

## Implementación de algoritmos MPPT en un controlador de carga para un prototipo de refrigeración con celdas Peltier

### Implementation of MPPT algorithms in a charge controller for a cooling prototype with Peltier cells

Luis Fernando Alape-Realpe<sup>1</sup>  Ginna Andrea Ramírez-Palechor<sup>2</sup>  Andrés Felipe Solís-Pino<sup>3</sup> 

**Para citar este artículo:** L. F. Alape-Realpe, G. A. Ramírez-Palechor, A. F. Solís-Pino, “Implementación de algoritmos MPPT en un controlador de carga para un prototipo de refrigeración con celdas Peltier”, Revista Vínculos, vol 18, no. 1, 19-30, 2021. <https://doi.org/10.14483/2322939X.15464>

Recibido: 09-04-2021 / Aprobado: 01-06-2021

**Resumen:** En este trabajo se muestra la implementación de algoritmos MPPT en un controlador de carga solar que se evalúa en un prototipo de sistema de refrigeración que funciona con energía solar fotovoltaica. Los algoritmos MPPT cuyo significado en español es Seguimiento del Punto de Máxima Potencia, buscan encontrar el mayor nivel de potencia que puede ofrecer un sistema solar fotovoltaico, dado que estos sistemas tienen un bajo rendimiento de aproximadamente el 22% [1], además de la dependencia que tienen de la radiación solar y la temperatura, que lo determinan como un sistema no lineal. Algunos de estos algoritmos son perturbar y observar, conductancia incremental y algoritmos basados en Inteligencia Artificial (IA) [2]. La investigación comprende las etapas de modelado matemático, cálculo de parámetros de potencia e implementación de algoritmos MPPT que optimicen la respuesta del sistema de potencia fotovoltaica. Asimismo, como trabajo adicional y para validar estos algoritmos, este trabajo muestra la elaboración del prototipo del sistema de refrigeración, que utiliza

energía solar fotovoltaica para su funcionamiento, y celdas Peltier para el proceso de refrigeración.

**Palabras clave:** algoritmo MPPT, efecto termoeléctrico, celdas Peltier, controlador de carga.

**Abstract:** This paper shows the implementation of MPPT algorithms in a solar charge controller that is evaluated in a prototype cooling system powered by solar photovoltaic energy. The MPPT algorithms whose meaning in Spanish is Maximum Power Point Tracking, seek to find the highest power level that can offer a solar photovoltaic system, given that these systems have a low efficiency of approximately 22% [1], besides the dependence they have on solar radiation and temperature, which determine it as a nonlinear system. Some of these algorithms are perturbed and observe incremental conductance and Artificial Intelligence (AI) based algorithms [2]. The research comprises the stages of mathematical modeling, calculation of power parameters, and implementation of MPPT algorithms that optimize the response of the PV

1 Ingeniero Físico. Universidad del Cauca. Magister en Sistemas Mecatrónicos. Miembro del Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes de la Corporación Universitaria Comfacauca. [lrealpe@unicomfacauca.edu.co](mailto:lrealpe@unicomfacauca.edu.co)

2 Ingeniera Mecatrónica. Corporación Universitaria Comfacauca. [andreamirez@unicomfacauca.edu.co](mailto:andreamirez@unicomfacauca.edu.co)

3 Ingeniero Mecatrónico. Corporación Universitaria Comfacauca. Magister (c) en computación. Miembro del Grupo de Investigación en Sistemas Inteligentes de la Corporación Universitaria Comfacauca. [andressolis@unicomfacauca.edu.co](mailto:andressolis@unicomfacauca.edu.co)

power system. Also, as additional work and to validate these algorithms, this work shows the development of the prototype of the cooling system, which uses solar photovoltaic energy for its operation, and Peltier cells for the cooling process.

**Keywords:** MPPT algorithm, thermoelectric effect, Peltier cooler, solar charge controller

## 1. Introducción

La presente investigación se centra en la energía solar fotovoltaica, abordando dos temas principales, el primero es la implementación de dos técnicas de algoritmos MPPT (Maximum Power Point Tracking) en un sistema solar fotovoltaico y, para su validación, el desarrollo de un prototipo de sistema de refrigeración con celdas Peltier. La combinación de estos dos temas de investigación da como resultado la creación de un dispositivo de refrigeración que utiliza un sistema fotovoltaico optimizado con un algoritmo MPPT para su funcionamiento.

La importancia de los algoritmos MPPT radica en la mejora del rendimiento en conversión energética de los paneles solares y controlador de carga en aproximadamente un 28% [4].

En esta línea, el desarrollo del prototipo propuesto en este trabajo se utiliza una celdas Peltier para la refrigeración de un sistema refrigerante, que se opera con un sistema solar fotovoltaico, y en su controlador de carga se implementa el algoritmo MPPT. El uso de este tipo de tecnología aliviaría el efecto nocivo que el ser humano tiene sobre el medio ambiente con los gases refrigerantes utilizados en la industria de la refrigeración, ya que estos son altamente dañinos para el ser humano y el ecosistema.

## 2. Algoritmo de Seguimiento de Punto Máximo de Potencia

La conversión de la energía solar en energía eléctrica está directamente relacionada con las coordenadas solares, la radiación, la temperatura, e incluso la orientación del panel, estos cuatro factores permiten dictar la capacidad de conversión de energía del panel [5], hay que tener en cuenta que la conjunción de estos factores no tiene resultados lineales, dando lugar a una potencia desconocida del panel en todo momento. La conversión de energía en los paneles solares no es eficiente. El promedio de los cálculos de eficiencia en el campo es de aproximadamente el 20% mientras que en los laboratorios es del 30%, esto hizo necesario encontrar nuevas alternativas para aumentar la eficiencia global del sistema fotovoltaico.

La razón principal de la baja eficiencia de conversión de los paneles fotovoltaicos se debe a que estos son sistemas no lineales, por lo tanto, no se puede determinar de antemano la potencia final, ya que existen múltiples factores como la irradiancia y la temperatura que influyen directamente en el rendimiento total del panel fotovoltaico [6]. Por lo anterior, la investigación en esta área apunta a la implementación de algoritmos que buscan el seguimiento del punto de máxima potencia o algoritmos MPPT, ya que estos mejoran sustancialmente el proceso de conversión de energía en el panel fotovoltaico en aproximadamente un 30% [7].

Al indagar sobre la energía solar fotovoltaica, se encuentra que el indicador de rendimiento más importante es la potencia de salida del módulo fotovoltaico. Se sabe que la potencia se mide en vatios y es el producto de la corriente por la tensión ( $W=V*I$ ). Algunos gráficos permiten determinar la potencia de salida del panel donde se puede ver una característica interesante y es que los vatios máximos se producen a un voltaje aproximado de 17v, a este punto se le denomina MPP (máximo punto de potencia). Sin embargo, cuando un panel solar se utiliza para cargar una batería de 12v directamente, baja el voltaje del panel solar al mismo

voltaje que la batería, desperdiciando una cantidad significativa de energía. El algoritmo MPPT permite aprovechar la tensión desperdiciada [6].

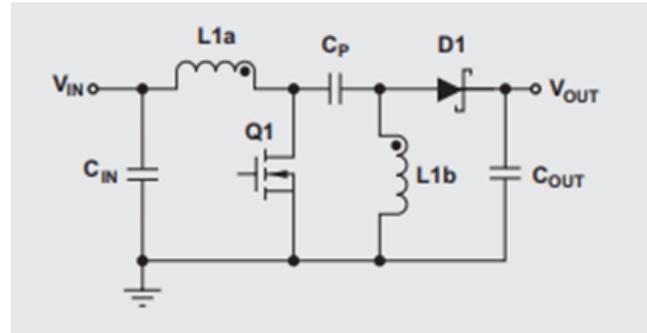
En los algoritmos MPPT existe un concepto denominado Peak Power Tracking (PPT), que es una técnica utilizada para encontrar el punto de máxima potencia del panel fotovoltaico. Por ejemplo, en el caso anterior, los 18v del panel solar deben ser convertidos a 12v de la batería sin pérdida de potencia, este proceso se logra utilizando un convertidor DC/DC (dispositivo estudiado más adelante), este dispositivo electrónico utiliza un Mosfet que cambia el mayor voltaje y la menor corriente del panel solar, a un voltaje mucho menor y mayor corriente de la batería. Esta acción evita la pérdida de potencia del panel solar hacia la batería, ya que transforma la alta tensión del panel en corriente hacia la batería. En realidad, el punto MPP no es fijo, ya que la salida del panel (potencia) depende de la temperatura y la radiación, y por esta razón, se debe asignar un seguidor del punto MPP al convertidor DC/DC, esta unión de dispositivos se llama controlador de carga solar [6].

La capacidad de encontrar el punto MPP o al menos estar lo más cerca posible y en el mayor tiempo es la función de los algoritmos MPPT, estos utilizan un enfoque iterativo para encontrarlo. Generalmente, los controladores de carga utilizan microprocesadores para medir los vatios generados por el panel solar y luego controlar la relación de conversión del convertidor DC/DC a través del ciclo de trabajo del Mosfet de potencia.

## 2.1 Circuito SEPIC

El controlador de carga solar utilizado en la investigación es una configuración Single Ended Primary Inductor (SEPIC). Este tipo de convertidor (Figura 1) es el más utilizado en la carga de baterías, capaz de aumentar o disminuir la tensión de salida independientemente del rango de tensión de entrada. Es importante mencionar que puede reflejar todo el rango de impedancias de la entrada del convertidor a la salida del mismo.

**Figura 1.** Ejemplo básico de un convertidor DC-DC tipo SEPIC



Fuente: [8]

Los convertidores de tipo SEPIC son una topología que puede proporcionar un valor positivo a su salida. Esta tensión de salida puede ser mayor o menor que la de entrada. Al igual que los otros convertidores es controlado por un interruptor llamado Mosfet de potencia, este dispositivo conmuta las señales para transferir la potencia. El uso de este tipo de configuración en el controlador de carga se debe a que esta topología no tiene pérdidas de energía, esto significa que la energía entregada por el panel fotovoltaico se inyecta completamente en la fuente de alimentación del sistema de refrigeración [8].

## 2.2 Controlador de Carga Solar

El desarrollo de un controlador de carga es fundamental porque sirve de plataforma para implementar un algoritmo MPPT. Éste actúa como intermediario entre el panel fotovoltaico y el acumulador de carga (en esta investigación la batería que alimenta el sistema de refrigeración), además de contar con un microcontrolador (Arduino Mega 2560) donde se aloja la programación y el algoritmo. El controlador de carga solar está basado en un circuito SEPIC cuya principal característica es reflejar más o menos tensión de entrada a su salida, ideal para la tarea que debe realizar el controlador ya que debe ser capaz de reflejar varios rangos de tensión para aplicar todas las etapas de carga de una batería [9].

Figura 2. Controlador de carga solar



Fuente: Elaboración propia

### 2.3 Algoritmo MPPT de Perturbación y Observación (P&O)

Este tipo de algoritmo permite cambiar la tensión de funcionamiento del controlador de carga para garantizar la máxima potencia del panel al sistema fotovoltaico aumentando o disminuyendo el ciclo de trabajo del Mosfet de potencia. Este tipo de programación utiliza un enfoque iterativo, en el que compara constantemente la potencia extraída del panel fotovoltaico y actúa en consecuencia.

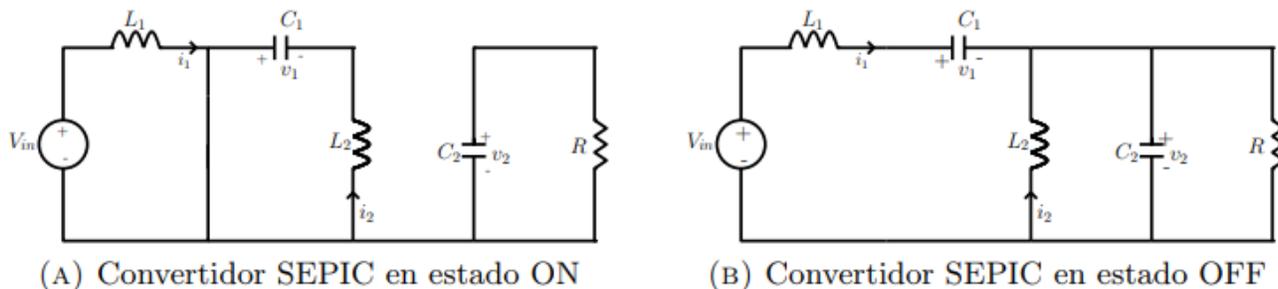
Es importante determinar la dinámica del sistema solar fotovoltaico, para determinar cuál será el comportamiento de este en cualquier instante de tiempo,

con el controlador de carga solar es imprescindible encontrar el modelo matemático del convertidor DC-DC tipo SEPIC, ya que, gracias a este se puede determinar cuáles deben ser los valores cercanos al ciclo de trabajo del PWM. El modelado del convertidor DC-DC utilizado se muestra a continuación.

### 2.4 Modelamiento Matemático Conversor SEPIC en Modo de Conducción Continua (MCC)

Para modelar correctamente el convertidor SEPIC se debe analizar este dispositivo en dos estados, cuando el interruptor del mosfet se encuentra encendido ( $u=1$ ) y cuando está apagado ( $u=0$ ).

Figura 3. Estados de un convertidor DC tipo SEPIC



Fuente: [10]

Aplicando la ley de voltajes de Kirchoff y con el interruptor encendido ( $u=1$ ) se obtienen las siguientes ecuaciones [8].

$$L1 \frac{di}{dt} = vin$$

$$C1 \frac{dv1}{dt} = -i2$$

$$L2 \frac{di2}{dt} = v1$$

$$C2 \frac{dv2}{dt} = -\frac{v2}{R}$$

Mientras para el estado apagado ( $u=0$ ) se encuentran las siguientes ecuaciones.

$$L1 \frac{di1}{dt} = -v1 - v2 + vin$$

$$C1 \frac{dv1}{dt} = i1$$

$$L2 \frac{di2}{dt} = -v2$$

$$C2 \frac{dv2}{dt} = i1 + i2 - \frac{v2}{R}$$

Utilizando el cambio de variable temporal siguiente se obtiene.

$$t = \frac{t}{\sqrt{L1 * C1}}$$

Aplicando el cambio de variable temporal propuesto en [11] se obtienen las siguientes variables de estado.

$$x1 = \frac{i1}{vin} \sqrt{\frac{L1}{C1}}$$

$$x2 = \frac{v1}{vin}$$

$$x3 = \frac{i2}{vin} \sqrt{\frac{L1}{C1}}$$

$$x1 = \frac{v2}{vin}$$

El sistema de ecuaciones queda expresado en los términos de los parámetro  $\alpha1 = \frac{L2}{L1}$ ,  $\alpha2 = \frac{C2}{C1}$  y  $Q = R \sqrt{\frac{C1}{L1}}$  en el siguiente modelo.

$$\frac{dx1}{dt} = -(1 - u)(x2 + x4) + 1$$

$$\frac{dx2}{dt} = (1 - u) x1 - ux3$$

$$\alpha1 \frac{dx3}{dt} = ux2 - (1 - u)x4$$

$$\alpha2 \frac{dx4}{dt} = (1 - u)(x1 + x3) - \frac{x4}{Q}$$

Es importante recordar que la variable  $u$  es la entrada del sistema, en el caso de convertidor SEPIC es el interruptor del mosfet de potencia. Expresado en términos de  $U$  es ecuación:

$$\overline{x1} = \frac{1}{Q} \frac{U^2}{(1-U)^2}$$

$$\overline{x2} = 1$$

$$\overline{x3} = \frac{1}{Q} \frac{U}{(1-U)}$$

$$\overline{x4} = \frac{U}{(1-U)}$$

La salida del sistema que es el voltaje final del conversor DC-DC se representa mediante la variable de estado  $\overline{x4}$ . Por lo tanto, se deben expresar las ecuaciones en este término.

$$\overline{x1} = \frac{\overline{x4}^2}{Q}$$

$$\overline{x2} = 1$$

$$\overline{x3} = \frac{\overline{x4}}{Q}$$

$$U = \frac{\overline{x4}}{\overline{x4} + 1}$$

Ahora, se puede relacionar la salida con la entrada para finalmente encontrar la función de transferencia ( $G$ ) del convertidor DC-DC.

$$(G) = \overline{x4} = \frac{U}{(1-U)}$$

Para encontrar la función de transferencia en términos de valores conocidos para el conversor se invierte la normalización aplicada.

$$\overline{i1} = \frac{1}{R} \frac{\overline{v2}^2}{vin}$$

$$\overline{v1} = vin$$

$$\overline{i2} = \frac{\overline{v2}}{R}$$

$$\overline{v2} = \frac{U}{(1-U)} vin$$

Donde,

$$U = \frac{\overline{v2}}{\overline{v2} + vin}$$

Las determinaciones de las anteriores expresiones matemáticas se basan en las fuentes [12] y [8].

## 2.5 Algoritmo de Perturbación y Observación modificado

El funcionamiento de los algoritmos P&O busca el punto MPP (punto de máxima potencia), que varía constantemente debido a la radiación y la temperatura. La lógica que sigue este tipo de algoritmos es la siguiente cuando la potencia del panel fotovoltaico aumenta, significa que el punto de funcionamiento se

ha desplazado hacia el MPP, por lo tanto, la tensión de funcionamiento es perturbada en la misma dirección aumentando el ciclo de trabajo, sin embargo, si la potencia extraída del panel fotovoltaico disminuye, el punto de funcionamiento se desplaza en dirección contraria a la ubicación del MPP, debido a esto, la tensión de funcionamiento es perturbada en dirección contraria a la que tenía. Una vez alcanzada la máxima potencia del algoritmo, el punto de operación del panel solar fluctúa alrededor de él manteniendo un ciclo de trabajo prácticamente estable [13].

Es importante aclarar que con este proyecto de investigación se utilizó un panel fotovoltaico que está sobredimensionado, esto significa que la potencia máxima que puede entregar el panel fotovoltaico es mayor a la que necesita la batería del sistema de refrigeración, por esta razón, es necesario tomar precauciones al momento de cargar el acumulador, ya que la corriente de carga o la caída de voltaje pueden dañar o causar efectos nocivos en la vida de la batería, por lo tanto, se aplicó un limitador de corriente al momento de cargar la batería.

Con el algoritmo P&O para el controlador de carga solar, se hicieron algunas reformas en su lógica, ya que se encontró que la mayoría de ellos no consideran la corriente máxima a la que se deben cargar los acumuladores si son pequeños, con el acumulador de 7Ah utilizado, el fabricante recomienda que la corriente máxima de carga sea de 700 miliamperios, por lo tanto, el algoritmo P&O busca la máxima potencia hasta llegar a ese límite de corriente, estableciendo un límite de transferencia de potencia y dejando el ciclo de trabajo fijado en este punto. La figura 3 muestra el diagrama de flujo correspondiente al algoritmo P&O modificado.

### 3. Sistema Refrigerante con Efecto Termoeléctrico

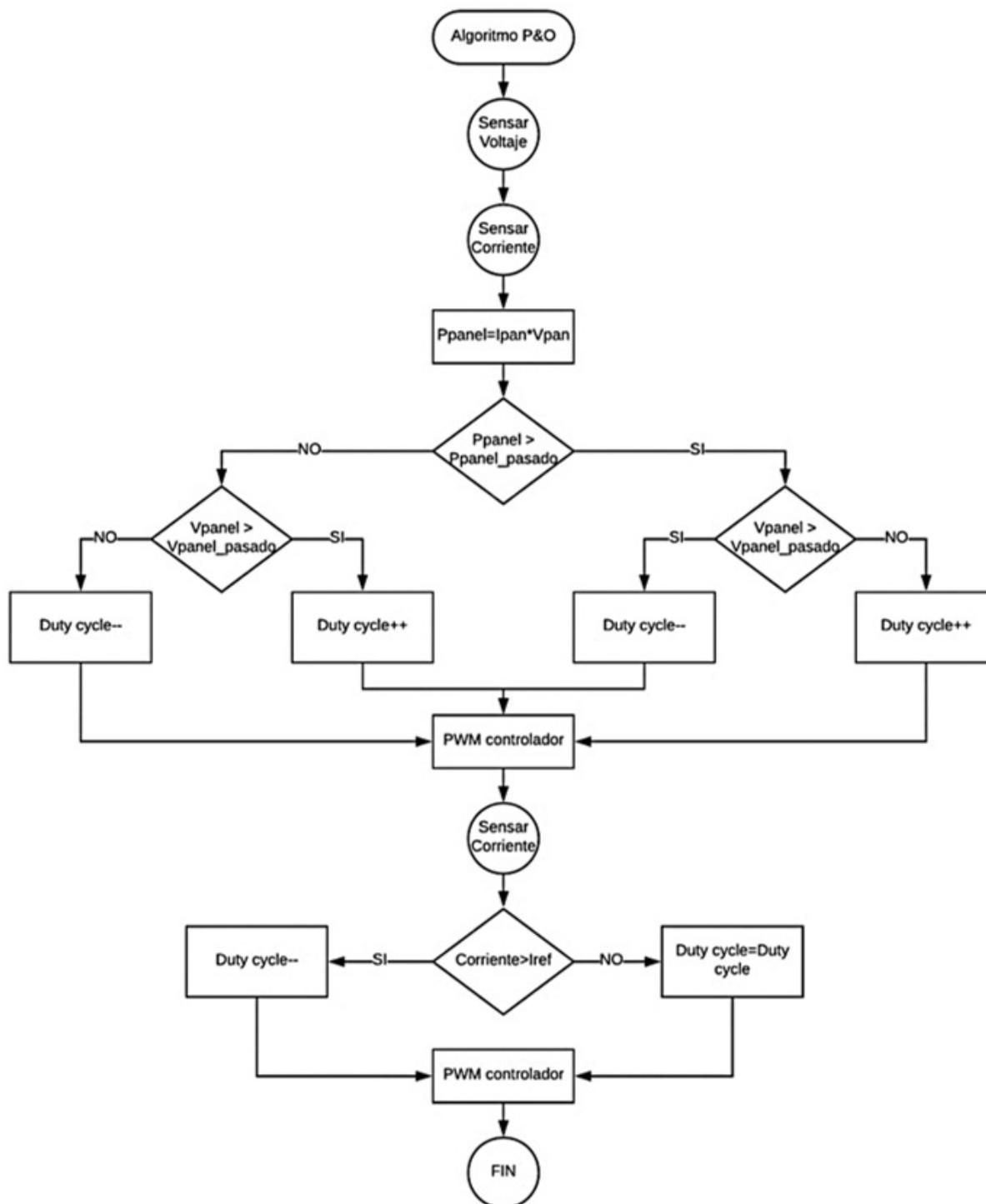
El sistema de refrigeración con efecto termoeléctrico es un prototipo diseñado para disminuir la temperatura en

un espacio reducido utilizando el efecto termoeléctrico. Es independiente de la corriente eléctrica ya que utiliza una batería de 7Ah del tipo VRLA para su funcionamiento. La utilización del acumulador de carga responde a dos razones: la primera, la utilización de una fuente alternativa a la corriente eléctrica convencional, que permite anular la dependencia del sistema a este tipo de energía, debido a que el dispositivo se utiliza en espacios donde la corriente eléctrica es escasa o directamente no se encuentra, además de ayudar a reducir el gran gasto energético que utilizan los dispositivos refrigerantes comunes. La segunda razón es la necesidad de aplicar y evaluar la eficiencia del algoritmo de carga MPPT en un caso real, para determinar si se cumplen o no los objetivos de la investigación.

Utilizar el efecto termoeléctrico obedece a encontrar una alternativa ecológica a los dañinos gases refrigerantes, ya que estos según dos estudios pueden ser tres mil veces más dañinos que el Co2 [14], por lo tanto, es necesario encontrar nuevas formas de producir frío sin dañar el medio ambiente, además, una de las principales características distintivas de este dispositivo es su carácter portátil con un peso aproximado de 7 kg, permite al usuario transportar el sistema de un lugar a otro y en pleno funcionamiento, ofreciendo una alternativa a otros dispositivos de contenedores y considerando los respectivos ajustes de salubridad, que deben hacerse al contenedor obviando los respectivos cambios de salubridad que deben hacerse al contenedor. A continuación, se pueden ver las ilustraciones del prototipo terminado del sistema de refrigeración con efecto termoeléctrico.

Es importante destacar que uno de los principales resultados de la investigación en el apartado del sistema de refrigeración es la aplicación realizada para el usuario ya que esta permite controlar y visualizar las variables del sistema sin tener contacto físico con el mismo.

Figura 4. Algoritmo P&O modificado para el controlador de carga solar



Fuente: Elaboración propia

**Figura 5.** Sistema Refrigerante con efecto termoeléctrico

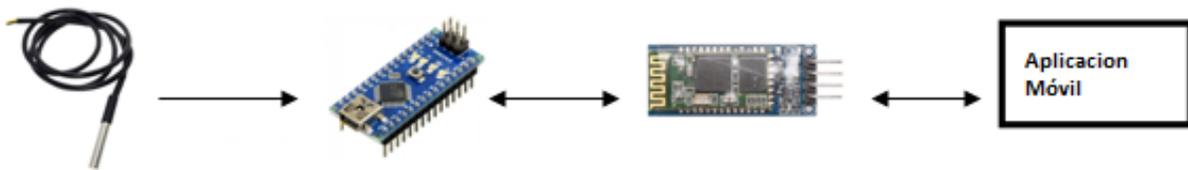


Fuente: Elaboración propia

### 3.1 Método “Aplicación Móvil”

El método de entrada se denominó “aplicación móvil” porque el dispositivo actúa como una pantalla de información. Este procedimiento tiene la particularidad de ser bidimensional como se puede ver en la Figura 5, por lo tanto, la aplicación móvil y el Bluetooth puede enviar como recibir información, permitiendo, por ejemplo, visualizar la información de temperatura en tiempo real, cambiar la referencia del sistema en cualquier instante de tiempo, además, enviar información a distancia ya que gracias al dispositivo de comunicación, se puede establecer una conexión hasta 100 metros de distancia en la línea de visión [15].

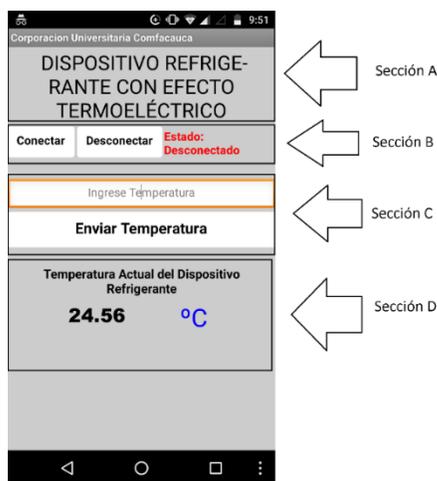
**Figura 6.** Secuencia de información en el método de entrada tipo aplicación móvil



Fuente: Elaboración propia

La aplicación móvil se detalla en varias secciones tal como se muestra en la figura:

**Figura 7.** Aplicación móvil para dispositivo refrigerante pantalla principal



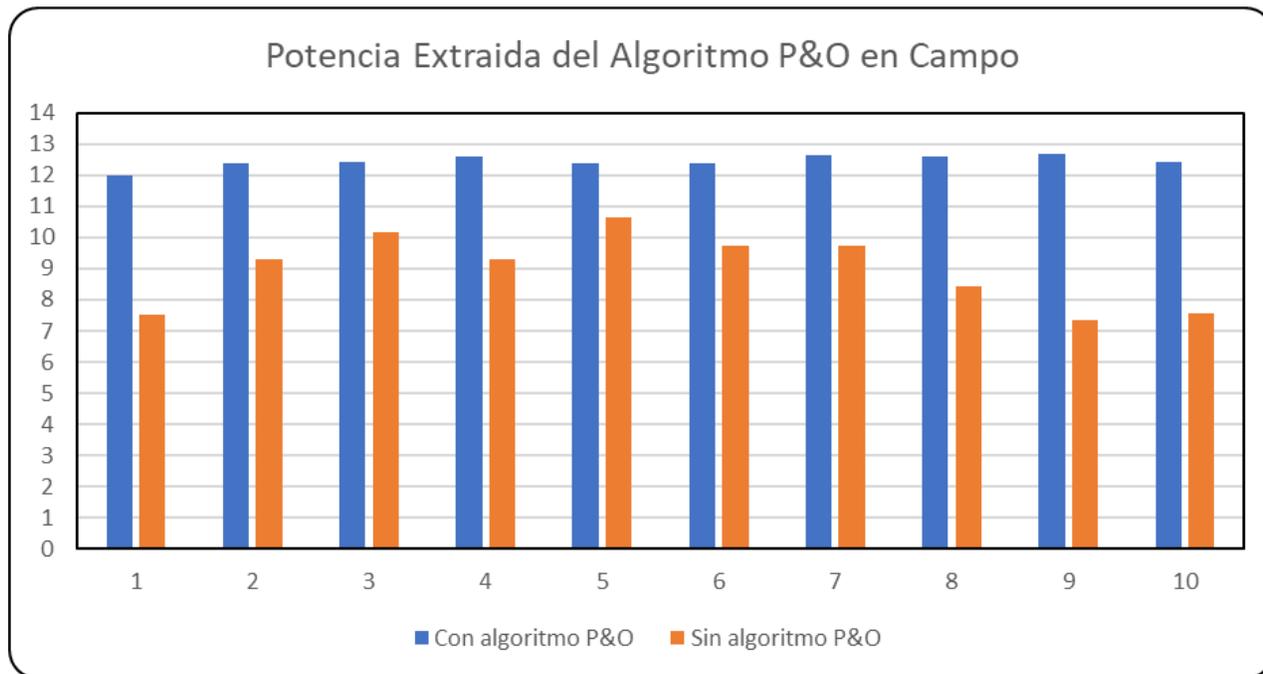
Fuente: Elaboración propia

## 4. Resultados

Los resultados arrojados por esta investigación son los siguientes:

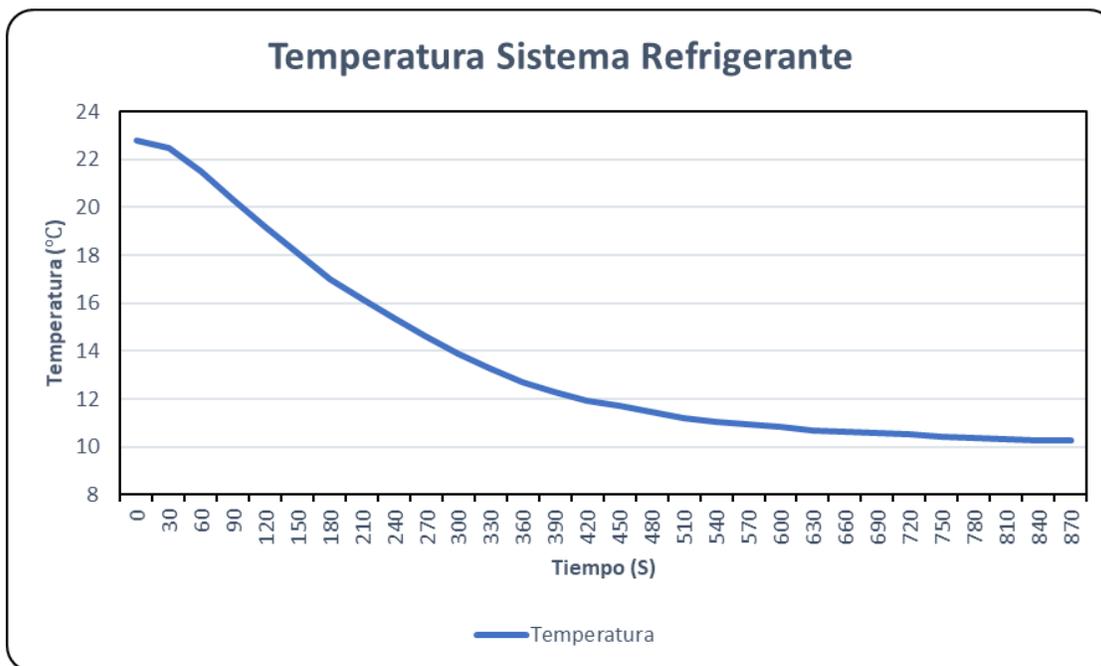
- Mejoramiento de la potencia extraída del panel fotovoltaico, gracias al algoritmo MPPT de perturbación y observación aproximadamente en un 20%. Como se puede apreciar en la siguiente figura el mejoramiento de la potencia extraída del panel mejora ostensiblemente.
- Controlador de carga solar modular capaz de alojar cualquier algoritmo MPPT que utilice el ciclo de trabajo para manejar la potencia, como se puede apreciar en la sección del controlador de carga.
- Sistema refrigerante que utiliza el efecto termoeléctrico como medio de disminución de la temperatura

**Figura 8.** Comparación de potencias extraídas del panel con algoritmo P&O y sin algoritmo en horas de la tarde



Fuente: Elaboración propia

**Figura 9.** Curva de rendimiento del sistema refrigerante a una temperatura ambiente 22.85 °C.



Fuente: Elaboración propia

## 5. Conclusiones

La determinación de parámetros físicos del controlador de carga solar y del sistema refrigerante se cumplió satisfactoriamente, dado que el controlador ha podido manejar las cargas de potencia que se han requerido para cargar la batería, además, de servir como plataforma de pruebas del algoritmo MPPT. Lo mismo ocurre con el dispositivo de refrigeración, ya que se logró una autonomía eléctrica aproximada de dos (2) horas, lo que permite que el dispositivo funcione en lugares donde no se dispone de corriente eléctrica convencional.

La presente investigación cumplió con el objetivo de desarrollar un algoritmo MPPT (algoritmo P&O) para mejorar el rendimiento de carga de la batería del sistema de refrigerante con efecto termoeléctrico.

Una correcta caracterización del panel fotovoltaico permite determinar el valor de tensión donde se puede extraer la máxima potencia, permitiendo establecer una base para el algoritmo MPPT y así poder identificar cuál es el MPP.

El controlador de carga solar implementado funciona correctamente de acuerdo a los requerimientos planteados en el capítulo dos (2), monitoreando constantemente la batería para determinar las fases de carga, la corriente y el voltaje. Para esta tarea, desarrolló módulos de protección constante del sistema para evitar un impasse, así como para preservar la vida de la batería y evitar el efecto memoria.

La parte física de los dos prototipos cumplió con los parámetros y características requeridas, eligiendo materiales ligeros y resistentes, realizando los respectivos diseños para que cada elemento estuviera en el lugar adecuado y el ensamblaje de cada pieza estuviera previsto.

Las celdas Peltier son una opción válida para reducir la temperatura en lugares cerrados, siempre y cuando la

energía no sea un impedimento importante, ya que el alto consumo energético de estos dispositivos, reduce las posibilidades de aplicación en diferentes campos, pero en cuanto a su rendimiento e impacto en el medio ambiente son aceptables.

## Referencias

- [1] Pablo Alcalde San Miguel, *Electrotecnia*, Madrid: Paraninfo, 2016.
- [2] A. Smets, K. Jäger y I. Olindo, *Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems*, Cambridge: UIT Cambridge, 2016.
- [3] «Popayán, Potencia en Energía Solar que debe utilizar,» *Periodico La Campana*, Popayán, 2016.
- [4] A. Castejon Oliva y G. Santamaria Herranz, *Instalaciones Solares Fotovoltaicas*, Madrid: Editex, 2010.
- [5] V. M. Mateo, *Instalaciones Generadoras Fotovoltaicas*, Madrid: Ediciones Paraninfo, 2015.
- [6] T. Nolan, «Tim Nolan,» Mayo 2014. [En línea]. Disponible: <http://www.timnolan.com/index.php?page=arduino-ppt-solar-charger>
- [7] B. E. Tarazona-Romero, Álvaro Campos-Celador, Y. A. Muñoz-Maldonado, C. L. Sandoval-Rodríguez, J. G. Ascanio-Villabona, "Prototype of lineal solar collector Fresnel: Artesanal system for the production of hot water and/or water vapor", *Visión electrónica*, vol. 14, no. 1, pp. 35–42, 2020. <https://doi.org/10.14483/22484728.16013>
- [8] Texas Instruments Incorporated, «Texas Instruments,» *Texas Instruments*, Diciembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.ti.com/lit/an/slyt309/slyt309.pdf> [Último acceso: 1 Marzo 2018].

- [9] M. Wens y M. Steyaert, Design and Implementation of Fully-Integrated Inductive DC-DC Converters in Standard CMOS, New York: Springer Science & Business Media, 2011. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-1436-6>
- [10] A. J. M. Sanchez, «Universidad Nacional de Colombia,» 2015. [En línea]. Available: <http://bdigital.unal.edu.co/48048/18/15051773.pdf>
- [11] A. M. G. Aguirre, «Análisis de la dinámica de un convertidor Cuk controlado con ZAD y PWM,» Manizales, 2014.
- [12] E. M. Benavides Farias y H. P. Rosario Morales, Implementación de un Sistema de Regulación para el Seguimiento del Punto de Máxima Potencia en Paneles Fotovoltaicos, Quito, 2010.
- [13] A. F. Solis Pino, G. A. Ramirez, y L. F. Alape, «Proposal of a Cooling Device with Peltier Cells Powered by an Independent Photovoltaic System: A Case Study», Ing. Cienc., vol. 17, n.o 33, pp. 151-183, 2021. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.17.33.7>
- [14] Greenpeace, «Gases refrigerantes son más peligrosos de lo que se pensaba,» Greenpeace, 24 Junio 2009.
- [15] Sigmaelectronica, «Sigmaelectronica LTDA.,» 28 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://www.sigmaelectronica.net/manuals/HOJA%20REFERENCIA%20TARJETA%20HC-05%20ARD.pdf>

