

CAPITULO 7

DESARROLLO Y MODELADO 3D DE UN SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON CELDAS PELTIER PARA SU APLICACIÓN EN ENERGÍA FOTOVOLTAICA



<https://doi.org/10.22533/at.ed.4871124151027>

Fecha de aceptación: 13/03/2025

Yadira del Carmen Huchin Ku

Universidad Autónoma de Campeche,
Estudiante de Mecánica Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.

Germán Escalante Notario

Universidad Autónoma de Campeche,
Posgrado de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.
ORCID: 0000-0002-5900-4570

Francisco Noé Demesa López

Tecnológico Nacional de México,
Instituto Tecnológico de Pachuca,
Pachuca de Soto, México.
ORCID: 0000-0002-5900-4570

Enrique Escalante-Notario

Instituto Politécnico Nacional,
Escuela Superior de Cómputo,
Ciudad de México, México.
ORCID: 0000-0001-9748-853X

Antonio Coyopol

Benemérita Universidad Autónoma de
Puebla,
Posgrado en Dispositivos
Semicongductores,
Puebla, México.
ORCID: 0000-0001-5498-5640

José Nathanael Wuitz Juan

Universidad Autónoma de Campeche,
Estudiante de Mecánica Eléctrica
de la Facultad de Ingeniería,
San Francisco de Campeche, México.

RESUMEN: Este capítulo se presenta el diseño y modelado de un sistema de refrigeración utilizando celdas Peltier para mejorar la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos. La temperatura elevada en los paneles fotovoltaicos reduce su rendimiento, por lo que se propone el uso de celdas Peltier, que aprovechan el efecto termoeléctrico para disipar el calor y mantener las temperaturas óptimas. Las celdas Peltier se integran con disipadores de calor y otros componentes térmicos para crear un sistema eficiente. A través del modelado 3D en SolidWorks, se modela el sistema de refrigeración completo, el cual contiene las celdas Peltier, intercambiador y su estructura de soporte. El modelado mediante SolidWorks permite crear y visualizar múltiples variaciones en el diseño y prever el comportamiento del sistema antes de su implementación en físico. Además, se abordará los beneficios de esta

tecnología tanto en instalaciones fotovoltaicas a gran escala como en aplicaciones de menor escala, como viviendas o dispositivos autónomos. La posible implementación de este sistema no solo mejora la eficiencia energética, sino que también aumenta la vida útil de los paneles fotovoltaicos.

PALABRAS CLAVE: Efecto termoeléctrico, Celda Peltier, Paneles fotovoltaicos.

3D DESIGN AND MODELING OF A REFRIGERATION SYSTEM WITH PELTIER CELLS FOR ITS APPLICATION IN PHOTOVOLTAIC ENERGY

ABSTRACT: This chapter presents the design and modeling of a cooling system using Peltier cells to improve the efficiency of photovoltaic systems. High temperatures in photovoltaic panels reduce their performance, so the use of Peltier cells is proposed, which take advantage of the thermoelectric effect to dissipate heat and maintain optimal temperatures. Peltier cells are integrated with heat sinks and other thermal components to create an efficient system. Through 3D modeling in SolidWorks, the complete cooling system is modeled, which contains the Peltier cells, heat exchanger and its support structure. Modeling using SolidWorks allows creating and visualizing multiple variations in the design and predicting the behavior of the system before its physical implementation. In addition, the benefits of this technology will be addressed both in large-scale photovoltaic installations and in smaller-scale applications, such as homes or autonomous devices. The possible implementation of this system not only improves energy efficiency, but also increases the useful life of photovoltaic panels.

KEYWORDS: Thermoelectric effect, Peltier cell, Photovoltaic panels.

INTRODUCCIÓN

El efecto termoeléctrico se refiere a la interacción entre fenómenos térmicos y eléctricos en los materiales, específicamente a la generación de calor cuando circula corriente a través de dos conductores diferentes, o a la generación de corriente eléctrica cuando un conductor está sometido a un gradiente de temperatura [1]. Existen tres efectos principales asociados a este fenómeno: **efecto Seebeck, Thomson y Peltier**.

El **efecto Seebeck**, descubierto por Thomas Johann Seebeck en 1821, consiste en la generación de una corriente eléctrica al aplicar calor en la unión de dos materiales diferentes, como cobre y bismuto. Seebeck observó que, al soldar dos alambres de estos metales en forma de lazo y calentar uno de ellos, se producía un campo magnético y, además, una corriente eléctrica si el calor se aplicaba en la unión de los metales. En general, cada metal tiene una densidad diferente de electrones "libres" por unidad de volumen. En consecuencia, cuando dos metales entran en contacto, los electrones libres de cada uno tienden a difundirse hacia el otro metal para igualar la densidad electrónica local. Esta difusión genera una diferencia de carga entre los metales en la juntura, creando un potencial eléctrico. Esta diferencia de carga y potencial depende de la temperatura. Como resultado, cuando se tienen dos uniones bimetálicas a diferentes temperaturas (ver

Figura 1), se genera una diferencia de potencia entre las junturas, lo que provoca el flujo de corriente al cerrarse el circuito [2].

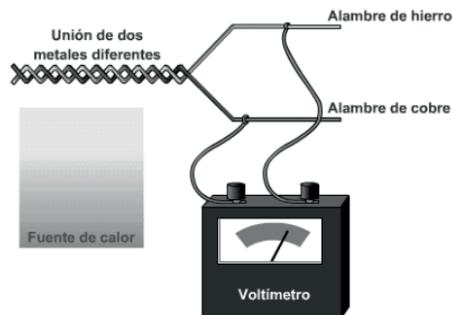


Figura 1. Efecto Seebeck [3].

El **efecto Thomson**, descubierto por William Thomson en 1851, describe el fenómeno en el que un material, cuando está sometido a un gradiente de temperatura y a una corriente interna, intercambia calor con su entorno (ver **Figura 2**). Este intercambio puede ser tanto de generación como de absorción de calor. A diferencia de otros efectos termoeléctricos como los efectos Seebeck y Peltier, el efecto Thomson ocurre en un solo material, sin necesidad de unir dos materiales diferentes [3].

El flujo de potencia térmica por unidad de volumen debido al efecto Thomson de material A, viene dado por la siguiente expresión [4]:

$$\dot{Q} = \gamma^4 j \nabla T$$

donde:

γ^4 es el coeficiente Thomson (V/K),

j es la densidad de corriente (A/m²)

∇T es el gradiente de temperatura, suponiendo que la densidad de corriente y el gradiente de temperatura son lineales.

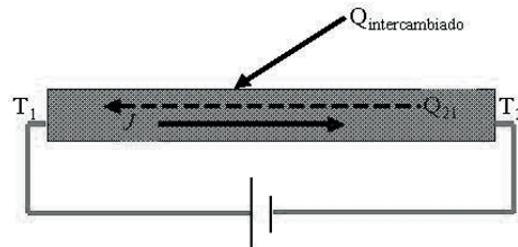


Figura 2. Efecto Thomson [5].

El **efecto Peltier** es un fenómeno termodinámico descubierto en 1834 por el físico francés Jean Charles Athanase Peltier. Este efecto ocurre cuando una corriente eléctrica fluye a través de la unión de dos conductores diferentes, generando una absorción o liberación de calor en esa unión, dependiendo de la dirección de la corriente. En términos simples, cuando una corriente eléctrica pasa a través de la unión de dos materiales conductores diferentes (metales o semiconductores), uno de los materiales absorbe calor y el otro lo libera, como se muestra en la **Figura 3**. La cantidad de calor intercambiado está relacionada con la intensidad de la corriente y las propiedades de los materiales involucrados [3]. Este efecto es la base de dispositivos conocidos como enfriadores termoeléctricos, que se utilizan en aplicaciones donde se necesita una transferencia de calor controlada, como en sistemas de refrigeración de pequeñas dimensiones o en la disipación de calor en componentes electrónicos. El efecto Peltier es el opuesto del efecto Seebeck, en el cual una diferencia de temperatura entre dos metales distintos genera una corriente eléctrica.

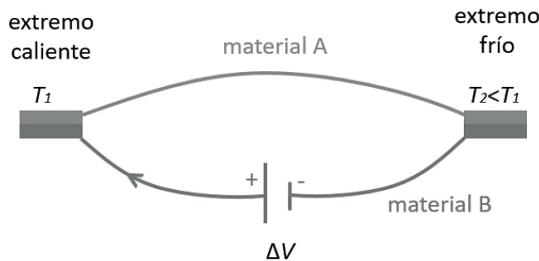


Figura 3. Efecto Peltier [4].

La potencia térmica absorbida o generada debido al efecto Peltier se puede expresar de la siguiente forma [3]:

$$Q = \Pi_{XY} * I \quad \text{o} \quad Q = (\Pi_Y - \Pi_X) * I$$

donde:

Q: Potencia calorífica absorbida o generada por el efecto Peltier.

I: Corriente que circula por las uniones expresadas en A.

Π_{XY} : Coeficiente Peltier entre los dos materiales expresado en V.

Π_X : Coeficiente Peltier del material X.

Π_Y : Coeficiente Peltier del material Y.

LA CELDA PELTIER

Es un módulo termoeléctrico el cual consiste, en una serie de termopares conectados en serie eléctricamente, pero en paralelo térmicamente. Estos termopares están formados por dos tipos de conductores: tipo-N y tipo-P (ver **Figura 4**). Estos conductores se conectan a través de un conductor de cobre, y entre ellos se encuentran dos placas cerámicas

que actúan como aislantes eléctricos. Las placas cerámicas tienen alta conductividad térmica (k) y muy baja conductividad eléctrica (σ), lo que permite que el calor se transfiera eficientemente a través del módulo sin permitir el paso de corriente eléctrica. El conjunto tiene una estructura en forma de “sándwich” [4].

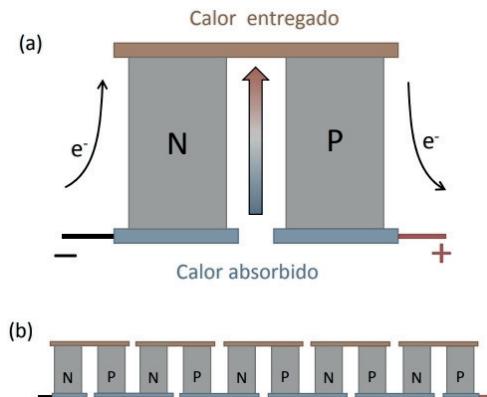


Figura 4. Celda Peltier, a) elemento formado por semiconductores N y P, b) celda con elementos conectados en serie [2].

En una celda Peltier, ocurren varios fenómenos, como los efectos Peltier, Seebeck y Thomson, además de los procesos relacionados con la transferencia de calor. Al aplicar una diferencia de potencia sobre la celda, se genera una transferencia de calor por unidad de tiempo en la cara caliente, la cual se describe [6]:

$$Q_{PC} = \alpha_{AB} T_C I$$

donde:

Q_{PC} : Transferencia de calor por unidad de tiempo.

T_C : Temperatura de la cara caliente.

α_{AB} : Coeficiente de Seebeck.

I: Corriente que atraviesa el circuito.

Por el mismo efecto, la absorción de calor por unidad de tiempo en la cara fría será:

$$Q_{PF} = \alpha_{AB} T_F I$$

Q_{PF} : Transferencia de frío por unidad de tiempo.

T_F : Temperatura de la cara fría.

α_{AB} : Coeficiente de Seebeck.

I: Corriente que atraviesa por el circuito.

Por otra parte, si se consideran las perdidas por unidad de tiempo originadas por el efecto Joule. Las cuales se supone que se reparten a la mitad para cada cara, estas pérdidas quedarán expresadas por [6]:

$$Q_J = \frac{1}{2} I^2 R$$

donde:

Q_J : Perdidas por unidad de tiempo.

R : Resistencia eléctrica de la celda Peltier.

La diferencia de temperatura entre ambas caras producirá un efecto de conducción térmica entre la cara caliente y la cara fría, cuantificable como [6]:

$$Q_{CT} = \frac{T_C - T_F}{R_{TH}}$$

donde:

Q_{CT} : Efecto de conducción térmica entre la cara fría y la cara caliente.

R_{TH} : Resistencia térmica entre la cara caliente y la cara fría.

T_C : Temperatura cara caliente.

T_F : Temperatura cara fría.

El flujo neto calorífico absorbido por la cara fría estará dado por:

$$Q_C = Q_{PF} - Q_J - Q_{CT} = \alpha_{AB} T_F I - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_C - T_F}{R_{TH}}$$

Mientras que el calor cedido que deber ser disipado a través de la cara caliente será igual a:

$$Q_F = Q_{PC} - Q_J - Q_{CT} = \alpha_{AB} T_C I - \frac{1}{2} I^2 R - \frac{T_C - T_F}{R_{TH}}$$

Aplicando el primer Principio de la Termodinámica, resultará que la potencia eléctrica suministrada será igual a la diferencia entre los flujos caloríficos de disipación de absorción, concluyéndose lo siguiente [6]:

$$Pe = Q_C - Q_F = \alpha_{AB} (T_C - T_F) I + I^2 R = \alpha \Delta T I + I^2 R$$

La potencia eléctrica es igual a la variación de temperatura entre las caras más el efecto Joule.

MODELADO 3D DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON CELDAS PELTIER

El modelado 3D se realizó mediante SolidWorks, el cual es un software de diseño asistido por computadora (CAD) [7], para crear los modelos 3D de los diferentes componentes del sistema de refrigeración y la celda Peltier. Este software resultó ser

fundamental debido a su capacidad para representar de manera precisa y detallada cada pieza, permitiendo que el diseño se visualizara en tres dimensiones antes de la fabricación.

El desarrollo del modelo de la celda Peltier se realizó principalmente mediante el modelado de piezas, una técnica que permite trabajar y diseñar cada componente o elemento individual del sistema (ver **Figura 5**). Para ello, se emplearon diversas herramientas de modelado que facilitaron la creación de los componentes en tres dimensiones. Entre las principales herramientas utilizadas se encuentran [7]:

Herramientas de dibujo: se utilizaron para crear los perfiles de los componentes mediante líneas, redondeos, cotas, croquis y croquis 3D. Estas herramientas permitieron establecer las formas básicas y las dimensiones de las piezas que conformarían el sistema de refrigeración.

Herramientas de extrusión, barrido, recubrimiento, corte, redondeo, asistente de taladro, plano y modificación: Estas herramientas fueron esenciales para transformar los perfiles 2D creados en modelos 3D. Las extrusiones y los barridos permitieron generar cuerpos sólidos a partir de los croquis, mientras que los cortes y redondeos facilitaron la creación de detalles y geometrías complejas.

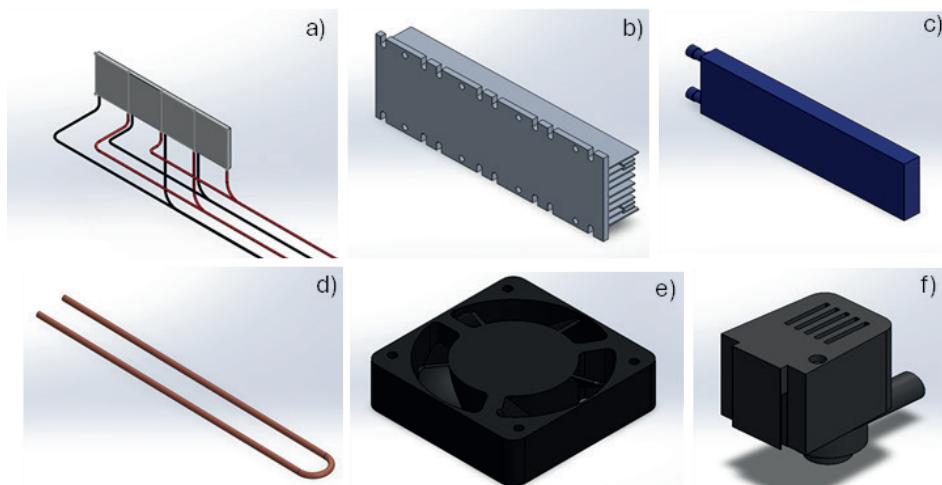


Figura 5. Modelado 3D de los principales componentes del sistema de refrigeración a) celdas Peltier, b) disipador, c) tanque, d) serpentín, e) ventilador y f) bomba de circulación.

Una vez que los componentes 3D fueron modelados, se procedió al modelado de ensamblaje, lo cual permitió la unión de todas las piezas para formar el sistema de refrigeración con celdas Peltier, para su acoplamiento en la parte posterior de un panel fotovoltaico, como se muestra en la **Figura 6**. Este proceso se llevó a cabo utilizando relaciones de posición que garantizaron que las piezas estuvieran correctamente alineadas y posicionadas en el espacio tridimensional.

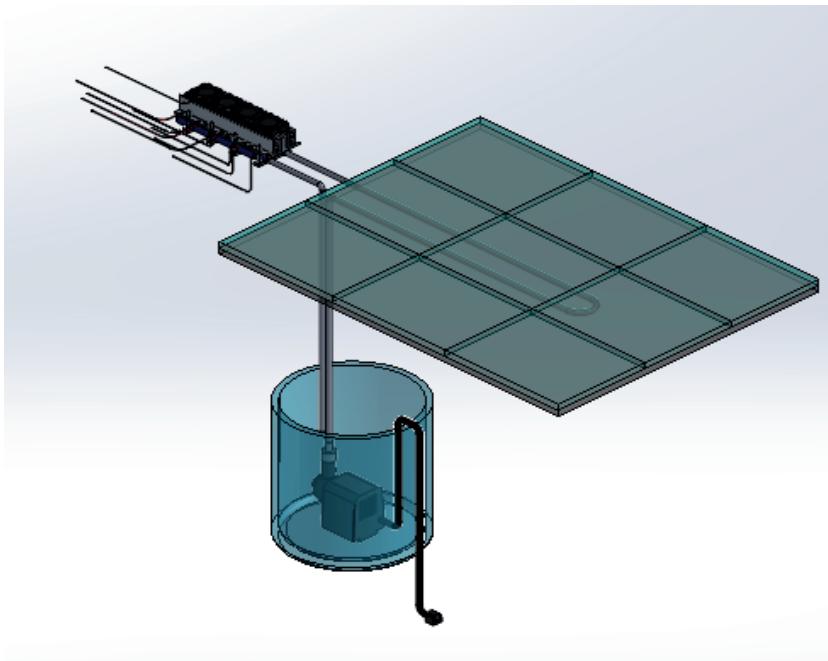


Figura 6. Modelado 3D del sistema de refrigeración con celdas Peltier, acoplado a un panel fotovoltaico.

Además de las herramientas básicas de modelado, SolidWorks ofrece funcionalidades avanzadas como la simulación, que permite analizar y predecir el comportamiento de los modelos 3D bajo diversas condiciones. Esta herramienta es especialmente útil para evaluar el desempeño del sistema de refrigeración en situaciones específicas, como cambios de temperatura, presiones o cargas, y optimizar su funcionamiento antes de la fabricación.

DESARROLLO DEL SISTEMA DE REFRIGERACIÓN CON CELDAS PELTIER

En la búsqueda constante por mejorar la eficiencia de los sistemas de energía renovable, una de las principales limitaciones de los paneles fotovoltaicos es la pérdida de rendimiento debido al aumento de temperatura. Este fenómeno térmico reduce significativamente la capacidad de generación de electricidad de los paneles solares, especialmente en climas cálidos. En este contexto, el desarrollo e implementación de un sistema de refrigeración basado en celdas Peltier ofrece una solución innovadora y eficiente.

La implementación de este sistema consistió en varios pasos clave. En primer lugar, se diseñó un modelo de integración que permitiera la instalación de las celdas Peltier, en uno de sus lados (caliente) se hizo contacto con el disipador de calor para permitir

maximizar la capacidad de refrigeración, permitiendo una disipación térmica eficiente (ver **Figura 7**). Del otro lado de las celdas (parte fría), se integró un tanque que hace pasar en su interior el fluido (agua) y pueda enfriar dicho fluido.

En la parte posterior del panel fotovoltaico, se acopla un ducto de cobre en forma de U, el cual se le hace pasar el agua para reducir la temperatura del panel cuando está bajo el sol. Dicho ducto, está conectado a una bomba que recircula el agua y está a su vez pasa por el sistema de refrigeración para bajar la temperatura.

La siguiente etapa fue la conexión eléctrica de las celdas Peltier a un controlador de corriente. Para garantizar la durabilidad y la eficiencia, también se implementaron sensores térmicos que monitorean constantemente la temperatura de ambos lados de las celdas Peltier.

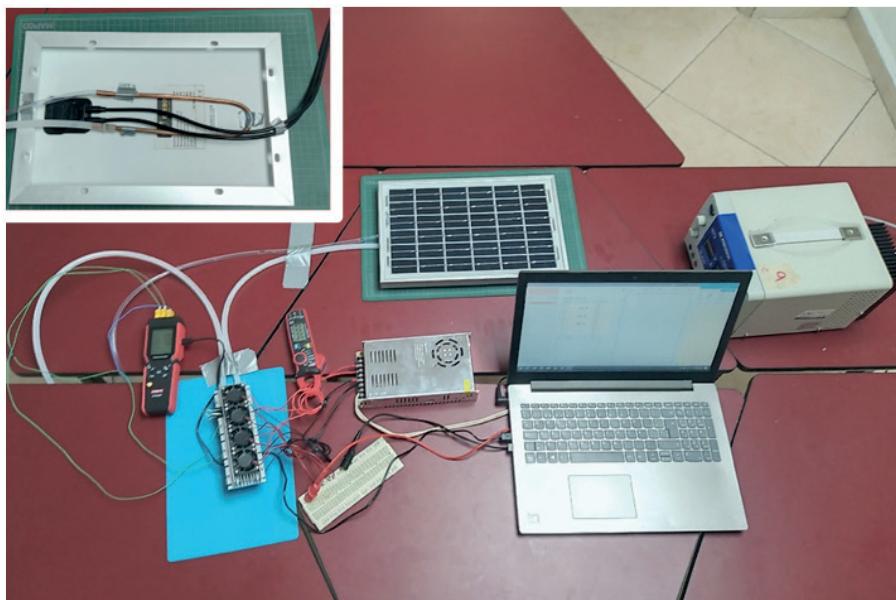


Figura 7. Implementación del sistema de refrigeración con celdas Peltier, acoplado a un panel fotovoltaico.

El sistema de refrigeración fue probado en condiciones de operación en el laboratorio, y los resultados demostraron una mejora significativa en la eficiencia de los paneles fotovoltaicos, en presencia de radiación solar (simulada). Esta integración no solo optimiza la producción energética, sino que también extiende la vida útil de los paneles, al mantener una temperatura de operación más estable.

La **Figura 8** muestra la gráfica de temperaturas y consumo de corriente de las celdas Peltier en función del tiempo, se observa que, a pesar de que el consumo de corriente se mantiene constante a lo largo del tiempo, las temperaturas de las celdas Peltier tanto del lado frío y caliente presentan comportamientos distintos. La temperatura en el lado

frío disminuye gradualmente, alcanzando un valor de aproximadamente 14.5°C a los dos minutos de iniciado el proceso y se mantiene estable conforme transcurre el tiempo; mientras que la temperatura en el lado caliente presenta una disminución de aproximadamente de 2°C con respecto a la temperatura ambiente (24°C Campeche, México). Esta diferencia en las temperaturas es característica del funcionamiento de las celdas Peltier, que generan un gradiente térmico entre sus dos superficies al aplicar corriente. El comportamiento observado refleja la eficiencia en la refrigeración del lado frío, así como la disipación de calor hacia el lado caliente.

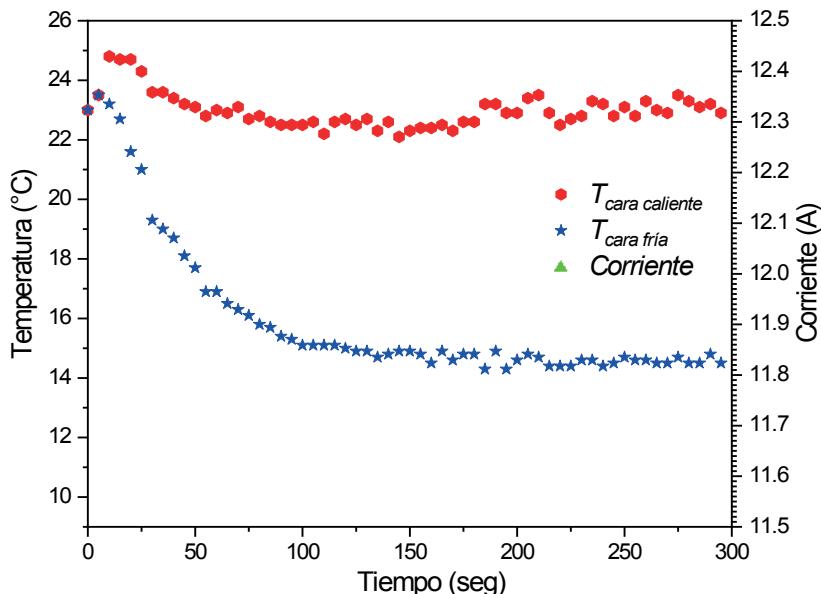


Figura 8. Gráfica de temperaturas y consumo de corriente de las celdas Peltier en función del tiempo.

La **Figura 9** muestra la gráfica de variación de la transferencia de calor (Q) por unidad de tiempo (usualmente en W) en ambas caras de una celda Peltier, tanto la cara fría como la caliente, cuando se aplica una diferencia de potencia (ΔP) sobre la celda. La celda Peltier, un dispositivo termoeléctrico, opera mediante el efecto Peltier, el cual genera un flujo de calor desde un lado a otro al aplicar una corriente eléctrica.

Cara fría: En la cara fría de la celda Peltier, la transferencia de calor tiende a ser negativa (Q_{PF}), lo que indica que el calor está siendo absorbido de su entorno.

Cara caliente: En la cara caliente, la transferencia de calor es positiva (Q_{PC}), ya que el calor absorbido por la cara fría es expulsado hacia la cara caliente.

En la gráfica, se observa cómo ambas transferencias de calor (en las caras fría y caliente) disminuyen en función del tiempo, pero el ritmo de incremento puede variar dependiendo de la eficiencia del dispositivo y la resistencia térmica de los materiales involucrados.

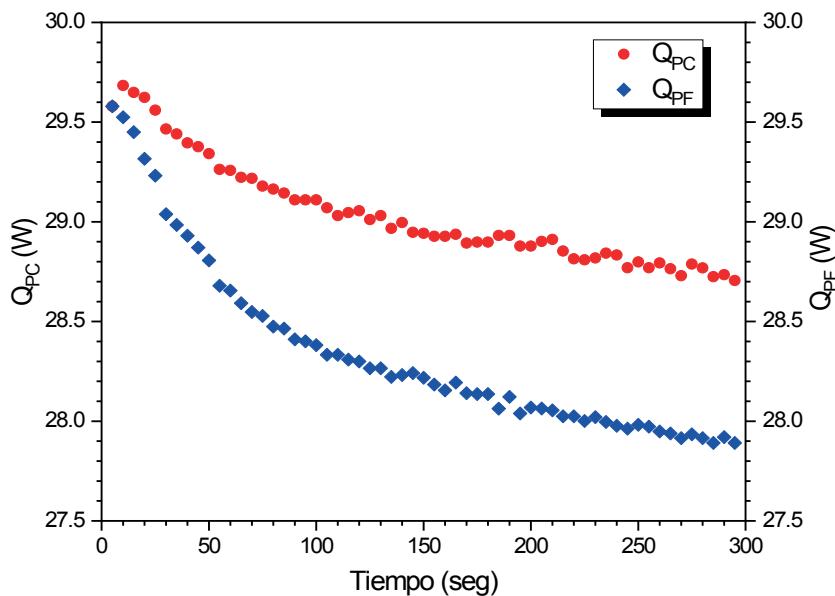


Figura 9. Gráfica de transferencias de calor Q_{pc} y Q_{pf} de las celdas Peltier en función del tiempo.

Finalmente, el desarrollo y modelado de un sistema de refrigeración utilizando celdas Peltier ha demostrado ser una solución innovadora para aplicaciones en energía fotovoltaica. A través de un diseño detallado y la construcción de un modelo tridimensional, se logró integrar de manera eficiente las celdas Peltier como elementos clave para la gestión térmica de sistemas fotovoltaicos. Este tipo de sistemas de refrigeración podría ser especialmente útil para mantener temperaturas óptimas en paneles fotovoltaicos, prolongando su vida útil y maximizando su capacidad de generación de energía. De este modo, el desarrollo de esta tecnología contribuye a la mejora de la eficiencia de los sistemas fotovoltaicos y abre nuevas posibilidades para su implementación en diversas aplicaciones, desde la gestión térmica de equipos electrónicos hasta la mejora en sistemas de energía autónomos en zonas remotas.

REFERENCIAS

- [1] Optimización de un Sistema de Refrigeración Termoeléctrica empleando el Método de Minimización de Generación de Entropía. (2006). [Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/843/gutierrezcoria.pdf?sequence=12&isAllowed=y>
- [2] S. Fernando. Termoelectricidad. Universidad de Buenos Aires. Accedido el 6 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://materias.df.uba.ar/lab04aa2014c2/files/2014/09/2014-Termoelectricidad.pdf>

[3] R. Muñoz Zurdo, “*Diseño de un sistema termoeléctrico aprovechando características geotérmicas*”, Trabajo final de grado, Univ. Politec. Catalunya, Catalunya, 2013. [En línea]. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19525/Memòria.pdf>

[4] S. Diéz Garcia, «Análisis de viabilidad de aplicaciones para recuperación de energía mediante efectos termoeléctricos», Trabajo de fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, 2017. Disponible en: https://oa.upm.es/48875/1/TFG_SARA_DIEZ_GARCIA.pdf

[5] L. F. Guayllas, “Análisis del comportamiento de módulos termoeléctricos para transformación de calor existente en el colector de escape a energía eléctrica en un motor G10”, Tesis de fin de grado, Univ. Politec. Sales., Cuenca, 2014. Accedido el 5 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6986/1/UPS-CT003641.pdf>

[6] D. Torres González, “*Sistema de Cogeneración para recuperar la energía térmica residual; del tablero de control de frenado de los ascensores ubicados en el edificio Torre Esmeralda I en la CDMX*”, Trabajo de grado, Inst. Politec. Nac. Esc. Super. Ing. Mec. Electr., Ciudad de México, 2018. Accedido el 15 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/27722/TESINA_211217_REV54.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[7] «CAD 3D de SOLIDWORKS», SOLIDWORKS, 11 de diciembre de 2024. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/product/solidworks-3d-cad>