

Planteamiento y simulación de modelo teórico

María José Rojas, Mateo Ortiz, Miguel Casallas

I. DOCUMENTACIÓN

El comportamiento de una celda termoeléctrica se fundamenta en fenómenos físicos asociados al transporte de carga y de calor en materiales semiconductores. El más importante de ellos es el efecto Peltier, que consiste en la absorción o liberación de calor en la unión de dos materiales diferentes cuando circula una corriente eléctrica [1]. En una celda termoeléctrica, compuesta por múltiples pares de elementos tipo P y tipo N interconectados, este fenómeno genera un flujo neto de calor desde una cara denominada *fria* hacia la cara opuesta o *caliente*.

El funcionamiento teórico de la celda se entiende como el resultado de la interacción de cuatro efectos fundamentales:

1. **Efecto Peltier:** Es el responsable directo del enfriamiento en la unión fría y del calentamiento en la unión caliente. La magnitud del calor transferido es proporcional a la corriente eléctrica que atraviesa los semiconductores y al coeficiente de Seebeck de los materiales [2].
2. **Efecto Joule:** La resistencia eléctrica de los materiales provoca generación interna de calor cuando circula la corriente. Este calentamiento representa una pérdida energética que tiende a contrarrestar la acción del efecto Peltier.
3. **Conducción de Fourier:** El gradiente de temperaturas entre las caras fría y caliente induce un flujo natural de calor desde la cara caliente hacia la fría. Este fenómeno limita la capacidad de refrigeración de la celda y establece un equilibrio con el calor bombeado por el efecto Peltier [3].
4. **Efecto Thomson:** Describe la generación o absorción adicional de calor dentro de un conductor sometido simultáneamente a una corriente eléctrica y a un gradiente de temperatura. Aunque a menudo es pequeño, en análisis detallados resulta relevante para describir el comportamiento dinámico de la celda [4].

El balance entre estos fenómenos determina la capacidad neta de enfriamiento de la celda y su eficiencia. En términos teóricos, se reconoce que la diferencia de temperatura máxima que puede alcanzarse entre las caras depende de las propiedades intrínsecas de los materiales, expresadas a través de parámetros como el coeficiente de Seebeck, la conductividad térmica y la resistividad eléctrica. Estos

parámetros, a su vez, presentan una dependencia con la temperatura, lo que complejiza el modelado matemático y exige el uso de modelos transitorios para describir la evolución temporal de la celda [4].

En este sentido, estudios de modelado dinámico han demostrado que a corrientes bajas el comportamiento puede predecirse de forma adecuada suponiendo propiedades constantes. Sin embargo, a corrientes medias y altas, la variación de las propiedades de los semiconductores con la temperatura introduce discrepancias significativas. En estas condiciones, la predicción de la respuesta transitoria de la celda requiere modelos tridimensionales que incluyan los efectos acoplados de conducción térmica, transporte eléctrico, efecto Peltier, efecto Joule y efecto Thomson [4], [5].

Desde una perspectiva teórica, la celda termoeléctrica constituye un sistema no lineal, en el que las variables de interés principalmente las temperaturas en el lado frío y caliente dependen de manera simultánea de la corriente aplicada y de los parámetros materiales.

II. MODELO EN VARIABLES DE ESTADO

El bloque del dispositivo Peltier representa un enfriador electrotérmico o generador termoeléctrico que utiliza los efectos Peltier y Seebeck. El bloque convierte energía eléctrica y térmica:

- Sin flujo de corriente, si la temperatura presentada en el puerto térmico **B** es mayor que la temperatura presentada en el puerto térmico **A**, entonces existe una diferencia de potencial positiva medida desde el puerto eléctrico positivo al negativo.
- Cuando el bloque actúa como un dispositivo de enfriamiento, una corriente positiva hace que el calor fluya desde el puerto **A** al puerto **B**, enfriando el puerto **A** con respecto al puerto **B**.

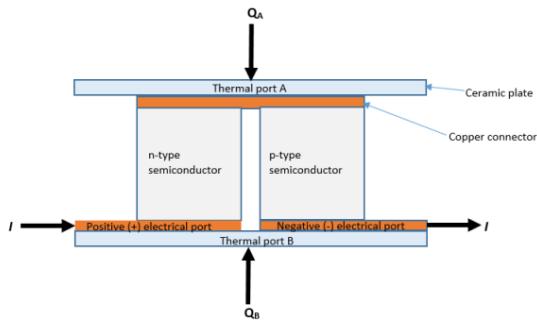


Figura 1. Bloque del dispositivo Peltier.

Las ecuaciones que modelan el sistema son:

$$Q_A = \alpha * T_A * I - \frac{1}{2} * I^2 * R + K(T_A - T_B) \quad (1)$$

$$Q_B = -\alpha * T_B * I - \frac{1}{2} * I^2 * R + K(T_B - T_A) \quad (2)$$

$$W = V * I \quad (3)$$

$$W + Q_A + Q_B = 0 \quad (4)$$

dónde:

- Q_A es el flujo de calor hacia el puerto A.
- Q_B es el flujo de calor hacia el puerto B.
- T_A es la temperatura del puerto A.
- T_B es la temperatura del puerto B.
- W es potencia eléctrica (positiva cuando fluye hacia el bloque).
- V es la diferencia de potencial entre los puertos + y -.
- I es corriente eléctrica, positiva del puerto + al -.
- R es la resistencia eléctrica total.
- α es el coeficiente de Seebeck.
- K es conductancia térmica.

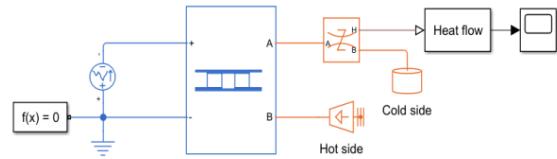
A partir de las ecuaciones anteriores se obtiene la siguiente ecuación eléctrica:

$$V = \alpha(T_B - T_A) + I * R \quad (5)$$

El bloque tiene una variable de registro potencia disipada. Esta variable indica la potencia eléctrica promedio durante un ciclo de CA si se alimenta el dispositivo con una fuente de CA (potencia eléctrica de CC). En términos de ecuaciones, es igual al valor instantáneo de $I^2 * R$ y resulta útil en aplicaciones de refrigeración para indicar la parte no productiva del flujo de calor [6].

III. SIMULACIÓN DEL ENFRIADOR TERMOELÉCTRICO EN MATLAB/SIMULINK

Para validar el modelo teórico en un entorno computacional, se utilizó el ejemplo oficial de MATLAB/Simscape “Use of Peltier Device as Thermoelectric Cooler” [6]. Este modelo incluye el bloque Peltier Device, el cual representa el comportamiento termoeléctrico de una celda basada en el efecto Peltier, considerando el transporte de calor en ambas caras del módulo, las pérdidas por efecto Joule y la conducción térmica inversa.



Use of Peltier Device as Thermoelectric Cooler

1. [Plot characteristic curves](#) for the Peltier cell ([see code](#))
2. [Explore simulation results](#) using [Simscape Results Explorer](#)
3. [Learn more](#) about this example

Copyright 2018-2023 The MathWorks, Inc.

Figura 2. Esquema de Celda Peltier como Enfriador termoeléctrico [6].

Este diagrama representa como el dispositivo Peltier se usa como enfriador termoeléctrico en Simscape de Matlab.

Componentes del diagrama:

1. Fuente de corriente constante ($f(x)=0$)

Generador de corriente constante que al pasar por el dispositivo Peltier genera el gradiente térmico entre los lados del módulo.

2. Dispositivo Peltier.

Está representado por un bloque que contiene dos elementos A y B. La corriente fluye a través de las celdas de materiales semiconductores, causando que el calor sea absorbido del lado frío (B) y disipado en el lado caliente (A).

3. Lado Caliente y Lado Frío.

El lado caliente (A) está conectado a un disipador de calor para evitar el sobrecalentamiento.
El lado frío (B) es donde se transfiere el calor a una carga la cual se busca refrigerar.

4. Flujo de Calor (Heat flow)

Es una salida del dispositivo que representa la cantidad de calor transferido desde el lado frío al lado caliente debido a la diferencia de temperaturas.

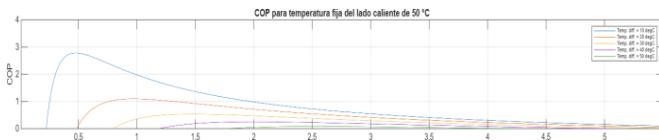


Figura 3. COP para temperatura fija del lado caliente de 50 °C [6].

El coeficiente de rendimiento (COP) se define como la cantidad de calor transferido desde el lado frío (Q_c) dividido entre la potencia eléctrica que consume el dispositivo (P_{in}).

$$COP = \frac{Q_c}{P_{in}} \quad (6)$$

Para un dispositivo Peltier funcionando en modo enfriamiento el COP también depende de varios factores como la diferencia de temperatura, donde:

$$COP = \frac{T_{cold}}{T_{hot} - T_{cold}} \cdot \left(1 - \frac{T_{cold}}{T_{hot}}\right) \quad (7)$$

- T_{cold} es la temperatura del lado frío (en Kelvin).
- T_{hot} es la temperatura del lado caliente (en Kelvin).

El COP también depende de: la corriente aplicada ya que a medida que esta aumenta la cantidad de calor extraído del lado frío aumentara, pero más allá de un punto óptimo, el efecto Joule hace que el COP disminuya; la resistencia interna debido a que un valor más alto de resistencia interna reduce la eficiencia del dispositivo; y del coeficiente de Seebeck porque un valor más alto, mejora la eficiencia.

La figura 3, muestra el coeficiente de rendimiento en función de la corriente aplicada para diferentes diferencias de temperatura entre el lado caliente y frío; se observa que tiene un punto en donde el COP alcanza un valor máximo para una corriente específica antes de disminuir, esto por el efecto Joule mencionado anteriormente.

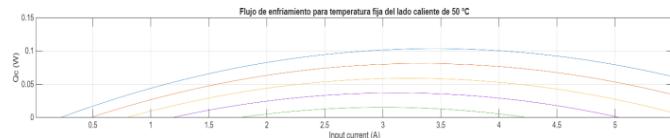


Figura 4. Flujo de enfriamiento para temperatura fija del lado caliente de 50 °C [6].

El flujo de calor (Q_c) se refiere a la cantidad de calor que el dispositivo extrae del lado frío del módulo y se transfiere al lado caliente. Para calcular este flujo se deben tener en cuenta parámetros como la corriente aplicada, la diferencia de temperatura, la resistencia interna y el coeficiente de Seebeck.

$$Q_c = I \cdot \left(\frac{S \cdot \Delta T}{R} - I \cdot R \right) \quad (8)$$

Donde:

- Q_c es el **flujo de calor** extraído del lado frío (en W).
- I es la **corriente** aplicada al dispositivo Peltier (en A).
- S es el **coeficiente de Seebeck** del material termoeléctrico (en V/K).
- R es la **resistencia interna** del módulo Peltier (en Ω).
- ΔT es la **diferencia de temperatura** entre el lado caliente y el lado frío (en K o °C).

La figura 4 presenta el flujo de calor en función de la corriente de entrada, para una temperatura fija de 50° C en el lado caliente, se evidencia como cambia el flujo de calor a medida que varía la corriente aplicada; al aumentar la corriente se observa que el flujo de calor también aumenta, esto porque al aplicar más corriente al dispositivo, se genera un mayor gradiente térmico; entre mayor la diferencia de temperatura se aprecia que el flujo es menor, se debe a que el dispositivo tiene que trabajar más para mantener la diferencia térmica, lo que reduce el calor extraído del lado frío y por último se puede apreciar también que es notorio el punto de corriente óptima por el efecto Joule a partir de la cual el flujo disminuye o se estabiliza.

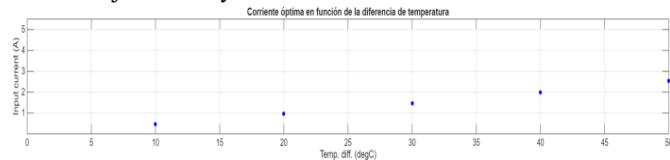


Figura 5. Corriente óptima en función de la diferencia de temperatura.

La corriente óptima en el dispositivo es aquella que maximiza el coeficiente de rendimiento, es decir la que

proporciona el mejor equilibrio entre la cantidad de calor y la potencia eléctrica consumida, dicha corriente está dada por:

$$I_{opt} = \frac{S \cdot \Delta T}{R} \quad (9)$$

- I_{opt} es la **corriente óptima** (en A).
- S es el **coeficiente de Seebeck** del material termoeléctrico (en V/K).
- ΔT es la **diferencia de temperatura** entre el lado caliente y el lado frío (en K o °C).
- R es la **resistencia interna** del dispositivo Peltier (en Ω).

De la ecuación se puede decir que a medida que la diferencia de temperatura aumente la corriente óptima también lo hace debido a que para mantener una mayor diferencia de temperatura el dispositivo necesita manejar más corriente.

En la figura 5 se observa la gráfica de corriente óptima en función de la diferencia de temperatura comprobando que sigue el comportamiento lineal de la ecuación 4 para la relación entre corriente óptima y diferencia de temperatura.

IV. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA

Las especificaciones del sistema usando como enfriador termoeléctrico incluyen parámetros que determinan el rendimiento y funcionamiento en diferentes condiciones siendo estos:

1. Coeficiente de Seebeck (S).

Determina la cantidad de voltaje generado por el dispositivo en respuesta a una diferencia de temperatura.

2. Resistencia interna (R).

Resistencia del módulo de peltier, que afecta la cantidad de calor disipada por efecto Joule.

3. Conductancia Térmica (K).

Representa la capacidad del dispositivo para transferir calor entre el lado caliente y el lado frío.

4. Corriente aplicada.

Corriente eléctrica aplicada al módulo.

5. Potencia de entrada.

Potencia eléctrica consumida por el dispositivo, se calcula como $P_{in} = I^2 \cdot R$.

Para el modelo simulado dichos parámetros son:

1. $S = 0.00022 \text{ V/K}$.
2. $R = 0.02 \Omega$.
3. $K = 0.0015 \text{ W/K}$.

V. APPLICACIÓN DEL SISTEMA

Una aplicación del sistema es la utilización de las celdas Peltier para calentar bebidas. En este caso, se alimenta con una fuente de 12 V y 5 A.

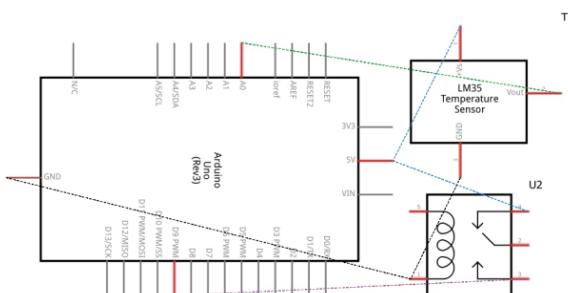


Figura 6. Montaje esquemático

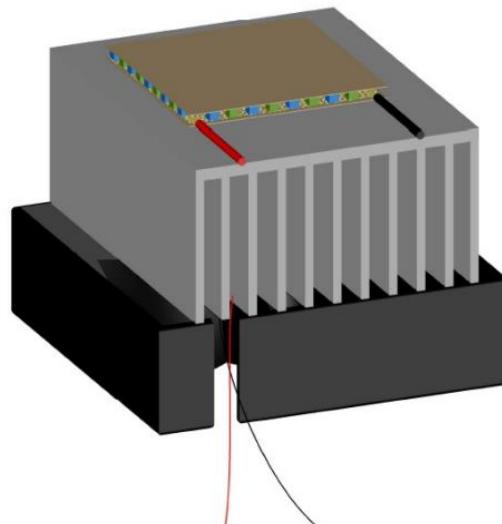


Figura 6. Montaje para la aplicación de calentar bebidas

REFERENCIAS

- [1] A. M. L. Sierra, *Design and Analysis Utilizing Water in the Air Condensation Process Using a Thermoelectric Cooler with a Solar Power Plant*, 2023.
- [2] Q. Li, et al., "The Influence of Peltier Effect on the Exergy of Thermoelectric Cooler-Thermoelectric Generator Systems," *Energy Technology*, vol. 11, no. 2, pp. 1–15, 2023.
- [3] Z. Li and D. Zhao, "Effect of Joule Heat Asymmetry on Thermoelectric Cooler Performance," *Energies*, vol. 16, no. 4, pp. 1234–1247, 2023.
- [4] B. Okyere, A. Agyemang, and E. Mensah, "Use of Thermoelectric Cooler as Humidity Regulator," *International Journal of Thermoelectricity*, vol. 9, no. 1, pp. 55–65, 2022.

- [5] J. Smoot, "Choosing and Using Advanced Peltier Modules for Thermoelectric Cooling," *Digi-Key Articles*, 2024. [Online]. Available: <https://www.digikey.com/en/articles/choosing-using-advanced-peltier-modules-thermoelectric-cooling>
- [6] MathWorks, "Use of Peltier Device as Thermoelectric Cooler," *Simscape Electrical Documentation*, 2025. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/use-of-peltier-device-as-thermoelectric-cooler.html>