

Caracterización de celdas Peltier para la generación sostenible de agua atmosférica por condensación

María C Salgado-Gutiérrez¹; José L López-Moreno¹; Juan C Arguello-Torres¹; José A Frago-Mandujano¹; María D Culebro-Farrera¹; Gilbert F Pérez-García¹

¹ Tecnológico Nacional de México - I. T. de Tuxtla Gutiérrez.

Área: Desarrollo sustentable.

Resumen

Se caracterizó el desempeño térmico de una celda termoeléctrica Peltier aplicada a la generación de agua atmosférica bajo cuatro configuraciones: ambiente exterior, contenedor con inyección de aire caliente, contenedor con inyección de aire ambiente y contenedor con aire estático.

El sistema incluyó sensores digitales de temperatura y humedad relativa, y se calculó el punto de rocío mediante la ecuación de Magnus–Tetens para determinar las condiciones de condensación.

Los resultados mostraron que las configuraciones con ambiente exterior e inyección de aire ambiente mantuvieron la cara fría por debajo de la temperatura de rocío durante la mayor parte del ensayo, logrando condensación sostenida. La inyección de aire caliente redujo la eficiencia por sobrecarga térmica, mientras que el aire estático limitó la condensación por falta de renovación de vapor.

Se concluye que el rendimiento de la celda depende del gradiente térmico respecto al punto de rocío y de la disponibilidad de vapor en el entorno inmediato, factores clave para optimizar sistemas de generación de agua atmosférica en condiciones reales.

Palabras clave: Generación de agua atmosférica, celda Peltier, condensación, gradiente térmico y humedad.

Abstract

The thermal performance of a thermoelectric Peltier cell applied to atmospheric water generation was characterized under four configurations: outdoor operation, container with hot air injection, container with ambient air injection, and container with static air.

The system included digital sensors for temperature and relative humidity, and the dew point was calculated using the Magnus–Tetens equation to determine condensation conditions.

Results showed that the outdoor and ambient air injection configurations maintained the cold side of the cell below the dew point for most of the test period, enabling sustained condensation. In contrast, hot air injection reduced efficiency due to thermal overload, while static air limited condensation because of insufficient vapor renewal.

It is concluded that the performance of the Peltier cell depends on the thermal gradient relative to the dew point and the availability of vapor in the immediate environment, which are key factors for

optimizing atmospheric water generation systems under real operating conditions.

Keywords: Atmospheric water generation, Peltier cell, condensation, thermal gradient, humidity.

Introducción

La escasez de agua potable es un desafío crítico a escala mundial. En este escenario, los sistemas de generación de agua atmosférica se han posicionado como una alternativa emergente al aprovechar la humedad relativa presente en el aire mediante procesos de condensación controlada (Narayan et al., 2020).

La eficiencia de estos sistemas depende de variables críticas como la temperatura de rocío, la disponibilidad de vapor de agua y la capacidad de mantener superficies frías por debajo de dicho umbral psicrométrico. Entre las tecnologías utilizadas, las celdas termoeléctricas tipo Peltier representan una solución compacta y de bajo consumo energético, capaces de establecer gradientes térmicos adecuados sin requerir compresores ni gases refrigerantes (Rowe, 2006; Sadeghzadeh et al., 2021); sin embargo, su rendimiento se ve afectado por las condiciones ambientales y la dinámica del flujo de aire alrededor de la superficie fría.

La presente investigación se enfocó en caracterizar térmicamente una celda Peltier (TEC1-12706) dedicada a la generación de agua atmosférica. Con dicho fin se diseñaron cuatro configuraciones experimentales (operación al aire libre, contenedor con inyección de aire caliente,

con aire a temperatura ambiente y con aire estático) para evaluar la influencia del flujo de aire y del gradiente térmico en el proceso de condensación.

Estos escenarios permitieron analizar la interacción entre el gradiente térmico impuesto por la celda, la temperatura de rocío y la disponibilidad local de vapor de agua. El objetivo fue determinar la influencia conjunta de estas variables en la eficiencia de condensación, aportando lineamientos para optimizar sistemas termoeléctricos de captación de agua atmosférica en condiciones reales.

Fundamentos teóricos

La generación de agua atmosférica mediante condensación se basa en el aprovechamiento del contenido de humedad presente en el aire y en la reducción controlada de la temperatura por debajo del punto de rocío. Este principio físico se fundamenta en la termodinámica de la transferencia de calor y masa, así como en la psicrometría del aire húmedo (Rogers & Mayhew, 2019).

La temperatura de rocío corresponde al valor en el cual el aire húmedo se satura y comienza la condensación de vapor en forma de agua líquida. Su cálculo se realiza comúnmente mediante expresiones empíricas, como la ecuación de Magnus–Tetens, la cual ofrece alta precisión en rangos típicos de humedad relativa (Alduchov & Eskridge, 1996).

Las celdas termoeléctricas tipo Peltier constituyen una alternativa compacta y de bajo

costo para la generación de superficies frías, debido a que permiten establecer gradientes térmicos mediante el efecto termoeléctrico. Este fenómeno, descrito originalmente por Jean Charles Athanase Peltier en 1834, se manifiesta cuando una corriente eléctrica circula a través de la unión de dos materiales semiconductores, generando un flujo de calor que produce enfriamiento en una cara y calentamiento en la opuesta (Rowe, 2006).

El desempeño de una celda Peltier depende de su capacidad de disipación térmica en la cara caliente y de la eficiencia en el mantenimiento de temperaturas por debajo del punto de rocío en la cara fría. Factores como la conductividad térmica del disipador, la ventilación forzada y las condiciones ambientales influyen directamente en la eficacia del proceso de condensación (Sadeghzadeh et al., 2021). Ambientes estáticos tienden a limitar el proceso una vez alcanzado el equilibrio higrotérmico, reduciendo progresivamente la eficiencia (Narayan et al., 2020).

En comparación con otros métodos de generación de agua atmosférica, las celdas Peltier ofrecen una alternativa más sostenible y operativamente simple. Los sistemas de compresión de vapor presentan altos consumos energéticos y el uso de refrigerantes con potencial de calentamiento global, mientras que los métodos adsorbentes dependen de ciclos de regeneración térmica intensiva. Los captadores pasivos, por su parte, están limitados por la variabilidad climática y no

permiten control sobre la tasa de producción. En contraste, los módulos Peltier operan sin refrigerantes, requieren potencias moderadas y permiten control térmico directo, lo que favorece su integración en sistemas compactos alimentados por fuentes renovables. Estas características sustentan su pertinencia como opción eficiente y de bajo impacto ambiental para la generación de agua atmosférica.

Materiales y métodos

El presente estudio se enfocó en la caracterización térmica de una celda Peltier, orientada a la generación de agua atmosférica por condensación. Se utilizó una celda termoeléctrica TEC1-12706 operada a 12 V DC y 6 A, con una potencia nominal de 50–72 W, dimensiones de $40 \times 40 \times 4$ mm y un rango operativo de -30 a 70 °C. El contenedor experimental de doble cámara se fabricó con placas de melamina ($126 \times 59.5 \times 116$ mm) y se selló con silicón termoestable para minimizar pérdidas térmicas. En las configuraciones que lo requirieron se integraron ventiladores axiales de 12 V, y todo el sistema fue alimentado mediante una fuente de corriente continua regulada.

Se evaluaron cuatro configuraciones experimentales: operación en ambiente exterior, contenedor aislado con inyección de aire caliente, contenedor aislado con inyección de aire ambiente y contenedor aislado con aire estático.

En las configuraciones con ventilación forzada, el caudal de aire se mantuvo constante (con una velocidad de 1800 RMS y un flujo de aire de 21.8

CFM) para asegurar un aporte homogéneo de vapor. Cada ensayo concluyó una vez alcanzado el régimen térmico estable, definido por la estabilización de las temperaturas en ambas caras de la celda; aunque la duración varió entre configuraciones, se aplicó el mismo criterio para garantizar comparabilidad. Todos los experimentos se realizaron bajo condiciones ambientales similares, con temperaturas iniciales entre 28.5 y 29.3 °C y humedades relativas entre 76 y 81 %.

Diseño del experimental

Configuración 1: Ambiente exterior

La celda Peltier se operó en exteriores, sin confinamiento físico y bajo condiciones ambientales naturales. Se acopló un disipador de aluminio y ventilador axial en la cara caliente para favorecer la disipación térmica y mantener un gradiente adecuado.

Configuración 2: Contenedor con inyección de aire caliente

La celda se instaló en el centro de un contenedor de madera aislado, dividido en dos cámaras: una para la disipación en la cara caliente y otra para la condensación en la cara fría. Se inyectó aire caliente en la cámara fría mediante una secadora eléctrica para modificar las condiciones higrotérmicas (aumento de temperatura y reducción de humedad relativa) y evaluar el efecto de la carga térmica sobre la eficiencia de condensación (figura 1).

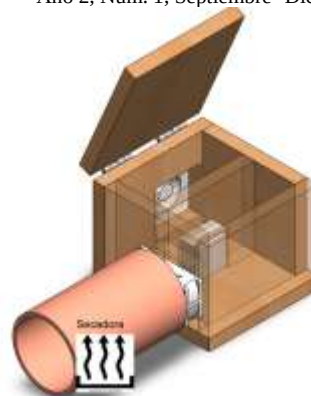


Figura 1. Celda Peltier ubicada en el interior de un contenedor con inyección de aire caliente.

Nota: Elaboración propia

Configuración 3: Contenedor con inyección de aire ambiente

En esta variante se empleó el mismo prototipo de doble cámara, incorporando un sistema de ventilación forzada que inyectaba aire exterior a temperatura ambiente directamente en la cámara fría. Este flujo continuo renovó el vapor de agua sin modificar de forma significativa las condiciones térmicas, favoreciendo la transferencia de masa hacia la superficie fría (figura 2).

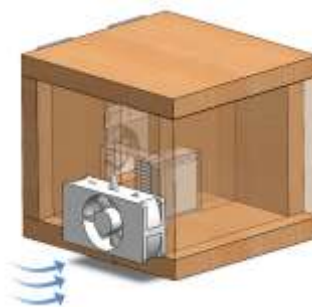


Figura 2. Celda Peltier ubicada en el interior de un contenedor con inyección de aire del exterior.

Nota: Elaboración propia

Configuración 4: Contenedor con aire estático

En esta configuración se selló por completo la cámara fría, eliminando la entrada de aire forzado.

Esto permitió evaluar el comportamiento del sistema en un volumen cerrado con disponibilidad limitada de vapor y sin renovación del entorno, condición útil para identificar restricciones de eficiencia asociadas al agotamiento de humedad (figura 3).

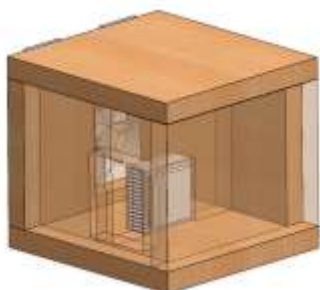


Figura 3. Celda Peltier ubicada en el interior de un contenedor con aire estático en la cara fría.
Elaboración propia

Instrumentación y adquisición de datos

Para la instrumentación del sistema se utilizaron sensores digitales de alta precisión conectados a una unidad central de procesamiento basada en ESP32, que permitió la adquisición, procesamiento y transmisión de datos en tiempo real. Los componentes utilizados fueron:

- Sensor digital de temperatura DS18B20, con precisión $\pm 0.5^\circ\text{C}$, instalado en diferentes ubicaciones: cámara fría, cara caliente, ambiente externo y superficie de la celda.
- Sensor de humedad relativa digital, con precisión de $\pm 2\%$ HR, ubicado en la cámara fría.

- Microcontrolador ESP32, encargado del registro continuo y almacenamiento de datos.

La frecuencia de muestreo fue de 1 dato por segundo y el almacenamiento se realizó a través de una conexión cableada para garantizar tanto el respaldo de la información como su visualización en tiempo real.

Estimación de la temperatura de rocío

A partir de los valores medidos de temperatura ambiente y humedad relativa, se calculó la temperatura de rocío, utilizando la ecuación de Magnus–Tetens, ampliamente validada en aplicaciones meteorológicas:

$$t_d = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{A_1 t}{B_1 + t} \right]}{A_1 - \ln \left(\frac{RH}{100} \right) - \frac{A_1}{B_1 + t}}$$

Donde:

t_d : temperatura de rocío en $^\circ\text{C}$

t : temperatura ambiente en $^\circ\text{C}$

RH: humedad relativa en %

Constantes para aire:

$A_1=17.625$

$B_1=243.04^\circ\text{C}$

Este parámetro fue fundamental para determinar el momento en que la temperatura de la cara fría de la celda se encontraba por debajo del punto de rocío, condición necesaria para que ocurra la condensación de vapor de agua en la superficie de la celda.

Resultados y discusión

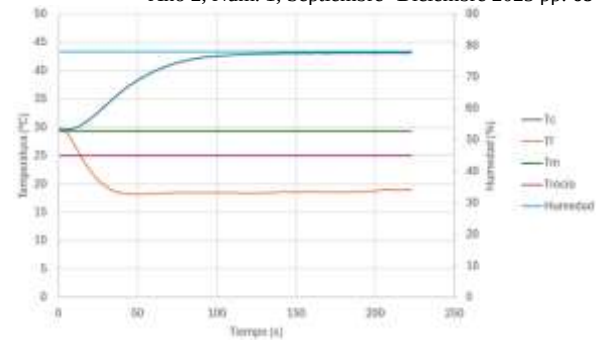
Las variables claves consideradas fueron: temperatura ambiente, humedad relativa,

temperatura de la cara fría y caliente de la celda, así como su relación con la temperatura de rocío. La eficiencia de condensación se evaluó en función del tiempo en el que la temperatura de la cara fría se mantuvo por debajo del punto de rocío.

Configuración 1: Operación en ambiente exterior

La Gráfica 1 presenta el comportamiento térmico de la celda Peltier operando a la intemperie bajo condiciones constantes de 29.3 °C y 78 % de humedad relativa, con un punto de rocío aproximado de 25 °C. Tras la energización, la cara caliente (T_c) mostró un incremento progresivo hasta alcanzar 43.1 °C a los 161 s, estabilizándose posteriormente alrededor de 44 °C. Simultáneamente, la cara fría (T_f) descendió rápidamente desde 29 °C hasta un mínimo de 18.1 °C a los 50 s, manteniéndose estable en el rango de 18–19 °C durante el resto del ensayo.

A partir de los 15 s, T_f se ubicó por debajo del punto de rocío, habilitando la condensación sostenida de vapor atmosférico. La estabilidad térmica observada indica un balance eficiente entre la disipación de calor en la cara caliente y el enfriamiento en la cara fría, condición esencial para garantizar una producción continua de condensado.

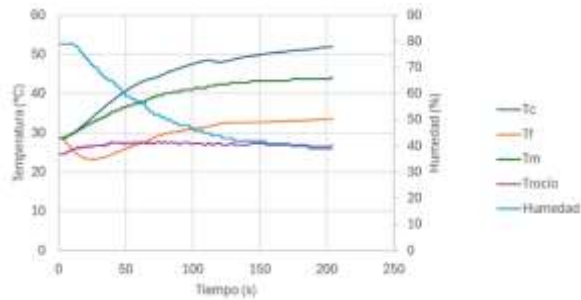


Gráfica 1. Comportamiento de la celda Peltier con configuración para el ambiente exterior.

Configuración 2: Contenedor con inyección de aire caliente

La Gráfica 2 muestra el comportamiento térmico de la celda bajo inyección de aire caliente en la cámara fría, aplicada para modificar el entorno higrotérmico. Las condiciones iniciales fueron 28.7 °C y 79 % de humedad relativa, con un punto de rocío estimado de 25.1 °C. Durante el ensayo, la cara caliente alcanzó un máximo de 52 °C, reflejando la elevada carga térmica impuesta por el flujo de aire caliente. La cara fría, aunque presentó un descenso inicial, se estabilizó en torno a 33 °C, valor superior al punto de rocío. Solo entre los 11 y 62 s permaneció por debajo del umbral de condensación, generando condensación temporal. Posteriormente, la temperatura superó de manera sostenida el punto de rocío, anulando la formación de condensado. Estos resultados evidencian que la sobrecarga térmica inducida por el aire caliente reduce significativamente la capacidad de la celda para mantener condiciones favorables de condensación continua.

operación bajo condiciones óptimas de condensación.



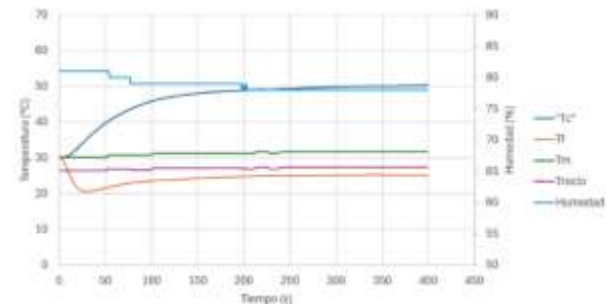
Gráfica 2. Comportamiento de la celda Peltier con inyección de aire caliente.

Configuración 3: Contenedor con inyección de aire ambiente

La Gráfica 3 muestra el comportamiento térmico de la celda bajo inyección de aire exterior a temperatura ambiente. Las condiciones iniciales fueron 28.8 °C, 81 % de humedad relativa y un punto de rocío aproximado de 25.8 °C. Durante los primeros 10 s, la temperatura de la cara fría (T_f) se mantuvo por encima del punto de rocío, impidiendo el inicio de la condensación. Posteriormente, T_f disminuyó progresivamente hasta estabilizarse entre 21 y 22 °C, es decir, 4–5 °C por debajo del punto de rocío, condición favorable para la condensación sostenida.

La humedad relativa descendió ligeramente de 81 a 78 %, evidenciando una extracción moderada de vapor sin comprometer la saturación necesaria. La ventilación forzada garantizó una renovación continua del aire húmedo, evitando el agotamiento de vapor y manteniendo un balance térmico y de masa estable.

Esta configuración mostró el desempeño más eficiente entre las condiciones controladas, al prolongar de manera significativa el tiempo de



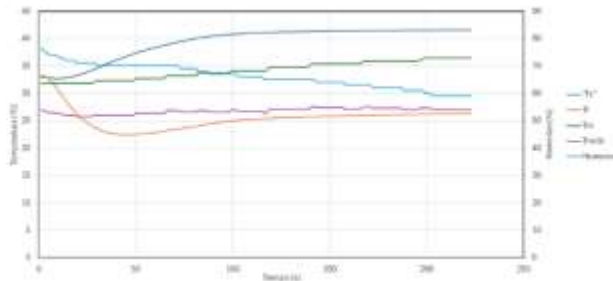
Gráfica 3. Comportamiento de la celda Peltier con inyección de aire ambiente

Configuración 4: Contenedor con aire estático

La Gráfica 4 muestra el comportamiento de la celda en un contenedor completamente sellado, sin flujo de aire forzado. Las condiciones iniciales fueron 28.5 °C, 76 % de humedad relativa y un punto de rocío estimado de 24.7 °C.

La temperatura de la cara fría (T_f) descendió por debajo del punto de rocío a los 21 s, habilitando el inicio de la condensación. Sin embargo, la ausencia de renovación de aire provocó una disminución progresiva de la humedad relativa hasta 59 %, evidenciando el agotamiento del vapor disponible en el volumen cerrado.

Aunque T_f se mantuvo dentro del rango requerido para la condensación, la limitada disponibilidad de vapor redujo la eficiencia del sistema. Esta configuración confirma que, además de alcanzar temperaturas inferiores al punto de rocío, es indispensable garantizar la renovación del aire húmedo para sostener una tasa de condensación continua.



Gráfica 4. Comportamiento de la celda Peltier con aire estático.

Comparación de configuraciones y análisis general

En la Tabla 1 se muestra la relación de la temperatura de la cara fría con respecto punto de rocío y el comportamiento térmico.

Tabla1. Comparación de parámetros en cada configuración.

Nota: Elaboración propia

Configuración	Relación con el punto de rocío $T_f < T_r$	Comportamiento térmico T_f
Ambiente exterior	15 – 200 s	Descenso rápido a 18 – 19 °C
Contenedor con inyección de aire caliente	11 – 62 s	Estabilización en ~ 33°C
Contenedor con inyección de aire ambiente	11 – 200 s	Estabilización en 21 – 22°C
Contenedor con aire estático	21 – 200 s	Limitada por agotamiento de vapor

Las configuraciones de operación en ambiente exterior y con inyección de aire ambiente demostraron la mayor eficiencia, al mantener la temperatura de la cara fría por debajo del punto de rocío durante la mayor parte del tiempo de operación. En contraste, la inyección de aire caliente impuso una carga térmica elevada que redujo de manera significativa la capacidad de enfriamiento de la celda. Por su parte, la

configuración con aire estático evidenció que, aunque es posible alcanzar temperaturas inferiores al punto de rocío, la falta de renovación de vapor limita progresivamente la tasa de condensación.

En conjunto, los resultados confirman que la eficiencia del sistema depende directamente del gradiente térmico entre la cara fría y el punto de rocío, así como de la disponibilidad y renovación del vapor de agua en el entorno inmediato.

Conclusiones

El presente estudio caracterizó el comportamiento térmico de una celda Peltier aplicada a la generación de agua atmosférica mediante cuatro configuraciones experimentales, orientadas a evaluar el impacto de las condiciones higrotérmicas y la dinámica del flujo de aire sobre el proceso de condensación.

Los resultados evidenciaron que la eficiencia del sistema depende fundamentalmente de la capacidad de la cara fría para mantenerse por debajo del punto de rocío y de la disponibilidad de vapor en el entorno inmediato. Bajo este criterio, las configuraciones en ambiente exterior y con inyección de aire ambiente fueron las más eficientes, al mantener un gradiente térmico estable y asegurar la renovación continua del vapor, condiciones que favorecieron la condensación sostenida.

En contraste, la inyección de aire caliente generó una sobrecarga térmica que redujo de manera significativa el tiempo operativo bajo condiciones de condensación. De forma similar, la condición

de aire estático mostró que, aunque la celda puede alcanzar temperaturas inferiores al punto de rocío, la falta de renovación de vapor provoca un agotamiento progresivo de la humedad disponible, limitando la continuidad del proceso. En conjunto, los hallazgos confirman que la implementación de módulos termoelectricos Peltier en sistemas de captación de agua atmosférica requiere un equilibrio adecuado entre control térmico y flujo de masa. La evidencia obtenida establece lineamientos esenciales para optimizar futuros diseños, especialmente en contextos con disponibilidad limitada de recursos hídricos.

Referencias bibliográficas

Alduchov, O. A., & Eskridge, R. E. (1996). Improved Magnus Form Approximation of Saturation Vapor Pressure. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 35(4), 601–609. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1996\)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1996)035<0601:IMFAOS>2.0.CO;2)

Rogers, G. F. C., & Mayhew, Y. R. (2019). *Engineering Thermodynamics: Work and Heat Transfer* (5th ed.). Pearson.

Rowe, D. M. (2006). *Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano*. CRC Press.

Sadeghzadeh, M., Gholami, M., & Amidpour, M. (2021). Performance analysis of a thermoelectric cooling system for atmospheric water harvesting. *Energy Conversion and Management*, 236,

114016.

<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114016>

Narayan, G. P., Hightower, M., & Ortiz, C. (2020). Water-from-air production via condensation: design, analysis, and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 132, 110042.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110042>