



Propuesta de un dispositivo refrigerante con celdas Peltier alimentado con un sistema fotovoltaico independiente: un caso de estudio

Andrés Felipe Solís Pino¹, Ginna Andrea Ramírez Palechor², Luis Fernando Alape Realpe³

Recepción: 06-07-2020 | Aceptación: 16-12-2020 | En línea: 10-05-2021

MSC: 74G65

doi:10.17230/ingciencia.17.33.7

Resumen

Actualmente, múltiples estudios intentan establecer alternativas que permitan disminuir las consecuencias del gasto energético y los gases de efecto invernadero. En este sentido, la energía solar fotovoltaica se ha convertido en una opción factible para aplacar esta problemática, asimismo, se han buscado nuevas tecnologías para disminuir el gasto energético de los dispositivos refrigerantes, porque consumen demasiada energía y utilizan refrigerantes dañinos para cumplir su tarea. Por esta razón, las celdas Peltier pueden ser una opción viable para disminuir la temperatura en espacios cerrados sin generar residuos o emisiones nocivas. En el presente trabajo se plantea combinar estas iniciativas en un sistema

¹ Corporación Universitaria Comfacaucua, afsolis@unicauca.edu.co, Popayán, Colombia.

² Corporación Universitaria Comfacaucua, ginnaramirez@unicomfacaucua.edu.co, Popayán, Colombia.

³ Corporación Universitaria Comfacaucua, lrealpe@unicomfacaucua.edu.co, Popayán, Colombia.

unificado para aprovechar ambas tecnologías, implementando un sistema refrigerante que utiliza el efecto termoeléctrico para reducir la temperatura en su interior, que es alimentado por un sistema fotovoltaico autónomo utilizando algoritmos de seguimiento del punto de máxima potencia para mejorar su rendimiento. Los resultados reflejan que el dispositivo es capaz de disminuir la temperatura en su interior, permitiendo la conservación de elementos a temperaturas bajas y constantes, sin los inconvenientes de los refrigeradores comunes. Finalmente, se concluye que este sistema es una posibilidad plausible para sustituir las tecnologías de enfriamiento donde el acceso a la energía eléctrica es limitado.

Palabras clave: Celdas Peltier; efecto termoeléctrico; sistema fotovoltaico; temperatura.

Proposal of a Cooling Device with Peltier Cells Powered by an Independent Photovoltaic System: A Case Study

Abstract

Currently, multiple studies are trying to establish alternatives that will allow for the reduction of the consequences of energy consumption and greenhouse gases. In this sense, photovoltaic solar energy has become a feasible option to alleviate this problem, also, new technologies have been sought to reduce the energy consumption of cooling devices, because they consume too much energy and use harmful refrigerants to accomplish their task. For this reason, Peltier cells can be a viable option to lower the temperature in closed spaces without generating waste or harmful emissions. In the present work, we propose to combine these initiatives in a unified system to take advantage of both technologies, implementing a cooling system that uses the thermoelectric effect to reduce the temperature inside, which is fed by an autonomous photovoltaic system using maximum power point tracking algorithms to improve its performance. The results show that the device is capable of lowering the temperature inside, allowing the conservation of elements at low and constant temperatures, without the disadvantages of common refrigerators. Finally, it is concluded that this system is a plausible possibility to replace cooling technologies where access to electrical energy is limited.

Keywords: Peltier cells; thermoelectric effect; photovoltaic system; temperature.

1 Introducción

El cambio climático se ha transformado en una verdadera preocupación para la sociedad en general [1], sus efectos a mediano y largo plazo pueden ser devastadores para la humanidad. Entre las principales consecuencias se encuentran el calentamiento de la superficie terrestre y la pérdida de ecosistemas naturales [2], por lo que los distintos gobiernos han establecido pactos para disminuir o retardar las consecuencias de este efecto. Entre las principales medidas adoptadas se encuentran los protocolos de Kioto [3] y Montreal [4], que buscan reducir la emisión de gases de efecto invernadero que aceleran el calentamiento global, además, de promover la generación de un desarrollo sostenible, de forma que se utilicen o integren fuentes de energía no convencionales para disminuir la demanda energética [5].

Actualmente, el uso desmedido de la energía eléctrica y la emisión de gases que aceleran el efecto invernadero es un tema de preocupación para los gobiernos de América Latina. Las investigaciones indican que la demanda energética en los próximos 15 años aumentará en un 80 % [6], por lo que han surgido varias estrategias para reducir el consumo de energía convencional. Entre las principales se encuentra el fomento de un entorno competitivo para la generación de energía renovable con un enfoque en la creación de sistemas distribuidos [7], y en segundo lugar, la importancia de promover el ahorro en los hogares y las pequeñas empresas, para ayudar a disminuir esta demanda [8]. Puntualmente, Sariego Toledo *et al.* en [9] indican que el mayor gasto energético en los hogares lo realizan los aparatos refrigerantes, que por lo general utilizan tecnologías poco “amigables” con el medio ambiente. Las investigaciones apuntan a que el gasto energético de un refrigerador representa el 32 % del consumo energético en las viviendas [10], además estos electrodomésticos utilizan gases refrigerantes que contribuyen al deterioro de la capa de ozono [11]. Por lo tanto, es necesario encontrar nuevas estrategias para mantener las temperaturas de los alimentos de forma segura, sin el costo ambiental y energético que conlleva la utilización de refrigeradores.

Recientemente, la comunidad científica ha seguido la tendencia de estudiar e implementar tecnologías que tengan un impacto mínimo sobre el medio ambiente [12]. En el caso de la presente investigación se ha adoptado las recomendaciones de las Naciones Unidas para disminuir el

gasto energético de los sistemas refrigerantes, por lo tanto, se estudia la implementación del efecto Peltier y de los algoritmos seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, por sus siglas en inglés Maximum Power Point Tracking), como alternativas reales para reducir el impacto ambiental causado por estos dispositivos, de forma que, se reduzca el gasto energético y no se utilicen fluido frigorígenos. Concretamente, el efecto Peltier es una propiedad que está asociada al efecto termoeléctrico, que consiste en hacer circular una diferencia de potencial en un conductor dando lugar a una diferencia de temperatura [13] en el material. Esta propiedad se ha utilizado como parte de los sistemas de refrigeración para disminuir la temperatura en zonas localizadas [14]. Por otra parte, los algoritmos MPPT son directrices que permiten aprovechar la máxima potencia disponible de los paneles Fotovoltaicos (FV), en determinadas condiciones [15]. La implementación de este tipo de tecnologías es importante, porque la potencia máxima de los sistemas fotovoltaicos varía en función de la radiación solar, la temperatura ambiente y la temperatura de las células solares, por lo tanto, no utilizar este tipo de estrategias conllevaría un desperdicio de energía, lo que se traduce en menos energía eléctrica generada del panel FV [16].

En la literatura consultada se encontró que han sido pocos los estudios que relacionan la implementación de los algoritmos MPPT en conjunción con el efecto Peltier. Puntualmente, se puede mencionar la investigación de Kane *et al.* en [17], donde utilizan esta propiedad (efecto Peltier) como medio para mantener la temperatura estable de un arreglo fotovoltaico con los algoritmos MPPT, permitiendo que el arreglo FV no decrezca en su rendimiento, además, usa el efecto Seebeck para generar energía adicional a partir de la temperatura. El autor concluye que el uso de la celda Peltier ayudó a disminuir la temperatura del panel en un 26 %, mejorando así el rendimiento del sistema fotovoltaico y su vida útil. Otra investigación relacionada es la de Jin Du *et al.* en [18], que utiliza una celda Peltier como medio de experimentación para probar el uso de un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia, en este caso, la celda es alimentada con un panel fotovoltaico y el algoritmo se utiliza para suministrar la mayor potencia posible, mejorando el rendimiento de la celda al máximo. El autor concluye que el uso de estas tecnologías puede mejorar el beneficio de los sistemas fotovoltaicos, añadiendo que

la utilización de la energía solar es una alternativa plausible para tener en cuenta cuando se alimentan los sistemas refrigerantes. Otro campo donde han interactuado el efecto Peltier y los algoritmos MPPT es en la construcción de generadores termoeléctricos. En las investigaciones [19] y [20] se han planteado mejorar el rendimiento de estos generadores utilizando el efecto Seebeck (efecto inverso al Peltier) para generar energía eléctrica a partir de los diferenciales de temperatura, apareciendo el efecto Peltier como una propiedad no deseada ya que se considera parasitario, porque la corriente eléctrica provoca una reducción de la conductancia térmica, teniendo como consecuencia la disminución del rendimiento del sistema. Es importante aclarar que el uso del efecto Peltier como medio para disminuir la temperatura en un sistema refrigerante no es novedoso, por ejemplo, Najafi y Woodbury en [21] proponen un método de enfriamiento utilizando el efecto Peltier para disminuir la temperatura en los sistemas fotovoltaicos de concentración solar, teniendo resultados positivos, ya que, el sistema es capaz de mantener la temperatura estable usando una cantidad razonable de energía eléctrica. También, Francis *et al.* en [22] ponen a prueba distintas propiedades asociadas al efecto termoeléctrico bajo condiciones variables, entre las que se encuentra el efecto Peltier. Los autores concluyen que esta propiedad es una candidata potencial para ser tenida en cuenta a la hora disminuir la temperatura de forma amigable con el ambiente, además, es importante aclarar que estos resultados se obtuvieron mediante simulaciones y no en un escenario real. Finalmente, Astrain *et al.* en [23] desarrollan un modelo computacional en donde simulan distintas condiciones para el efecto Peltier y luego llevan estas simulaciones a la realidad, demostrando que es una alternativa plausible para mantener la temperatura estable y con ventajas sobre otros sistemas de enfriamiento como el de compresión de vapor.

Por otra parte, es importante decir que la utilización del efecto Peltier como medio para disminuir o mantener la temperatura es válido, pero tiene una serie de desventajas, entre las que se encuentra principalmente el alto consumo energético de los dispositivos que usan este efecto [24], por tanto, la aplicación del efecto Peltier por sí solo no aporta una solución adecuada al creciente consumo energético. Por ende, se ha desarrollado un prototipo de sistema refrigerante que utiliza el efecto Peltier como medio para mantener o disminuir la temperatura de su interior, evitando

la utilización de gases refrigerantes, además, este prototipo es alimentado por un sistema de energía fotovoltaica, que utiliza un controlador de carga programable con algoritmos MPPT para mejorar su rendimiento, lo que permite moderar el uso de la energía eléctrica convencional.

El presente documento se encuentra estructurado de la siguiente forma: En la sección 2 se detalla los principales materiales y métodos utilizados, posteriormente en la sección 3, se presentan los principales resultados obtenidos en la investigación, finalmente, en la sección 4 se exponen las conclusiones principales obtenidas, así como los trabajos futuros.

2 Metodología

En esta sección se presentarán los materiales y métodos utilizados para la construcción del controlador de carga, el sistema refrigerante y la lógica de los algoritmos MPPT. La propuesta tiene un alto grado de complejidad, debido a que, conjuga elementos multidisciplinarios como la producción de energía solar fotovoltaica, el efecto termoeléctrico y la conjunción de elementos electrónicos y eléctricos, por lo que se utilizó las pautas del diseño mecatrónico [25] como elemento integrador para lograr una sinergia correcta entre las tecnologías. En concreto, para la transformación de la energía solar en eléctrica se utilizó un panel fotovoltaico Solar Plus Energy de 130w. Respecto al controlador de carga se construyó en base a lo propuesto por Halder en [26], con las adecuaciones necesarias para el contexto de la investigación, además, se utilizó un Arduino Nano como controlador principal del dispositivo donde se aloja el algoritmo MPPT y el control de carga de la batería. En cuanto al sistema de refrigeración, se puede aludir que su construcción consta de varias etapas iniciando con la fabricación física del dispositivo, el algoritmo de control de la temperatura y la comunicación entre el dispositivo y el usuario. Para esto, se utilizó la celda Peltier TEC1-12706 como dispositivo de enfriamiento, además, de SolidWorks [27] para las simulaciones de transferencia de calor y 3D, por último, se empleó App Inventor [28] para el desarrollo de la aplicación del refrigerador.

2.1 Desarrollo del controlador de carga

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos que convierten la energía solar en energía eléctrica [29]. Entre los principales componentes de este tipo de sistemas se encuentra el controlador de carga, que es el encargado de proteger las baterías de sobrecargas o descargas profundas del sistema. Un controlador de carga puede estar dotado de inteligencia utilizando un microcontrolador que permita albergar algoritmos MPPT y de esta forma mejorar el rendimiento del arreglo fotovoltaico [30]. A continuación, se puede observar el circuito eléctrico del controlador de carga utilizado en la investigación, donde se puede notar mediante un recuadro el convertidor DC-DC tipo SEPIC para realizar el manejo de potencias. Esta configuración permite utilizar distintos tipos de algoritmos MPPT usando el ciclo de trabajo como medio para realizar control sobre la potencia de salida del dispositivo [31]. En la figura 1 se puede apreciar el esquema eléctrico del controlador de carga utilizado en la investigación

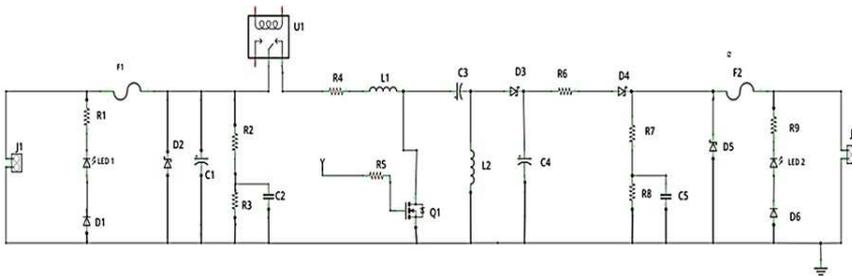


Figura 1: Circuito eléctrico del controlador de carga utilizado en la investigación.

2.2 Dimensionamiento del convertidor SEPIC

Los controladores de carga suelen consistir principalmente de un microcontrolador y un convertidor DC-DC, que son los dispositivos encargados de transformar el voltaje continuo a otro valor de Voltaje (V) [32]. En esta investigación se utilizó un convertidor del tipo SEPIC, ya que, esta configuración presenta pérdidas insignificantes de energía cuando se realiza el proceso de conversión energética, esto quiere decir que la potencia

entregada por el panel FV se inyecta en su mayor parte a la carga resistiva (sistema refrigerante), además, esta tipología es capaz de reflejar todo el rango de impedancias de la entrada del convertidor en la salida de este [33].

El modelado del convertidor se realizó de acuerdo con los documentos de investigación de da Silva *et al.* en [34] y Reiter *et al.* en [35], donde se proveen las instrucciones necesarias para realizar el modelamiento según los requerimientos del sistema. Los autores expresan que las ecuaciones de los inductores L1 y L2 y los condensadores C1 y C2 son ecuaciones análogas, por lo tanto, su comportamiento es el mismo y están relacionadas matemáticamente.

El cálculo de valor del inductor L1 y el condensador C2, se pueden realizar utilizando las expresiones (1) y (2) respectivamente, donde se llega a un valor aproximado de 14 mH para el inductor L1 y L2 y $64\mu\text{F}$ para el condensador C1 y C2, siguiendo la Figura 1.

$$L1 = \frac{V_{in} * \varphi}{f * \delta L1} \quad (1)$$

$$C1 = \frac{I_{in} * (1 - \varphi)}{\delta V C1 * f} \quad (2)$$

Específicamente, en las ecuaciones (V_{in}) es el voltaje de entrada, (φ) es el ciclo de trabajo, (f) la frecuencia de operación y (δ) L es la corriente en el punto de máxima potencia.

2.3 Dimensionamiento del sistema fotovoltaico autónomo

La energía solar fotovoltaica cumple un rol fundamental en el funcionamiento del dispositivo propuesto, dado que la conversión de energía solar a eléctrica permite alimentar el sistema de control y potencia del prototipo refrigerante. Los principales componentes del sistema fotovoltaico son el banco de baterías, el controlador de carga, el panel solar y la celda peltier.

La determinación del tipo de batería utilizada en la investigación se basó en la carga energética que debe soportar el sistema fotovoltaico, normalmente se utilizan las del tipo Ácido-Plomo Regulada por Válvula

(VRLA), debido a que, no necesitan de mantenimiento y pueden ser ubicadas en diferentes posiciones sin sufrir contratiempos [36]. El dimensionamiento eléctrico del sistema propuesto se realizó según lo expuesto en el documento de Salamanca-Avila en [37], donde se plantea una serie de ecuaciones para determinar el gasto energético requerido por un sistema fotovoltaico independiente. En la siguiente tabla se puede observar el dimensionamiento eléctrico del sistema propuesto.

Tabla 1: Dimensionamiento eléctrico del sistema propuesto

Dispositivos	Cantidad	Consumo	Horas de uso	Total
Celda Peltier	1	55	1	55
Pantalla LCD	1	0.125	3	0.375
Arduino Nano	1	3	3	9
Otros	1	2	3	6
Total				70.4

El gasto energético del sistema fotovoltaico propuesto es de 70.4 de Watts-Hora (Wh), por lo que el dispositivo propuesto debe asegurar esta cantidad de energía en todo momento.

$$Ep = E * Fc \tag{3}$$

$$Ci = \frac{Ep}{Vba} \tag{4}$$

Las ecuaciones (3) y (4), permite determinar la potencia que requiere el sistema refrigerante para su funcionamiento (Ep) y la corriente necesaria de la batería (Ci).

Ahora bien, basados en las ecuaciones anteriores se obtuvieron los siguientes requerimientos energéticos para el sistema propuesto: voltaje de funcionamiento 12 voltios, corriente del banco de baterías 7.5 Amperios Hora (Ah) y el tipo de baterías es VRLA con válvula regulada.

Respecto al panel fotovoltaico cuya función principal es proporcionar energía eléctrica a partir de la irradiación solar por medio del efecto fotoeléctrico [3]. El dimensionamiento de este dispositivo se realiza bajo la siguiente ecuación matemática.

$$I_{sfv} = C_p * H_{sol} \quad (5)$$

Según la ecuación (5) la corriente que debe proporcionar el sistema fotovoltaico es 1.875 Ah, pero según las recomendaciones del fabricante se debe garantizar un margen protección del 25 %, por lo tanto, la corriente mínima que debe proporcionar el panel FV en todo momento es de 2.34 Ah.

Finalmente, se debe mencionar que existe un tercer componente del sistema propuesto que es la carga resistiva, en este contexto el dispositivo utilizado es una celda Peltier que es un elemento eléctrico que trabaja bajo el efecto termoeléctrico, generando calor y frío simultáneamente gracias a la unión de dos materiales semiconductores del tipo P y N. Su funcionamiento radica en transferir calor de un lado del dispositivo a otro oponiéndose al gradiente de temperatura, consumiendo para ello energía eléctrica [38]. En condiciones óptimas una celda peltier es capaz de alcanzar por su lado caliente una temperatura máxima de 60 °C, mientras en su lado frío llega a casi el cero absoluto de temperatura [39]. En el sistema refrigerante este elemento cumple un papel fundamental, ya que, permite refrigerar y así poder mantener la temperatura deseada, por la elección del tipo de control utilizado, su funcionamiento se restringe a apagado o encendido, con un pico de corriente máxima de 3.5 amperios.

2.4 Construcción e implementación de algoritmos MPPT

Los algoritmos MPPT son un conjunto de instrucciones que se aplican a los controladores de carga para maximizar la extracción de energía en determinadas circunstancias [40]. La eficiencia de un sistema fotovoltaico depende de múltiples condiciones como la cantidad de luz solar en los paneles FV, la temperatura y las características eléctricas de la carga resistiva, que son valores cambiantes en el tiempo, por lo tanto, no se puede asegurar que un panel fotovoltaico esté siempre entregando la máxima potencia (también denominado punto de máxima potencia (MPP)) y es aquí donde los algoritmos MPPT juegan un papel importante, debido a que, permite rastrear el punto MPP y mejorar así la producción de energía eléctrica [41].

En la investigación se utilizó un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia del tipo perturbar y observar (P&O, por sus siglas en inglés Perturb and Observe) en combinación con un control Proporcional, Integral y Derivativo (PID) para asegurar la carga correcta de la batería VRLA. A continuación, en la figura 2 se puede observar la lógica utilizada para el sistema propuesto general y el controlador de carga donde se alojan los algoritmos MPPT.

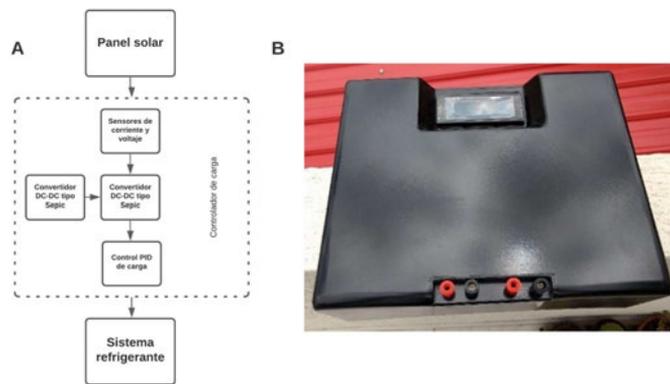


Figura 2: (A) Componentes principales del sistema propuesto. (B) Prototipo del controlador de carga finalizado.

Los algoritmos P&O son ampliamente utilizados y aceptados como una apuesta de fácil implementación y correcto funcionamiento para mejorar la producción energética de los sistemas fotovoltaicos. La lógica de este tipo de algoritmos es la siguiente, cuando la potencia del panel fotovoltaico aumenta, significa que el punto de operación se ha trasladado hacia el MPP, por tanto, el voltaje de operación se perturba en la misma dirección mediante el aumento del ciclo de trabajo, sin embargo, si la potencia extraída del panel fotovoltaico disminuye, el punto de operación se mueve en dirección opuesta de la ubicación del MPP, debido a esto, el voltaje de operación se perturba en dirección contraria al 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 [16]. En el caso del algoritmo P&O implementado (Figura 3, A) se le realizó algunas reformas en la lógica del mismo, debido a que, se encontró

que la mayoría de estos no tienen en cuenta la corriente máxima a la que se debe cargar las baterías si estas son pequeñas, en el caso de la batería utilizada que es de 7Ah el fabricante recomienda que la máxima corriente de carga sea 700 miliamperios, por lo tanto, el algoritmo P&O busca la máxima potencia posible hasta que llega a ese tope, estableciendo ahí un límite de transferencia de potencia y dejando el ciclo de trabajo señalado en este punto.

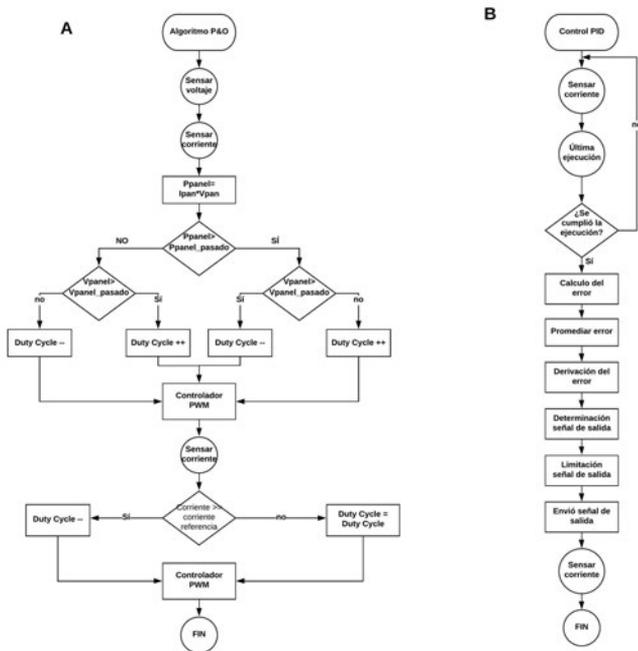


Figura 3: (A) Algoritmo P&O utilizado para mejorar la potencia extraída del panel fotovoltaico. (B) Algoritmo de control PID para optimizar la carga de batería del sistema refrigerante.

En esta línea, es importante mencionar que el algoritmo P&O se utilizó en combinación con un control PID (Figura 3, B) para asegurar la carga de la batería, debido a que, el funcionamiento de los sistemas fotovoltaicos no es lineal, por lo que la respuesta del sistema a una entrada no es posible definirla con anterioridad [42]. La razón de utilizar el control del

tipo PID sobre la carga de la batería se debe a que es un sistema que sufre cambios bruscos, por lo tanto, es necesario un control que responda rápido a estas variaciones de corriente y voltaje (disturbios). Los controladores PID digital son un tipo de control con retroalimentación ampliamente utilizados en la industria, debido a que, son robustos, de fácil implementación y de gasto computacional reducido. Además, este tipo de control funciona en base a una variable denominada error, que se determina mediante la comparación entre una referencia antes establecida y la salida del sistema [43]. En la investigación, el control PID se aplica sobre el controlador de carga y en la única variable que se puede modificar en el sistema, que es el ciclo de trabajo del MOSFET de potencia, utilizando una señal modulada por ancho de pulsos (PWM, siglas en inglés de Pulse-Width Modulation) aplicada al microcontrolador (Arduino Nano). La acción sobre el MOSFET se realiza aplicando un tren de pulsos de voltaje (ciclo de trabajo) que en mayor o menor medida permiten pasar más o menos energía a la salida del sistema (batería del sistema refrigerante) [44]. La sintonización de los valores de control PID se realizó empleando el método de Ziegler-Nichols, consistente en sintonizar el controlador PID de forma empírica, mediante la observación de la respuesta del sistema [45]. Los valores utilizados para el controlador son, $K_p=12$, $K_i=1$ y $K_d=0.25$, además, la función de transferencia de primer orden (Ecuación (6)) para el sistema propuesto se presenta a continuación.

$$G_c(s) = \frac{1,8 \left(\frac{s+4}{2}\right)^2}{s} \quad (6)$$

El funcionamiento del controlador PID inicia cuando el sensor de corriente de la batería (INA 219) envía una señal digital al controlador Arduino, esta representa el punto actual en que se encuentra el proceso. El controlador compara la señal recibida con una referencia preestablecida (referencia o *setpoint*), esta es dinámica y varía dependiendo del tipo o estado en que se encuentra la batería (las baterías VRLA tienen tres estados de descarga, carga pesada cuya corriente debe ser aproximada a los 700 miliamperios, carga de mantenimiento aproximado a 400 miliamperios y finalmente carga de flotación 200 miliamperios). Posteriormente, el controlador resta la señal de referencia con la del sensor, la cual se

le denomina señal de error. Esta es utilizada por los tres componentes principales del control PID las cuales son sumadas para componer la señal de salida del microcontrolador al actuador, a esta se le denomina variable manipulada. En el caso del controlador de carga solar la variable manipulada es el ciclo de trabajo en el PWM la cual es aplicada en el MOSFET de potencia. Por último, es importante aclarar que el método de sintonización utilizado es empírico, por lo tanto, son valores aproximados a la realidad a los que se deben realizar algunas modificaciones para sintonizar el control PID correctamente.

Ahora, se procede a reportar la construcción del sistema refrigerante que utiliza el efecto termoelectrico y es alimentado mediante la energía fotovoltaica.

2.5 Construcción del sistema refrigerante que utiliza el efecto Peltier

El sistema refrigerante es el dispositivo encargado de mantener y/o disminuir la temperatura en el interior del dispositivo, para esto se utilizaron materiales aislantes que dificultan la transmisión de calor entre el interior y el exterior del sistema. El área es de aproximadamente un metro cuadrado y con las adecuaciones necesarias (obligaciones sanitarias) podría adaptarse para ser un sistema de vacunas o transporte de pequeños alimentos que necesiten de cadena de frío.

La construcción física del dispositivo refrigerante comprendió, desde la planeación hasta la construcción final del prototipo, transitando por la selección de los materiales y los cálculos necesarios para su realización. En primer lugar, se desarrolló un modelo en tres dimensiones en el que se realizó el análisis de materiales y se hizo una simulación de transferencia de calor, para observar qué materiales se adaptan a los requerimientos del sistema (Figura 4, A). En este sentido se encontró que el poliestireno expandido reunió las mejores características para mantener la temperatura y además es un material de bajo costo. Asimismo, el dispositivo tiene un circuito de potencia que cumple la función de soportar las cargas de corriente y voltaje, como se puede observar en la Figura 4, B.

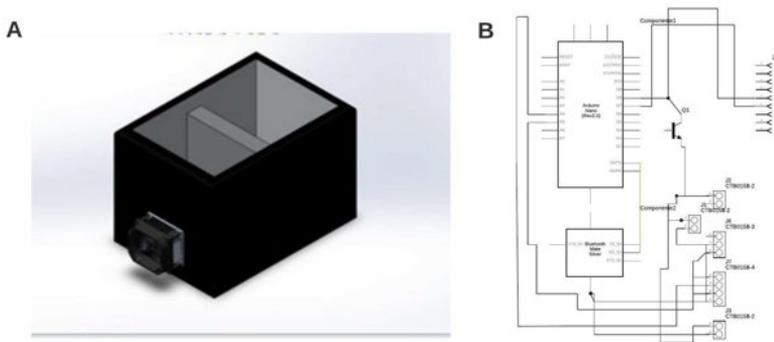


Figura 4: (A) Diseño CAD en software del prototipo de sistema refrigerante. (B) Esquema eléctrico de potencia del sistema refrigerante.

La lógica del sistema de refrigeración depende de un algoritmo de control de temperatura de tipo ON-OFF con un proceso de histéresis. La elección de este tipo de control por sobre otros se debe a que la temperatura es una variable de evolución lenta en el tiempo y, por lo tanto, la inclusión de un control más avanzado no mejoraría la eficacia del sistema [12]. El algoritmo de control que rige el microcontrolador está enfocado en ahorrar la mayor cantidad de energía posible, para mejorar los tiempos de autonomía de parte de la fuente de alimentación del sistema (batería). Un relé ubicado en el circuito permite desconectar o conectar la celda Peltier en función de la temperatura interna del dispositivo. Una de las razones principales para la implementación de este tipo de control es que se adapta perfectamente a las necesidades del caso de estudio, ya que, el sistema refrigerante basa su funcionamiento en un control lineal, con retroalimentación simple y sin exposición a perturbaciones pronunciadas que pudieran afectar directamente a la señal controlada.

El funcionamiento de sistema refrigerante es el siguiente, en un primer momento se realiza la elección de la referencia (*setpoint*) del sistema, esta acción puede realizarse de dos maneras, la primera mediante un teclado matricial situado en la parte superior del refrigerador, o utilizando una aplicación móvil diseñada específicamente para esta tarea. Una vez determinada la referencia el controlador ordena el encendido de la celda

Peltier, esta segunda fase del algoritmo es la que más tiempo consume, por lo que se le aplicó histéresis [46] al control ON-OFF, para reducir el tiempo de encendido de la celda, disminuyendo así el consumo de energía y el desgaste mecánico del relé que permite la activación del sistema. Para lograr estas dos exigencias se diseñó un condicional de activación (histéresis) que consistente en que una vez que se activa la segunda etapa del algoritmo el relé se ancla (activa) hasta que alcanza la temperatura deseada. Una vez, llegada la temperatura del dispositivo a la referencia del sistema, el microcontrolador envía una señal que desancla el relé y, por lo tanto, ocurre la desenergización de la celda peltier, debido a las propiedades físicas del sistema y a los materiales utilizados, la temperatura va a seguir descendiendo hasta un rango aproximado de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ por debajo de la temperatura de referencia. En este punto, la temperatura empezará a ascender hasta alcanzar la temperatura ambiente; por lo que, se estableció como condicional de activación que el controlador envíe una señal de encendido sólo si la variable controlada está a $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ por encima de la consigna. En esta etapa y con el relé activado el controlador estará aplicando una acción de control continúa hasta que el sistema llegue de nuevo a la referencia, repitiendo el proceso anterior hasta que el usuario determine un nuevo *setpoint*.

Por último, se desarrolló una aplicación para realizar la comunicación entre el usuario y el sistema en donde se puede enviar y recibir información en el dispositivo móvil. Esta comunicación tiene la particularidad de ser bidimensional, por lo que la aplicación móvil tiene la facultad tanto de enviar como de recibir información, permitiendo, por ejemplo, se pueda visualizar información de la temperatura en tiempo real, cambiar la referencia del sistema en cualquier instante y enviar información a distancia. En la Figura (5) se puede apreciar la aplicación móvil desarrollada y el prototipo de sistema refrigerante.

Ahora bien, con el ánimo de permitir replicar y/o ahondar sobre la investigación, se proporciona el siguiente enlace <https://cutt.ly/coTaQN1> donde se puede encontrar recursos (algoritmo P&O y de control PID) y material relacionado con el presente documento.



Figura 5: (A) Aplicación desarrollada para comunicar el sistema refrigerante con el usuario. (B) Sistema refrigerante prototipo final.

3 Resultados y discusión

En esta sección se expondrán los resultados obtenidos durante la investigación, en primera instancia se presentarán aquellos resultados relativos al sistema fotovoltaico con algoritmos MPPT y, posteriormente, lo correspondiente al sistema refrigerante con efecto Peltier. Por último, se analizará el funcionamiento del sistema en conjunto y se mostrarán sus correspondientes pruebas.

3.1 Caracterización del panel fotovoltaico

El proceso de caracterización de un panel fotovoltaico es fundamental porque permite representar la relación entre la intensidad y el voltaje, para determinar el MPP de las condiciones donde se desempeña el dispositivo. Generalmente, los paneles de 12 voltios encuentran su punto de máxima potencia entre los 16 y 18 voltios [47]. Puntualmente, en la investigación la caracterización del panel se realizó experimentalmente entre las 12 y las 2 de la tarde, ya que en este momento del día la radiación es mayor en la ciudad de Popayán. Posteriormente se utilizaron varios valores de carga variable (resistencias de varios valores) que conforme se iba registrando los datos se iban intercambiando por otras de menor resistencia, además, se monitoreo el voltaje y la corriente utilizando un multímetro digital. Este proceso se realizó basados en el documento de Fernández Ferichola en [48]

para caracterizar paneles fotovoltaicos. A continuación, en la Figura 6 se puede apreciar la curva característica del panel solar utilizado.

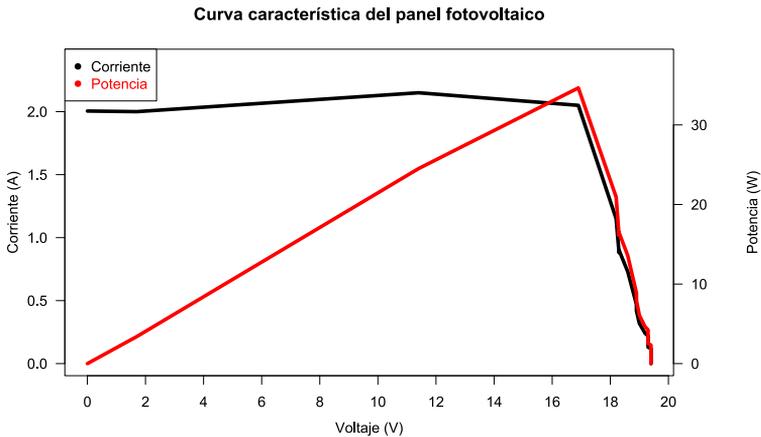


Figura 6: Curva característica del panel fotovoltaico utilizado.

Basados en la gráfica anterior se puede determinar que la máxima potencia posible del panel FV para las condiciones de la ciudad de Popayán está dada en el rango de voltaje entre 15.5 y 16.5 voltios, corroborando lo mencionado anteriormente para los paneles de 12v.

3.2 Demostración de eficiencia de los algoritmos MPPT

Con el fin de encontrar la eficiencia del algoritmo P&O con control de carga PID se plantearon dos escenarios posibles, en primera instancia una prueba controlada en la que las variables que afectan el sistema están fiscalizadas con anterioridad (denominadas “pruebas de laboratorio”) y posteriormente un escenario real sin ningún control sobre las variables (denominadas “pruebas en campo”). Las pruebas se realizaron durante dos días contiguos con temperaturas ambientes y climas similares, además, se recolectaron los datos de radiación con la herramienta en línea denominada POWER data access viewer [49] desarrollada por la NASA.

La eficiencia del algoritmo MPPT se determinó calculando la potencia extraída del panel FV y comparando estos valores. La primera muestra se toma en un ambiente controlado, es decir, se extraen los datos de salida del sistema fotovoltaico (potencia) sin el algoritmo y posteriormente se realiza la misma medición con el algoritmo P&O, con la particularidad de que cada cierto tiempo se cubren zonas del panel fotovoltaico de forma que se pueda simular cambios repentinos de la radiación solar.

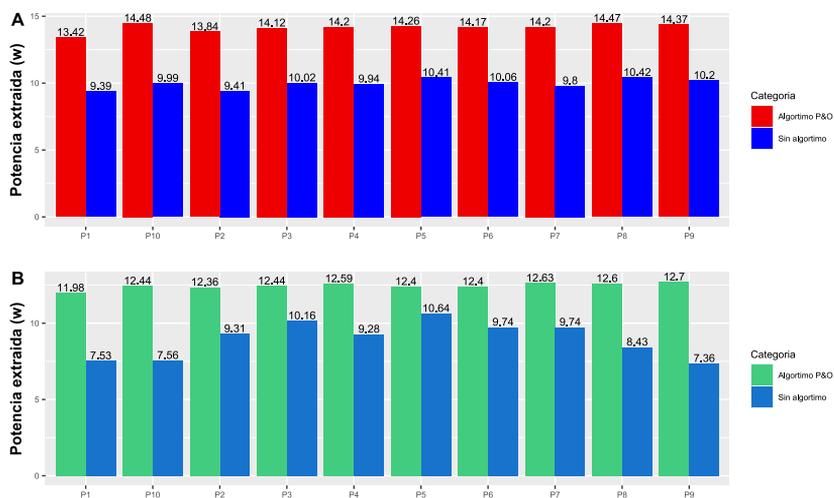


Figura 7: (A) Comparación de potencias extraídas del panel con algoritmo P&O y sin algoritmo en horas de la tarde en prueba controlada. (B) Comparación de potencias extraídas del panel con algoritmo P&O y sin algoritmo en horas de la mañana en campo.

La primera prueba se tomó en horas de la tarde con un cielo parcialmente nublado y un voltaje de circuito abierto de 20.3V. Además, la radiación registrada en ese momento fue en promedio de 3.34 kilowatts-hora por metro cuadrado por día (kWh/m²/día), con una temperatura ambiente de 23.7 °C. Para mejorar la visualización de los datos, se acordó seccionarlos en partes iguales y con el mismo número de registros en ambas situaciones. En la primera prueba (Figura 7, A), se puede apreciar la diferencia de potencia extraída del panel fotovoltaico con el algoritmo P&O y sin este bajo condiciones controladas, el aumento en la potencia extraída es

aproximadamente del 25 % en las muestras que no se cubrió el panel, lo que supone una mejora considerable a la hora de realizar la conversión energética. En el caso que se cubrió el panel FV para simular cambios repentinos en la radiación, se puede observar que el rendimiento del algoritmo disminuye, pero que aún así mejora la extracción de potencia del sistema fotovoltaico. Asimismo, puede indicarse que la potencia extraída con el algoritmo MPPT se mantiene estable con pocas variaciones en el rendimiento, el coeficiente de variación para los datos con el algoritmo P&O es aproximadamente de 1.5 %, mientras que para los datos obtenidos sin algoritmo el CV es de 12.5 %, reafirmando lo mencionado anteriormente.

Ahora bien, la segunda prueba (Figura 7, B) se tomó en horas de la mañana con cielo despejado y un voltaje en circuito abierto de 21.0v. También, se tomó el registro de energía solar que corresponde a 3.95 kWh/m²/día con una temperatura ambiente de 25.9 °C, al igual que en la pasada toma se decidió segmentar los datos y posteriormente promediarlos. En esta prueba no se cubrió ninguna parte del panel FV (prueba en campo), por lo tanto, se tiene datos sin ninguna modificación. Concretamente, para esta prueba fue posible encontrar una mejora aproximada del 26 % con el algoritmo P&O con respecto a la potencia extraída sin el algoritmo. Lo anterior, se puede explicar por la mayor radiación en el momento de la prueba, debido a que llega más energía solar de onda corta hacia el panel, por lo tanto, el algoritmo intenta optimizar en todo momento el aumento de potencia que el sistema fotovoltaico puede proporcionar gracias a las condiciones actuales, mejorando así la potencia extraída del panel y por consiguiente la carga de la batería, en cambio, sin algoritmo MPPT el controlador de carga solar no tiene ningún indicativo que le permita optimizar la potencia extraída, y por lo tanto, se evidencia un desperdicio de potencia energética. Esto está en consonancia con lo expuesto por Khatib *et al.* en [50], donde exponen que la radiación solar y la temperatura son factores determinantes para extraer más o menos potencia por parte de un algoritmo MPPT, por lo que para esta investigación mayores registros de radiación y temperatura han significado más potencia extraída del panel FV.

En esta línea, el coeficiente de variación para los datos registrados con el algoritmo P&O fue aproximadamente de 2.2 %, mientras que para los datos sin el algoritmo el CV fue del 3.5 %, por lo que se puede concluir

que el algoritmo P&O presentado cumple con la función de maximizar la potencia extraída del panel, además, de asegurar cierta fiabilidad en el rendimiento del sistema bajo las condiciones adecuadas del entorno (radiación, temperatura, entre otras). Finalmente, es importante mencionar que el algoritmo MPPT utilizado tiene un rendimiento adecuado tal y como lo mencionan otros autores, donde el mejoramiento de la potencia extraída ronda entre el 20 % y el 30 % [51].

3.3 Demostración de eficiencia del control PID

Es importante evaluar el rendimiento del algoritmo de control PID para cargar la batería del sistema refrigerante, debido a que, una incorrecta sintonización de parámetros o implementación del control podría ocasionar una sobrecarga de la batería con consecuencias adversas para el acumulador y el sistema de refrigeración. Es ampliamente aceptado que si el control PID está bien sintonizado es capaz de responder de manera oportuna a cualquier perturbación del sistema. Específicamente, para la investigación la tensión del panel FV es una variable de entrada que fluctúa en el tiempo, por condiciones de radiación, humedad, temperatura, entre otras, por lo tanto, se debe realizar el proceso de refinamiento del control de carga de manera correcta.

Al igual que en la sección anterior se van a realizar pruebas de laboratorio y en campo para comprobar la eficacia del control propuesto. La realización de las pruebas en laboratorio se hizo con una fuente de voltaje variable, debido a que, permite simular el panel fotovoltaico (entrada del sistema), además, se planteó un escenario, donde, se utiliza un voltaje lineal e invariable para poder determinar el tiempo que le toma al controlador llegar al *setpoint* o referencia (voltaje que permite extraer la máxima potencia posible del panel), además, de esta forma determinar la eficiencia del controlador PID.

Las variables que se analizaron durante estas pruebas (laboratorio y campo) fueron las siguientes: la referencia o *setpoint* correspondiente a la corriente a la que se debe cargar la batería del sistema refrigerante, que en este caso es de 0.65 amperios, dado que esta es la máxima corriente a la que se aconseja cargar la batería del sistema que alimenta al dispositivo

refrigerante. La señal de salida es la corriente de carga de la batería y es controlada mediante un MOSFET de potencia, por lo tanto, el control PID debe mantener esta corriente estable (carga máxima posible) y no superarla para evitar daños en el sistema. También, está la variable de entrada que es el voltaje suministrado por el panel fotovoltaico (pruebas de campo) o la fuente de voltaje (pruebas de laboratorio). Finalmente, la variable controlada es el ciclo de trabajo (δ) del MOSFET de potencia, pues, la manipulación de éste permite el paso de más o menos voltaje hacia la batería [44]. A continuación, se presentan los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio.

En las pruebas de laboratorio (Figura 8, A) se encontró que el tiempo de retraso del control PID fue de 1.5 segundos, el tiempo de subida 14 segundos, el tiempo pico de 20.8 segundos y la máxima sobreoscilación de 0.68 amperios. Por lo tanto, se puede decir que los tiempos de respuesta del sistema son adecuados, para el nivel de exigencia que requiere el sistema. En cuanto a las pruebas de laboratorio se puede indicar que, al ser una señal de entrada constante e invariante, el sistema logra equilibrar rápidamente la señal de salida (corriente de carga) sin presentar sobreoscilaciones o ruidos.

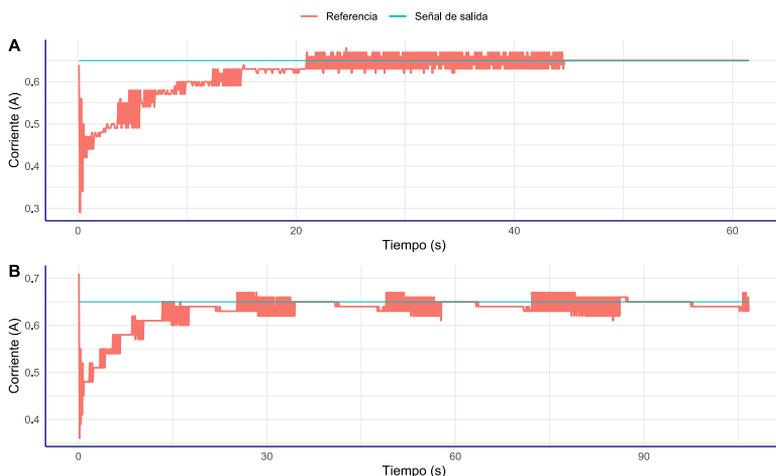


Figura 8: (A) Curva de reacción del controlador de carga solar con control PID en laboratorio (B) Curva de reacción del controlador de carga solar con control PID en campo.

Ahora bien, una vez realizadas las pruebas de laboratorio se procedió a realizar la toma de datos en campo (Figura 8, B), en un día con poca nubosidad sin excesiva radiación solar entre las 11:30 y 12:00 del día. En la siguiente gráfica se puede observar que el control PID mantiene la señal de salida alrededor de la referencia del sistema, pero debido a las condiciones climáticas cambiantes de la ciudad, el voltaje de salida del panel fotovoltaico fluctúa constantemente, además, de la existencia de variables incontrolables como la temperatura ambiente y la irradiación lo que ayuda a generar ruido constante, pero es evidente que el algoritmo respeta la regla de no generar sobrepulsos grandes (mayor a un 1 amperio) que puedan ocasionar daños permanentes en la batería. Por lo tanto, permite cargar el sistema lo más eficiente posible sin generar daños por tensiones o corrientes grandes.

3.4 Rendimiento del sistema refrigerante propuesto

Respecto al sistema refrigerante se puede mencionar que se obtuvo un dispositivo que permite disminuir la temperatura en su interior y mantenerla estable, sin pérdidas considerables de calor. Esto es ideal para elementos que necesiten refrigeración en un espacio compacto, utilizando energías limpias para su funcionamiento. Ahora, en cuanto a la eficiencia del sistema refrigerante para disminuir la temperatura interior de éste, se realizaron diferentes pruebas. En la Figura 9, se puede observar la disminución de temperatura en un tiempo determinado (60 minutos) con una temperatura ambiente en el exterior de 19 °C.

Se puede observar un descenso aproximado de 14 °C, lo que sugiere una disminución considerable y sostenida de la temperatura a lo largo del tiempo. Por lo tanto, el dispositivo cumple su función de disminuir la temperatura en su interior, además de mantenerse en el rango deseado gracias al control aplicado sobre el sistema, lo que habla de un control funcional y fiable para el dispositivo refrigerante, sumado a que, el poliestireno expandido permite mantener la temperatura interna sin pérdidas considerables de calor, por lo que para este tipo de prototipos este material es una posibilidad funcional y fiable.

En esta línea, y para mejorar la confianza de los resultados se decidió transportar el dispositivo refrigerante a lugares con distintas temperaturas

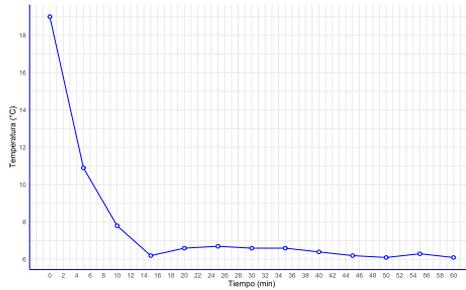


Figura 9: Desempeño del sistema refrigerante a 19 °C de temperatura ambiente en condiciones controladas.

ambientes, para evaluar el rendimiento del dispositivo y observar si existen diferencias notables (Figura 10), por lo que se hizo una prueba en la ciudad de Popayán en un lugar abierto sin condiciones controladas y otra en la ciudad de Bogotá. A continuación, se pueden observar los resultados en los distintos lugares mencionados.

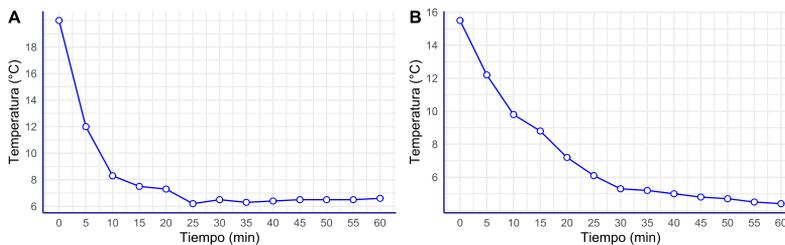


Figura 10: Desempeño del sistema refrigerante en la ciudad de Popayán (A) y en Bogotá (B) respectivamente.

Los resultados en la ciudad de Popayán y en la ciudad de Bogotá son ciertamente similares, más allá del hecho de que hay una diferencia entre la temperatura inicial de ambas situaciones (aproximadamente 4 °C). En esta línea, se puede indicar que el descenso de la temperatura en la ciudad de Popayán fue más rápida, donde la temperatura inicial fue de 21 °C, y en el transcurso de aproximadamente 10 minutos la temperatura alcanzó los 8 °C, a diferencia de la ciudad de Bogotá donde en esa misma ventana de tiempo la temperatura disminuye aproximadamente en 5.6 °C, esto

habla de que la temperatura en el exterior del dispositivo es un factor determinante para la temperatura interior del sistema refrigerante [21], lo anterior sucede por el proceso de transferencia de calor que ocurre cuando existe una diferencia de temperatura a través de un material por contacto directo entre sus partículas [52]. Asimismo, se puede mencionar que la temperatura descendió progresivamente hasta llegar a un punto en el que no puede disminuir más, lo que sugiere una restricción para las celdas Peltier como dispositivo de enfriamiento, ya que sólo uno de estos dispositivos no tiene la suficiente potencia de enfriamiento en comparación con los aparatos comunes, por lo que para mejorar este punto se podrían utilizar más celdas Peltier en serie como lo reportan otras investigaciones [53], además, de mejorar el encerramiento del sitio donde se va a realizar la disminución de la temperatura, porque es un factor para tener en cuenta y decisivo en esta actividad.

3.5 Prototipo de un dispositivo refrigerante con celdas peltier alimentado con un sistema fotovoltaico independiente

En este apartado se expondrá el funcionamiento del prototipo propuesto de forma unificada, en este sentido, se debe mencionar que el dispositivo propuesto cumple su función de disminuir la temperatura en su interior utilizando la energía fotovoltaica como fuente energética. En la Figura 11, se puede apreciar el sistema ejecutado con sus componentes principales.

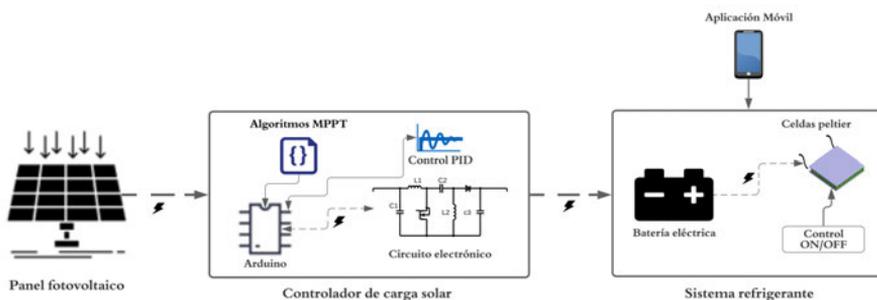


Figura 11: Sistema propuesto con sus principales componentes.

Los resultados obtenidos de la propuesta tecnológica permite denotar que es viable y con un mayor campo de acción y ejecución si se realiza el refinamiento necesario, porque es un sistema que permite disminuir la temperatura en su interior utilizando energías renovables que no afectan al medio ambiente, además se establece como una alternativa viable para resolver problemáticas concretas como el transporte de vacunas o elementos que necesitan refrigeración. Asimismo, se debe mencionar que fue beneficiosa la combinación de tecnologías que a priori no tienen relación como son la energía fotovoltaica y los dispositivos Peltier, permitiendo un nivel de integración alto entre las partes y con una buena sinergia de funcionamiento, además se demostró que este dispositivo puede aportar en temáticas como el gasto energético y los fluidos frigorígenos. Por lo anterior, es recomendable ahondar sobre la presente investigación ya que con la puesta a punto de las tecnologías mencionadas se puede llegar a una solución permanente.

4 Conclusiones

En este documento se expone un sistema refrigerante que usa el efecto termoeléctrico como medio de disminución de la temperatura en su interior, además, es alimentado por un sistema fotovoltaico que utiliza un controlador de carga y un algoritmo MPPT, para mejorar el rendimiento de este. Los resultados obtenidos sugieren que el sistema propuesto es viable, de bajo coste y respetuoso con el medio ambiente. Además, combina distintas disciplinas como la mecánica, la electrónica y la física convergiendo en un dispositivo funcional, que con las adecuaciones sanitarias necesarias podría ser una opción viable para transportar vacunas o alimentos a lugares donde la energía eléctrica convencional es de difícil acceso.

Según lo encontrado en la investigación se puede indicar que la energía solar fotovoltaica es una opción factible para sustituir la energía eléctrica en algunos dispositivos que estén supeditados a un gasto energético limitado. En este sentido, también se comprobó que los algoritmos MPPT son un esfuerzo que vale la pena asumir en este tipo de sistemas, puesto que el aumento en la producción de energía eléctrica a partir del sol es considerable (en la investigación el aumento en la extracción de energía fue entre un 20 % y el 26 % dependiendo de las condiciones), convirtiendo la optimización de

la producción de energía solar en un área de estudio para tener en cuenta en estas temáticas. Asimismo, se puede aludir que la inclusión de nuevos tipos de algoritmos MPPT como el de voltaje constante o el de conductancia incremental, podrían ser una opción para mejorar la extracción de energía del panel en condiciones específicas para cada dispositivo de enfriamiento.

Respecto al dispositivo refrigerante, se puede mencionar que las celdas Peltier son una posibilidad plausible como elemento de enfriamiento para reemplazar los gases refrigerantes. Específicamente, en la investigación se encontró que estos dispositivos pueden disminuir la temperatura en un espacio cerrado hasta aproximadamente 14 °C. También, se debe indicar que las celdas Peltier tienen un consumo eléctrico alto, por lo que es recomendable optimizar la eficiencia energética de estos elementos para aumentar las posibilidades de implementación de estos enfriadores termoeléctricos. Finalmente, se pudo encontrar que la temperatura ambiente es un factor determinante que influye en el rendimiento del dispositivo refrigerante, por lo cual el encerramiento y los materiales aislantes son factores de suma importancia en la construcción de este tipo de sistemas.

Agradecimientos

Agradecimientos sinceros a todas las entidades que estuvieron involucradas en este proyecto de investigación (Código: 04B – 2015 -04 y Convenio No./ID: 6-81.2/031 DE 2016), a la Corporación Universitaria Comfacauca (Unicomfacauca) por brindarnos sus instalaciones y equipos para realizar las pruebas de campo, Maccob Tecnología LTDA por ser empresa intermediaria y direccionadora, también, a Virgilio Jose Silvera Gonzales por sus enseñanzas y tiempo. Por último, a InnovAcción Cauca por el rubro intelectual y apoyo económico para el presente proyecto de investigación.

Referencias

- [1] D. M. Konisky, L. Hughes, and C. H. Kaylor, “Extreme weather events and climate change concern,” *Climatic Change*, vol. 134, no. 4, pp. 533–547, Feb. 2016. <http://link.springer.com/10.1007/s10584-015-1555-3> 153

- [2] J. Li, D. W. Hilbert, T. Parker, and S. Williams, “How do species respond to climate change along an elevation gradient? A case study of the grey-headed robin (*Heteromyias albispecularis*),” *Global Change Biology*, vol. 15, no. 1, pp. 255–267, Jan. 2009. <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2486.2008.01737.x> 153
- [3] W. D. Nordhaus and J. G. Boyer, “Requiem for Kyoto: an economic analysis of the Kyoto Protocol,” *The Energy Journal*, vol. 20, no. Special Issue-The Cost of the Kyoto Protocol: A Multi-Model Evaluation, pp. 93–130, 1999. <https://doi.org/10.5547/ISSN0195-6574-EJ-Vol20-NoSI-5> 153, 159
- [4] R. McKenzie, G. Bernhard, B. Liley, P. Disterhoft, S. Rhodes, A. Bais, O. Morgenstern, P. Newman, L. Oman, C. Brogniez, and S. Simic, “Success of Montreal Protocol Demonstrated by Comparing High-Quality UV Measurements with “World Avoided” Calculations from Two Chemistry-Climate Models,” *Scientific Reports*, vol. 9, no. 1, p. 12332, Sep. 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48625-z> 153
- [5] N. Maamoun, “The Kyoto protocol: Empirical evidence of a hidden success,” *Journal of Environmental Economics and Management*, vol. 95, pp. 227–256, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2019.04.001> 153
- [6] L. H. Balza, R. Espinasa, and T. Serebrisky, “Lights On?: Energy Needs in Latin America and the Caribbean to 2040,” *Banco Interamericano de Desarrollo*, 2016. <https://publications.iadb.org/en/lights-energy-needs-latin-america-and-caribbean-2040> 153
- [7] C. Washburn and M. Pablo-Romero, “Measures to promote renewable energies for electricity generation in Latin American countries,” *Energy Policy*, vol. 128, pp. 212–222, May 2019. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.12.059> 153
- [8] E. Rosenfeld, G. A. San Juan, C. A. Discoli, I. Martini, C. Ferreyro, D. A. Barbero, B. Brea, M. Melchiori, G. M. Viegas, L. Dicroce, and others, “Ahorro de energía en el sector residencial,” *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 11, pp. 31–38, 2007. 153
- [9] Y. Sario Toledo, S. Pérez Ybáñez, E. García Noa, and L. Rodríguez, “Evaluación energética de una planta de helados,” *Ingeniería Energética*, vol. 38, no. 1, pp. 42–53, 2017. 153
- [10] P. A. Martínez Cancino, “Análisis del Recambio de Refrigeradores Energéticamente Eficientes como Medida de Eficiencia Energética y Propuestas de Implementación,” PhD Thesis, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2010. <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103987> 153

- [11] F. Zink, J. S. Viperman, and L. A. Schaefer, “Environmental motivation to switch to thermoacoustic refrigeration,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no. 2-3, pp. 119–126, Feb. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.07.008> 153
- [12] J. Mardini-Bovea, G. Torres-Díaz, M. Sabau, E. De-la Hoz-Franco, J. Niño-Moreno, and P. J. Pacheco-Torres, “A review to refrigeration with thermoelectric energy based on the Peltier effect,” *DYNA*, vol. 86, no. 208, pp. 9–18, 2019. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v86n208.72589> 153, 165
- [13] J. Flipse, F. Bakker, A. Slachter, F. Dejene, and B. Van Wees, “Direct observation of the spin-dependent Peltier effect,” *Nature nanotechnology*, vol. 7, no. 3, p. 166, 2012. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.2> 154
- [14] G. Casano and S. Piva, “Experimental investigation of a Peltier cells cooling system for a Switch-Mode Power Supply,” *Microelectronics Reliability*, vol. 79, pp. 426–432, Dec. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.microrel.2017.05.042> 154
- [15] G. Walker and others, “Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model,” in *Journal of Electrical & Electronics Engineering*, vol. 21, Australia, 2001, pp. 45–55. 154
- [16] M. A. Elgendy, B. Zahawi, and D. J. Atkinson, “Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 21–33, Jan. 2012. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6102293/> 154, 161
- [17] A. Kane, V. Verma, and B. Singh, “Optimization of thermoelectric cooling technology for an active cooling of photovoltaic panel,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 1295–1305, Aug. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.114> 154
- [18] Jin Du, Fan Yang, and Jiande Wu, “Design and analysis of semiconductor refrigeration system powered by PV Cells,” in *2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Hangzhou, China: IEEE, May 2012, pp. 286–291. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2012.6237099> 154
- [19] L.-x. Ni, K. Sun, L. Zhang, Y. Xing, M. Chen, and L. Rosendahl, “A power conditioning system for thermoelectric generator based on interleaved Boost converter with MPPT control,” in *2011 International Conference on Electrical Machines and Systems*. Beijing, China: IEEE, Aug. 2011, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEMS.2011.6073395> 155
- [20] A. Montecucco, J. Siviter, and A. R. Knox, “The effect of temperature mismatch on thermoelectric generators electrically connected in series

- and parallel,” *Applied Energy*, vol. 123, pp. 47–54, Jun. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.030> 155
- [21] H. Najafi and K. A. Woodbury, “Optimization of a cooling system based on Peltier effect for photovoltaic cells,” *Solar Energy*, vol. 91, pp. 152–160, May 2013. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.01.026> 155, 175
- [22] O. Francis, C. J. Lekwuwa, and I. H. John, “Performance evaluation of a thermoelectric refrigerator,” *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, vol. 2, no. 7, 2013. 155
- [23] D. Astrain, J. G. Vián, and J. Albizua, “Computational model for refrigerators based on Peltier effect application,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 25, no. 17, pp. 3149 – 3162, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.04.003> 155
- [24] A. C. Zúñiga, G. S. Tejada, L. F. G. Gómez, and S. n. Cañas, “Algunas variables para evaluación de tecnologías aislantes óptimas en la implementación en cajas refrigerantes portátiles. Corporación Universitaria Lasallista,” *Producción+ Limpia*, vol. 12, no. 2, pp. 9–23, 2017. <https://doi.org/10.22507/pml.v12n2a1> 155
- [25] J. van Amerongen, “Mechatronic design,” *Mechatronics*, vol. 13, no. 10, pp. 1045–1066, Dec. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(03\)00042-4](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(03)00042-4) 156
- [26] T. Halder, “Charge controller of solar photo-voltaic panel fed (SPV) battery,” in *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*. New Delhi, India: IEEE, Jan. 2011, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/IICPE.2011.5728056> 156
- [27] A. B. Cantillo, J. R. Charris, J. S. Rodríguez, J. D. González, E. Y. Rodríguez, and J. R. Mckinley, “Modelado dinámico del manipulador serial Mitsubishi Movemaster RV-M1 usando SolidWorks,” *Revista UIS Ingenierías*, vol. 15, no. 2, pp. 49–62, 2016. <https://doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016004> 156
- [28] D. Wolber, H. Abelson, and M. Friedman, “Democratizing Computing with App Inventor,” *GetMobile: Mobile Comp. and Comm.*, vol. 18, no. 4, pp. 53–58, Jan. 2015. <https://doi.org/10.1145/2721914.2721935> 156
- [29] C. Peng, Y. Huang, and Z. Wu, “Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China,” *Energy and Buildings*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, Dec. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.032> 157
- [30] A. Harish and M. Prasad, “Microcontroller based photovoltaic mppt charge controller,” *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 1018–1021, 2013. 157

- [31] M. González Valencia and A. Alzate Gómez, “Diseño estático de un convertidor DC/DC reductor-elevador bidireccional,” *Tecnura*, vol. 14, no. 26, pp. 7–14, Jan. 2010. <https://doi.org/10.14483/22487638.6682> 157
- [32] L. Schmitz, D. C. Martins, and R. F. Coelho, “Generalized High Step-Up DC-DC Boost-Based Converter With Gain Cell,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I*, vol. 64, no. 2, pp. 480–493, Feb. 2017. <https://doi.org/10.1109/TCSI.2016.2603782> 157
- [33] J. Falin, “Designing DC/DC converters based on SEPIC topology,” *Analog Applications Journal*, pp. 18–23, 2008. 158
- [34] M. Da Silva, J. Fraytag, N. Chagas, M. Schlittler, M. Dalla Costa, R. A. Pinto, A. Seidel, and R. do Prado, “Single-stage high-power-factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp,” in *2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. IEEE, 2011, pp. 390–395. <http://dx.doi.org/10.1109/ISIE.2011.5984190> 158
- [35] R. A. Reiter, R. D. de Oliveira Reiter, and A. Péres, “Controlador de carga de acordo com a portaria 396 do INMETRO,” in *Seminário de Eletrônica de Potência e Controle (SEPOC 2014)*, vol. 1, Santa Maria - Brazil, 2014. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.3871.0882> 158
- [36] S. Martha, B. Hariprakash, S. Gaffoor, S. Ambalavanan, and A. Shukla, “Assembly and performance of hybrid-VRLA cells and batteries,” *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 2, pp. 560–567, Jun. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.11.016> 159
- [37] S. Salamanca-Avila, “Propuesta de diseño de un sistema de energía solar fotovoltaica. Caso de aplicación en la ciudad de Bogotá,” *Revista Científica*, vol. 3, no. 30, pp. 263–277, Sep. 2017. <https://doi.org/10.14483/23448350.12213> 159
- [38] C. Lundgaard and O. Sigmund, “Design of segmented thermoelectric Peltier coolers by topology optimization,” *Applied Energy*, vol. 239, pp. 1003–1013, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.247> 160
- [39] P. S. Iskrenović, G. B. Sretenović, I. B. Krstić, B. M. Obradović, and M. M. Kuraica, “Thermostat with Peltier element and microcontroller as a driver,” *Measurement*, vol. 137, pp. 470–476, Apr. 2019. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224119301034> 160
- [40] L. Ruiz, J. Beristáin, I. Sosa, and J. Hernández, “Estudio del algoritmo de seguimiento de punto de máxima potencia perturbar y observar,” *Revista de ingeniería eléctrica, electrónica y computación*, vol. 8, no. 1, pp. 17–23, 2010. 160

- [41] C. Abdelkhalek, E. B. Said, and A. Younes, “An Improved MPPT Tactic for PV system under Temperature variation,” in *2019 8th International Conference on Systems and Control (ICSC)*. Marrakesh, Morocco: IEEE, Oct. 2019, pp. 382–387. <https://doi.org/10.1109/ICSC47195.2019.8950508> 160
- [42] A. Reza Reisi, M. Hassan Moradi, and S. Jamasb, “Classification and comparison of maximum power point tracking techniques for photovoltaic system: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 433–443, Mar. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.11.052> 162
- [43] K. Ogata, *Ingeniería de control moderna*. Pearson Educación, 2003. 163
- [44] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, and M. Vitelli, “Optimizing sampling rate of P&O MPPT technique,” in *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*. Aachen, Germany: IEEE, 2004, pp. 1945–1949. <https://doi.org/10.1109/PESC.2004.1355415> 163, 172
- [45] K. Åström and T. Hägglund, “Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control,” *Journal of Process Control*, vol. 14, no. 6, pp. 635–650, Sep. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002> 163
- [46] M. L. Ruz, S. Fragoso, F. Vázquez, J. Garrido, D. Rodríguez, and F. Morilla, “Planta experimental para supervisión y control del ciclo de refrigeración por compresión de vapor,” in *Madrid: CEA-IFAC*, Madrid, Spain, 2016, pp. 308–315. 166
- [47] K. A. Kim, G.-S. Seo, B.-H. Cho, and P. T. Krein, “Photovoltaic Hot-Spot Detection for Solar Panel Substrings Using AC Parameter Characterization,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 2, pp. 1121–1130, Feb. 2016. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2417548> 167
- [48] J. Fernández Ferichola, “Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil,” B.S. thesis, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2009. 167
- [49] M. B. A. Shuvho, M. A. Chowdhury, S. Ahmed, and M. A. Kashem, “Prediction of solar irradiation and performance evaluation of grid connected solar 80KWp PV plant in Bangladesh,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 714–722, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.011> 168
- [50] T. T. N. Khatib, A. Mohamed, N. Amim, and K. Sopian, “An Improved Indirect Maximum Power Point Tracking Method for Standalone Photovoltaic Systems,” in *Proceedings of the 9th WSEAS International Conference on Applications of Electrical Engineering*, ser. AEE’10. Stevens

- Point, Wisconsin, USA: World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS), 2010, pp. 56–62. 170
- [51] B. W. Williams, A. A. Helal, M. A. Elsharty, A. K. Abdelsalam, and N. E. Zakzouk, “Improved performance low-cost incremental conductance PV MPPT technique,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 4, pp. 561–574, Apr. 2016. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2015.0203> 171
- [52] P. Wu and W. Little, “Measurement of the heat transfer characteristics of gas flow in fine channel heat exchangers used for microminiature refrigerators,” *Cryogenics*, vol. 24, no. 8, pp. 415–420, Aug. 1984. [https://doi.org/10.1016/0011-2275\(84\)90015-8](https://doi.org/10.1016/0011-2275(84)90015-8) 175
- [53] G. A. Mannella, V. La Carrubba, and V. Brucato, “Peltier cells as temperature control elements: Experimental characterization and modeling,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, no. 1, pp. 234–245, Feb. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.10.069> 175