

Mitigación de Pérdida de Agua por Evaporación en Sistema Acuícola Cerrado Mediante Condensación Termoeléctrica

Mitigation of Water Loss Due to Evaporation in a Closed Aquaculture System by Thermoelectric Condensation

Luna-Guardado, D. M.¹; Guevara-Amatón, K. V.,² ✉, Coto-Fuentes, H.³; Valdés-Perezgasga, F.⁴

Datos de Adscripción:

¹ Luna Guardado, Diana Monserrat
TecNM/ Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
ROR ID: <https://ror.org/00xbw4a70>
m.dmlunag@lalaguna.tecnm.mx
<https://orcid.org/0009-0004-5586-4604>

² Guevara Amatón, Karla Victoria
TecNM/Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
kvguevaraa@lalaguna.tecnm.mx
<https://orcid.org/0009-0000-2894-4861>

³ Coto Fuentes, Hesner
TecNM/ Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
hesnercf@lalaguna.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-9548-7864>

⁴ Valdés Perezgasga, Francisco
TecNM/ Instituto Tecnológico de la Laguna. Torreón, Coahuila. México.
fvaldesp@lalaguna.tecnm.mx
<https://orcid.org/0000-0002-7176-3641>

Resumen – La escasez hídrica causada por el cambio climático, causa incertidumbre en la disponibilidad alimentaria. Los Sistemas de Recirculación Acuicola Cerrados son fundamentales para cultivar especies acuáticas, desafortunadamente enfrentan pérdidas significativas por evaporación o filtración afectando la viabilidad operacional y económica. Para mitigar la pérdida de agua por evaporación en estos sistemas se trabajó en implementar un sistema de recuperación de humedad durante la etapa de oxigenación, se experimentó en un estanque de vidrio de 24 Litros de volumen, llenado con 18 L de agua, este tiene una tapa de material acrílico y se trabajaron diferentes condiciones de sellado; se monitoreo internamente, a través de sensores, condiciones como la humedad, la temperatura y el nivel, esta información va hacia un microcontrolador ESP32 con transmisión de internet en tiempo real. La condensación del vapor se indujo mediante ventilación forzada, aireación acuática y control del módulo termoeléctrico (celda Peltier). El sistema, bajo condiciones de luz solar indirecta y con ventilación forzada, reduce drásticamente la recuperación de agua a 0.45 ml/h, mientras que en un sistema con oxigenación alcanza 1.79 ml/h. El valor máximo del volumen condensado fue de 2.21 ml/h, este se obtuvo mejorando la hermeticidad y con activación de la celda termoeléctrica a un umbral del 40% de humedad. Los factores de control termoeléctrico y el sellado adecuado del sistema, eficientan la recuperación de agua y el consumo energético.

Palabras Clave – Acuicultura, Condensación, Evaporación, Monitoreo, Termoelectricidad.

Abstract – Water scarcity driven by climate change introduces severe uncertainty regarding global food availability. Recirculating Aquaculture Systems (RAS), while essential for sustainable fish cultivation, often suffer significant water losses due to evaporation and leakage, which compromises their operational and economic viability. To mitigate evaporative water loss in these systems, this study implemented a moisture recovery system integrated into the aeration stage. Experiments were conducted using a 24-liter glass tank filled with 18 liters of water, sealed under various conditions using an acrylic lid. Sensors connected to an ESP32 microcontroller continuously monitored internal humidity, temperature, and water levels, and transmitted data in real time over the internet. Vapor condensation was actively induced through forced ventilation, aquatic aeration, and automated control of a thermoelectric Peltier module. The results demonstrated that exposure to indirect sunlight coupled with forced ventilation severely reduced water recovery to just 0.45 mL/h. Conversely, the system achieved a maximum recovery efficiency of 2.21 mL/h by combining airtight sealing with activation of the thermoelectric cell at a 40% humidity threshold. Ultimately, optimizing thermoelectric control factors and ensuring proper system sealing significantly improve both water recovery efficiency and energy consumption.

Keywords - Aquaculture, Condensation, Evaporation, Monitoring, Thermoelectricity.

I. INTRODUCCIÓN

La acuicultura es el proceso orientado al cultivo y producción de organismos acuáticos en ambientes controlados, contribuyendo al crecimiento y estabilidad del sistema alimentario y económico. Tradicionalmente, esta técnica se ha practicado en cuerpos de agua dulce o salada, utilizando presas, ríos, lagos u océanos, o bien de manera artificial, replicándose cerca de ellos (Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural, 2019).

Los Sistemas de Recirculación Acuicola (Recirculating Aquaculture Systems, RAS) surgen a partir de la necesidad de contrarrestar la escasez del recurso hídrico. Han adquirido gran relevancia por su capacidad para reutilizar agua, controlar parámetros fisicoquímicos y reducir el impacto ambiental asociado a la producción intensiva de organismos acuáticos. Uno de los principales desafíos técnicos de estos sistemas es la pérdida de agua por evaporación o filtración constante,

especialmente en zonas áridas o semiáridas donde las temperaturas elevadas incrementan considerablemente la humedad relativa (Joshi et al., 2017).

Gracias a estas características, los sistemas RAS son considerados una de las tecnologías más prometedoras para el desarrollo de una acuicultura sustentable, especialmente en regiones con disponibilidad limitada de agua (Bregnballe & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2025).

A pesar de sus ventajas, estos sistemas presentan pérdidas continuas de agua ocasionadas principalmente por evaporación, filtraciones y actividades propias de la operación, como la aireación y el intercambio térmico entre el agua y el ambiente. La evaporación representa un fenómeno particularmente importante debido a que provoca una disminución gradual del volumen útil del estanque, incrementa la concentración de sólidos disueltos y modifica parámetros fisicoquímicos fundamentales para el desarrollo de las especies cultivadas (Joshi et al., 2017).

Tradicionalmente, estas pérdidas se compensan mediante la incorporación continua de agua fresca, práctica que incrementa el consumo hídrico total y reduce la eficiencia de los sistemas de producción. En consecuencia, durante los últimos años se han desarrollado diversas investigaciones orientadas a recuperar agua a partir de la condensación del vapor atmosférico utilizando tecnologías termoeléctricas basadas en el efecto Peltier, debido a su bajo costo, reducido tamaño, facilidad de integración y ausencia de refrigerantes convencionales (Liu et al., 2017; Manjunath et al., 2022).

El principio de funcionamiento de una celda Peltier consiste en la transferencia de calor entre dos materiales semiconductores cuando circula corriente eléctrica a través de ellos, generando simultáneamente una superficie fría y otra caliente. La cara fría permite condensar el vapor de agua presente en el aire cuando su temperatura es inferior al punto de rocío, mientras que la cara caliente requiere una adecuada disipación térmica para mantener la eficiencia del proceso. Diversos autores han demostrado que factores como la humedad relativa, la temperatura ambiente, el flujo de aire y el diseño de los disipadores influyen directamente sobre la cantidad de agua obtenida mediante condensación termoeléctrica (Casallas et al., 2021; Joshi et al., 2017; Liu et al., 2017).

En investigaciones recientes, Casallas et al. (2021) optimizaron experimentalmente un generador portátil de agua atmosférica basado en módulos termoeléctricos, concluyendo que el principal desafío de esta tecnología corresponde al elevado consumo energético, por lo que resulta indispensable optimizar las condiciones de operación para mejorar la relación entre energía consumida y volumen de agua recuperada. De manera similar, Liu et al. (2017) reportaron que el incremento de la humedad relativa y una adecuada circulación del aire favorecen significativamente la producción de agua condensada, mientras que Joshi et al. (2017) demostraron que la incorporación de disipadores adecuados incrementa considerablemente la eficiencia del proceso de condensación.

Otros trabajos han explorado diferentes configuraciones de generación de agua atmosférica. Varun y Jayabarathi (2021) desarrollaron un prototipo de obtención de agua mediante módulos Peltier alimentados eléctricamente, demostrando la

viabilidad técnica de estos dispositivos para aplicaciones de pequeña escala. De forma complementaria, Rascón Barceló (2020) diseñó un sistema alimentado mediante energía solar para producir agua atmosférica utilizando celdas Peltier, destacando el potencial de esta tecnología para disminuir el consumo energético asociado al proceso de condensación.

Asimismo, investigaciones recientes han propuesto optimizaciones en el diseño de los sistemas de condensación. Mafla Maza (2023) analizó diferentes configuraciones geométricas para cámaras de condensación y superficies de intercambio térmico, concluyendo que la distribución del flujo de aire y la geometría del condensador influyen directamente sobre la recolección del agua condensada. Por otra parte, Salgado-Gutiérrez et al. (2025) caracterizaron experimentalmente módulos Peltier destinados a la generación sostenible de agua atmosférica, identificando que la renovación continua del aire húmedo sobre la superficie fría constituye uno de los parámetros de mayor influencia sobre el rendimiento global del sistema.

Recientemente, Ginters y Ginters (2026) propusieron sistemas híbridos que combinan condensación termoeléctrica con técnicas electrostáticas para incrementar la captación de agua en ambientes con niebla. Sus resultados evidencian que la integración de múltiples mecanismos físicos puede incrementar la eficiencia del proceso bajo condiciones ambientales específicas; sin embargo, también resaltan que la condensación termoeléctrica continúa siendo el principal mecanismo responsable de la formación de agua líquida.

Aunque estas investigaciones demuestran la viabilidad de la generación atmosférica de agua, la mayoría de ellas se encuentran orientadas a la producción de agua para consumo humano y no a la recuperación parcial del agua evaporada dentro de sistemas acuícolas cerrados. En consecuencia, existe un área de oportunidad para adaptar estas tecnologías a sistemas RAS, donde la humedad relativa generada naturalmente por la evaporación puede aprovecharse para reincorporar parte del agua perdida al propio sistema.

Con base en esta problemática, la presente investigación propone el diseño e implementación de un sistema de recuperación de agua evaporada mediante condensación termoeléctrica integrado directamente a un prototipo de Sistema de Recirculación Acuícola. El sistema emplea un módulo Peltier TEC1-12706, sensores DHT22 y JSN-SR04T, así como un microcontrolador ESP32 encargado del monitoreo ambiental, el control automático mediante modulación por ancho de pulso (PWM) y la transmisión remota de datos a través de una arquitectura de Internet de las Cosas (IoT).

El algoritmo de control implementado en el ESP32 realiza la adquisición continua de las variables ambientales y regula automáticamente el funcionamiento del módulo termoeléctrico en función de la humedad relativa registrada dentro del estanque. En este trabajo se empleó un control determinístico basado en umbrales debido a su simplicidad computacional, facilidad de implementación en sistemas embebidos y bajo consumo de recursos de procesamiento, características apropiadas para aplicaciones IoT de pequeña escala.

Finalmente, esta investigación busca demostrar la factibilidad técnica de recuperar parcialmente el agua evaporada dentro de un sistema RAS mediante condensación termoeléctrica

controlada automáticamente, contribuyendo al desarrollo de tecnologías orientadas al uso eficiente del recurso hídrico, la reducción del consumo energético y el fortalecimiento de la acuicultura sustentable.

II. PARTE TÉCNICA DEL ARTÍCULO

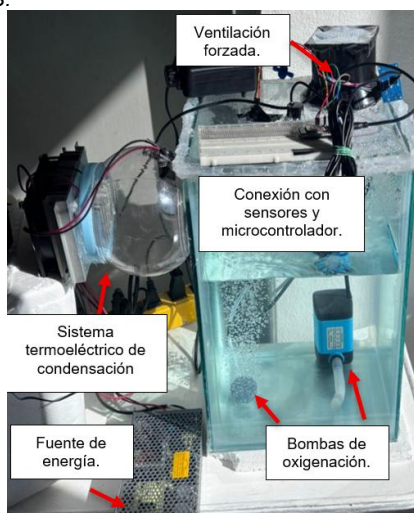
El desarrollo experimental se realizó bajo condiciones ambientales naturales, permitiendo evaluar el comportamiento del sistema frente a variaciones de temperatura, humedad relativa y evaporación dentro del estanque.

2.1 Estructura experimental del prototipo RAS

El sistema experimental (mostrado en la Figura 1), fue diseñado con el propósito de recuperar parcialmente el agua evaporada dentro de un Sistema de Recirculación Acuicola (RAS) mediante condensación termoeléctrica. El prototipo se construyó a escala de laboratorio empleando un estanque de vidrio con dimensiones de 26cm × 26cm × 36cm, fabricado con cristal de 5mm de espesor y una capacidad aproximada de 24L, manteniendo un nivel operativo equivalente a dos terceras partes de su capacidad total. En una de las paredes se realizó una abertura circular de $\frac{3}{4}$ " de diámetro, ubicada en una esquina superior, para la extracción del vapor de agua generado dentro del estanque. El diseño del prototipo se planteó considerando tres objetivos principales:

- Incrementar la humedad relativa interna.
- Maximizar el contacto entre el aire húmedo y la superficie fría.
- Reducir pérdidas térmicas y energéticas.

Figura 1
Prototipo RAS.



2.2 Justificación técnica de componentes

El microcontrolador ESP32 fue seleccionado por su capacidad de procesamiento, conectividad Wifi integrada y compatibilidad con plataformas IoT, lo que permitió implementar control PWM sobre los módulos Peltier y adquirir datos en tiempo

real de múltiples sensores con un menor consumo energético respecto a otros microcontroladores utilizados en sistemas similares.

El sensor DHT22 se utilizó para el monitoreo de temperatura y humedad relativa, variables clave en el proceso de condensación dado que la cantidad de agua recuperada depende directamente del vapor presente en el aire. Este sensor entrega valores calibrados de fábrica; se verificó su exactitud comparándolo con un termohigrómetro digital comercial colocado dentro del mismo volumen de aire, confirmando la estabilidad de las mediciones antes de iniciar las pruebas experimentales. A partir de los datos obtenidos fue posible determinar las condiciones óptimas de condensación, activar automáticamente el sistema Peltier y analizar la relación entre humedad y producción de agua.

El sensor ultrasónico JSN-SR04T fue elegido por su capacidad de operar en ambientes húmedos y su resistencia al agua. Su función principal es medir continuamente el borde libre (la distancia desde la tapa hacia la superficie del agua del estanque), permitiendo cuantificar las pérdidas por evaporación y evaluar el efecto del sistema de condensación sobre el volumen recuperado. El sensor fue calibrado midiendo la altura interior del tanque (36 cm) y diferentes alturas conocidas entre la tapa y la superficie del agua, empleando una regla metálica graduada como patrón de referencia. Se verificó que el sensor permaneciera perpendicular a la superficie del agua para minimizar errores por reflexión del ultrasonido.

El módulo termoeléctrico TEC1-12706 opera a 12V y 6A, permitiendo generar diferencias térmicas cercanas a 65°C y capacidades de enfriamiento de aproximadamente 50–60 W. Su funcionamiento se basa en el efecto Peltier: el paso de corriente produce una cara fría (utilizada para condensar el vapor de agua) y una cara caliente que requiere disipación térmica eficiente. Para mejorar este comportamiento se implementaron disipadores de aluminio, ventiladores de extracción y circulación forzada de aire, condiciones que mejoran la eficiencia de condensación y evitan el sobrecalentamiento del sistema. El módulo fue seleccionado por su amplio uso en sistemas compactos de generación de agua atmosférica, presentando un equilibrio adecuado entre capacidad de enfriamiento, disponibilidad comercial y facilidad de integración (Liu et al., 2017; Manjunath et al., 2022; Varun & Jayabarathi, 2021).

2.3 Diseño experimental y pruebas realizadas.

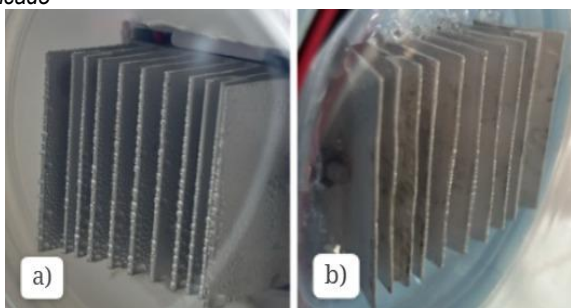
Se realizaron cinco experimentos bajo distintas configuraciones ambientales y operativas con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema. Durante las pruebas se modificaron variables como la humedad relativa, el grado de sellado del sistema, el uso de ventiladores, la potencia suministrada al módulo Peltier y el tiempo de operación, lo que permitió analizar su influencia en el proceso de condensación. La celda termoeléctrica TEC1-12706 se integró en una cámara de condensación diseñada para recuperar parte del vapor generado en el estanque. Se implementó una minibomba de

succión de 12 V, ubicada directamente frente al disipador frío de la celda Peltier, para dirigir de forma controlada el vapor extraído del estanque hacia la superficie fría de condensación. Esta configuración favorece un mejor contacto entre el aire húmedo y el disipador térmico, lo que mejora la transferencia de calor y la producción de condensado, en concordancia con lo reportado por Salgado-Gutiérrez et al. (2025), quienes concluyen que la renovación continua del vapor y el flujo controlado de aire son factores críticos para mantener la eficiencia de condensación en sistemas termoeléctricos.

El disipador térmico de aluminio instalado en la cara fría de la celda Peltier fue modificado físicamente, aumentando la separación entre sus aletas en aproximadamente 5 mm, como se observa en la Figura 2. Esto favorece el flujo de aire húmedo entre las superficies metálicas, permitiendo que las gotas de agua condensada descendan con mayor facilidad hacia la parte inferior de la cámara de condensación, evitando acumulaciones y mejorando la recolección.

Figura 2

a) *Rejillas del disipador sin modificación* b) *Rejillas del disipador modificado*



La cámara de condensación consiste en un recipiente esférico con capacidad aproximada de un litro (Figura 3). La geometría esférica se seleccionó porque favorece la caída gravitatoria de las gotas condensadas hacia la parte inferior del recipiente, evitando acumulaciones en las paredes internas. Además, el volumen interno permitió mantener una alta concentración local de humedad alrededor del disipador frío, lo que favoreció una condensación más rápida y estable. Se descartó la instalación directa del disipador de la cara fría sobre la parte superior del estanque (opción inicialmente planteada para aprovechar el ascenso natural del vapor) porque la forma esférica del recipiente dificultaba la fijación segura del conjunto termoeléctrico e incrementaba en exceso el peso estructural sobre la tapa. En su lugar, se implementó un cuerpo externo que simplificó el mantenimiento, facilitó la experimentación y permitió controlar el flujo de vapor mediante la bomba de extracción hacia el recipiente colector. Esta extracción forzada resolvió las restricciones físicas y optimizó la termodinámica del proceso, aumentando significativamente el contacto y la renovación del aire sobre la superficie fría del disipador, lo que incrementa la eficiencia de condensación en sistemas termoeléctricos

(Casallas et al., 2021; Joshi et al., 2017; Salgado-Gutiérrez et al., 2025). La disposición del flujo de aire siguió los criterios propuestos por Mafla Maza (2023), quien señala que el recorrido del aire húmedo sobre la superficie fría favorece el crecimiento de gotas y su posterior escurrimiento hacia el recipiente colector. El agua condensada se recuperó y midió mediante probeta graduada al término de cada experimento.

Figura 3

Bomba de extracción que dirige el vapor al disipador.



Se utilizaron bombas de aire para oxigenar el agua, con el propósito de simular condiciones reales de operación en sistemas RAS. Además de mantener niveles adecuados de oxígeno disuelto, la aireación generó movimiento superficial y turbulencia en el estanque, lo que incrementó la evaporación y favoreció la acumulación de humedad relativa en el entorno inmediato.

2.4. Variables experimentales.

Las principales variables analizadas durante las pruebas fueron:

- Humedad relativa (%).
- Temperatura ambiental (°C).
- Voltaje aplicado al módulo Peltier.
- Ciclo de trabajo (PWM).
- Flujo de aire sobre los disipadores.

Este conjunto de variables permitió evaluar de manera integral el comportamiento del sistema y su capacidad para recuperar agua a partir del vapor generado en el estanque.

El Experimento 1 tuvo como finalidad verificar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos, la comunicación entre sensores y el inicio del proceso de condensación; por esta razón no fue considerado para la comparación directa con los experimentos desarrollados durante 24 horas. Cada uno de los experimentos de larga duración consistió en un único ensayo continuo de 24 horas, durante el cual el sistema registró automáticamente las variables ambientales cada 60 segundos. Debido a limitaciones de tiempo y de disponibilidad del prototipo, cada condición experimental fue evaluada únicamente una vez; en consecuencia, los resultados representan una validación experimental del desempeño del sistema bajo diferentes condiciones de operación, sin pretender

realizar inferencias estadísticas sobre la variabilidad experimental. Como trabajo futuro, se propone incrementar el número de réplicas independientes para realizar análisis estadísticos de repetibilidad y reproducibilidad.

A. Ecuaciones.

La potencia consumida por el módulo Peltier se calcula mediante la ecuación (1)

$$P = V * I \quad (1)$$

En donde P es la potencia eléctrica, V es el voltaje e I es la corriente. Para el módulo TEC1-12706 tendremos:

$$P = 12V * 6A = 72W$$

El consumo energético se calcula mediante:

$$E = P * t \quad (2)$$

Donde E es la energía consumida, P es la potencia y t es el tiempo.

El porcentaje de eficiencia de recuperación se determina mediante:

$$\eta = \frac{V_c}{V_e} * 100 \quad (3)$$

En donde n es la eficiencia de recuperación, V_e es el volumen evaporado y V_c es el volumen condensado

En la Tabla 1 se presentan los resultados del consumo eléctrico estimado de los componentes utilizados en el prototipo.

Tabla 1
Consumo eléctrico.

Componentes	Modelo	Voltaje	Corriente	Potencia
Microcontrolador	ESP32	5V	0.2A	1.0W
Sensor temperatura y humedad	DHT22	5V	0.002A	0.01W
Sensor ultrasónico	JSN-SR04T	5V	0.03A	0.15W
Celda Peltier	TEC1-12706	12V	6.0A	72.0W
Ventilador disipador en Peltier	12V DC	12V	0.2A	2.4W
Ventilador disipador	12V DC	12V	0.2A	2.4W
Mini bomba de succión	12V DC	12V	0.5A	6.0W
Bomba de oxigenación	Aireador 2 salidas	12V	0.25A	3.0W
Bomba sumergible agua	Equipo hidráulico	12V	1.0A	25.0W
MOSFET	IRLZ44N	5V	0.01A	0.05W
Total		--	--	112.01W

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Control y adquisición de datos

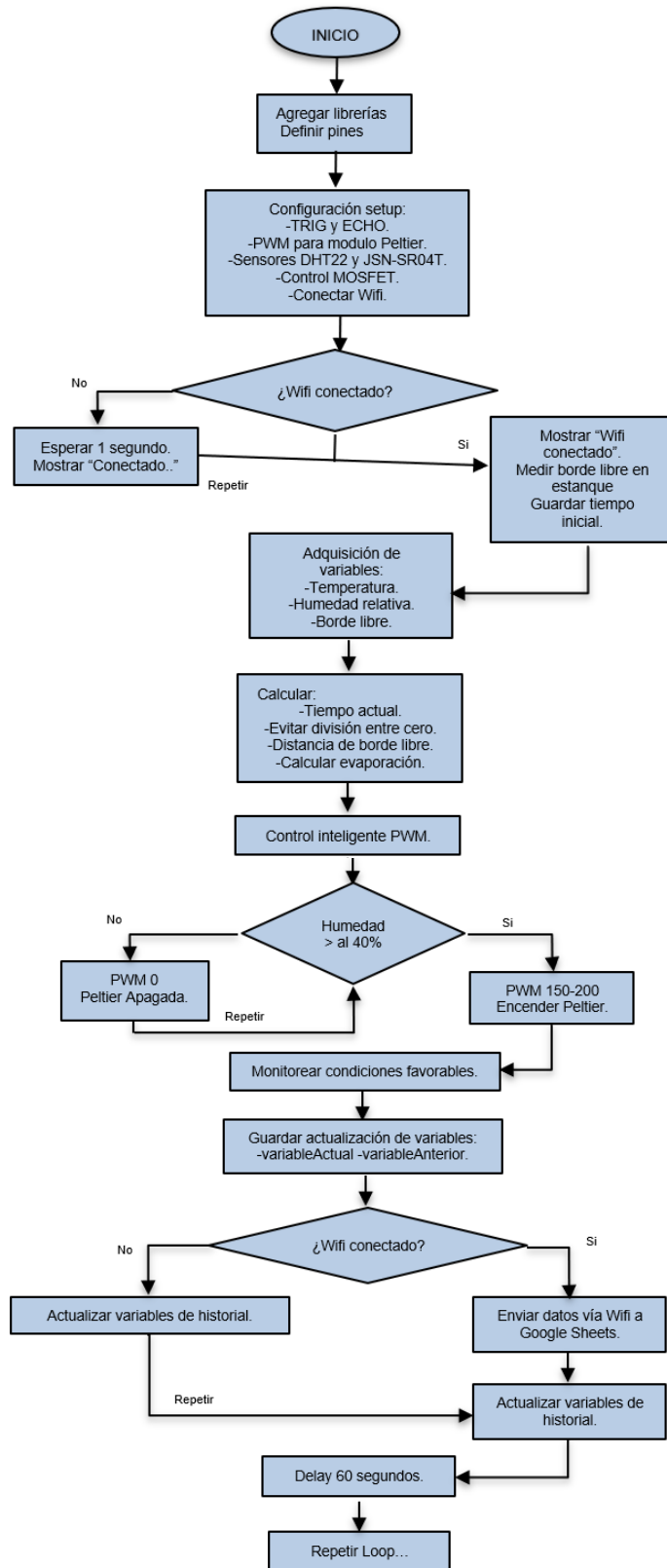
El sistema fue controlado mediante el microcontrolador ESP32 programado en el entorno Arduino IDE. El algoritmo automatizó la adquisición de datos ambientales, el control del módulo termoelectrónico y la transmisión de información a Google Sheets mediante un servicio desarrollado con Google Apps Script. El control del módulo Peltier se realizó mediante señal PWM a 5 kHz con resolución de 8 bits, empleando valores entre 150 y 200, lo que redujo el consumo energético respecto a operación continua al 100% de potencia. El ciclo de muestreo fue de 60 segundos e incluyó: lectura de temperatura y humedad relativa (DHT22), medición del nivel de agua (JSN-SR04T), cálculo del volumen evaporado, evaluación de la humedad relativa para activar o desactivar el módulo Peltier, y envío de datos a Google Sheets. La verificación continua de la conexión Wi-Fi garantiza que los datos se envíen inmediatamente cuando exista conectividad; de lo contrario, el algoritmo los almacena temporalmente y reintenta la comunicación automáticamente para evitar la pérdida de información durante el desarrollo de cada experimento. El diagrama de flujo del algoritmo se presenta en la Figura 4.

B. Control de módulo termoelectrónico

Durante el desarrollo experimental se evaluaron dos estrategias de activación del módulo Peltier con el objetivo de reducir el consumo energético sin afectar de manera significativa la recuperación de agua. Inicialmente, en el Experimento 4, el sistema se programó para activar el módulo únicamente cuando la humedad relativa superara el 80%. Sin embargo, se observó que la humedad permanecía por debajo de este umbral durante periodos prolongados, lo que mantuvo inactivo el módulo gran parte del tiempo, reduciendo el tiempo efectivo de condensación y el volumen recuperado a tan solo 5,5 ml. Con base en este comportamiento, para el Experimento 5 se redujo el umbral de activación al 40% de humedad relativa, incrementando el tiempo de funcionamiento del módulo y favoreciendo una mayor producción de agua condensada sin incrementar significativamente el consumo energético gracias al control PWM. Esta estrategia permitió alcanzar el mejor desempeño experimental: 53 ml recuperados en 24 horas, lo que demuestra que la optimización del algoritmo de control es tan determinante como el diseño físico del condensador para mejorar la eficiencia global del sistema.

Figura 4

Diagrama de flujo del ciclo continuo automático del sistema Peltier.



Código fuente:

```

1. #include <WiFi.h>
2. #include <HTTPClient.h>
3. #include "DHT.h"
4. #define DHTPIN 4
5. #define DHTTYPE DHT22
6. #define TRIG 5
7. #define ECHO 18
8. #define PELTIER 23
9. #define PWM_CHANNEL 0
10. #define PWM_FREQ 5000
11. #define PWM_RESOLUTION 8
12. DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);
13. const char* ssid = "TP-Link_44C6";
14. const char* password = "4419531";
15. String url = "https://script.google.com/macros/s/AKfycbwGXPYLRdzH6DDd0SjJbHLatkyTU3Mk0II3XOWYUNK1RnKiv5hy_sf1PUODDeq-Zu9gg/exec";
16. float alturaTanque = 36.0;
17. // Variables de predicción
18. float nivelAnterior = 0;
19. unsigned long tiempoAnterior = 0;
20. void setup() {
21.   Serial.begin(115200);
22.   pinMode(TRIG, OUTPUT);
23.   pinMode(ECHO, INPUT);
24.   ledcAttach(PELTIER, PWM_FREQ, PWM_RESOLUTION);
25.   dht.begin();
26.   WiFi.begin(ssid, password);
27.   while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
28.     delay(1000);
29.     Serial.println("Conectando WiFi...");
30.   }
31.   Serial.println("Wifi conectado");
32.   nivelAnterior = medirNivel();
33.   tiempoAnterior = millis();
34. }
35. float medirNivel() {
36.   digitalWrite(TRIG, LOW);
37.   delayMicroseconds(2);
38.   digitalWrite(TRIG, HIGH);
39.   delayMicroseconds(10);
40.   digitalWrite(TRIG, LOW);
41.   long duracion = pulseIn(ECHO, HIGH, 30000);
42.   float distancia = duracion * 0.034 / 2;
43.   float nivel = alturaTanque - distancia;
44.   return nivel;
45. }
46. void loop() {
47.   float temperatura = dht.readTemperature();
48.   float humedad = dht.readHumidity();
49.   float nivelActual = medirNivel();
50.   unsigned long tiempoActual = millis();
51.   float deltaTiempo = (tiempoActual - tiempoAnterior) /
52.     60000.0; // minutos
53.   // Evitar división por 0
54.   if (deltaTiempo <= 0) deltaTiempo = 1;
55.   // Cálculo de evaporación
56.   float evapRate = (nivelAnterior - nivelActual) /
57.     deltaTiempo; // cm/min
58.   // Predicción a 10 minutos
59.   float nivelFuturo = nivelActual - (evapRate * 10);
60.   int pwm = 0;
61.   // CONTROL INTELIGENTE
62.   if (nivelFuturo < 22.0) {
63.     pwm = 200; // fuerte anticipado
64.   }
65.   else if (evapRate > 0.05) {
66.     pwm = 150; // evaporación alta
67.   }
68.   else if (humedad > 40) {
69.     pwm = 120; // condiciones favorables
70.   }
71.   }
    
```

```

70. else {
71.   pwm = 0;
72. }

73. ledcWrite(PELTIER, pwm);
74.   Serial.println("-----");
75.   Serial.print("Nivel          actual:      ");
76.   Serial.println(nivelActual);
77.   Serial.print("Evap rate: "); Serial.println(evapRate);
78.   Serial.print("Nivel          futuro:      ");
79.   Serial.println(nivelFuturo);
80.   Serial.print("PWM: "); Serial.println(pwm);
81.   // Guardar datos para siguiente ciclo
82.   nivelAnterior = nivelActual;
83.   tiempoAnterior = tiempoActual;
84.   // Envío a Google Sheets
85.   if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
86.     HTTPClient http;
87.     String datos = url +
88.       "?temp=" + String(temperatura, 2) +
89.       "&hum=" + String(humedad, 2) +
90.       "&nivel=" + String(nivelActual, 2) +
91.       "&evap=" + String(evapRate, 4) +
92.       "&pred=" + String(nivelFuturo, 2) +
93.       "&peltier=" + String(pwm);
94.     http.begin(datos);
95.     http.GET();
96.     http.end();
97.   }
98.   delay(60000);
99. }

```

C. Evaluación del desempeño experimental

La Tabla 2 resume las condiciones ambientales y operativas de los cinco experimentos. La temperatura promedio presentó una variabilidad de 24.6°C a 31.5°C, mientras que la humedad relativa osciló entre 39.46% y valores cercanos al 100%.

Tabla 2

Condiciones ambientales y operativas de los experimentos con celda Peltier.

Experimento	Temp. Prom. (°C)	Hum. Prom. (%)	Duración (h)	Peltier encendida (h)
Experimento 1	29.7	93.3	1	1
Experimento 2	31.5	99.6	24	24
Experimento 3	24.6	63.7	24	24
Experimento 4	27.29	39.46	24	20
Experimento 5	30.99	99.49	24	17

La Tabla 2 resume las condiciones ambientales y operativas de los cinco experimentos. La temperatura promedio varió entre 24.6 °C y 31.5 °C, mientras que la humedad relativa osciló entre 39.46 % y valores cercanos al 100 %.

El Experimento 1 se realizó como prueba preliminar del sistema y no se incluye en la comparación directa de eficiencia con los experimentos de 24 horas; se trabajó bajo condiciones de luz solar directa con un difusor, sin ventilación interna forzada y alta hermeticidad, obteniéndose 2 ml en una hora.

En el Experimento 2, el sistema operó durante 24 horas con luz indirecta, dos difusores, sin ventilación forzada y alta hermeticidad, recuperando 43 ml en total.

En el Experimento 3 se añadió ventilación forzada hacia el interior del estanque, lo que eliminó la hermeticidad y provocó la salida del vapor de agua al ambiente, resultando en únicamente 11 ml recuperados durante el mismo periodo.

El Experimento 4 se modificó para encenderse solamente cuando la humedad relativa superara el 80 %, lo que mantuvo el módulo inactivo durante periodos prolongados y limitó la recuperación a 5.5 ml en 24 horas.

En el Experimento 5 se redujo el umbral a 40 % de humedad relativa y se restableció la hermeticidad del sistema, logrando el mejor desempeño: 53 ml recuperados en 24 horas, con el módulo encendido únicamente durante 17 horas. Aunque el Experimento 5 incrementó el tiempo de operación respecto al Experimento 4, la mayor recuperación de agua compensó el incremento energético, lo que permitió obtener una eficiencia de recuperación superior.

La Figura 5 muestra el volumen de agua condensada recolectado en el Experimento 5, medido en una probeta graduada.

Figura 5

Probeta graduada con el agua recuperada del Experimento 5.

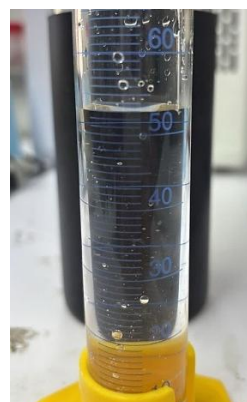


Tabla 3

Pérdida de agua y condensación obtenida.

Experimento	Diferencia del borde libre (Cm)	Volumen Evaporado (ml)	Volumen. Condensado (ml)	Producción ml/h
Experimento 1	0.20	135.20	2.0	2.0
Experimento 2	2.62	1771.12	43	1.79
Experimento 3	4.39	2967.64	11	0.45
Experimento 4	3.12	2109.12	5.5	0.22
Experimento 5	3.14	2122.64	53	2.20

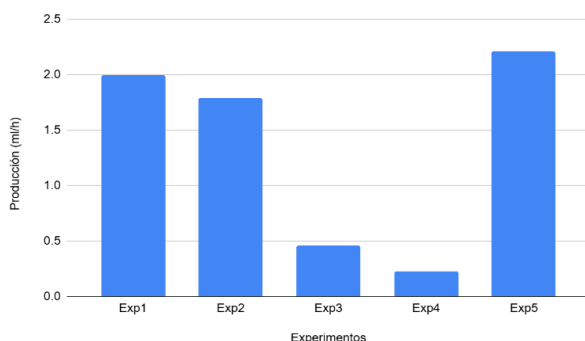
La Tabla 3 presenta los resultados de la pérdida de agua y la condensación obtenidos en cada experimento. El volumen evaporado varió entre 135.20 ml y 2 967.64 ml, mientras que el volumen condensado mostró valores entre 2.0 ml y 53 ml, con tasas de producción entre 0.22 ml/h y 2.20 ml/h, lo que evidencia una variabilidad importante en la eficiencia del sistema bajo diferentes condiciones experimentales.

Tabla 4
Comparación de desempeño experimental.

Experimento	Eficiencia de recuperación (%)	Consumo energético estimado (Wh)	Eficiencia energética (ml/Wh)	Observaciones
Experimento 1	1.48	58.4	0.0342	Luz solar directa
Experimento 2	2.43	62	0.0288	Luz indirecta, sin ventilación
Experimento 3	0.37	64	0.0071	Ventilación forzada
Experimento 4	0.26	53.33	0.0042	Peltier al 80%
Experimento 5	2.50	43.91	0.0502	Peltier al 40%

La Tabla 4 presenta la comparación del desempeño experimental del sistema. La eficiencia de recuperación varió entre 0.26% y 2.50%, el consumo energético entre 43.91 Wh y 64 Wh, y la eficiencia energética entre 0.0042 ml/Wh y 0.0502 ml/Wh. La eficiencia energética evidencia la influencia de las condiciones operativas y ambientales: factores como la ventilación, la incidencia de la luz y el régimen de operación del módulo Peltier inciden directamente en el rendimiento del sistema. Condiciones de baja humedad relativa (por debajo del 65%) presentaron una disminución notable de la producción, con valores inferiores a 0.5 ml/h, lo que confirma la fuerte dependencia del proceso de condensación respecto a la humedad ambiental. En términos generales, la mayor producción (2.21 ml/h) se obtuvo al combinar un alto sellado con un control adecuado del módulo termoelectrónico, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6
Resultados generales de la producción de agua líquida recuperada de los experimentos realizados.



Las Figuras 7 y 8 presentan los resultados detallados de los dos experimentos de mayor relevancia. El Experimento 2 (Figura 7), con una temperatura promedio de 31.5°C y una humedad relativa del 99.6%, concentró la mayor parte de sus datos entre 30.2°C y 33.5°C, con una humedad relativa cercana al 100%, lo que permitió una condensación sostenida. El Experimento 5 (Figura 8) registró temperaturas predominantes entre 30.9°C y 33.1°C, con humedades superiores al 90%, y obtuvo el mejor desempeño global: mayor volumen de agua condensada y menor consumo de energía por mililitro recuperado.

Figura 7
Gráfica de resultados del primer experimento eficiente

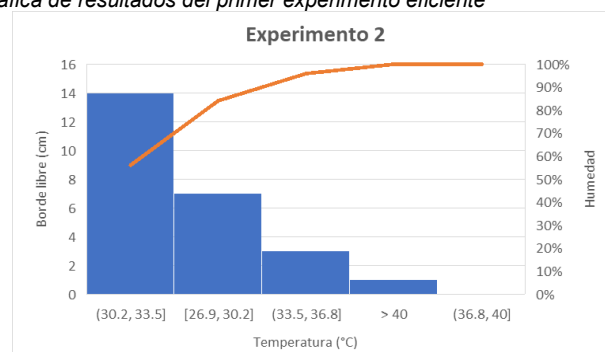
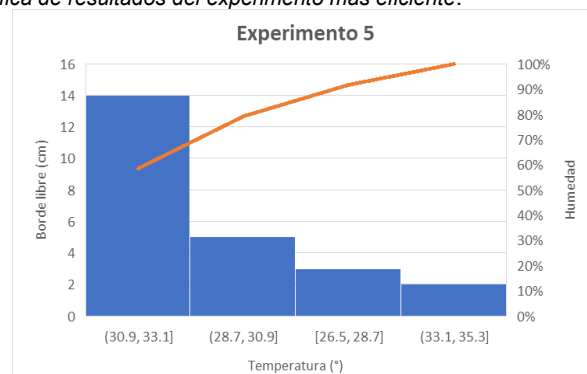


Figura 8
Gráfica de resultados del experimento más eficiente.



En cuanto al costo-beneficio, la celda Peltier TEC1-12706 (12V, 6A, 72W) fue el componente de mayor consumo energético del sistema. En el peor escenario (Experimento 3) se recuperaron únicamente 11 ml de los aproximadamente 3 L evaporados, con una eficiencia de recuperación del 0.37% y una eficiencia energética de 0.0071 ml/Wh. No obstante, el objetivo de esta investigación no fue maximizar la producción de agua atmosférica, sino demostrar la factibilidad técnica de recuperar parcialmente el agua evaporada en un sistema RAS. La mejor condición experimental (Experimento 5) alcanzó una eficiencia de recuperación del 2.50% y una eficiencia energética de 0.0502 ml/Wh, mejorando significativamente el desempeño mediante el control PWM con activación por humedad relativa, lo que redujo el tiempo de operación del módulo de 24 a 17 horas. Como trabajo futuro, se propone optimizar la eficiencia del sistema mediante módulos Peltier de mayor rendimiento, un mejor aislamiento térmico y estrategias de control más avanzadas. Para contextualizar el desempeño del sistema, la Tabla 5 presenta una comparación con investigaciones relacionadas. Todos los trabajos coinciden en que la humedad relativa, la disipación térmica y el control del módulo Peltier son las variables de mayor influencia sobre la eficiencia del proceso de condensación termoelectrónica.

Tabla 5

Comparación de investigaciones relacionadas con generación de agua mediante condensación termoeléctrica.

Autor	Aplicación	Agua recuperada
Joshi et al. (2017)	Generador portátil de agua atmosférica	Hasta 250 ml/día (dependiendo de las condiciones ambientales)
Liu et al. (2017)	Generador atmosférico portátil.	Entre 150 y 350 ml/día según humedad y temperatura.
Casallas et al. (2021)	Optimización experimental de un generador portátil de agua.	Variable (dependiente de parámetros experimentales)
Manjunath et al. (2022)	Deshumidificador y generador de agua	Aproximadamente 180 ml/día
Varun y Jayabarathi (2021)	Generador atmosférico de agua con IoT.	No reporta un volumen único; depende de la humedad ambiental
Presente investigación	Recuperación de agua evaporada en un sistema RAS con control IoT.	53 ml/24 h

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación demostró que la integración estratégica de celdas termoeléctricas Peltier constituye una alternativa viable y eficiente para la recuperación parcial del agua evaporada en sistemas RAS, operando según el principio de condensación atmosférica controlada.

Los resultados experimentales revelaron que la eficiencia del proceso de condensación está intrínsecamente ligada a factores críticos como el mantenimiento de una humedad relativa elevada, la optimización de la disipación térmica en la cara caliente de la celda Peltier y el control preciso del flujo de vapor. La implementación de una bomba de succión de aire hacia la cámara de condensación resultó fundamental para asegurar el tránsito homogéneo del vapor saturado hacia la superficie fría, maximizar el contacto con el disipador y mitigar las pérdidas pasivas de humedad.

El sistema se consolidó como un nodo IoT (Internet de las Cosas) completamente funcional, estructurado en torno al microcontrolador ESP3. Esta arquitectura articuló de manera

robusta las etapas de sensado ambiental, procesamiento embebido y conectividad inalámbrica, facilitando la visualización remota, el almacenamiento seguro y el análisis continuo del comportamiento del sistema mediante la transmisión de datos en tiempo real hacia Google Sheets.

Mediante la modulación por ancho de pulsos (PWM), el microcontrolador gestionó la potencia del módulo termoeléctrico, logrando un equilibrio entre la tasa de recuperación de agua, logrando alcanzar un rendimiento experimental alrededor de los 2ml/h en condiciones favorables, y el consumo energético. La reducción del umbral de activación del módulo Peltier de 80% a 40% de humedad relativa demostró ser la mejora operativa determinante, recuperando un volumen de 53 ml en 34 horas. En conjunto, este desarrollo representa una solución tecnológica innovadora que contribuye a mejorar la sostenibilidad hídrica y operativa en los sistemas de recirculación acuícolas cerrados.

V. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado y el impulso al desarrollo científico. Asimismo, se reconoce la contribución de todas las personas que participaron, directa o indirectamente, en la realización de este trabajo.

VI. REFERENCIAS

- Bregnballe, J., & Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2025). *Guía sobre recirculación acuícola: Introducción a los nuevos sistemas cerrados de acuicultura, respetuosos con el medio ambiente y altamente productivos*. FAO; Eurofish. <https://doi.org/10.4060/i4626s>
- Casallas, I., Pérez, M., Fajardo, A., & Páez-Rueda, C. I. (2021). *Experimental parameter tuning of a portable water generator system based on a thermoelectric cooler*. Electronics, 10(2), 141. <https://doi.org/10.3390/electronics10020141>
- Ginters, E., & Ginters, P. V. (2026). *Experimental study of electrostatic and thermoelectric hybrid modes in fog water harvesting*. Preprints.org. <https://doi.org/10.20944/preprints202602.1762.v1>
- Joshi, V. P., Joshi, V. S., Kothari, H. A., Mahajan, M. D., Chaudhari, M. B., & Sant, K. D. (2017). *Experimental investigations on a portable fresh water generator using a thermoelectric cooler*. Energy Procedia, 109, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.085>
- Liu, S., He, W., Hu, D., Lv, S., Chen, D., Wu, X., Xu, F., & Li, S. (2017). *Experimental analysis of a portable atmospheric water generator by thermoelectric cooling method*. Energy Procedia, 142, 1609–1614. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.12.538>
- Mafla Maza, J. A. (2023). *Diseño y construcción de prototipos de captura y condensación de vapor de agua presente en el aire atmosférico* [Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional].

<https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/24359/1/CD%2013278.pdf>

Manjunath, A., Shadaskhar, I. R., Singh, A. K., Sahu, H., Kaylan, K. P., Rai, P., & Ramteke, S. (2022). *Water extractor and dehumidifier using Peltier module*. International Journal of Engineering Research & Technology, 10(10), 30–33.
<https://www.ijert.org/research/water-extractor-and-dehumidifier-using-peltier-module-IJERTCONV10IS10007.pdf>

Rascón Barceló, L. E. (2020). *Generador de agua mediante uso de celdas Peltier y energía solar* [Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México].
https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/5190/1/180_MIE_Luis%20Eduardo%20Rasc%C3%B3n%20Barcel%C3%B3.pdf

Salgado-Gutiérrez, M. C., López-Moreno, J. L., Arguello-Torres, J. C., Fragoso-Mandujano, J. A., Culebro-Farrera, M. D., & Pérez-García, G. F. (2025). *Caracterización de celdas Peltier para la generación sostenible de agua atmosférica por condensación*. Tecnológico Nacional de México. ISSN: 3061-810X.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. (2019). *Acuicultura, producción y conservación de organismos acuáticos*. Gob.mx.
<https://www.gob.mx/agricultura/articulos/acuicultura-produccion-y-conservacion-de-organismos-acuaticos>

Varun, M. K., & Jayabarathi, R. (2021). *Prototype implementation of atmospheric water generation by Peltier device*. IEEE Xplore.
<https://doi.org/10.1109/SMARTGENCON51891.2021.9645838>

No.	Rol	Descripción
1	Conceptualización	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón; Hesner Coto Fuentes; Francisco Valdés Perezgasga.
2	Curación de datos	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón.
3	Análisis formal	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón.
4	Obtención de fondos	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón.
5	Investigación	Diana Monserrat Luna Guardado; Hesner Coto Fuentes.
6	Metodología	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón; Hesner Coto Fuentes.
7	Administración del proyecto	Karla Victoria Guevara Amatón.
8	Recursos	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón.
9	Software	Diana Monserrat Luna Guardado.
10	Supervisión	Karla Victoria Guevara Amatón; Francisco Valdés Perezgasga.
11	Validación	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón.
12	Visualización	Francisco Valdés Perezgasga.
13	Redacción - borrador original	Diana Monserrat Luna Guardado; Francisco Valdés Perezgasga.
14	Redacción - revisión y edición	Diana Monserrat Luna Guardado; Karla Victoria Guevara Amatón.