

# RECUPERACIÓN DEL AGUA DE LA HUMEDAD ATMOSFÉRICA POR CONDENSACIÓN TERMOELÉCTRICA

Autores: Rafael Valentín Tolentino Hernández, Fernando Ruiz Pérez,  
Mireya del Socorro Ovando Rocha, Felipe Caballero Briones

## Resumen

La zona conurbada del sur de Tamaulipas presento una crisis hídrica en mayo 2024, como consecuencia de la escasez de lluvia, explotación industrial, mal manejo del recurso y poca conciencia del cuidado del agua por la población, este fenómeno se ha potencializado a lo largo del mundo. Por ello, el presente artículo, tiene como objetivo analizar y proponer el uso de dispositivos de recuperación de agua de la humedad atmosférica por condensación termoeléctrica, implementando un dispositivo que utiliza el efecto Peltier. Se abordarán los principios fundamentales de las celdas Peltier, su estructura y aplicaciones. Además, se abordarán los dispositivos termoeléctricos diseñados para la condensación de agua atmosférica, ventajas y desventajas, así como las perspectivas a futuro de esta tecnología que promete aliviar la sed del planeta.

**Palabras clave:** Sequia, Celdas Peltier, Condensación, Termoeléctricos.

## Introducción

La crisis hídrica es un problema creciente que afecta tanto a zonas urbanas como rurales en muchas partes del mundo, y México no es la excepción. La escasez de agua no solo es un desafío inmediato, sino una amenaza para el futuro de millones de personas, ecosistemas y actividades económicas. En muchas regiones del país, los recursos hídricos están siendo sobreexplotados, lo que, combinado con la falta de infraestructura adecuada y el cambio climático, genera una disminución progresiva de las fuentes de agua. En México, de acuerdo con información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se observaron lluvias por debajo de lo normal, incrementado las áreas con sequía (CONAGUA, 2024). En el primer semestre del 2024, en gran parte del país, se reportaron estados con indicadores de sequía excepcional, tales como Sonora, Chihuahua y Querétaro como se muestra en la Figura 1a. Un ejemplo claro de los problemas que sobrelleva el país fue lo observado en la zona

conurbada del sur de Tamaulipas, donde el sistema lagunario, un ecosistema de humedales compuesto por diversas lagunas como Champayán, La Tortuga, Mayorazgo, Tancol, La Escondida y Chairel. Debido a la falta de lluvias de temporada el sistema prácticamente desapareció, aunado a la sobre explotación industrial, el mal uso doméstico y comercial ocasionó una crisis hídrica sin precedentes en la zona. La Figura 1b y 1c mues-

tran el estado de la laguna del Champayán en el municipio de Altamira, antes y durante la crisis hídrica de mayo del 2024. Esta emergencia hídrica inigualable hasta el momento, obligo a las autoridades, a la sociedad civil y sector privado a actuar de manera inmediata, proponiendo y aplicando soluciones urgentes para mitigar los efectos de la escasez de agua (Gobierno del Estado de Tamaulipas, 2024).

Figura 1.

- a) Monitor de Sequía de México al 15 de mayo de 2024.  
 b) laguna del Champayán antes de la crisis hídrica de mayo.  
 c) laguna del Champayán durante la crisis hídrica de mayo de 2024.



Nota. Tomada de: COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA - SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL.

La crisis hídrica no solo pone en riesgo la disponibilidad de agua para el consumo humano, sino que también afecta a la agricultura, que depende del riego para producir alimentos, y a la industria, que utiliza grandes cantidades de agua en sus procesos de producción. Las comunidades rurales, muchas veces las más vulnerables, enfrentan dificultades aún mayores debido a la falta de infraestructura para acceder al agua potable y a la inestabilidad climática. Ante este desafiante panorama, la ciencia y la tecnología están buscando soluciones innovadoras para mitigar la escasez de agua y mejorar su distribución.

En este contexto, una de las soluciones más prometedoras es la recuperación de agua de la humedad ambiental, alternativa que permite obtener agua a partir de la condensación de la humedad presente en el aire. Una de las tecnologías más destacadas en este campo es el uso de dispositivos termoeléctricos, como las celdas Peltier, que proporcionan ventajas tecnológicas, al ser empleadas en una amplia variedad de condiciones climáticas. Estos dispositivos son capaces de generar agua a partir del aire atmosférico, incluso en condiciones de baja humedad relativa. Además, este tipo de tecnología puede aprovechar fuentes de energía renovable, como la energía solar, para alimentar el sistema, lo que la convierte en una opción sustentable a largo plazo, pese a tener una eficiencia energética baja de alrededor del 3%.

Sin embargo, también existen desafíos asociados con la implementación de esta tec-

nología. El costo inicial de los sistemas basados en celdas Peltier puede ser elevado, lo que puede dificultar su adopción en áreas con recursos limitados. Además, aunque las celdas Peltier son eficaces para generar agua a partir de la humedad ambiental, la cantidad de agua producida depende de diversos factores, como la temperatura, la humedad y la eficiencia del sistema. En condiciones extremas de sequía, como las que se experimentan en algunas regiones de México, la cantidad de agua recuperada puede ser insuficiente para satisfacer las necesidades de toda la población.

A pesar de estos desafíos, el potencial de las celdas Peltier para enfrentar la crisis hídrica es significativo. Su capacidad para generar agua de fuentes no tradicionales abre nuevas oportunidades para asegurar el acceso al agua en zonas donde los recursos hídricos convencionales son limitados o están en peligro de agotarse. Incluso, el desarrollo y la mejora de esta tecnología, combinados con políticas públicas y esfuerzos comunitarios, pueden contribuir a la creación de soluciones sostenibles a largo plazo para la gestión del agua.

### ¿Qué es una Celda Peltier?

Jean Charles Athanase Peltier en 1834 (Narducci, 2024), descubrió un intercambio de calor que ocurre cuando una corriente eléctrica fluye a través de dos materiales diferentes (A y B), generando una absorción de calor en un punto y liberación de este en otro, depen-

diendo de la dirección de la corriente (Llamas, 2021), (Godoy-Vaca, 2016). Aunque el hallazgo de Peltier fue revolucionario, no fue hasta mediados del siglo XX que la tecnología moderna permitió usarlo en aplicaciones prácticas, desde refrigeradores portátiles hasta sistemas de control térmico en satélites (Singh et al., 2023), este fenómeno es conocido como efecto Peltier, el cual es empleado dentro de las celdas que llevan su apellido en dispositivos térmicos.

### Principio de funcionamiento

Cuando una corriente eléctrica circula por dos materiales distintos unidos (como un semiconductor tipo N, rico en electrones negativos, y uno tipo P, lleno de "huecos" o espacios positivos), ocurre un intercambio de calor en las uniones. En la cara fría, el calor se absorbe enfriando esa zona, y en la cara caliente se libera calentándola. Es como si los electrones, al saltar entre materiales, robaran energía térmica de un lado para soltarla en el opuesto, dependiendo de hacia dónde fluya la corriente como se muestra en la Figura 2a. La diferencia de temperatura generada en ambas caras permite utilizarlas para aplicaciones específicas, por ejemplo, la cara fría se puede usar en refrigeración de componentes electrónicos.

¿De qué está hecha una celda Peltier?

Una celda Peltier está formado por varios componentes clave como se muestra en la Figura 2b y detallada a continuación:

:

**Materiales Semiconductores tipo N y P:** Como el jamón en el sándwich, estos son el corazón del dispositivo que, al unirse, crean las uniones termoeléctricas (o termopares) donde ocurre el intercambio de calor. Los primeros tipo N actúan como autopistas con exceso de electrones (negativos), los segundos tipo P como carriles con exceso de huecos (positivos).

**Placas de Cerámica (Sustrato):** Son pan del sándwich, al ser un sustrato de cerámica en cada lado de la celda, para proporcionar una estructura rígida y aíslan térmicamente evitando que el calor generado se propague a través de la celda.

**Conexiones Eléctricas:** Las celdas Peltier tienen conexiones eléctricas (aderezo) para permitir la entrada de corriente directa (DC). Estas conexiones son necesarias para que fluya la corriente que activa el proceso termoeléctrico.

**Termopares:** Son las uniones entre los materiales de tipo N y tipo P. Cada termopar (combinación de dos materiales diferentes) genera una pequeña diferencia de temperatura cuando la corriente eléctrica fluye a través de ellos.

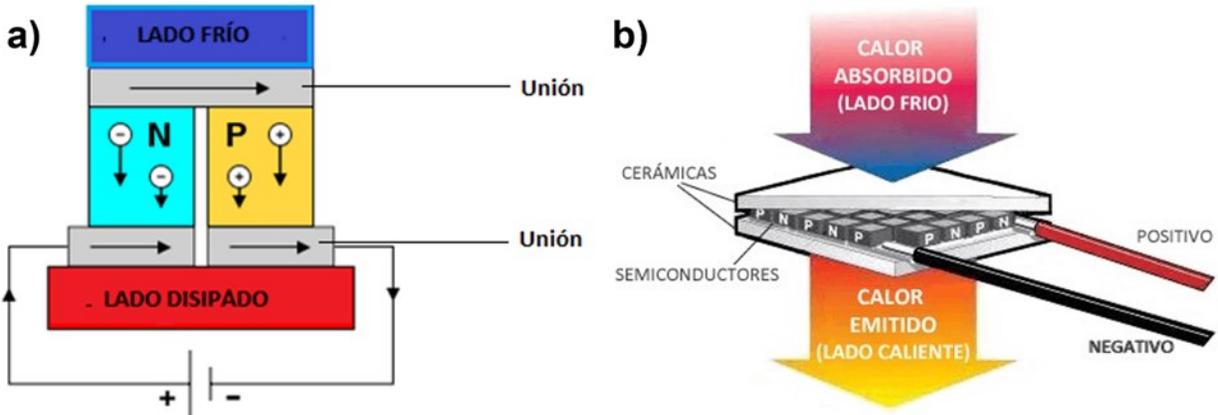
**Disipador de calor (opcional):** En aplicaciones donde se requiere la disipación del calor acumulado en el lado caliente de la celda lo puede convertir en un mini horno, por lo que se pueden utilizar disipadores de calor o sistemas de refrigeración adicionales, como ventiladores o radiadores, para evitar sobrecalen-

tamientos y mantener la eficiencia del sistema.

Figura 2.

a) Esquema del principio de funcionamiento de una celda Peltier

b) Esquema general de una celda termoeléctrica Peltier.



Nota. Tomada de: Luis Llamas (Llamas, 2021) bajo licencia de Creative Commons BY-NC-SA.

### Especificaciones de una celda Peltier

Las especificaciones técnicas de una celda Peltier varían según su tamaño, materiales y el diseño específico. Sin embargo, algunas de las capacidades más destacadas incluyen:

**Capacidad de enfriamiento:** Una celda Peltier puede extraer entre 20 y 200 Watts de calor, dependiendo del modelo y la corriente aplicada.

**Rango de temperaturas:** Estas celdas pueden crear una diferencia de temperatura de entre  $-30^{\circ}\text{C}$  a  $75^{\circ}\text{C}$  entre sus dos lados, siendo la temperatura del lado frío notablemente más baja que la del lado caliente.

**Tamaño y forma:** Las celdas Peltier están disponibles en varios tamaños, desde pequeñas unidades para enfriamiento de dispositivos electrónicos hasta grandes módulos para aplicaciones industriales.

**Vida útil:** En general, las celdas Peltier tienen una vida útil prolongada, siempre que se les proporcione una correcta disipación de calor en el lado caliente. Sin embargo, su eficiencia disminuye con el tiempo si no se manejan adecuadamente.

### Aplicaciones de las celdas Peltier:

Las celdas Peltier no son solo curiosidades de laboratorio, son soluciones versátiles que combaten el calor, generan energía e incluso puede “producir agua del aire”. Sí, has leído bien. Estos dispositivos termoeléctricos, además de enfriar tu laptop o mantener fría tu bebida en un viaje, tienen aplicaciones que van desde proteger componentes electrónicos hasta ayudar en crisis hídricas. Las celdas Peltier se emplean en una variedad de aplicaciones, entre ellas:

- Refrigeración electrónica: Para evitar el

sobrecalentamiento de componentes electrónicos como microchips en computadoras, cámaras térmicas o telescopios espaciales, manteniéndolos a temperaturas estables sin hacer ruido.

- **Sistemas de enfriamiento portátiles:** Como los enfriadores de bebidas o sistemas de climatización de coches, mini refrigeradores para medicinas o incluso chalecos térmicos para trabajadores en fundición.
- **Centrales de energía termoeléctrica:** Reciclan el calor residual de máquinas en energía eléctrica extra.
- **Recuperación de agua:** Como se mencionó anteriormente, las celdas Peltier se pueden usar para extraer el agua de la humedad atmosférica al condensar el vapor de agua en el aire. En zonas áridas o lugares con escasez, ¡es como tener un "pozo atmosférico"!

**Instrumentos científicos:** Para control de temperatura preciso en aplicaciones de laboratorio.

Imagina vivir en un lugar con recursos hídricos limitados, donde el agua tan escasa que hasta el aire parece guardarla con avaricia. Las celdas Peltier ofrecen una solución innovadora usando tecnología avanzada basada en principios de termodinámica: al ser los componentes clave de los "Sistemas de Recuperación de Agua a partir de la Humedad del Aire" (AWG por sus siglas en inglés), que condensa la humedad ambiental y la convierte en agua líquida. ¿Cómo lo hacen? A través de tres etapas clave, como si fueran "cazadoras

de rocío" tecnológicas: capturar el vapor, condensar y recolectar.

### Etapa 1: Captura de vapor

El primer paso en el proceso de recuperación de agua; es la captura del vapor de agua presente en el ambiente. El aire, aunque parezca seco, siempre lleva consigo vapor de agua en mayor o menor medida según la zona en que te encuentres, es lo que comúnmente conocemos como la humedad. Para atraparlo, el sistema dirige el aire ambiental hacia una superficie fría, creada por la cara "fría" de una celda Peltier. Aquí, entran en acción ventiladores que fuerzan el paso del aire, como si usaran un abanico gigante para "empujar" más humedad hacia la trampa fría. Cuanto más aire pase, más vapor entra en contacto con la superficie de condensación, aumentando la eficiencia del dispositivo.

### Etapa 2: Condensación: de gas a líquido

Cuando el aire húmedo toca la superficie enfriada por la celda Peltier, se produce el fenómeno de la condensación, ocurre algo similar a lo que ves en un vaso de agua helada en verano: el vapor se condensa en gotitas sobre las paredes del vaso. Esto sucede porque la celda Peltier, baja la temperatura del aire por debajo de su punto de rocío (el límite donde el vapor ya no puede seguir siendo gas), el cual está determinado por el equilibrio que existe entre la temperatura y la humedad relativa del aire. A nivel microscópico, las moléculas de agua, al chocar con la superficie fría, pierden energía (se enfrían) y se "abrazan" entre sí,

formando gotas.

Dato clave: La eficiencia depende en gran medida de la temperatura y la humedad relativa del ambiente, así como de la eficiencia de la celda Peltier y del dispositivo generador de agua atmosférica en general.

Por ejemplo, en el desierto de Atacama (el más seco del mundo), se necesitarían celdas muy potentes, pero en zonas tropicales, ¡el sistema podría llenar un botellón de 20 litros por día (*SunToWater Water Generator-How It Works and Features*, n.d.)!.

**Etapa 3: Recolección: cada gota es como un tesoro.**

Las gotas, guiadas por la gravedad conforme aumentan su tamaño, resbalan por la superficie fría hacia canales de recolección que las lleven hasta el recipiente de almacenamiento final.

Los conductos de recolección están diseñados para evitar que las gotas de agua se evaporen de nuevo antes de llegar al sistema de almacenamiento, además estos sistemas pueden estar acoplados con filtros, tratamientos o tecnologías de desinfección, como la luz ultravioleta o tratamiento por ozono para garantizar que el agua recolectada esté libre de impurezas, contaminantes, bacterias, etc.

Así, lo que empezó como humedad termina siendo apto para consumo humano, usos industriales, agricultura o usar en hospitales, dependiendo de la calidad y tratamientos que se apliquen.

## Componentes del sistema de condensación termoeléctrica

Para construir un sistema de recuperación de agua por condensación con celdas Peltier, se necesitan varios componentes clave:

- Celdas Peltier: responsables de crear la diferencia de temperatura necesaria para la condensación.

- Disipadores de Calor: esenciales para el buen funcionamiento de las celdas Peltier. Ya que las celdas Peltier generan calor en su cara caliente, este calor debe ser eliminado de manera eficiente para evitar que la temperatura del lado frío suba, lo que afectaría la eficiencia del proceso de condensación. Los disipadores de calor, generalmente hechos de materiales como aluminio o cobre, permiten que el calor se disipe hacia el ambiente. En un sistema de recuperación de agua, estos disipadores pueden estar acompañados de ventiladores o radiadores para mejorar la transferencia de calor. Su función es asegurar que la temperatura del lado caliente se mantenga lo más baja posible, lo que a su vez optimiza la capacidad de enfriamiento del lado frío, permitiendo que el vapor de agua se condense eficientemente. Además, la caja de disipación de calor suele tener un diseño de aletas o una estructura en forma de rejilla, lo que aumenta la superficie de contacto con el aire y mejora la eficiencia en la disipación de calor.

- Ventiladores: Los ventiladores son componentes clave para mejorar la circulación del aire dentro del sistema. En un proceso de re-

cuperación de agua mediante condensación, es fundamental asegurar que el aire húmedo se mueva constantemente sobre la superficie de condensación para maximizar la cantidad de vapor que se puede condensar. Los ventiladores ayudan a aumentar el flujo de aire hacia la superficie fría de la celda Peltier, mejorando la eficiencia del proceso al asegurar que más aire entre en contacto con la superficie enfriada. Además de mejorar la eficiencia de la condensación, los ventiladores pueden optimizar la distribución del aire alrededor de los disipadores de calor, ayudando a mantener la temperatura del lado caliente lo suficientemente baja. Es importante seleccionar ventiladores que ofrezcan un buen flujo de aire constante, pero con bajo consumo energético, ya que el sistema debe operar de manera eficiente y sostenible.

- Superficie de Condensación: La superficie de condensación es el área donde el vapor de agua se encuentra con la cara fría de la celda Peltier. Este componente es crucial, ya que es donde ocurre la condensación del vapor de agua, transformándolo en gotas líquidas que luego serán recolectadas. La superficie de condensación puede estar hecha de materiales que mejoren la transferencia de calor, como el aluminio o cobre debido a su alta conductividad térmica. Además, la textura de la superficie juega un papel importante; superficies con microestructuras o recubrimientos hidrofóbicos pueden aumentar la eficiencia de la condensación, evitando la acumulación de gotas de agua sobre la superficie y reduciendo

do la evaporación. Algunos sistemas incluyen una capa conductora térmica entre la celda Peltier y la superficie de condensación para optimizar aún más el intercambio de calor, asegurando que la temperatura del aire se reduzca lo suficiente para que el vapor se condense eficientemente.

Sistema de Recolección: Una vez que el vapor de agua se condensa sobre la superficie fría, se forman gotas de agua que caen por gravedad hacia un sistema de recolección. Este sistema es responsable de canalizar y almacenar el agua condensada. El diseño de este sistema debe ser cuidadosamente pensado para asegurar que el agua recolectada no se pierda ni se evapore antes de ser almacenada. El sistema de recolección típicamente consiste en canales o tuberías que guían el agua hacia un recipiente de almacenamiento, como un tanque o reservorio. Los canales pueden estar diseñados para minimizar las pérdidas de agua durante el trayecto hacia el recipiente de almacenamiento, y es común que el sistema incluya filtros para purificar el agua recolectada. Esto asegura que el agua almacenada sea apta para el consumo, el riego o incluso aplicaciones industriales. En algunos sistemas avanzados, el recipiente de almacenamiento puede estar equipado con mecanismos de tratamiento de agua, como filtros de carbón activado o sistemas de desinfección por ultravioleta (UV), para garantizar que el agua condensada cumpla con los estándares de calidad requeridos para el tipo de uso, los cuales van desde el agua para consu-

mo humano (agua potable), para uso industrial (procesos industriales específicos), para uso doméstico (lavar ropa, utensilios de cocina, pisos, etc.), para uso agrícola (agua rica en minerales y nutrientes) (*Calidad Del Agua: Clasificación y Usos Según Su Nivel de Pureza* | Laboratorio ABM, 2023), etc.

## Ventajas y Desafíos

### Ventajas

1. Portabilidad: Una de las principales ventajas de los sistemas de generación de agua atmosférica a base de celdas Peltier es su portabilidad. Estos sistemas son compactos y ligeros, lo que facilita su transporte y uso en lugares donde los sistemas tradicionales de agua potable no están disponibles. En áreas remotas donde el acceso a fuentes de agua es limitado y el terreno no permite el tránsito de vehículos, o durante emergencias, como periodos de sequía extrema o desastres naturales en los que el suministro de agua potable puede verse interrumpido.

2. Escalabilidad: Los sistemas basados en celdas Peltier pueden ser escalables, lo que significa que pueden adaptarse a diferentes tamaños y necesidades. Desde unidades pequeñas y portátiles que proporcionan agua para uso personal, hasta sistemas más grandes diseñados para comunidades o instalaciones industriales, las celdas Peltier pueden ofrecer soluciones eficientes para diversos contextos. Esta capacidad de escalabilidad es una gran ventaja, ya que permite implementar la tecnología tanto a nivel doméstico como a

gran escala, como sistemas de producción de agua potable en áreas rurales o zonas afectadas por sequías.

Sostenibilidad: Una de las características más atractivas de los sistemas de recuperación de agua mediante celdas Peltier es su sostenibilidad. Estos sistemas pueden ser energéticamente autosuficientes si se integran con fuentes de energía renovable, como los paneles solares. Al utilizar la energía solar para alimentar las celdas Peltier, se reduce la dependencia de fuentes de energía no renovables y se minimiza la huella de carbono del sistema. Esta característica es especialmente valiosa en zonas aisladas, donde la infraestructura eléctrica es limitada o inexistente. La capacidad de operar de manera sostenible y con bajo impacto ambiental hace que estos sistemas sean una opción viable a largo plazo en regiones afectadas por la crisis hídrica.

### Desafíos

1. Eficiencia Energética: Uno de los principales desafíos asociados con las celdas Peltier es su baja eficiencia energética. A pesar de ser una tecnología innovadora, las celdas Peltier requieren una cantidad considerable de electricidad para generar la diferencia de temperatura necesaria para la condensación del vapor de agua. Esto significa que, en términos de eficiencia energética, pueden ser menos competitivas frente a otras tecnologías de deshumidificación o producción de agua. Si bien se pueden combinar con fuentes de energía renovable como la solar, el consumo

energético sigue siendo un factor limitante, especialmente cuando el clima no es óptimo para la producción de fotovoltaica o en zonas donde los costos de energía son altos.

**2. Dependencia Climática:** La eficiencia del sistema está fuertemente influenciada por las condiciones climáticas, en particular la temperatura y la humedad relativa del aire. En climas cálidos y húmedos, la capacidad de recuperación de agua es óptima, ya que el aire contiene una mayor cantidad de vapor de agua, lo que facilita la condensación. Sin embargo, en climas secos o en zonas con baja humedad relativa, la cantidad de agua recuperada puede ser insuficiente para cubrir las necesidades del usuario. Este factor limita la aplicabilidad del sistema en regiones áridas o semiáridas, donde la escasez de humedad en el aire reduce significativamente la cantidad de agua que puede ser extraída.

**Costo Inicial:** El costo inicial de los componentes necesarios para construir un sistema de recuperación de agua mediante celdas Peltier puede ser relativamente alto. Las celdas Peltier mismas, junto con los disipadores de calor y los materiales de alta calidad necesarios para un funcionamiento eficiente, son costosos en comparación con otras tecnologías de obtención de agua, como los sistemas de recolección de agua de lluvia o desalinizadores simples. Además, los costos adicionales de instalación y mantenimiento pueden ser una barrera para la adopción de esta tecnología en áreas de bajos recursos. Si bien la portabilidad y la escalabilidad del sistema son

ventajas, el costo inicial puede ser un obstáculo importante para su implementación generalizada.

Aplicaciones Potenciales de los Sistemas de Recuperación de Agua a partir de la Humedad del Aire mediante condensación termo-eléctrica

### Áreas Rurales y Desérticas

En regiones con escasez de agua, especialmente en áreas rurales o desérticas, la falta de acceso a fuentes de agua potable es un desafío constante. Los sistemas que utilizan celdas Peltier para recuperar agua a partir de la humedad ambiental pueden ser una solución innovadora y eficaz para proporcionar agua potable en estas zonas. Al ser portátiles y escalables, estos sistemas pueden instalarse tanto en pequeñas comunidades rurales como en grandes instalaciones en regiones desérticas, donde las fuentes tradicionales de agua (como ríos o embalses) son limitadas o inexistentes.

El hecho de que estos sistemas no dependan de fuentes de agua preexistentes hace que sean particularmente útiles en áreas áridas y de poca precipitación. Además, la autosuficiencia energética que se puede lograr mediante la integración con fuentes de energía renovable como la solar, hace que estos sistemas sean ideales para zonas remotas sin acceso estable a la red eléctrica. Esto puede transformar la vida de las comunidades rurales, reduciendo la dependencia de costosos camiones cisterna de agua o de sistemas de

extracción de agua subterránea, que a menudo resultan insostenibles.

### Campamentos y Expediciones

Los sistemas de recuperación de agua mediante celdas Peltier también tienen aplicaciones prácticas en campamentos y expediciones en áreas remotas.

Exploradores, científicos, trabajadores de campo y otras personas que pasan largos períodos en zonas sin acceso directo a fuentes de agua potable pueden beneficiarse enormemente de esta tecnología. Durante expediciones científicas o de exploración, la portabilidad y eficiencia de estos sistemas pueden ser esenciales para garantizar el suministro constante de agua potable sin necesidad de transportarla en grandes contenedores.

### Situaciones de emergencia

En zonas afectadas por desastres naturales, como terremotos, huracanes, y sequías extremas, donde la infraestructura de agua potable suele verse gravemente dañada, los sistemas de recuperación de agua de la humedad ambiental basados en celdas Peltier pueden ofrecer una solución temporal rápida y efectiva. Su portabilidad los convierte en dispositivos ideales para campamentos de refugiados, zonas de socorro y campamentos militares, donde las fuentes de agua potable se ven interrumpidas, es limitado o inexistente.

### Innovaciones y Futuro

A medida que la investigación y el desarrollo continúan avanzando en los campos de los

materiales termoeléctricos y el diseño de sistemas, es probable que la eficiencia y la viabilidad económica de los sistemas de recuperación de agua a partir de la humedad del aire mejoren sustancialmente. Algunas de las áreas clave de innovación incluyen:

- Mejora de la Eficiencia de las Celdas Peltier: Los avances en materiales semiconductores y en el diseño de las celdas Peltier pueden aumentar la capacidad de enfriamiento de estas celdas sin aumentar significativamente el consumo de energía. El desarrollo de nuevos materiales termoeléctricos con mayor eficiencia podría reducir el consumo energético y aumentar la cantidad de agua que se puede recuperar.

- Optimización de Diseño del Sistema: La eficiencia general del sistema también puede mejorarse mediante el diseño de sistemas que maximicen la superficie de condensación y la circulación de aire. Tecnologías como fluidos refrigerantes o recubrimientos térmicos avanzados pueden ayudar a mejorar la transferencia de calor y la eficiencia de la condensación.

- Uso de Nanotecnología: Aplicar recubrimientos nanoestructurados en las superficies de condensación podría aumentar la eficiencia del proceso de captura y recolección de agua. La nanotecnología tiene el potencial de crear superficies que no solo tengan mayor conductividad térmica, sino también más hidrofóbicas, lo que ayudaría a mejorar la captura de gotas de agua y minimizar la pérdida de agua por evaporación.

**Sistemas Inteligentes y Autónomos:** Con el avance de la inteligencia artificial (IA) y el Internet de las Cosas (IoT), se podrían desarrollar sistemas de monitoreo inteligentes que optimicen el uso de la energía y el rendimiento del sistema, ajustando automáticamente las condiciones de operación (como la velocidad del ventilador, la temperatura de la celda Peltier y la captación de humedad) para maximizar la producción de agua en función de las condiciones ambientales.

### Conclusiones

La recuperación de agua a partir de la humedad ambiental mediante celdas Peltier se presenta como una solución prometedora frente a la creciente crisis hídrica global. A través de la tecnología termoeléctrica, es posible generar agua a partir de la humedad contenida en el aire, incluso en condiciones de baja humedad relativa, lo que convierte a esta tecnología en una opción viable para regiones donde el acceso al agua es limitado o donde las fuentes hídricas tradicionales están comprometidas. El proceso, basado en tres etapas clave “captación de humedad, condensación y recolección” ha demostrado ser efectivo y adaptable a diversas condiciones climáticas. Además, la integración con energías renovables, como la energía solar, proporciona una solución autosuficiente y sostenible para abastecer de agua a comunidades en zonas remotas o de difícil acceso a infraestructura hídrica. A pesar de sus desafíos, como el alto costo inicial y la dependencia climática, el potencial de las celdas Peltier para aliviar la es-

casez de agua es significativo. La tecnología continúa evolucionando con el desarrollo de materiales termoeléctricos de nueva generación y mejoras en el diseño de los sistemas, lo que incrementará su eficiencia y rentabilidad en el futuro cercano. Innovaciones en nanotecnología, el uso de sistemas inteligentes y la optimización de la gestión energética son áreas clave que permitirán ampliar su aplicabilidad y escalabilidad. A medida que los avances en la tecnología continúan, es crucial que los gobiernos y organizaciones internacionales colaboren en la promoción de esta tecnología, combinándola con políticas públicas y proyectos de cooperación que fomenten su implementación en comunidades vulnerables y en zonas afectadas por desastres naturales.

La adopción de sistemas basados en celdas Peltier puede no solo garantizar el acceso al agua en áreas críticas, sino también contribuir a la conservación de los ecosistemas acuáticos y a la reducción de la huella de carbono de los procesos de desalinización y obtención de agua potable tradicionales. Así, la tecnología de recuperación de agua mediante celdas Peltier representa una herramienta clave en la lucha por un futuro más sostenible y resiliente frente a la crisis hídrica mundial.

### Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la SIP-IPN con el programa de Innovación para Alumnos 2023-2024, RVTH, FRP y MSOR agradecen la beca doctoral de la Secihti.

## Referencias

- Calidad del agua: Clasificación y usos según su nivel de pureza* / Laboratorio ABM. (2023). <https://laboratorioabm.com/calidad-del-agua-clasificacion-y-usos-segun-su-nivel-de-pureza/>
- CONAGUA. (2024). *Monitor de Sequía en México*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- Gobierno del Estado de Tamaulipas. (2024). *Plan integral para mitigar crisis hídrica, empresarios y gobierno de Tamaulipas*. <https://www.tamaulipas.gob.mx/2024/06/concretan-plan-integral-para-mitigar-crisis-hidrica-empresarios-y-gobierno-de-tamaulipas/>
- Godoy-Vaca, L. F. (2016). *Diseño, construcción y evaluación energética de una cámara con celdas Peltier (efecto termoeléctrico) para refrigeración de vacunas*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.27011.09763>
- Llamas, L. (2021). *Generar frío con Arduino y una placa Peltier*. <https://www.luisllamas.es/arduino-peltier/>
- Narducci, D. (2024). J. Peltier, New Experiments on the Caloricity of Electrical Currents. *Springer Series in Materials Science*, 328, 51–55. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22108-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22108-8_6)
- Singh, V. K., Sisodia, S. S., Patel, A., Shah, T., Das, P., Patel, R. N., & Bhavsar, R. R. (2023). Thermoelectric cooler (TEC) based thermal control system for space applications: Numerical study. *Applied Thermal Engineering*, 224, 120101. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120101>
- SunToWater Water Generator-How It Works and Features*. (n.d.). Retrieved March 22, 2025, from <https://suntowater.com/water-generator/>

## Autores:

Rafael Valentín Tolentino-Hernández

*Instituto Politécnico Nacional*

*Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT)*

*CICATA Altamira*

*rtolentino1800@alumno.ipn.mx*

Fernando Ruiz Pérez

*Instituto Politécnico Nacional*

*Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT)*

*CICATA Altamira*

*ruizpfernando@hotmail.com*

Mireya del Socorro Ovando Rocha

*Instituto Politécnico Nacional*

*Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT)*

*CICATA Altamira*

*movandor2300@alumno.ipn.mx*

Felipe Caballero Briones

*Instituto Politécnico Nacional*

*Materiales y Tecnologías para Energía, Salud y Medio Ambiente (GESMAT)*

*CICATA Altamira*

*fcaballero@ipn.mx*