

Influence of the relative humidity and temperature on atmospheric water harvesting using the Arduino controlled Peltier cell

Kevin Mosqueira-Moreno¹ , Gabriela Sánchez-Vilela¹ , Yonathan Yalle-Teran¹  and Luis Vásquez-Ramírez, Dr.¹ 
¹*Escuela Profesional de Ingeniería Hidráulica, Universidad Nacional de Cajamarca - Cajamarca, Perú,*
kmosqueiram21_1@unc.edu.pe, gsanchezv21_1@unc.edu.pe, yyallet17_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Abstract– Atmospheric water uptake is influenced by relative humidity and temperature, key factors in the performance of a prototype designed and assembled with temperature and humidity sensors and a condensation system based on the Peltier cell controlled by Arduino. To evaluate its efficiency, 50 experimental tests were carried out at the Abra “El Gavilán”, located at 3155 masl, Cajamarca - Peru. The results showed that water generation is directly influenced by relative humidity, reaching its maximum performance in environments with values higher than 95%, while moderate temperatures favor the condensation process. Likewise, it was shown that the operation time and the number of Peltier cells used play a key role in the amount of water collected, suggesting that the system can be optimized and scaled to improve its efficiency. Statistical analysis confirmed a positive correlation between relative humidity and water production, supporting the viability of this technology in regions with high humidity.

Keywords-- Temperature, Relative humidity, Atmospheric water, Peltier cells, Arduino

Influencia de la humedad relativa y la temperatura en la captación de agua atmosférica utilizando la Celda Peltier controlado por Arduino

Kevin Mosqueira-Moreno¹ , Gabriela Sánchez-Vilela¹ , Yonathan Yalle-Teran¹  and Luis Vásquez-Ramírez, Dr.¹ 

¹Escuela Profesional de Ingeniería Hidráulica, Universidad Nacional de Cajamarca - Cajamarca, Perú,

kmosqueiram21_1@unc.edu.pe, gsanchezv21_1@unc.edu.pe, yyallet17_1@unc.edu.pe, lvasquez@unc.edu.pe

Resumen– La captación de agua atmosférica se ve influenciada por la humedad relativa y la temperatura, factores clave en el desempeño de un prototipo diseñado y ensamblado con sensores de temperatura, humedad y un sistema de condensación basado en la celda Peltier controlada por Arduino. Para evaluar su eficiencia, se realizaron a cabo 50 pruebas experimentales en el Abra “El Gavilán”, ubicada a 3155 msnm, Cajamarca - Perú. Los resultados demostraron que la generación de agua está directamente influenciada por la humedad relativa, alcanzando su máximo rendimiento en ambientes con valores superiores al 95%, mientras que temperaturas moderadas favorecen el proceso de condensación. Asimismo, se evidenció que el tiempo de operación y el número de celdas Peltier utilizadas juegan un papel clave en la cantidad de agua recolectada, lo que sugiere que el sistema puede optimizarse y escalarse para mejorar su eficiencia. El análisis estadístico confirmó una correlación positiva entre la humedad relativa y la producción de agua, lo que respalda la viabilidad de esta tecnología en regiones con alta humedad.

Palabras clave– Temperatura, Humedad relativa, Agua atmosférica, Celdas Peltier, Arduino

I. INTRODUCCIÓN

En el mundo actual, caracterizado por el avance tecnológico y la creciente presión sobre los recursos naturales, es indispensable encontrar formas sostenibles de satisfacer las necesidades básicas de la humanidad. Entre los recursos más vitales, el agua ocupa un lugar central, siendo esencial para la vida y el desarrollo de las sociedades. El aprovechamiento de fuentes alternativas, como la humedad relativa, junto con el uso de tecnologías innovadoras, representa una oportunidad característica para generar agua atmosférica y promover el cuidado del medio ambiente.

En los últimos años, la generación de agua atmosférica ha sido objeto de múltiples investigaciones en diferentes partes del mundo, explorando tecnologías como la condensación del vapor de agua, el uso de celdas Peltier y sistemas automatizados para mejorar la eficiencia del proceso. Por ejemplo, [1] diseñó un prototipo para obtener agua potable a través de la condensación del vapor atmosférico en la Parroquia de Lloa, Ecuador implementando 3 Celdas Peltier. Este sistema aprovechó una humedad relativa promedio del 85%, logrando

generar 350.5 mL de agua recolectada durante la noche y 213.5 ml de volumen mínimo durante el día, lo que representó que en 28.1 horas se debe tardar en generar un litro de agua lo cual indica que la implementación de este prototipo es una solución eficaz para comunidades rurales con acceso limitado a fuentes de agua. Asimismo, el autor subraya que la humedad relativa es un factor clave, ya que incrementa la eficiencia del proceso de condensación en más del 50% cuando supera el 80%. Además [2] define a la humedad relativa como la cantidad de vapor de agua presente en el aire, la cual está expresada como un porcentaje de la cantidad total que el aire puede contener a una temperatura específica, teniendo en cuenta que una alta humedad relativa es favorable para la captación de agua, ya que incrementa la eficiencia del proceso de condensación. Destacando dentro de su estudio que esta cantidad de agua presente en el aire tiene una relación inversamente proporcional con la temperatura del lugar, lo que quiere darnos a entender que a menor temperatura la humedad aumenta y viceversa.

De manera similar, [3] desarrolló un sistema de captación atmosférica activa de agua en México, el cual fue diseñado específicamente para mitigar los efectos de las sequías severas en algunos lugares del país. El sistema presentado en dicha investigación logró captar hasta 15 litros diarios aproximadamente, con una eficiencia del 70% al hacer la comparación con métodos convencionales, lo que demuestra nuevamente que gracias a la incorporación y adquisición de tecnologías de refrigeración y control automatizado. Estos resultados nos llegan a mostrar la importancia de adaptar los diseños a las condiciones climáticas locales, puesto que la eficiencia llegó a variar en un 20% considerando entre climas áridos y semiáridos.

En cuanto al uso de tecnologías específicas, las celdas Peltier han sido ampliamente investigadas como una alternativa eficiente para generar agua a partir de la humedad del aire. Estudios como los realizados por [4] quienes realizaron un estudio de eficiencia de refrigeración por agua en el Campus Natal – Zona Norte donde implementaron una estructura para tomar las medidas necesarias para determinar la eficiencia del sistema utilizando energía solar y celdas peltier, donde menciona que estos son dispositivos termoeléctricos que hace

uso del efecto Peltier para transferir calor entre dos superficies cuando se llega a aplicar una corriente eléctrica. Estas celdas se caracterizan por su capacidad de generar un gradiente de temperatura, lo que permite que se realice la condensación del vapor de agua presente en el aire. Además, este sistema demostró ser especialmente viable para su implementación en zonas con acceso limitado a la red eléctrica y por otro lado [5] llevó a cabo un estudio que evaluó y analizó la implementación de sistemas basados en el uso de celdas Peltier en diferentes situaciones climáticas con la finalidad de encontrar las similitudes y diferencias entre sus pruebas realizadas con respecto a cada contextualización ambiental. Así mismo, los resultados finales mostraron que estos dispositivos pueden adaptarse con gran eficiencia a zonas con alta humedad relativa, destacando su potencial para proporcionar agua potable en regiones con recursos limitados, cabe recalcar que los resultados que se obtuvieron con alta humedad relativa (80%-90%), reportando en promedio una capacidad de generación diaria de hasta 12 litros, con una eficiencia térmica del 60%.

El tema de la automatización, el control y programador de sistemas de generación de agua atmosférica también han sido temas de suma importancia en la literatura. En este caso tenemos las investigaciones de [6] y [7] quienes también demuestran que han analizado la viabilidad de estos sistemas en diferentes contextos climáticos, resaltando su utilidad en zonas donde la humedad relativa es suficiente para garantizar una producción de agua constante. Sin embargo, surgen inconvenientes similares al realizar la automatización del modelo o prototipo que presentan, ya que no llegan a tener triunfos en sus pruebas de programación con alguna tecnología adicional, dado estos casos se evidencia que se debe al error en la redacción del código de programación.

La automatización y el control de sistemas de generación de agua atmosférica han sido otro punto de interés de los investigadores, por lo que se presentan, investigaciones como la de [8] donde destacan la integración de tecnologías de monitoreo y control en tiempo real para mejorar el rendimiento de estos sistemas, mientras que [9] resalta la importancia de implementar prototipos que incorporen sensores y dispositivos de bajo costo, como los controladores Arduino, para optimizar la captación de agua. Además, [8] y [10] han explorado cómo estos sistemas pueden adaptarse óptimamente a comunidades específicas, considerando variables importantes como la humedad relativa, el consumo energético y la implementación de Arduino, el cual después de un análisis los autores indican que actúa como plataforma de control fundamental con la finalidad de automatizar y monitorear los sistemas de generación de agua, ya que se conoce como una plataforma de hardware y software libre que facilita el diseño y la implementación de sistemas electrónicos, permitiendo la integración de sensores, actuadores y módulos de comunicación, encontrar Arduino dentro del mercado es incorporar métodos innovadores para la sociedad en general.

En el contexto peruano, estudios como el de [7] han investigado acerca del diseño y construcción de prototipos que permitan la captación y condensación de vapor de agua atmosférico, demostrando la viabilidad de aplicar estas tecnologías en regiones con acceso limitado al agua potable. Muestra el estudio en Lima, una región caracterizada por su diversidad climática y problemas en algunos lugares relacionados con el acceso desigual al agua ofrece un escenario ideal para la implementación de un sistema generador de agua atmosférica. Este tipo de solución busca atender las necesidades hídricas y contribuir al desarrollo sostenible.

Adicionalmente, revisiones como las de [11] y [12] destacan las tendencias actuales y las oportunidades futuras en la investigación de generadores de agua atmosférica. Estas incluyen desde la optimización del diseño y los materiales hasta la integración de energías renovables. Por ejemplo, [13] y [14] han desarrollado generadores portátiles y sistemas híbridos que aprovechan energías como la solar, permitiendo su aplicación en zonas urbanas y rurales con infraestructura limitada. Investigaciones recientes como las de [15] y [16] también han abordado la optimización de los sistemas mediante diferentes métodos de enfriamiento y configuraciones tecnológicas.

Estudios realizados por [17] y [18] enfatizan la portabilidad y eficiencia en sistemas de captación atmosférica, mostrando cómo el desarrollo de su diseño compacto puede ser crucial para zonas de difícil acceso. Asimismo, [19] y [20] han evaluado la viabilidad económica de estos sistemas, sugiriendo estrategias para reducir los costos de implementación y operación, lo cual resulta fundamental para su masificación.

De esta manera, se plantea como objetivo analizar la influencia de la humedad relativa y la temperatura en la captación de agua atmosférica mediante un sistema basado en la celda Peltier, controlado por Arduino, diseñado para realizar el estudio en el Abra "El Gavilán", Cajamarca - Perú. A través de la integración de tecnologías como Arduino, celdas Peltier, sensores ambientales y módulos de control automatizado, se busca evaluar la eficiencia del sistema en función de las condiciones climáticas. Asimismo, se comparan los resultados obtenidos con estudios previos, destacando los aportes al conocimiento científico y su potencial aplicación en la región.

En síntesis, el uso de celdas Peltier para la captación de agua atmosférica permite evaluar la influencia de factores ambientales, como la humedad relativa y la temperatura, en el proceso de condensación. Este artículo resalta la importancia de estas tecnologías a través de un análisis de la literatura actual, a avances en sistemas termoelectrónicos y su aplicación en la obtención de agua. Asimismo, se proponen nuevas líneas de investigación orientadas a mejorar la eficiencia del sistema, optimizar su consumo energético y comprender mejores las condiciones que favorecen su funcionamiento.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

El tipo de investigación fue descriptivo, diseñado para evaluar el efecto producido de las variables como parámetros de la humedad relativa y temperatura para así analizar el desempeño de un sistema de captación de agua atmosférica controlado por Arduino en un área ubicada en el Abra “El Gavilán”, Cajamarca – Perú, delimitadas con las coordenadas 779208.28 E y 9199353.45 N.



Fig. 1 Ubicación del punto de estudio

Con el objetivo de garantizar la eficiencia del sistema y su replicabilidad, se seleccionaron los componentes electrónicos y mecánicos utilizados en el diseño del prototipo que se detallan en la Tabla I.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES UTILIZADOS EN EL DISEÑO DEL PROTOTIPO

Componente	Dimensiones	Especificaciones técnicas
Celda Peltier TEC1-12706	40 × 40 × 3 mm	12 V, 0–6 A, 60 W máx. de enfriamiento
Sensor de temperatura y humedad DHT22	20 × 15 × 8 mm	±0.5 °C (temp), ±2% HR, rango: -40 a 80 °C, 0–100% HR
Microcontrolador Arduino Uno	68.6 × 53.4 mm	14 entradas/salidas digitales, 6 entradas analógicas, voltaje de 5 V
Disipador de calor Circular (aluminio)	60 mm de diámetro	Aletas metálicas, compatible con Peltier
Pasta térmica Estándar	-	Alta conductividad térmica ($\geq 3 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)
Relé Módulo de 1 canal	50 × 26 mm	5 VDC, 10 A/250 VAC
Ventilador Estándar	80 × 80 × 25 mm	12 VDC, caudal de aire promedio 30–40 CFM
Pantalla LCD	80 × 36 mm	Interfaz I2C, alimentación 5 V
Fuente de alimentación Ultra Slim	110 × 78 × 36 mm	12 V / 5 A, diseño compacto
Protoboard AJ-PT02 con lámina	165 × 55 mm	830 puntos de conexión
Zumbador	23 × 12 mm	

El estudio se desarrolló a lo largo de cinco etapas fundamentales, abarcando desde el diseño del prototipo hasta el análisis de los datos recolectados.

En la **primera etapa** se diseñó y ensambló un prototipo funcional que incluyó una estructura mecánica adecuada para albergar componentes electrónicos y de control. El sistema empleó un sensor de temperatura y humedad relativa DHT22 para monitorear las condiciones ambientales, arduino UNO, pantalla LCD, protoboard, fuente de almacenamiento, relays, ventilador, disipador de calor, pasta térmica, zumbador y una celda Peltier encargada de la condensación de humedad, el diseño del prototipo se representa en el diagrama total de conexiones en la Fig. 2.

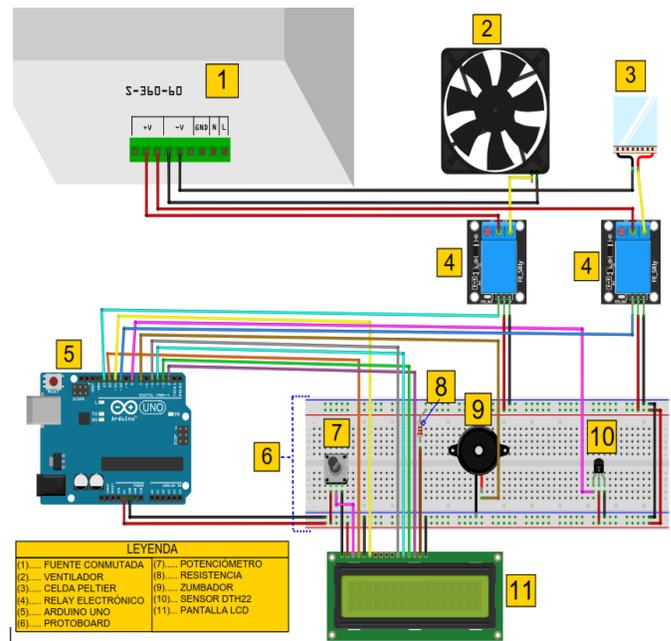


Fig. 2 Diagrama total de conexiones

Para el control, se utilizó un microcontrolador Arduino Uno, siguiendo los principios de código de programación utilizando la plataforma de programación Arduino. También se incorporaron relays electrónicos para la automatización de encendido y apagado de la celda peltier, del ventilador y un sistema de alimentación para asegurar el funcionamiento continuo del prototipo. Se diseñó un método de control específico para mantener las celdas Peltier a una temperatura y tiempo que favoreciera la formación de escarcha y posterior condensación de agua. Este proceso fue optimizado considerando factores como la disipación térmica, la eficiencia energética y el aprovechamiento del efecto Peltier para maximizar la transferencia de calor y la captura de humedad, ya que este es un fenómeno termoeléctrico en el que, al aplicar una corriente eléctrica, una superficie se enfría mientras la opuesta se calienta, permitiendo la transferencia de calor entre ambas [6]. En la Fig. 3 se observa el esquema del efecto Peltier.

Así mismo, la automatización del prototipo surge con la finalidad de tener mayores alcances, por lo que se definió un tiempo de prendido y apagado en el código de programación, con la finalidad de tener la capacidad de recolectar el agua generada en la celda con eficacia.

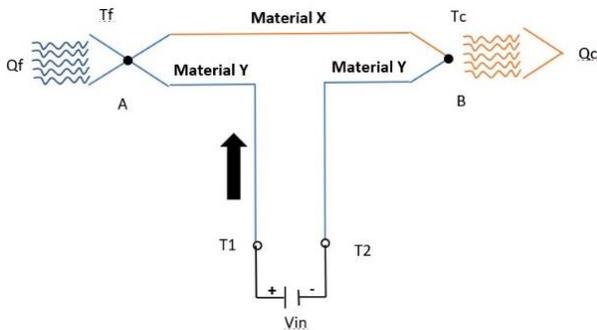


Fig. 3 Esquema del Efecto Peltier
Adaptado de: (Cardona Maciel, 2010)

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN ARDUINO PARA AUTOMATIZAR EL
PROTOTIPO

```

#define PIN_INPUT 0
#define PIN_OUTPUT 3
#include <DHT.h>
#include <DHT_U.h>
int salida=3; //output
double Setpoint; //PID setpoint
int sensor;
int SENSORDTH = 2;
int TEMPERATURADTH;
int HUMEDAD;
int segundos=60;
DHT dht(SENSORDTH, DHT22);
float temperatura=0;
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Serial.begin(9600);
  Setpoint=5;
  dht.begin();
  pinMode(salida, OUTPUT);}
void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:
  while(segundos>0)
  segundos--;
  delay(1000);
  TEMPERATURADTH = dht.readTemperature();
  //sensor=analogRead(PIN_INPUT);
  sensor=analogRead(A0);
  HUMEDAD = dht.readHumidity();
  temperatura=((sensor*5000.0)/1023)/10;
  if (temperatura>=Setpoint){
    digitalWrite(salida,LOW);
  }
  else {
    digitalWrite(salida,HIGH);
    if(segundos==0){
      for(int i=0; i<=60; i++)

```

```

digitalWrite(salida,HIGH);
Serial.println(temperatura,1);
Serial.println(TEMPERATURADTH);
Serial.println(HUMEDAD);
delay(1000);
if(i==60){
  segundos=60;
  Serial.println(temperatura,1);
  Serial.println(TEMPERATURADTH);
  Serial.println(HUMEDAD);
  delay(1000);
}

```

La **segunda etapa** se basó en realizar pruebas preliminares para verificar el correcto funcionamiento del prototipo como se aprecia en la Fig. 4. Estas pruebas incluyeron las siguientes actividades:

- Encendido del prototipo durante una hora para alcanzar condiciones de operación estables.
- Inicio del procesamiento del código programado, dentro de cinco minutos suena el zumbador para dar alerta de que empezó a funcionar el prototipo.
- Después de la alerta de inicio, se programó los 25 minutos de funcionamiento en donde se da la observación de la formación de escarcha en la celda Peltier, lo que indicó un adecuado enfriamiento de la superficie.
- Después de los 25 minutos de funcionamiento suena nuevamente el zumbador para la toma de datos de temperatura, humedad relativa y recolección de agua ya que procede al apagado del sistema durante cinco minutos, permitiendo la condensación del agua en la superficie fría.
- Finalmente, se realiza la medición del volumen de agua recolectada mediante una jeringa calibrada y nuevamente se repite el proceso hasta realizar la recolección de 50 observaciones de las variables necesarias.

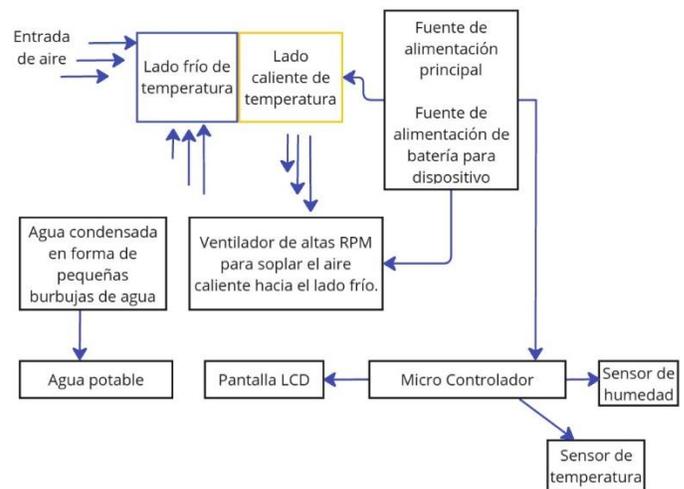


Fig. 4 Esquema del funcionamiento del prototipo

Las condiciones ambientales durante el proceso de las pruebas preliminares se presentaron aproximadamente entre 7 y 16 °C de temperatura y 68% a 100% de humedad relativa. Las

condiciones se registraron con la ayuda del sensor DHT22 y también se mantuvieron constantes a lo largo de las pruebas.

Estas actividades permitieron ajustar y calibrar los parámetros de operación del sistema antes de iniciar la recolección formal de datos.

La **tercera etapa** consistió en la recolección de datos que se realizó durante el mes de enero de 2025, con diez mediciones semanales en intervalos de 20 minutos, desde las 4:00 p. m. hasta las 8:00 p. m. Siendo un total de 50 observaciones que incluyeron:

- Lecturas de temperatura.
- Lecturas de humedad relativa del aire.
- Medida del volumen de agua condensada en cada ciclo de operación.

Los datos se obtuvieron utilizando los sensores integrados en el prototipo y se registraron manualmente en protocolos como el de la Tabla II para su posterior análisis.

TABLA II
HERRAMIENTA PARA RECOLECCIÓN DE DATOS EN EL LUGAR DE ESTUDIO PARA LAS 50 OBSERVACIONES REALIZADAS

Fecha	Hora	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)	Agua (ml)	Observaciones
2025-01-11	4:00 p.m.	<i>Inicio</i>			
2025-01-11	4:30 p.m.				
2025-01-11	5:00 p.m.				
2025-01-11	5:30 p.m.				
2025-01-11	6:00 p.m.				
2025-01-11	6:30 p.m.				
2025-01-11	7:00 p.m.				
2025-01-11	7:30 p.m.				
2025-01-11	8:00 p.m.				
2025-01-11	8:30 p.m.				
2025-01-11	9:00 p.m.				

La **cuarta etapa** radicó en el procesamiento de los datos que comenzó con una limpieza para eliminar valores inconsistentes o errores de medición. Posteriormente, la información se organizó en hojas de cálculo de Microsoft Excel y se analizó utilizando software estadístico especializado llamado Jamovi versión 2.3.28.

Las herramientas estadísticas empleadas permitieron realizar:

- Análisis descriptivos para resumir las características principales de los datos.
- Análisis de media, mediana, desviación estándar, la correlación de las variables valores mínimos y máximos.
- Análisis de las variables mediante un modelo de regresión lineal múltiple en el que ambas variables actúan como predictores. Con base en este enfoque, se formularon hipótesis estadísticas para cada una de ellas. En el caso de la humedad relativa y de la temperatura ambiental, la hipótesis nula (H_0) plantea que no existe un efecto estadísticamente significativo

sobre la cantidad de agua recolectada, mientras que la hipótesis alternativa (H_1) sostiene que sí existe tal efecto.

- Análisis experimentales con diagramas de efectos principales, gráficas y superficies de respuesta para evaluar la influencia de las variables ambientales sobre la generación de agua.

Finalmente, la **quinta etapa** consistió en la Evaluación del desempeño experimental donde se realizaron análisis detallados para determinar el efecto de la temperatura y la humedad relativa sobre la eficiencia del sistema generador. Se evaluaron en diferentes horarios y condiciones ambientales, observando cómo los parámetros impactaban en la cantidad de agua generada.

Este enfoque metodológico aseguró que los datos obtenidos fueran confiables y permitieran concluir sobre la viabilidad de un sistema generador de agua atmosférica como alternativa sostenible en regiones con desafíos de acceso a agua potable.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante el desarrollo del estudio, se analizaron las propiedades de un sistema generador de agua atmosférica controlado por Arduino, implementado en el Abra “El Gavilán”, Cajamarca – Perú como se muestra en la Fig. 5 el prototipo fue evaluado bajo diferentes condiciones climáticas, obteniendo datos de la humedad, temperatura y generación de agua para la estimación de la eficiencia del sistema, y las variables ambientales que influyen en su funcionamiento. En total, se realizaron 50 mediciones distribuidas en sesiones semanales, proporcionando una base estadística sólida para el análisis.

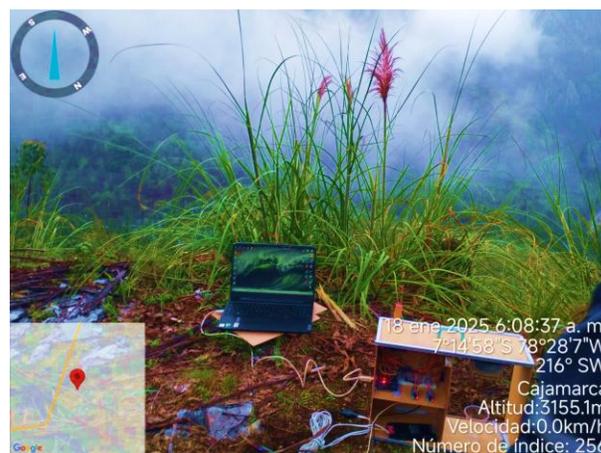


Fig. 5 Prototipo implementado en el Abra “El Gavilán”

Según los estudios y análisis realizados se evidencia que el sistema diseñado con componentes electrónicos controlado por arduino tiene funcionalidad e innovación en la fase de automatización y que la cantidad de agua generada será proporcional al número de Celdas Peltier utilizadas, la humedad presente en el ambiente y el tiempo de operación del sistema,

por ejemplo, con la aplicación de una celda en nuestros prototipo en un tiempo estimado de cuatro horas la máxima cantidad de agua producida fue de 7.30 mL con el 95% de humedad relativa promedio. En la Fig. 6 se muestra el circuito general de control del prototipo.



Fig. 6 Sistema de Control conectado a todos los accesorios utilizados

Después de finalizar las 50 observaciones con respecto a los ensayos realizados con el prototipo en distintos horarios, fechas y haber realizado el procesamiento de datos con ayuda Microsoft Excel y el software estadístico Jamovi 2.3.28. se obtuvieron los siguientes valores estadísticos para las variables temperatura, humedad y cantidad de agua generada, los cuales se presentan en la Tabla III. Además, en la Fig. 7 se representan los valores tomados para cada parámetro y se puede apreciar la relación entre las variables dependientes e independientes.

concuerta con [11] al mencionar en su investigación que la generación de agua presenta variaciones y parece estar directamente influenciada por la humedad, ya que los mayores volúmenes recolectados coinciden con niveles elevados de esta variable, lo que se ajusta con nuestro estudio ya que indica que la humedad relativa es directamente proporcional a la generación de agua atmosférica. Además, se identifican ciclos en los que la humedad y la temperatura siguen patrones similares, lo que sugiere una dependencia del sistema a las condiciones ambientales. Estos resultados indican que el rendimiento del dispositivo es óptimo en ambientes con alta humedad relativa, aunque las variaciones en la producción de agua sugieren la necesidad de optimizar la transferencia térmica para mejorar la eficiencia del proceso.

TABLA III
VALORES ESTADÍSTICOS OBTENIDOS PARA LAS VARIABLES

	Temperatura	Humedad	Agua
N	50	50	50
Media	11.7	95.1	0.660
Mediana	12.3	98.5	0.700
Desviación estándar	2.58	7.25	0.186
Mínimo	7.30	69.9	0.200
Máximo	15.9	100	1.00

Según los datos de la investigación indican que las condiciones en "El Gavilán" son favorables para la generación de agua a partir de la humedad atmosférica, con una temperatura media de 11.7 °C y una humedad relativa promedio de 95.1%. Comparando con el estudio de [12] que menciona que logró recolectar agua en condiciones de 16.32 °C y 81.97% de humedad, se evidencia que el prototipo puede ser optimizado para diferentes ambientes. La implementación de un sistema controlado por Arduino podría mejorar la eficiencia del proceso al ajustar automáticamente las operaciones según las condiciones cambiantes.

TABLA IV
REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Modelo	R	R ²
1	0.752	0.566

En la Tabla IV se indica el resumen del modelo de regresión lineal aplicado para evaluar la influencia de la humedad relativa y la temperatura sobre la cantidad de agua atmosférica recolectada. El valor del coeficiente de correlación múltiple $R = 0.752$ nos presenta una correlación fuerte entre las variables independientes y la variable dependiente. Por su parte, el coeficiente de determinación $R^2 = 0.566$ señala que cerca del 56.6% de las variaciones en la cantidad de agua recolectada pueden explicarse por los cambios en la humedad y la

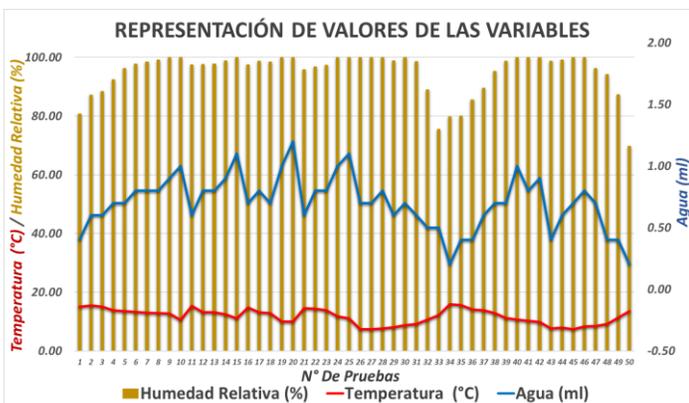


Fig. 7 Representación de la relación de los datos observados en las variables

La Fig. 7 muestra la relación entre temperatura, humedad relativa y la cantidad de agua generada por el prototipo. Se observa que la humedad relativa alcanza valores altos, con picos cercanos al 100%, mientras que la temperatura se mantiene relativamente estable. Además, al analizar esta gráfica

temperatura, lo cual muestra que el modelo tiene un buen nivel de precisión y explicación.

Así mismo, el modelo de regresión lineal, así como sus respectivos errores estándar, intervalos de confianza al 95%, valores t y valores p correspondientes se aprecian en la Tabla V. Donde se observa que la variable humedad relativa muestra un coeficiente positivo $B = 0.020$ y estadísticamente significativo. Por un lado, $p < 0.001$ indica que un incremento de un 1% en la humedad relativa se asocia con un aumento promedio de 0.020 mL en el volumen de agua atmosférica recolectada, de igual manera dicho valor p permitió rechazar la hipótesis nula con un nivel de significancia del 5%. Esto indica que la humedad relativa tiene un efecto estadísticamente significativo y positivo sobre la cantidad de agua atmosférica recolectada, es decir, a mayor humedad, mayor volumen de condensación. En contraste, la variable temperatura presenta un coeficiente positivo $B = 0.005$, pero no resulta estadísticamente significativa $p = 0.540$, lo que sugiere que, bajo las condiciones evaluadas, la temperatura no tiene un efecto significativo sobre la cantidad de agua captada, de igual modo el valor de p no fue suficiente para rechazar la hipótesis nula, evidenciando que, dentro del rango de datos analizados, la temperatura no ejerce un efecto estadísticamente significativo sobre la variable dependiente.

TABLA V
COEFICIENTES DEL MODELO DE REGRESIÓN

Vaticinador	Estimador (B)	EE	Intervalo de confianza al 95 %		t	p
			Inferior	Superior		
Constante	-1.315	0.330	-1.978	-0.651	-3.985	< .001
Humedad (%)	0.020	0.003	0.014	0.026	7.052	< .001
Temperatura (°C)	0.005	0.008	-0.011	0.011	0.618	0.54

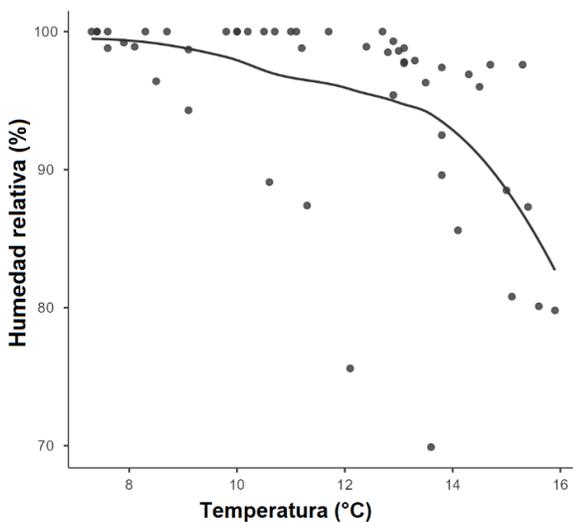


Fig. 8 Gráfico de dispersión de la Temperatura (°C) vs Humedad relativa (%)

En la Fig. 8 se puede apreciar que a medida que la temperatura aumenta, la humedad tiende a disminuir, lo que sugiere una correlación negativa entre ambas variables. En el rango de temperaturas más bajas (alrededor de 7-10 °C), la humedad se mantiene cerca del 100%, mientras que en temperaturas más altas (superiores a 14 °C), la humedad cae drásticamente por debajo del 50%. Este comportamiento se repite en el estudio de la termodinámica del aire y la humedad relativa. Donde [13] indica en su investigación que un incremento en la temperatura del aire reduce la capacidad del aire para retener humedad, lo que resulta en una disminución de la humedad relativa, especialmente en climas secos.

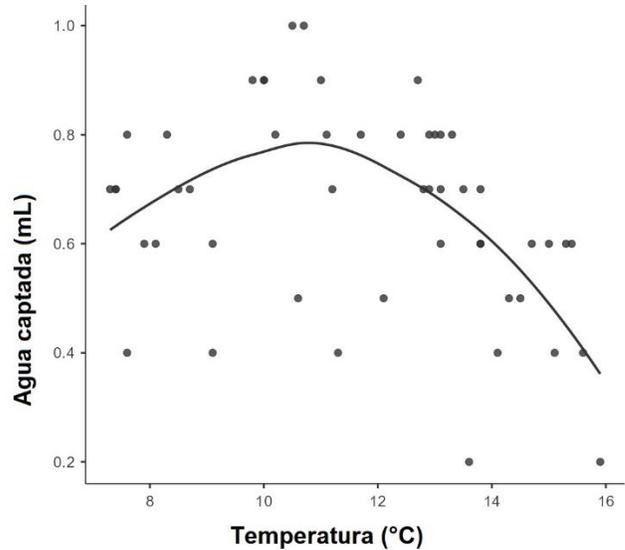


Fig. 9 Gráfico de dispersión de agua captada (mL) vs Temperatura (°C)

En la Fig. 9 se muestra una relación no lineal entre la temperatura y el contenido de agua, con un máximo en torno a los 11-12 °C y una disminución en temperaturas más altas.

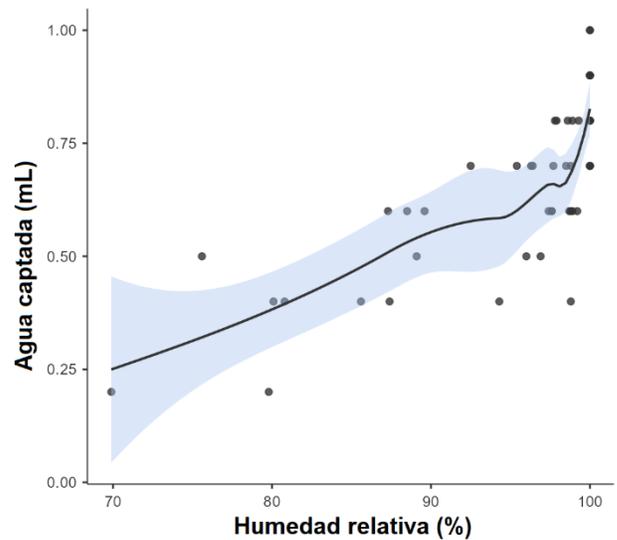


Fig. 10 Gráfico de dispersión de agua captada (mL) vs Humedad relativa (%)

En la Fig. 10 se muestra la relación entre la humedad relativa y la captación de agua. Los puntos de color negro son datos experimentales, la línea negra indica la tendencia y el sombreado celeste representa los intervalos de confianza. Se observa un aumento notable en la recolección cuando la humedad supera el 95%.

A continuación, en la Fig. 11 y Fig. 12 se muestra la relación entre humedad relativa - agua, respectivamente con puntos codificados por hora, lo que permite analizar la variabilidad temporal. Donde la dispersión de colores sugiere que esta relación puede estar influenciada por la hora del día y que las variables se conectan entre sí para poder analizar el comportamiento de la celda peltier al generar el agua.

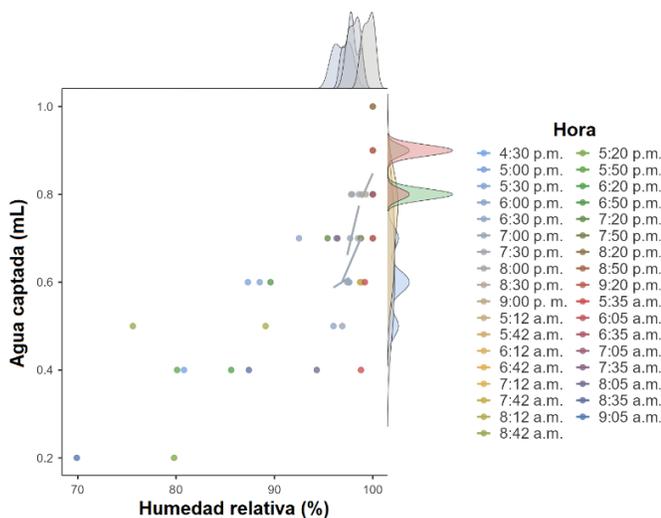


Fig. 11 Gráfico de dispersión de características horarias de agua captada (mL) vs Humedad relativa (%) con línea de regresión lineal y marginales de densidad

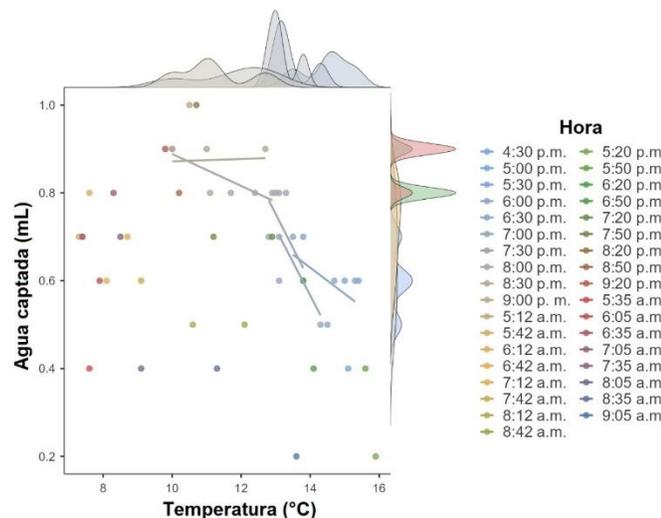


Fig. 12 Gráfico de dispersión de características horarias de agua captada (mL) vs Temperatura (°C) con línea de regresión lineal y marginales de densidad

IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio confirmó que la humedad relativa y la temperatura influyen en la captación de agua atmosférica mediante una celda Peltier controlada por Arduino, siendo la humedad relativa la variable más determinante. En pruebas realizadas en el Abra “El Gavilán”, se observó un mayor volumen de agua recolectada cuando la humedad superó el 90 %, mientras que la influencia de la temperatura fue estadísticamente menor. A pesar de las limitaciones del prototipo, el sistema demostró ser funcional y promete una mayor eficiencia con un diseño optimizado y más celdas, representando una solución innovadora y viable frente a la escasez hídrica.

REFERENCIAS

- [1] K. Andrango Miranda, “Diseño e implementación de un prototipo para la obtención de agua potable por condensación de la humedad del aire en la parroquia de Lloa,” 2023.
- [2] A. Calderón Nava, K. A. Castillo Zamudio, L. S. López Díaz, C. A. Linares López, y E. I. Rojas Bedolla, “Construcción de un sistema de captación atmosférica activa de agua en zonas de sequía severa,” Verano de la Ciencia, 2024. [Online]. Available: www.jóvenesenciencia.ugto.mx.
- [3] J. M. Chávez, D. F. Espejel-Blanco, F. A. Hernández-Aguirre, y L. E. Rascón-Barceló, “Generador de agua mediante el uso de celdas Peltier y energía solar,” Revista de Ingeniería Innovativa, pp. 22–28, Sep. 2019, doi: 10.35429/joie.2019.11.3.22.28.
- [4] W. A. Oviedo Jiménez, “Generador atmosférico de agua potable destinado a uso residencial en la ciudad de Popayán,” 2016.
- [5] C. L. Felles Isidro y M. Cisneros Tejeira, “Generación de agua con celdas Peltier a partir de la humedad del aire de la ciudad de Huacho, 2019,” 2022.
- [6] Ramya M, Roja K, Roopa M, Supriya A, y Padma R, “Atmospheric Water Generator using Peltier Device,” 2020. [Online]. Available: www.ijert.org.
- [7] J. A. Mafla Maza, “Diseño y construcción de prototipos de captura y condensación de vapor de agua presente en el aire atmosférico,” 2023.
- [8] D. Pari Huaman, G. Montes Ilizarbe, K. Meza Perilla, Y. K. Reyes Montes, y R. Paucar Curasma, “Implementación de un prototipo de monitoreo del nivel del agua en el reservorio de Viñas de la ciudad de Pampas de la provincia de Tayacaja,” Llamkasun, vol. 3, no. 1, pp. 104–111, Mar. 2022, doi: 10.47797/llamkasun.v3i1.89.
- [9] C.-Y. Chen et al., “Experimental study on the performance of an atmospheric water generator with different cooling methods,” Applied Thermal Engineering, vol. 145, pp. 123-130, May 2018.
- [10] J. S. Lee et al., “Performance analysis of an atmospheric water generator using a thermoelectric cooling system,” Energy Reports, vol. 5, pp. 1-9, Dec. 2019.
- [11] R. K. Gupta y S. K. Singh, “Atmospheric water harvesting: A review of technologies and applications,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 81, pp. 100-110, Jan. 2018.
- [12] N. M. Yusof et al., “Review of atmospheric water generators: Current status and future directions,” Journal of Cleaner Production, vol. 244, pp. 118-130, Mar. 2020.

- [13] M. S. Elhassan, A. A. Elshafie, y M. M. Elhussein, "Development of a portable atmospheric water generator," *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 10, no. 4, pp. 384-392, Apr. 2018.
- [14] T.-H. Kim et al., "Development of a hybrid atmospheric water generator using solar energy," *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1-10, Aug. 2019.
- [15] C.-Y. Chen et al., "Design and optimization of a new type atmospheric water generator," *International Journal of Refrigeration*, vol. 102, pp. 1-10, Oct. 2019.
- [16] P.-C. Hsu et al., "Atmospheric water generation: A review on technologies and applications for sustainable development," *Environmental Science & Policy for Sustainable Development*, vol. 62, no. 3, pp. 1-15, Sep./Oct. 2020.
- [17] A. A. Alhaj, "Design and implementation of an atmospheric water generator using Peltier module," *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 8, no. 6, pp. 1-6, Jun. 2018.
- [18] M. S. Elhassan, A. A. Elshafie, y M. M. Elhussein, "Development of a portable atmospheric water generator," *Journal of Water Resource and Protection*, vol. 10, no. 4, pp. 384-392, Apr. 2018.
- [19] S.-H. Lee et al., "A study on the economic feasibility of atmospheric water generators in urban areas," *Sustainability*, vol. 12, no. 12, pp. 1-15, Jun. 2020.
- [20] T.-H. Kim et al., "Development of a hybrid atmospheric water generator using solar energy," *Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 1-10, Aug. 2019.
- [21] The jamovi project (2022). *jamovi*. (Version 2.3) [Computer Software]. Retrieved from <https://www.jamovi.org>.
- [22] R Core Team (2021). *R: A Language and environment for statistical computing*. (Version 4.1) [Computer software]. Retrieved from <https://cran.r-project.org>. (R packages retrieved from MRAN snapshot 2022-01-01).