando la temperatura del panel y, reduciendo su eficiencia considerablemente [3].

Independientemente de la tecnología del panel solar, la temperatura representa un rol importante en el desempeño de la eficiencia eléctrica de éste, pues se ha observado que entre ambos se presenta una relación inversamente proporcional. En [4] se puede evidenciar este comportamiento reflejado en las características de un panel del tipo monocristalino, en el cual al aumentar sus niveles de temperatura, se observa cómo el voltaje y la potencia disminuyen acorde a este comportamiento, haciendo que la eficiencia se viera afectada de manera negativa, mientras que, en [1] se observa el mismo comportamiento en un panel fotovoltaico de tecnología policristalina, puesto que por medio de disipadores de calor al comparar las condiciones con y sin la transferencia de calor de estos, se pudo evidenciar cómo el tener un descenso en la temperatura, aumentó el rendimiento de la eficiencia eléctrica en el panel.

Uno de los fines de los desarrolladores ha sido corregir esta característica en la temperatura de operación de los paneles solares a través del tiempo, pues un panel de tecnología Multijuntion InGaP/InGaAs/Ge presenta una mejora en su eficiencia eléctrica ante los efectos de la temperatura con respecto a uno con tecnología amorfa, que a su vez presenta mejoras en ésta con respecto a las tecnologías policristalina y monocristalina, siendo esta última la que presenta menos rendimiento a consecuencia de los aumentos en la temperatura [5]. Además, en [6] también se encontró que, si se trata de conectar más de un panel, la configuración de conexión (Serie Simple, Serie-Paralelo, Atado Cruzado Total, etc.) entre ellos también puede hacer que la eficiencia aumente o disminuya ante los efectos de la temperatura.

En [7, 8] se observó una continua tendencia al deterioro en las capacidades de generación de electricidad debido al incremento de la temperatura, ya que, se comprobó que la potencia máxima es inversamente proporcional a la temperatura de la celda, lo cual afecta directamente la eficiencia de generación fotoeléctrica, bajo temperaturas ambiente variables. De la misma manera, en [5, 6] se evidenció cómo el calor generado en el panel fotovoltaico debido a la resistencia interna afecta las características de funcionamiento de éste, además, también se demostró que el comportamiento de la temperatura en la celda es dependiente del nivel de radiación.

Teniendo en cuenta el panorama anteriormente descrito, se puede afirmar que existe una importante influencia de la temperatura en los sistemas fotovoltaicos para generación de energía eléctrica. En busca de contribuir a los Objetivos de Desarrollo Sostenible -ODS-, específicamente el objetivo 7 de Energía Asequible y en concreto la meta 7.b la cual busca ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios energéticos modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo [9], y, teniendo en cuenta que hasta la fecha no se han encontrado estudios acerca de los efectos de la temperatura en los paneles solares en la región, específicamente en las condiciones climáticas/ambientales del centro histórico del municipio de Popayán, y reconociendo la

desventaja que representa las altas temperaturas en los Paneles Solares, y el poco desarrollo orientado a este ámbito en la región, se presenta la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es la relación que existe entre la producción energética en paneles fotovoltaicos y las variaciones de la temperatura en las condiciones ambientales del centro histórico del municipio de Popayán-Cauca?.

2. Materiales y métodos

El desarrollo del proyecto y la implementación del mismo está basado en la metodología de diseño Modelo V – Cuadrante, ya que este toma en cuenta la necesidad de integración de conocimientos y sistemas para los diferentes procesos de desarrollo y aplicación de prototipos mecatrónicos.

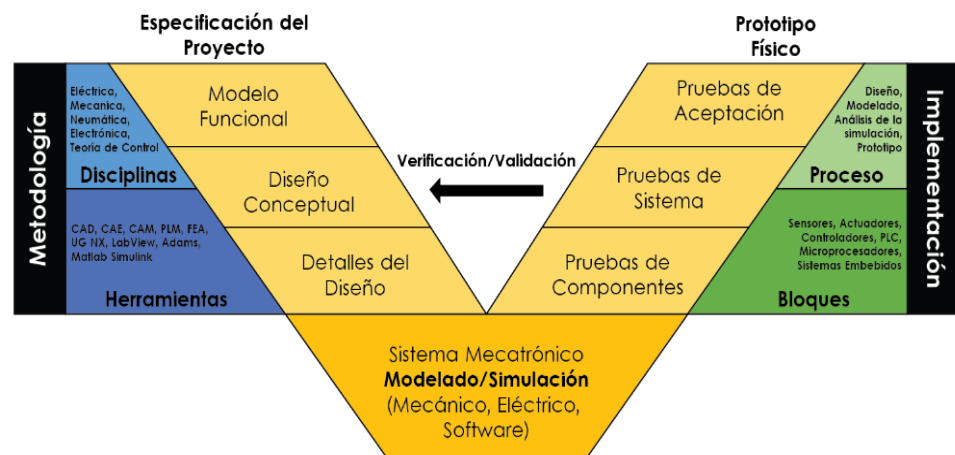


Figura 1. Modelo V-Cuadrante para el Diseño de Sistemas de Control, adaptado de [9]

La implementación de la metodología Modelo V–Cuadrante, inicia realizando un mapeo sistemático de conceptos con fuentes bibliográficas acerca de la relación existente entre la temperaturas ambiente y en el panel y, la eficiencia que produce. Después, se parte con la definición de las funciones y los componentes mecánicos y eléctricos, continuando con las especificaciones físicas y estructurales del diseño (Fase de Diseño), siguiendo con el montaje y la realización de pruebas para su validación (Fase de Implementación), para dar paso al registro y almacenamiento de las variables de interés (Fase de Registro), finalizando con un análisis estadístico de estas últimas (Fase de Analisis).

Inicialmente, se establecen los componentes básicos de operación con los que debe contar el sistema fotovoltaico, además de la implementación de uso de protecciones, todo lo anterior mencionado se muestra gráficamente en la Figura 2.

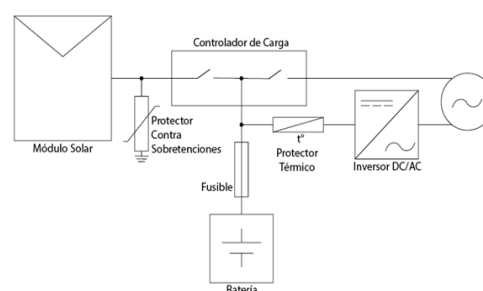




Figura 2. Esquema de Conexión de los Componentes del Sistema Fotovoltaico, creación propia

Para la medición de los parámetros requeridos, se plantea la creación un dispositivo que contará con los respectivos sensores de acuerdo a las variables requeridas, siendo estas: voltaje y corriente DC, la temperatura ambiente y la temperatura en la superficie del panel. También, este debe contar con protección contra los picos de voltaje y filtros necesarios, además de un microcontrolador que cuente con un sistema datalogger, por último, una interfaz gráfica que permita observar los datos sensados por el dispositivo, realizar un monitoreo del correcto desempeño del sistema y gestionar la información obtenida en tiempo de máquina.

Una vez planteados los componentes que se requieren en los sistemas fotovoltaicos y de medición de las variables de interés, se realiza el proceso de selección de los equipos, componentes y materiales disponibles en el mercado acorde al presupuesto asignado al proyecto, mostrados en las Tablas 1 y 2.


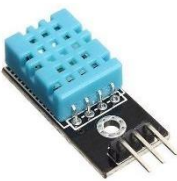





Tabla 1. Selección de Equipos, Materiales e Insumos para el Sistema Fotovoltaico Aislado



Nombre	Tipo	Características Principales	Imagen
XH100P (36)	Módulo Solar	$P_{max}=100W$ $V_{oc}=22.54V$ $I_{sc}=5.76A$ $V_{mp}=18,54v$ $I_{mp}=5.40A$	
NUHIB-7510	Inversor (Hibrido)	Potencia nominal: 1KVA/1KW PF1 Entrada DC: 12VDC, 83.3A Salida AC: 120VAC, 50/60Hz, 6,6A	
FLS121000	Batería	12V 100AH/100HR Ciclo de uso: 14.4V - 15V Uso en espera: 13.5V - 13.8V	
FSP-D40	Protector contra Sobretensión	2P 600VDC 800VDC 20kA 40kA	
FPV-63DC C16	Protector Térmico	2P 550VDC 63A	

EFH 10DC	Fusible	10x38mm 25A 1000VDC	
Cable Solar	Apantallado	Monoconductores de tensión 1,8 KV en corriente continua y 0.6-1KA AC en corriente alterna. Diámetro: 6 mm ² .	

¹ Como se puede observar, no se dispuso de un Controlador de Carga ya que la tecnología del inversor seleccionado es híbrida, por ende, hace la función de Controlador e Inversor.

Tabla 2. Selección de Componentes Electrónicos, Módulos y Microcontrolador

Nombre	Tipo	Características Principales	Imagen
Arduino Nano	Microcontrolador	Microcontrolador ATmega328, arquitectura AVR, voltaje de funcionamiento 5 V, memoria Flash 32 KB de los cuales 2 KB utilizados por el gestor de arranque, velocidad del reloj 16 MHz, 8 entradas analógicas, EEPROM 1 KB, 22 E/S digitales, tamaño PCB 18X45mm, peso 7g	
DHT11	Sensor de Temperatura Ambiente y Humedad	Voltaje de Operación: 3V - 5V DC, rango de medición de temperatura: 0 a 50 °C, precisión de medición de temperatura: ±2.0 °C, resolución Temperatura: 0.1°C	
PT100	Termocupla	Rango de temperatura utilizable: -200 a 550 °C, interfaz de 3 hilos, precisión de ±0,5 °C de -10 °C a + 85 °C, peso 19.3g	
MAX31865	Módulo de Termocupla	Voltaje de operación: 3 - 5VDC, resolución ADC: 15 bits (0.03125°C), precisión: 0.5°C, tiempo de conversión: 21ms (máx.), interfaz: SPI	
ACS712-30A	Sensor de Corriente Continua	Rango de -30 a 30 A, sensibilidad de 100mV/A, voltaje de operación DC: 5V, tamaño PCB 31x14mm.	
DS1307	Módulo de Reloj	Rango de voltaje de entrada DC: 4.5V a 5.5V, rango de voltaje de Batería: 2Vdc a 3.5Vdc, máxima corriente de consumo: 1.5 mA, interfaz: I2C, frecuencia máxima de transmisión: 100KHz.	
ADS1115	Módulo Conversor Análogo/Digital	Voltaje de alimentación: 2.0V a 5.5V, tasa de datos programable: 8SPS a 860SPS (SPS: muestras por segundo), interfaz: I2C, direcciones seleccionables por pines, cuatro entradas independientes o dos diferenciables.	

Módulo MICRO SD	Módulo para Tarjeta de Almacenamiento SD	Voltaje de funcionamiento: 4.5 ~ 5.5V VCC, circuito regulador de voltaje, soporta Micro SD de hasta 2 GB, Micro SDHC de hasta 32GB, interfaz: SPI, tamaño 46x24mm, peso 5g	
NRF24L01L	Módulo de Comunicación Inalámbrico	Frecuencia: 2.4GHz~2.5GHz, voltaje de operación: 3 ~ 3.6V, corriente máxima: 115mA, soporta hasta seis canales de recepción de datos	

¹ Como se evidencia en la tabla anterior, no se selecciona un sensor de voltaje, esto se debe a que este se diseña para ser medido mediante un divisor de voltaje con una salida que pueda ser admitida por el sistema.

Se diseñó un sistema de filtrado para las señale generadas por los paneles (corriente DC y voltaje DC), para esto se eligió un filtro pasa bajas activos de segundo orden, seleccionando para esta función el amplificador operacional LM358, el cual funciona de de una manera bastante funcional conectado a 5V, sin embargo este solo es capaz de amplificar hasta los 3.8V aproximadamente conectado al voltaje anteriormente mencionado, por ende, fue necesario un divisor de tensión para no ver afectada la señal, ademas del modulo ADS1115 para corregir el grave daño en la resolución de lectura de las variables.

Para terminar con la fase de selección de componentes, se procedió a enlistar los requisitos con los que debía contar tanto el sistema fotovoltaico como el sistema de medición de las variables interés, estos requisitos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Detalles de Diseño

Área	Detalles
Requisitos Mecánicos	<ul style="list-style-type: none"> a)El sistema debe soportar 16.2Kg que pesan los paneles, permitir una estabilidad física y permitir una inclinación mayor a 8° para evitar residuos en la superficie de los paneles. b)Los paneles están diseñados para soportar lluvia. Por lo tanto, el resto de componentes del sistema deben estar protegidos de esta y de cualquier fuente acuosa. c)Los componentes eléctricos del sistema deben estar fijos y seguros para su uso. d)El almacenamiento de los sensores debe permitir que estos funcionen sin dificultad alguna e)Los sensores deben posicionarse de tal manera que no afecte el funcionamiento de los paneles ni de los componentes eléctricos.
Requisitos Eléctricos	<ul style="list-style-type: none"> a)El sistema debe contar con protección contra sobretensiones y cortocircuitos b)Los componentes deben estar dentro de una unidad (caja) que los proteja de inconvenientes externos, como el agua de lluvia, polvo, ruido, etc.
Otros Requisitos	<ul style="list-style-type: none"> a)El tiempo de muestreo de los sensores debe permitir medir los suficientes datos para que el análisis tenga la menor variación posible. b)El sistema debe ser capaz de almacenar los datos captados por los sensores c)El sistema debe contar con una interfaz que permita la interpretación de los datos d)El sistema debe procesar la información y realizar análisis estadísticos descriptivos e inferenciales

Con la definición de los requisitos y parámetros del diseño conceptual más adecuado para la investigación, se inicia el proceso de modelado con herramientas software CAD/CAM/CAE del componente electrónico y la estructura física del sistema de medición.

En el componente electrónico, el conjunto de elementos mencionados en la sección anterior, se diseñaron e integraron mediante el software de Proteus® debido a la inexistencia de estos elementos en las librerías de este software. El resultado del diseño se observa en la Figura 3, donde son expuestos sus esquemas con sus respectivas conexiones.

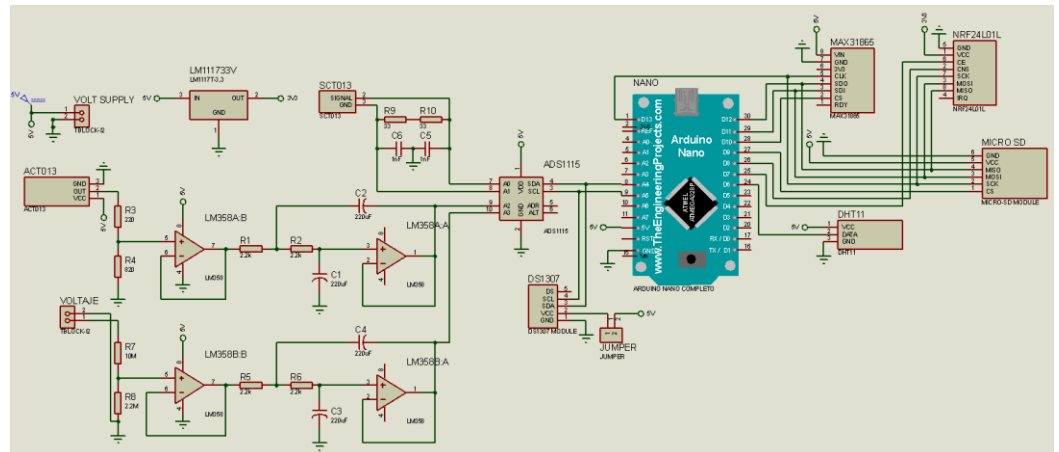


Figura 3. Esquema Electrónico Completo, creación propia

En el mismo software se diseñó la placa PCB y se exportó un modelo 3D de esta para un posterior diseño de la estructura de iría contenida, lo anterior se muestra en las Figuras 4 y 5.

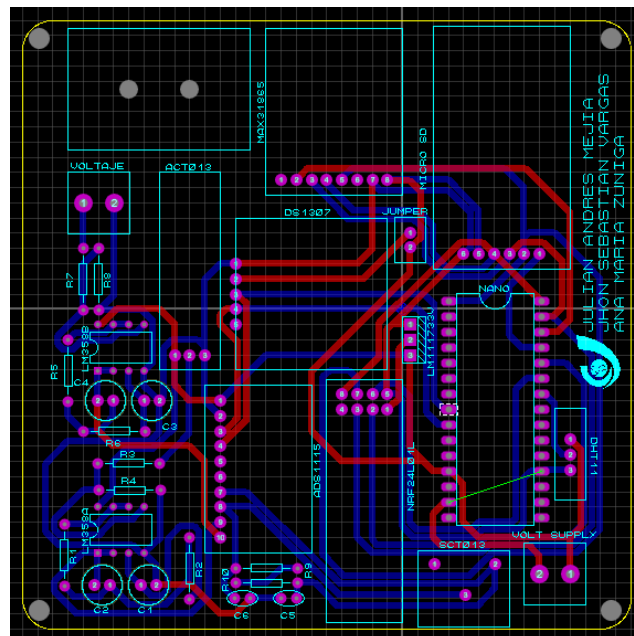


Figura 4. Diseño PCB, creación propia

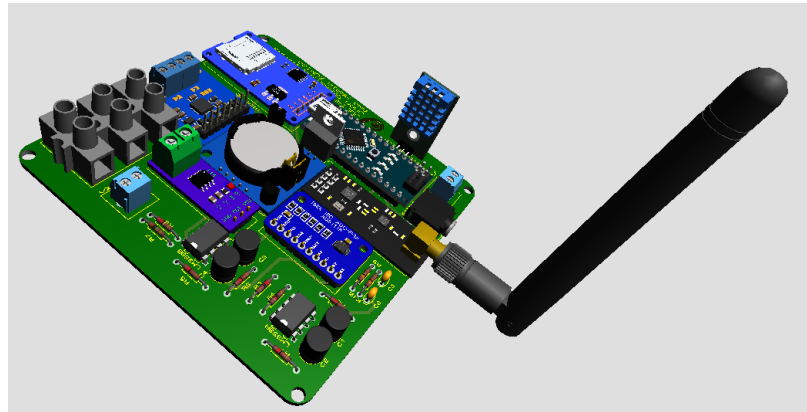


Figura 5. Modelado 3D Placa PCB, creación propia

Dimensionada el área donde se instala la caja de medición junto a los demás componentes del sistema de conexión fotovoltaico, se determina que una sujeción anclada a la pared de la caja metálica que contiene los elementos del sistema, y la técnica de manufactura que se emplea para mecanizarla es la fabricación digital por medio de la impresión 3D de poliacido láctico (PLA) por deposición de hilo fundido, gracias a la facilidad y compatibilidad de esta técnica con los requerimientos del sistema. El diseño de la caja consta de dos partes: base y tapa.

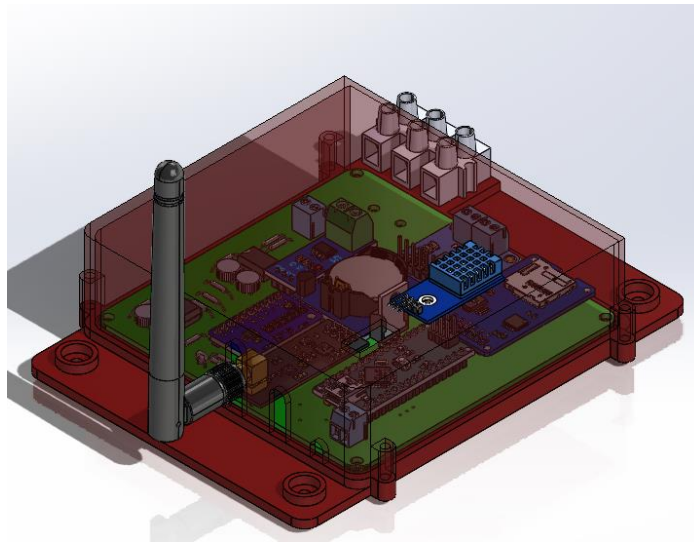


Figura 6. Estructura de Sistema de Medición, creación propia

También, se desarrolla el componente software correspondiente al algoritmo del sistema de medición y aplicación para PC, esta última consta de dos partes: monitoreo para desplegar los datos e información que llegan del sistema de medición, y otra para gestionar, los datos almacenados en la base de datos.

Con los procedimientos anteriores realizados, se dió paso a la implementación del Prototipo Físico, la cual inicia con la instalación del sistema fotovoltaico sin tener en cuenta el sistema de medición, para ello, se usa de la terraza del bloque B de las instalaciones de la Corporación Universitaria Comfacauca, Este sitio cuenta con la inclinación adecuada para que el panel fotovoltaico tenga la incidencia de la irradiancia solar lo más perpendicular posible con la superficie del panel, además de ofrecer una inclinación para evitar el alojamiento de algún residuo de polvo y lluvia, asimismo, estar alejado de cualquier elemento o partes de la edificación que produzcan sombras en el sistema fotovoltaico. Debajo de la estructura, se instalan los demás instrumentos, elementos y

componentes del sistema fotovoltaico, dentro de una caja de distribución de lámina que aisle el sistema del alcance de aguas lluvias o algún otro elemento que pueda ocasionar una falla eléctrica en alguno de los componentes.



Figura 7. Estructura de Sistema de Medición, creación propia

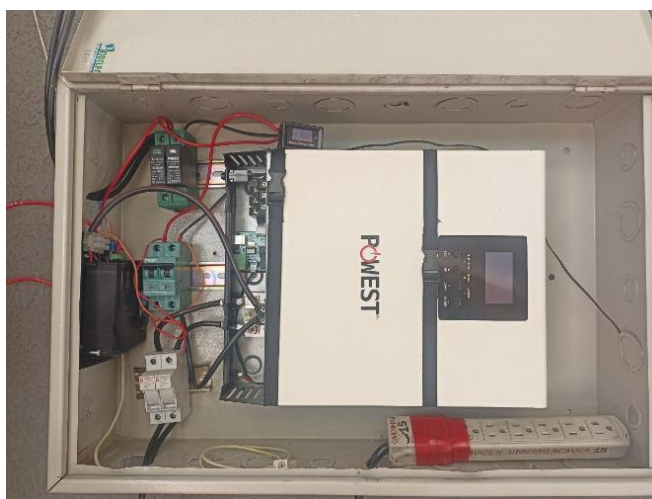


Figura 8. Estructura de Sistema de Medición, creación propia

Una vez instalados los componentes del sistema fotovoltaico, se procede a la implementación del sistema de medición. La actividad inicial es imprimir la placa PCB diseñada, una vez los componentes fueron soldados, se procede a comprobar su funcionalidad, y finalmente se realizan pruebas del sistema de medición completo antes de instalarlo al sistema fotovoltaico.

De igual manera se realiza la implementación del componente gráfico de las interfaces de la aplicación para PC tanto para la función de monitoreo como la función de gestión con la base de datos. Están basados en las normativas de visualización de HMI, se selecciona un tema con colores oscuros resaltándolos detalles importantes como botones, textos, gráficas y demás en colores fuertes CMYK.



Figura 9. Interfaz Sistema de Monitoreo, creación propia

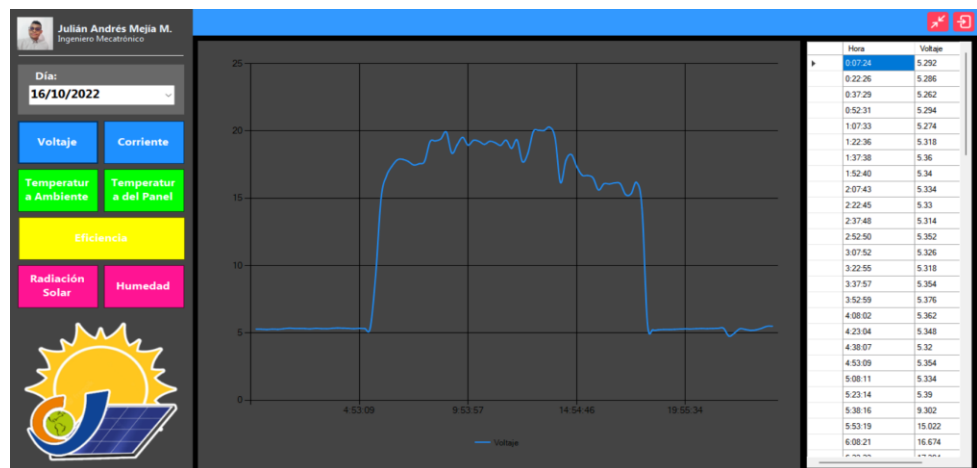


Figura 10. Interfaz Graficadora (Base de Datos), creación propia

Paralelamente se realiza un experimento, el cual consiste en la observación del comportamiento de la temperatura en los paneles. Para esto, se utiliza un sistema alterno en el que, por medio de un microcontrolador, se controla un relé para apertura o cierre del circuito de un panel solar para medir el voltaje en circuito abierto y la corriente en cortocircuito, también, se emplea una pistola de calor para aumentar la temperatura del panel. La Figura 11 evidencia el esquema del sistema mencionado.

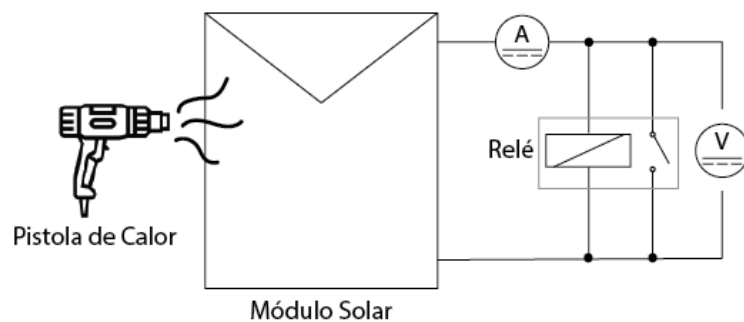


Figura 11. Esquema del Sistema Temperatura/Eficiencia Alterno

3. Resultados

Alcanzadas las dos semanas (15 días) estipuladas para la medición de las variables, se dio paso a analizar los datos guardados en memoria para el análisis de los mismos.

El sistema datalogger fue capaz de almacenar un total de 6252 datos en las que se encontraba registrados el día, la hora, el voltaje y la corriente generada por el panel sin carga, la temperatura ambiente, la temperatura en la superficie del panel y la humedad. Es importante aclarar que no se alcanzaron los 7200 debido a que en cuatro de estos días no se almacenó la información del día completo, además que se eliminaron los datos erróneos, dando como resultado 6238 datos para el análisis.

Lo primero que se hizo con toda la información fue promediarla, de tal manera que alcanzará un poco más de mil doscientos datos, y así, hacer de manera más sencilla su análisis. Para el resto del análisis estadístico, tanto descriptivo como inferencial se utilizó el software IBM SPSS el cual pese a ser un software destinado a las ciencias sociales, también funciona para más tipos de campos como la ciencia, la física, etc. [10]

La primera relación de la temperatura en la superficie del panel y la eficiencia generada. Se realizó en el software IBM SPSS estableciendo como variable independiente la temperatura en la superficie de la celda y como dependiente la eficiencia energética. Se observó que la gráfica que representa la relación de ambas variables no es lineal, así que se consideró para el análisis modelos de regresión no lineales como el logarítmico, cuadrático, inverso, cúbico y exponencial los cuales posee el software SPSS. El resultado de su análisis se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4. Resumen del modelo y estimaciones de parámetro Temperatura en la Superficie del Panel vs. Eficiencia

Ecuación	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Lineal	0.616	1991.967	1	1240	<0.001
Logarítmico	0.681	2652.832	1	1240	<0.001
Inverso	0.718	3163.401	1	1240	<0.001
Cuadrático	0.743	1794.890	2	1240	<0.001
Cúbico	0.748	1226.269	3	1240	<0.001
Compuesto	0.559	1570.626	1	1240	<0.001
Potencia	0.629	2098.844	1	1240	<0.001
S	0.675	2576.172	1	1240	<0.001
Crecimiento	0.559	1570.626	1	1240	<0.001
Exponencial	0.559	1570.626	1	1240	<0.001
Logística	0.559	1570.626	1	1240	<0.001

El R cuadrado más alto fue el del modelo de regresión cúbico, así que se procedió a sacar más características e información, como el ANOVA y los coeficientes de este modelo, mostrados en las Tablas 6 y 7 respectivamente.

Tabla 5. Resumen del Modelo Cúbico [Temperatura en la Superficie del Panel vs. Eficiencia]

R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Desv. Error de la Estimación
0.865	0.748	0.748	5.328

Tabla 6. ANOVA Modelo Cúbico [Temperatura en la Superficie del Panel vs. Eficiencia]

	Suma de cuadrados	gl	Media Cuadrática	F	Sig.
Regresión	104422.752	3	34807.584	1226.269	<0.001
Residuo	35140.555	1238	28.385		
Total	139563.307	1241			

Tabla 7. Resumen del Modelo Cúbico [Temperatura en la Superficie del Panel vs. Eficiencia]

	B	Desv. Error	Beta	t	Sig.
TempCell	7.928	0.695	5.620	11.404	<0.001
TempCell ²	-0.182	0.024	-7.134	-7.464	<0.001
TempCell ³	0.001	0.000	2.322	4.857	<0.001
(Constante)	-83.236	6.154		-13.525	<0.001

Ahora bien, se llevó a cabo el mismo procedimiento, esta vez con la temperatura ambiente, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 8. Resumen del modelo y estimaciones de parámetro Temperatura en la Ambiente vs. Eficiencia

Ecuación	R cuadrado	F	gl1	gl2	Sig.
Lineal	0.313	564.772	1	1240	<0.001
Logarítmico	0.316	573.726	1	1240	<0.001
Inverso	0.318	576.902	1	1240	<0.001
Cuadrático	0.320	291.662	2	1239	<0.001
Cúbico	0.321	292.769	2	1239	<0.001
Compuesto	0.375	745.323	1	1240	<0.001
Potencia	0.378	752.393	1	1240	<0.001
S	0.377	750.692	1	1240	<0.001
Crecimiento	0.375	745.323	1	1240	<0.001
Exponencial	0.375	745.323	1	1240	<0.001
Logística	0.375	745.323	1	1240	<0.001

Por otra parte, con el Sistema Temperatura/Eficiencia Alternativo se observó la influencia de temperatura en la superficie en la eficiencia del panel, para este la temperatura del panel se midió con la cámara termográfica.

Tabla 9. Resultados del Sistema de Temperatura/Eficiencia Alternativo

Temperatura (°C)	Corriente (A)	Voltaje (V)
78	5.41	19.2
104.96	2.23	19.1

4. Discusión

La manera de interpretar las Tablas 4 y 8, es que entre más alto sea el valor de R cuadrado, mejor representa la relación entre ambas variables.

Como se puede observar, en el caso de la relación de la temperatura en la superficie del panel y la eficiencia, en el modelo lineal, solo el 61.6% de la eficiencia es predicha por la variación de la temperatura. Sin embargo, podemos ver otros modelos los cuales son

no lineales que representan una “bondad de ajuste” superior al 70%, como lo son la inversa, la cuadrática y la cúbica. Siendo esta última la que más representación tiene.

Con la información dada por las Tablas 6 y 7 podemos decir que la relación entre la temperatura en la superficie del panel está dada por la ecuación:

$$\eta = 0.001312930826t^3 - 0.182147936t^2 + 7.927808679t - 83.23641625 \quad (1)$$

Donde t representa la Temperatura de Celda en grados centígrados, y η representa a la eficiencia. La manera en la que se puede interpretar esta ecuación es que, pese a que al principio se comporta de manera lineal, llega un momento en el que el aumento de la temperatura en la superficie del panel no permite que la eficiencia siga aumentando, y, por el contrario, se atenúe y disminuya, alcanzando el máximo entre los 34°C y 36°C. No se supone que siga aumentando después de bajar como indica la gráfica, pero, para los datos obtenidos en el rango alcanzado, esta es la mejor ecuación que representa la relación.

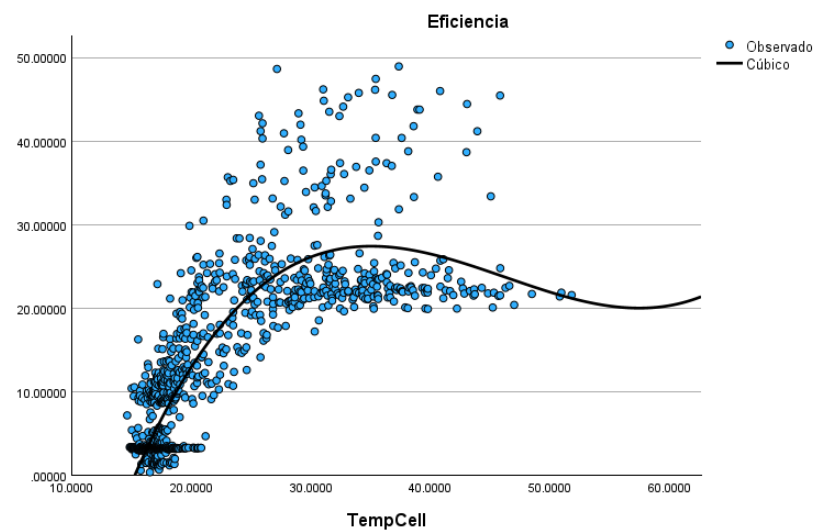


Figura 12. Eficiencia vs. Temperatura en la Superficie, Regresión Cúbica

Para el sistema de medición alterno, el panel contaba con un desperfecto, ya que, una de sus celdas estaba dañada y generaba un punto caliente. Por ende, la temperatura que se tiene en cuenta es la de esa celda en específico ya que todas las celdas están conectadas eléctricamente en serie.

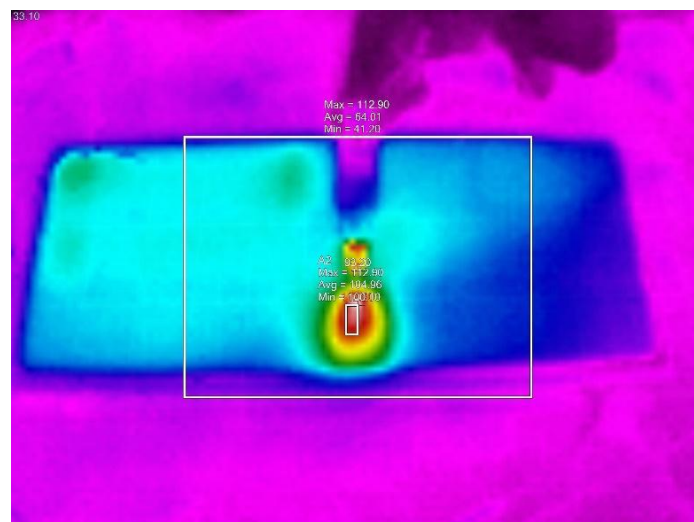


Figura 13. Medición de Temperatura del Sistema Alterno

Por último, como se puede observar en la Tabla 8, ninguno de los modelos de regresión expresa que la temperatura ambiente representa siquiera un 40% de la Eficiencia generada por el panel. Por ende, para los datos obtenidos, se descarta una relación al menos estadísticamente.

5. Conclusiones

En este trabajo se logró mediante la integración de las herramientas de fabricación digital CAD / CAM / CAE, el diseño de un sistema fotovoltaico aislado con conexión en paralelo de dos paneles fotovoltaicos policristalinos de 100W, el desarrollo de un sistema de monitoreo y almacenamiento de datos en tiempo real de las variables físicas y eléctricas como Voltaje DC, Corriente DC, temperatura ambiente y temperatura en la superficie del panel; permitiendo el procesamiento digital de las variables de interés para realizar una evaluación de las variaciones en la generación de energía eléctrica en un sistema fotovoltaico aislado en el centro histórico de la ciudad de Popayán.

Se logró desarrollar una placa de circuito impreso - PCB compacta y acondicionada para la medición de señales eléctricas y electrónicas generadas por un sistema fotovoltaico aislado de baja potencia, el producto final obtenido denominado Caja de Sistema de Medición, integra una carcasa modular de 10.2 cm x 10.6 cm x 4 cm fabricada con el material ácido poliláctico - PLA, una unidad de desarrollo Arduino Nano® como unidad central de procesamiento, un sensor de temperatura ambiente y humedad DHT11, una termocupla PT100, un módulo de acondicionamiento para termocupla MAX31865, un sensor de corriente ACS712-30A, un módulo de reloj DS1307, un módulo conversor Análogo/digital ADS1115, un módulo de almacenamiento micro SD y un protocolo de comunicación inalámbrico NRF24L01L.

Se logró desarrollar una aplicación intuitiva para PC en el entorno de desarrollo Visual Studio® bajo el paradigma de programación orientada a objetos, esta integra el despliegue de interfaces gráficas con herramientas visuales para el monitoreo, almacenamiento, análisis e interpretación de los datos almacenados en la base de datos de las variables de Voltaje DC, Corriente DC, temperatura ambiente y temperatura en la superficie del panel.

Con los 6252 datos obtenidos por medio de la caja de medición y la aplicación de monitoreo y almacenamiento, se hicieron análisis estadísticos que permitieron observar la influencia que tiene la variabilidad de la temperatura ambiente y la temperatura en la superficie del panel en la eficiencia en la generación de energía eléctrica, se observa la relación entre la temperatura que alcanza la superficie del panel bajo las condiciones ambientales de la ciudad de Popayán Cauca y la eficiencia, según la ANOVA de Modelo Cúbico con significancia entre estas dos variables menor que 0.05 (Ver Tabla 6), implicando estadísticamente una relación de estas variables. Para los valores alcanzados por la temperatura en este estudio, se puede decir que la temperatura tiene un efecto atenuante sobre la eficiencia, ya que esta, a medida que la temperatura sube tiende a decrementar su magnitud lo cual puede deberse a la clara relación entre esta temperatura y la corriente del panel, esta información se comprobó por medio de un sistema de medición de Temperatura/Eficiencia alterno, observando la clara afección en la corriente y no en el voltaje que existía al aumento de la temperatura en los paneles fotovoltaicos.

Con los datos obtenidos en el estudio estadístico, no es posible determinar una relación entre la temperatura ambiente y la eficiencia en la generación eléctrica en un sistema fotovoltaico aislado en el centro histórico de la ciudad de Popayán. Sin embargo, al existir antecedentes en los que se demuestra la influencia de esta variable tanto en la eficiencia como en la temperatura ambiente, se puede concluir que es necesario realizar una medición en diferentes puntos en la superficie del panel solar y en las celdas internas del panel para obtener datos de temperatura en secciones del área del panel fotovoltaico.

Contribuciones de autor: **JM:** Contribuyó al desarrollo, diseño, implementación y validación de un prototipo para un sistema fotovoltaico y un dispositivo de medición. **JG:** Revisión final. Almacenamiento y monitoreo junto a una aplicación para computador que cuenta con interfaces para observar las variables así como para graficarlas con ayuda de una base de datos.

Fondos: Esta investigación recibió financiamiento parcial por parte de la Corporación Universitaria de Comfacaucá -Unicomfacaucá-.

Agradecimientos: Agradecemos a la Corporación Universitaria de Comfacaucá por su apoyo, en especial al Grupo de Investigación Sistemas Inteligentes del programa de Ingeniería Mecatrónica por su acompañamiento y asesoramiento.

Conflictos de interés: Los autores declaran no tener ningún conflicto de intereses.

Referencias

- [1] Z. Arifin, D. D. Dwi Prija Tjahjana, S. Hadi, R. Adhi Rachmanto, G. Setyohandoko y B. Sutanto, «Numerical and Experimental Investigation of Air Cooling for Photovoltaic Panels Using Aluminium Heat Sinks,» *Hindawi International Journal of Photoenergy*, p. 9, 2020.
- [2] D. Petreuş, C. Fărcaş y I. Ciocan, «MODELLING AND SIMULATION OF PHOTOVOLTAIC CELLS,» *ACTA TECHNICA NAPOCENSIS*, vol. 49, nº 1, p. 6, 2008.
- [3] S. Dubey, J. N. Sarvaiya y B. Seshadri, «Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World A Review,» *PV Asia Pacific Conference 2012*, p. 11, 2013.
- [4] C. G. Popovici, S. V. Hudîşteanu, T. D. Mateescu y N.-C. Cherecheş, «Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks,» *Sustainable Solutions for Energy and Environment*, p. 8, 2015.
- [5] D. T. Cotfas, P. A. Cotfas y O. M. Machidon, «Study of Temperature Coefficients for Parameters of Photovoltaic Cells,» *Hindawi International Journal of Photoenergy*, p. 12, 2018.
- [6] A. D. Dhass, E. Natarajan y P. Lakshmi, «An Investigation of Temperature Effects on Solar Photovoltaic Cells and Modules,» *International Journal of Engineering*, vol. 27, nº 11, p. 10, 2014.
- [7] P. Billewicz y P. Wegierek, «Laboratory Stand for Examining the Influence of Environmental Conditions on Electrical Parameters of Photovoltaic Cells,» *Lublin University of Technology*, p. 4, 2016.
- [8] N. Wang, M. Wu y G. SHi, «Study on characteristics of photovoltaic cells based on MATLAB simulation,» *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, p. 4, 2011.
- [9] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>.
- [10] I. SPSS®, «IBM SPSS Statistics,» 04 04 2023. [En línea]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/products/spss-statistics>.