

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO MORELOS

FACULTADA DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

DOCTORADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y
TECNOLOGÍAS SUSTENTABLES

**SISTEMA AUTÓNOMO PARA LA CAPTACIÓN DE
AGUA MEDIANTE AIRE ATMOSFÉRICO**

TESIS PROFESIONAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTOR EN INGENIERÍA AMBIENTAL Y TECNOLOGÍAS
SUSTENTABLES

PRESENTA:

M.I. YAIR ALEJANDRO GUTIÉRREZ ALVAREZ

DIRECTOR:

DR. ROY LÓPEZ SESENE

CODIRECTOR:

DR. OUTMANE OUBRAM

CUERNAVACA, MORELOS

JULIO 2026

Índice general

Resumen.....	9
Abstract	10
Objetivos del proyecto.....	11
Objetivo general.....	11
Objetivos específicos	11
Hipótesis.....	11
Alcances y limitaciones	12
Alcance.....	12
Limitaciones	13
Capítulo 1.....	14
1. Introducción.....	14
1.1. Problemática de escasez de agua.....	15
1.2. Uso de técnicas de captación atmosférica.....	17
Capítulo 2.....	19
2. Marco Teórico.....	19
2.1. Fenómeno de captación de agua atmosférica	19
2.2. Punto de rocío.....	21
2.2.1. Cálculo del punto de rocío	22
2.3. Condensación	23
2.4. Humedad relativa.....	24
2.5. Tecnologías de captación de agua atmosférica	25
2.5.1. Captación por enfriamiento activo (condensación mecánica)	25
2.5.2. Captación pasiva por condensación natural (rocío)	27
2.5.3. Captación mediante redes atrapanieblas.....	27
2.5.4. Captación mediante materiales higroscópicos y MOFs	28
Capítulo 3.....	31
3. Metodología	31
3.1. Diseño de la arquitectura del sistema electrónico.	32
3.1.1. Sensores utilizados.....	32
3.1.2. Sensor de humedad y temperatura DHT11	32

3.1.3.	Sensor de temperatura DS18B20	33
3.1.4.	Dispositivos de control	35
3.1.5.	Arduino Mega 2560	35
3.1.6.	Módulo de relevadores	37
3.1.7.	Celda Peltier	38
3.1.8.	Potencia térmica máxima	40
3.1.9.	Ecuación del efecto Peltier.....	41
3.1.10.	Sistema de adquisición de datos	41
3.1.11.	Módulo SD	42
3.1.12.	Reloj de tiempo real (RTC)	43
3.1.13.	Arquitectura del sistema electrónico	43
3.2.	Diseño del prototipo para la condensación de agua atmosférica	47
3.2.1.	Selección de materiales.....	47
3.2.2.	Selección de materiales para la cámara de condensación	48
3.2.3.	Selección de materiales para disipadores de calor del área de condensación.....	51
3.3.	Diseño del prototipo en SolidWorks	54
3.3.1.	Módulo de condensación	55
3.3.2.	Módulo estructural y de recolección	57
3.3.3	Fabricación del prototipo	60
CAPITULO 4		66
4.	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	66
4.1.	Comportamiento térmico del módulo de condensación.....	66
4.2.	Resultados de captación de agua atmosférica	70
4.3.	Pruebas de alcalinidad y dureza del agua captada	78
4.4	Eficiencia energética y costo de producción del agua captada.....	81
Capítulo 5		82
5.	Conclusiones y recomendaciones.....	82
5.1.	Conclusiones	82
5.2.	Recomendaciones.....	83
Referencias		85

Índice de Figuras

Figura 1.1. Relación proyectada entre la demanda y disponibilidad de agua (nivel de estrés hídrico) en 2025 [6].....	16
Figura 1.2. Distribución del agua en el mundo [9].	17
Figura 2.1. Condensación de humedad en superficies [13].	19
Figura 2.2. Sistema de generación atmosférica de agua (AWG) [23].....	26
Figura 2.3. Sistema de captación pasiva (atrapa nieblas) [28].	27
Figura 2.4. Sistema de captación de agua mediante MOFs [30].....	28
Figura 3.1. Pines de conexión del sensor DS18B20 [36].	33
Figura 3.2. Diagrama esquemático de pines del Arduino mega 2560 [40].	36
Figura 3.3. Módulo de relevador de 2 canales [43].	37
Figura 3.4. Estructura de una celda Peltier [46].	39
Figura 3.5. Lector de Memorias Micro SD para Arduino [52].....	42
Figura 3.6. DS3231 Reloj de Tiempo Real RTC [54].	43
Figura 3.7. Diagrama electrónico del sistema de captación de agua atmosférica [fuente: elaboración propia en Fritzing 1.0.1.]	46
Figura 3.8. Módulo de condensación del prototipo de captación de agua atmosférica [fuente: elaboración propia].	56
Figura 3.9. Componentes principales del módulo estructural y de captación [fuente: elaboración propia].....	58
Figura 3.10. Diseño de la base de captación fabricada en PLA [Fuente: elaboración propia].....	60
Figura 3.11. Fabricación del disipador de aluminio por fundición utilizando aluminio reciclado como materia prima. (a) Molde de fundición, (b) horno de fundición, (c) vertido del aluminio fundido, (d) solidificación de la pieza y (e) disipador obtenido [Fuente: elaboración propia con fotografías obtenidas en colaboración con el Dr. Jesús Mario Colín de la Cruz de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos]	61

Figura 3.12. Etapas del proceso de fabricación de la base de captación: (a) diseño CAD, (b) laminado del modelo y (c) fabricación mediante impresión 3D [fuente: elaboración propia].....	62
Figura 3.13. Ensamblaje general del prototipo de captación de agua atmosférica [fuente: elaboración propia].....	63
Figura 3.14. Vistas del proceso de fabricación, cableado e integración del sistema electrónico de control [fuente: elaboración propia].....	64
Figura 3.15. Prototipo final del sistema autónomo para la captación de agua atmosférica, integrado por el módulo de condensación, el módulo de captación de agua, el sistema electrónico de control y la base de soporte [fuente: elaboración propia].....	65
Figura 4.1. Formación de gotas de agua en los disipadores del lado frío del sistema, resultado de la condensación del vapor de agua atmosférico-inducida por las celdas Peltier [fuente: elaboración propia].....	71
Figura 4.2. Distribución de temperatura del módulo de condensación obtenida mediante SolidWorks Simulación bajo las condiciones experimentales registradas (a) al inicio de la prueba (14:20 h) y (b) al finalizar la prueba de operación continua de 12 horas (02:19 h).....	77
Figura 4.3. Procedimiento utilizado para la determinación de la alcalinidad del agua captada: (a) muestra de agua condensada (45 mL), (b) adición de anaranjado de metilo, (c) reacción de la muestra	79
Figura 4.4. Procedimiento empleado para la determinación de la dureza del agua captada: (a) muestra de agua condensada (45 mL), (b) adición de negro de eriocromo como indicador y (c) reacción de la muestra durante la titulación con EDTA para la determinación de la dureza total	79

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Comparación de las tecnologías de captación de agua.....	29
Tabla 3.1. Valor de resistencia respecto a distancia del cable [38].....	34
Tabla 3.2. Conductividad térmica de los materiales evaluados para la estructura del prototipo [58].	49
Tabla 3.3. Conductividad térmica de los materiales evaluados para la construcción del disipador [58].	52
Tabla 4.1 Parámetros registrados durante la prueba 1.....	70
Tabla 4.2. Parámetros registrados durante la prueba 2.....	73
Tabla 4.3. Valores iniciales y finales de temperatura, humedad relativa y punto de rocío registrados durante la prueba de operación continua del prototipo.	76
Tabla 4.4. Parámetros y resultados de alcalinidad de las muestras de agua captada.	78
Tabla 4.5. Parámetros y resultados de dureza de las muestras de agua captada.	78

Índice de Gráficas

Gráfica 3.1. Comparación de la conductividad térmica de los materiales evaluados para la estructura del prototipo [fuente: elaboración propia].	50
Gráfica 3.2. Comparación de la conductividad térmica de los materiales evaluados para la construcción de los disipadores [fuente: elaboración propia]	53
Gráfica 4.1. Respuesta térmica del disipador acoplado al lado frío de la celda Peltier.	66
Gráfica 4.2. Respuesta térmica del disipador acoplado al lado caliente de la celda Peltier	67
Gráfica 4.3. Comparación de las temperaturas del lado frío y caliente de la celda Peltier y de la diferencia de temperatura entre ambas superficies durante la prueba experimental.	68
Gráfica 4.4. Comportamiento de la temperatura del lado frío de la celda Peltier durante la Prueba 1	72

Acrónimos

AWG	<i>Atmospheric Water Generator</i> (Generador de Agua Atmosférica)
CAD	<i>Computer-Aided Design</i> (Diseño Asistido por Computadora)
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
DHT	Sensor digital de temperatura y humedad
DS18B20	Sensor digital de temperatura basado en protocolo 1-Wire
EDTA	Ácido etilendiaminotetraacético
ESP32	Microcontrolador ESP32
HR	Humedad relativa
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet de las Cosas)
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Pantalla de cristal líquido)
MOF	<i>Metal-Organic Framework</i> (Marco Metal-Orgánico)
PCB	<i>Printed Circuit Board</i> (Placa de circuito impreso)
PID	<i>Proportional–Integral–Derivative</i>
PLA	Ácido Poliláctico
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulación por ancho de pulso)
RNA	Red Neuronal Artificial
RTC	<i>Real Time Clock</i> (Reloj en tiempo real)
SD	<i>Secure Digital</i>
TEC	<i>Thermoelectric Cooler</i> (Celda termoeléctrica Peltier)

Agradecimientos y dedicatoria

Agradezco especialmente a los doctores Roy López Sesenes y Outmane Oubram por su orientación, apoyo y confianza a lo largo del desarrollo de esta investigación. Sus conocimientos, consejos y observaciones fueron fundamentales para enriquecer este trabajo y para mi crecimiento profesional. Gracias por compartir su experiencia y por brindarme siempre el respaldo necesario para alcanzar esta meta.

A la Universidad Autónoma del Estado de Morelos y, en particular, a la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, por brindarme la oportunidad de continuar mi formación académica. Mi agradecimiento a todos los profesores del Doctorado en Ingeniería Ambiental y Tecnologías Sustentables (DIATS), quienes contribuyeron a mi desarrollo profesional mediante sus enseñanzas, experiencia y dedicación.

Finalmente, agradezco a mis compañeros, amigos y a todas aquellas personas que, de una u otra manera, formaron parte de este proceso y me brindaron su apoyo durante esta etapa.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, Gregoria y Gilberto, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. Gracias por impulsarme siempre a seguir adelante.

A mi hermana, Mafer, quien a su manera siempre ha estado presente, brindándome su cariño, apoyo y compañía durante este camino.

A mi esposa, Marifer, por su amor, comprensión, paciencia y por acompañarme en cada momento de esta etapa, brindándome siempre su apoyo para alcanzar esta meta.

A mi pequeño hijo Emilio, quien llegó al final de este camino académico para convertirse en una fuente aún mayor de alegría, inspiración y motivación.

Este logro también es de ustedes.

Resumen

La escasez de agua potable representa uno de los principales desafíos del siglo XXI, especialmente en regiones con estrés hídrico y acceso limitado a fuentes convencionales de abastecimiento. En este contexto, la presente investigación propone el diseño e implementación de un sistema autónomo para la captación de agua atmosférica mediante celdas termoeléctricas tipo Peltier.

El sistema desarrollado aprovecha la condensación del vapor de agua presente en el aire mediante enfriamiento controlado. El prototipo integra sensores de temperatura y humedad, sensores de temperatura de precisión, un sistema de almacenamiento de datos en tarjeta SD y un módulo de reloj en tiempo real, todo gestionado mediante una plataforma Arduino Mega.

Las pruebas experimentales demostraron que el sistema es capaz de mantener las condiciones térmicas necesarias para alcanzar el punto de rocío y producir agua de manera continua. Se obtuvieron tasas de captación entre 14 y 15 mL/h en pruebas de una hora y volúmenes de entre 100 y 120 mL durante periodos de operación continua de 12 horas.

Los análisis fisicoquímicos del agua obtenida mostraron bajos valores de alcalinidad, dureza y conductividad eléctrica, evidenciando una baja concentración de minerales disueltos, característica propia del agua producida por condensación atmosférica. Asimismo, el consumo energético registrado fue de 0.876 kWh durante 12 horas de operación, equivalente a un consumo específico de 7.3 kWh por litro de agua producido.

Palabras clave: captación de agua atmosférica, celdas Peltier, enfriamiento termoeléctrico, punto de rocío, condensación, escasez de agua.

Abstract

Water scarcity is one of the major challenges of the 21st century, particularly in regions experiencing water stress and limited access to conventional water supply sources. In this context, this research presents the design and implementation of an autonomous atmospheric water harvesting system based on thermoelectric Peltier cells.

The developed system utilizes the condensation of water vapor present in the air through controlled cooling. The prototype integrates temperature and humidity sensors, precision temperature sensors, a data storage system based on an SD card, and a real-time clock (RTC) module, all managed by an Arduino Mega platform.

Experimental tests demonstrated that the system is capable of maintaining the thermal conditions required to reach the dew point and continuously produce water. Water production rates between 14 and 15 mL/h were obtained during one-hour tests, while volumes ranging from 100 to 120 mL were collected during continuous 12-hour operation periods.

The physicochemical analyses of the collected water revealed low alkalinity, hardness, and electrical conductivity values, indicating a low concentration of dissolved minerals, a characteristic typical of water obtained through atmospheric condensation. Furthermore, the recorded energy consumption was 0.876 kWh during 12 hours of operation, corresponding to a specific energy consumption of 7.3 kWh per liter of water produced.

The results confirm the technical feasibility of atmospheric water harvesting through thermoelectric cooling and provide a foundation for future developments aimed at increasing water production and improving the system's energy efficiency.

Keywords: atmospheric water harvesting, Peltier cells, thermoelectric cooling, dew point, condensation, water scarcity.

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Diseñar, desarrollar e implementar un sistema autónomo de captación de agua atmosférica basado en celdas Peltier, y control automatizado para operar de manera eficiente en zonas con acceso limitado a fuentes de agua.

Objetivos específicos

1. Analizar las condiciones ambientales necesarias para la captación de agua a partir del aire, considerando variables como temperatura, humedad relativa y punto de rocío.
2. Diseñar e integrar un sistema de condensación basado en celdas Peltier y ventilación forzada, capaz de alcanzar temperaturas por debajo del punto de rocío para inducir la condensación del vapor de agua.
3. Implementar un sistema de control automatizado que utilice sensores ambientales y ventiladores en función de las condiciones del entorno.
4. Desarrollar un sistema de adquisición y almacenamiento de datos, que registre parámetros ambientales y de operación para su posterior análisis y validación.
5. Evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales, cuantificando la cantidad de agua generada, el consumo energético, la eficiencia del sistema y su viabilidad para zonas rurales o de difícil acceso.

Hipótesis

Si se diseña e implementa un sistema de captación de agua atmosférica que combine celdas Peltier y control automático, entonces será posible captar agua de manera eficiente y autónoma en entornos con limitada disponibilidad hídrica.

Si el sistema opera mediante controladores automáticos que regulan la temperatura de las celdas Peltier según el punto de rocío, entonces se optimizará la condensación de vapor de agua.

Si se integran sensores ambientales y un sistema de adquisición de datos, entonces será posible monitorear y ajustar el rendimiento del sistema en tiempo real para mejorar su eficiencia.

Si el sistema es instalado en una zona con condiciones de humedad moderada y temperatura favorable, entonces podrá generar un volumen de agua útil para consumo básico o riego doméstico.

Alcances y limitaciones

Alcance

El presente trabajo tiene como objetivo principal el diseño, construcción e implementación de un sistema autónomo de captación de agua atmosférica utilizando celdas Peltier para inducir la condensación del vapor de agua en el aire. Contará con un controlador automatizado que regula el funcionamiento de los elementos activos según las condiciones ambientales (temperatura, humedad relativa y punto de rocío).

El proyecto abarca:

- El análisis de las condiciones climáticas óptimas para la generación de agua a partir del aire.
- El desarrollo de un prototipo funcional, incluyendo electrónica, estructura mecánica, programación y almacenamiento de datos.
- La implementación de un sistema de control, sensores de temperatura y humedad, y monitoreo automatizado.
- La evaluación de la eficiencia del sistema en condiciones reales, principalmente en climas semiáridos o con humedad moderada.
- La generación de datos que permitan medir el volumen de agua recolectada, consumo energético y comportamiento térmico del sistema.

Limitaciones

Pese al alcance del proyecto, existen ciertas limitaciones técnicas, económicas y ambientales que deben considerarse.

- Condiciones climáticas específicas: El sistema depende de una humedad relativa mínima (generalmente superior al 40%) y de una temperatura ambiental compatible con el punto de rocío. Su desempeño se ve limitado en zonas extremadamente secas o frías.
- Capacidad de producción limitada: Al tratarse de un prototipo de escala pequeña, el volumen de agua generado está pensado para aplicaciones domésticas, experimentales o de demostración, y no para consumo masivo.
- Costo y eficiencia de las celdas Peltier: Las celdas Peltier tienen un rendimiento energético relativamente bajo en comparación con sistemas de refrigeración por compresión. Además, su vida útil y capacidad de enfriamiento pueden verse afectadas por el uso continuo y el calor residual.
- Almacenamiento de agua y calidad: El proyecto no contempla aún sistemas de filtrado, potabilización o tratamiento del agua recolectada. Aunque el agua condensada es en principio pura, puede contaminarse si no se almacena adecuadamente.
- Escalabilidad limitada en esta fase: El diseño está orientado a un sistema piloto. La ampliación a escala comunitaria o industrial requeriría ajustes significativos en potencia, estructura, automatización y costos.

Capítulo 1

1. Introducción

El acceso al agua potable representa uno de los desafíos más críticos del siglo XXI. De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos (2023) [1], más de 2 mil millones de personas en el mundo viven en regiones con estrés hídrico severo, lo que pone en riesgo su salud, seguridad alimentaria y desarrollo económico [1]. Este escenario se agrava en zonas rurales y marginadas donde las fuentes convencionales de agua, como ríos, pozos o sistemas municipales, no están disponibles o han sido contaminadas.

Frente a esta problemática, la captación de agua atmosférica surge como una alternativa viable y sostenible, particularmente en regiones con niveles moderados o altos de humedad relativa. Esta técnica permite extraer agua del aire a través de procesos de condensación, sin depender de fuentes superficiales ni subterráneas. En este contexto, los sistemas basados en celdas Peltier, también conocidos como módulos termoeléctricos, han demostrado ser prometedores por su capacidad de generar un gradiente térmico que induce la condensación del vapor de agua presente en el ambiente [2][3].

Sin embargo, uno de los principales retos en estos sistemas es la eficiencia energética. El uso continuo de las celdas puede derivar en un alto consumo de energía, lo que limita su aplicación en zonas sin acceso a la red eléctrica. Por esta razón, el desarrollo de sistemas autónomos alimentados por energía solar, capaces de operar de manera continua y con bajo consumo, representa un avance tecnológico significativo.

Además, el uso de microcontroladores programables, sensores ambientales (como los DHT11, DHT22, DS18B20 o el sensor de temperatura MAX6675), módulos de almacenamiento de datos (SD) y sistemas de control como PID (Proporcional–Integral–Derivativo), permite automatizar el proceso de captación. Estos sistemas

pueden regular la temperatura de operación en función del punto de rocío, maximizando así la eficiencia del proceso y garantizando la operación autónoma [4].

Este trabajo propone el diseño e implementación de un sistema autónomo para la captación de agua atmosférica, basado en el uso de celdas Peltier controladas por un microcontrolador, con regulación automática de temperatura, almacenamiento de datos y alimentación solar. El objetivo principal es desarrollar un prototipo funcional, eficiente y replicable que contribuya a mitigar el problema de escasez de agua en comunidades vulnerables, así como el monitoreo de la calidad del agua captada.

1.1. Problemática de escasez de agua

La escasez de agua es una de las crisis globales más urgentes y persistentes de la actualidad. De acuerdo con el Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos [1], más de 2 mil millones de personas carecen de acceso a agua potable segura, y se espera que esta cifra aumente significativamente en las próximas décadas debido al crecimiento demográfico, la urbanización acelerada y el cambio climático.

En regiones áridas y semiáridas, como partes de África, Asia y América Latina, la disponibilidad hídrica per cápita ha disminuido drásticamente. México, por ejemplo, enfrenta un estrés hídrico severo en varias entidades, siendo la zona centro y norte las más afectadas por la sobreexplotación de acuíferos y la baja recarga natural [5]. Esta situación genera impactos negativos en la salud pública, la producción agrícola, el desarrollo económico y la estabilidad social.

México se encuentra con una tasa alta de los países que más estarán afectados para el 2050 por la falta de agua, se estima que para el 2050, 51 de los 164 países y regiones analizados experimentarán niveles de estrés hídrico de alto a extremadamente alto, afectando al 31% de la población mundial.

EL ESTRÉS HÍDRICO PARA 2050

México se encuentra entre los países más afectados para 2050

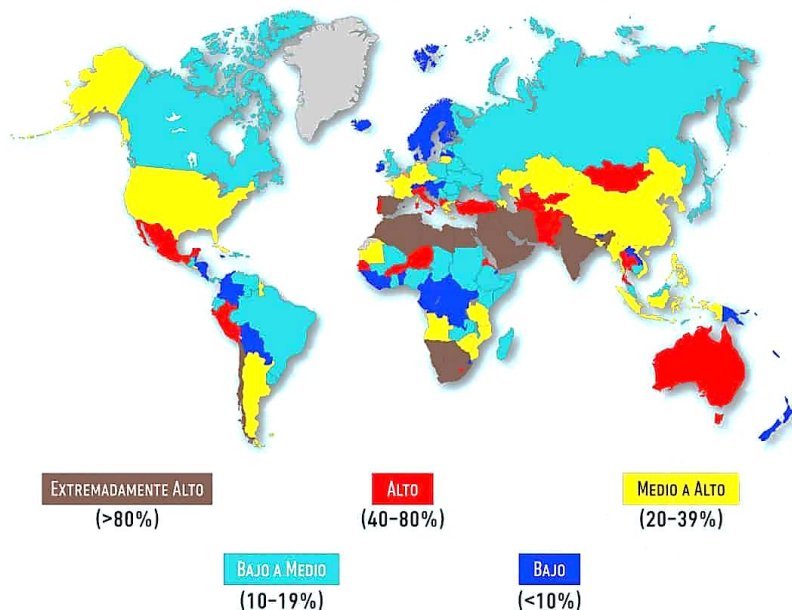


Figura 1.1. Relación proyectada entre la demanda y disponibilidad de agua (nivel de estrés hídrico) en 2025 [6].

La degradación ambiental, la contaminación de fuentes superficiales y subterráneas, así como la infraestructura ineficiente de distribución, agravan la situación. Se estima que más del 30 % del agua tratada en zonas urbanas se pierde debido a fugas o robo [7]. Además, el cambio climático está alterando los patrones de precipitación, provocando sequías más intensas y prolongadas, lo que limita aún más el acceso al recurso.

Ante este panorama, resulta urgente desarrollar estrategias tecnológicas alternativas que permitan garantizar el acceso al agua, especialmente en comunidades aisladas o sin conexión a redes hidráulicas. La captación de agua atmosférica mediante sistemas autónomos representa una posible solución sostenible y descentralizada, aprovechando la humedad ambiental como fuente complementaria.

1.2. Uso de técnicas de captación atmosférica

La captación de agua atmosférica se ha convertido en una alternativa prometedora frente a la creciente escasez de fuentes convencionales de agua potable. Esta técnica se basa en la recuperación del vapor de agua contenido en el aire mediante procesos de condensación o adsorción, aprovechando que la atmósfera terrestre contiene aproximadamente 12,900 km³ de agua en forma de vapor, lo cual representa una fuente renovable accesible en muchas regiones del planeta [8]. En la **Figura 1.1**, se observa la distribución del agua en el mundo.

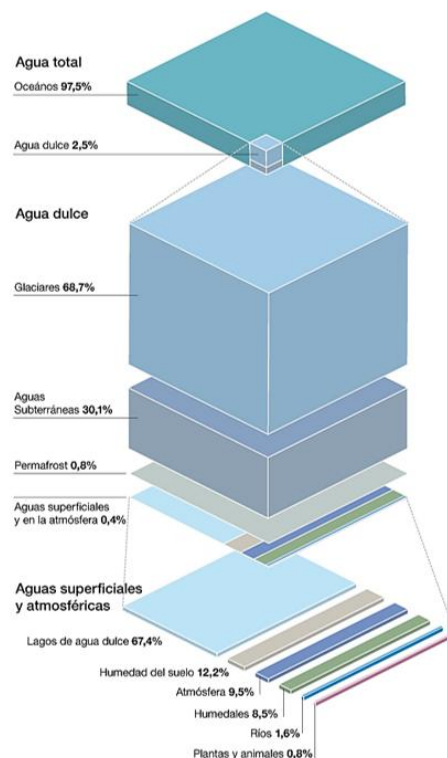


Figura 1.2. Distribución del agua en el mundo [9].

A diferencia de métodos tradicionales como pozos o captación pluvial, las técnicas atmosféricas no dependen de precipitaciones estacionales ni de cuerpos de agua subterráneos, lo que las hace ideales para zonas áridas o semiáridas, y para comunidades sin acceso a infraestructura hidráulica. Estas soluciones pueden adaptarse a distintas condiciones climáticas y operar de manera autónoma con bajo

mantenimiento, lo que las convierte en una opción viable para el desarrollo sostenible y la seguridad hídrica.

En los últimos años, el desarrollo de tecnologías activas, como las celdas Peltier, ha permitido avanzar en sistemas que inducen artificialmente la condensación a través de un control térmico eficiente. Estos dispositivos termoelectrónicos pueden alcanzar temperaturas por debajo del punto de rocío, lo que facilita la recolección de agua incluso en condiciones de humedad moderada [10]. A su vez, el uso de controladores automáticos, sensores ambientales y energías renovables ha mejorado la eficiencia y autonomía de estos sistemas, facilitando su implementación en zonas marginadas [11].

Además, organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) han recomendado el fomento de tecnologías innovadoras de captación atmosférica como medida de adaptación frente al cambio climático y para fortalecer la resiliencia hídrica en contextos rurales o vulnerables [12].

Por tanto, el diseño e implementación de sistemas autónomos para la captación de agua del aire, especialmente aquellos que integran fuentes de energía solar, sensores ambientales y almacenamiento inteligente de datos, representa una estrategia factible, sostenible y escalable para enfrentar la crisis hídrica actual.

Capítulo 2

2. Marco Teórico

2.1. Fenómeno de captación de agua atmosférica

La captación de agua atmosférica se basa en el principio de que el aire contiene vapor de agua en distintas concentraciones, dependiendo de factores como la temperatura, la presión atmosférica y la humedad relativa. Este vapor puede ser transformado en agua líquida mediante diferentes procesos físicos, principalmente la condensación, cuando el aire se enfría por debajo de su punto de rocío, provocando que el vapor se condense en forma de gotas.

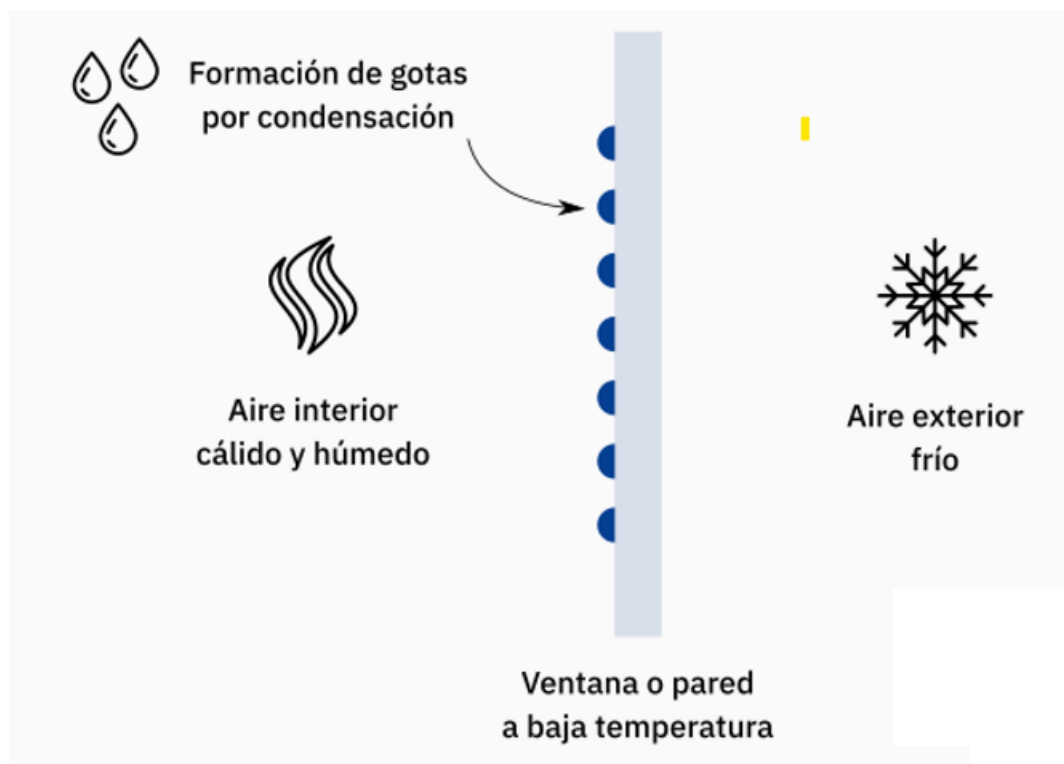


Figura 2.1. Condensación de humedad en superficies [13].

El punto de rocío es la temperatura a la cual el aire se satura (100 % de humedad relativa) y no puede retener más vapor, por lo que el exceso se convierte en agua

líquida. Este fenómeno ocurre de forma natural (rocío matutino, niebla o lluvia), pero también puede ser inducido artificialmente mediante tecnologías diseñadas para forzar la condensación, como sistemas de enfriamiento termoeléctrico (celdas Peltier), enfriadores por compresión, o superficies radiativas (pasivas).

Existen principalmente tres enfoques tecnológicos para capturar agua del aire:

- **Métodos pasivos:** utilizan el enfriamiento nocturno, redes atrapanieblas o superficies radiativas que condensan agua sin energía externa.
- **Métodos activos:** emplean energía (eléctrica o térmica) para inducir la condensación mediante sistemas de enfriamiento forzado.
- **Métodos híbridos:** combinan elementos pasivos y activos para mejorar el rendimiento y la eficiencia energética.

La densidad de vapor de agua en el aire varía según la región, pero incluso en climas áridos, la atmósfera contiene una cantidad significativa de humedad potencialmente recuperable. Según estudios un metro cúbico de aire con 60 % de humedad relativa a 25 °C puede contener hasta 14 gramos de vapor de agua [17], lo que abre oportunidades para su aprovechamiento mediante sistemas eficientes.

Además, tecnologías como las celdas Peltier, basadas en el efecto termoeléctrico, permiten alcanzar temperaturas por debajo del punto de rocío de forma controlada y sin necesidad de componentes mecánicos. Esto ha permitido el desarrollo de sistemas compactos, autónomos y aplicables en contextos rurales o fuera de red eléctrica [10].

2.2. Punto de rocío

El punto de rocío es una variable meteorológica fundamental para comprender y aplicar procesos de captación de agua atmosférica. Se define como la temperatura a la cual el aire húmedo debe enfriarse, manteniendo constante la presión atmosférica, para que el vapor de agua contenido en él comience a condensarse en forma de líquido. Este fenómeno ocurre cuando la humedad relativa alcanza el 100 %, es decir, cuando el aire está completamente saturado de vapor y ya no puede retener más humedad en estado gaseoso [18].

El punto de rocío representa un límite físico que marca la transición entre vapor y líquido en la atmósfera. Por ello, constituye el parámetro crítico para el diseño de sistemas de captación de agua del aire: solo cuando la temperatura de una superficie es igual o menor al punto de rocío, ocurre la condensación [15].

El punto de rocío depende principalmente de dos variables: la temperatura del aire y la humedad relativa. A medida que la humedad relativa aumenta, el punto de rocío se acerca a la temperatura ambiente. Por ejemplo, a 25 °C con 60 % de humedad relativa, el punto de rocío se sitúa en torno a 16.7 °C [19].

Tabla 2.2. Cálculo de punto de rocío

Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Punto de rocío (°C)
25	30	6.0
25	60	16.7
25	90	23.2

2.2.1. Cálculo del punto de rocío

Una de las fórmulas más aceptadas para calcular el punto de rocío es la fórmula de Magnus-Tetens, válida en el rango de $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [18]:

$$T_d = \frac{b * \alpha(T, RH)}{a - \alpha(T, RH)} \quad (1)$$

Donde:

T_d : Punto de rocío

T : Temperatura ambiente

RH : Humedad relativa

$a = 17.62$

$b = 243.12\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\alpha(T, RH) = \frac{a * T}{b + T} + \ln \left(\frac{RH}{100} \right)$$

Sustituyendo en la ecuación 1, obtenemos:

$$T_d = \frac{b * \left(\frac{a * T}{b + T} + \ln \left(\frac{RH}{100} \right) \right)}{a - \left(\frac{a * T}{b + T} + \ln \left(\frac{RH}{100} \right) \right)} \quad (2)$$

Esta fórmula ha demostrado ser útil en aplicaciones prácticas, como el control térmico en sistemas de captación de agua atmosférica o en climatización de espacios [18]

2.3. Condensación

La condensación es un proceso termodinámico de cambio de fase mediante el cual una sustancia pasa del estado gaseoso al estado líquido debido a una disminución de temperatura o un incremento de presión. En el caso del vapor de agua presente en la atmósfera, la condensación ocurre cuando el aire alcanza su punto de rocío, es decir, la temperatura a la cual se satura y ya no puede retener más vapor de agua en estado gaseoso [20].

El punto de rocío depende directamente de la temperatura del aire y de la humedad relativa. Cuando una superficie presenta una temperatura inferior al punto de rocío del aire circundante, el vapor comienza a transformarse en pequeñas gotas líquidas sobre dicha superficie. Este fenómeno es el principio físico fundamental en los sistemas de captación de agua atmosférica, ya que permite extraer agua del aire mediante enfriamiento controlado [21].

Desde el punto de vista energético, la condensación implica la liberación del calor latente de vaporización, lo cual exige que el sistema de enfriamiento sea capaz de remover tanto el calor sensible como el calor latente asociado al cambio de fase. Por ello, el diseño térmico del sistema de enfriamiento y la adecuada disipación del calor son factores determinantes en la eficiencia global del proceso [22].

En los sistemas que emplean celdas termoeléctricas basadas en el efecto Peltier, el enfriamiento se logra al generar un gradiente térmico cuando una corriente eléctrica atraviesa el dispositivo. La cara fría de la celda funciona como superficie de condensación, mientras que la cara caliente debe disipar el calor extraído hacia el ambiente mediante disipadores y sistemas de ventilación. La eficiencia de estos sistemas depende de variables como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la velocidad del aire y la eficiencia del intercambio térmico [24].

Asimismo, estudios recientes han demostrado que la modificación de las superficies de condensación mediante recubrimientos hidrofílicos o superhidrofóbicos puede mejorar la eficiencia de recolección de agua, al favorecer la coalescencia y

desprendimiento de gotas, reduciendo la resistencia térmica superficial y aumentando la tasa de condensación [25].

En el contexto de la presente investigación, la condensación constituye el principio físico central del sistema propuesto, ya que permite transformar la humedad atmosférica en agua líquida mediante el control preciso de la temperatura de las celdas Peltier, optimizando la producción de agua bajo diferentes condiciones climáticas.

2.4. Humedad relativa

La humedad relativa es una magnitud psicrométrica que expresa la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la cantidad máxima que este podría contener a una temperatura determinada, antes de alcanzar la saturación. Se expresa comúnmente como un porcentaje (%) y constituye uno de los parámetros fundamentales en el análisis de procesos de condensación y captación de agua atmosférica [20].

Matemáticamente, la humedad relativa (HR) se define como:

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (3)$$

donde P_v es la presión parcial del vapor de agua presente en el aire y P_{vs} es la presión de saturación del vapor a la misma temperatura. Cuando la humedad relativa alcanza el 100 %, el aire se encuentra saturado y cualquier descenso adicional de temperatura produce condensación.

La humedad relativa depende directamente de la temperatura del aire. A mayor temperatura, el aire puede contener una mayor cantidad de vapor de agua; por lo tanto, si la temperatura aumenta sin que cambie la cantidad absoluta de vapor presente, la humedad relativa disminuye. Este comportamiento es clave en los sistemas de captación de agua atmosférica, ya que determina la viabilidad y eficiencia del proceso de condensación [30].

En aplicaciones de generación de agua atmosférica, la humedad relativa influye directamente en la cantidad de agua que puede extraerse del aire. En condiciones de alta humedad relativa (superior al 60–70 %), el punto de rocío se encuentra más cercano a la temperatura ambiente, lo que reduce la energía necesaria para inducir la condensación. Por el contrario, en ambientes con baja humedad relativa, el sistema debe alcanzar temperaturas considerablemente más bajas, incrementando el consumo energético [25].

Desde el punto de vista experimental, la medición de la humedad relativa se realiza mediante sensores electrónicos basados en variaciones capacitivas o resistivas, como el sensor DHT11 empleado en esta investigación. Estos dispositivos permiten obtener datos en tiempo real para el cálculo del punto de rocío y la implementación de estrategias de control térmico, como el control PID aplicado a las celdas termoelectricas.

En el contexto de la presente tesis, la humedad relativa constituye una variable independiente crítica, ya que condiciona tanto la eficiencia energética del sistema como la tasa de producción de agua condensada, siendo un parámetro fundamental para el análisis y optimización del prototipo desarrollado.

2.5. Tecnologías de captación de agua atmosférica

La captación de agua atmosférica (*Atmospheric Water Harvesting, AWH*) comprende un conjunto de tecnologías diseñadas para extraer vapor de agua presente en el aire y transformarlo en agua líquida utilizable. Estas tecnologías han cobrado relevancia como alternativa sostenible frente a la escasez hídrica, particularmente en regiones con limitada infraestructura de abastecimiento [31].

2.5.1. Captación por enfriamiento activo (condensación mecánica)

Este método se basa en reducir la temperatura del aire por debajo de su punto de rocío mediante sistemas de refrigeración activa, tales como compresores o

dispositivos termoelectricos. El vapor de agua se condensa sobre superficies frías y posteriormente se recolecta como se muestra en la **Figura 2.2**.

Los sistemas comerciales de generación atmosférica de agua (AWG) suelen emplear ciclos de refrigeración por compresión de vapor similares a los utilizados en aires acondicionados. Aunque presentan alta eficiencia de producción, su consumo energético puede ser elevado [26]. En contraste, los sistemas basados en celdas termoelectricas tipo Peltier ofrecen una alternativa más compacta y modular, adecuada para aplicaciones de pequeña escala o sistemas autónomos alimentados con energía solar, como el propuesto en esta investigación [22].

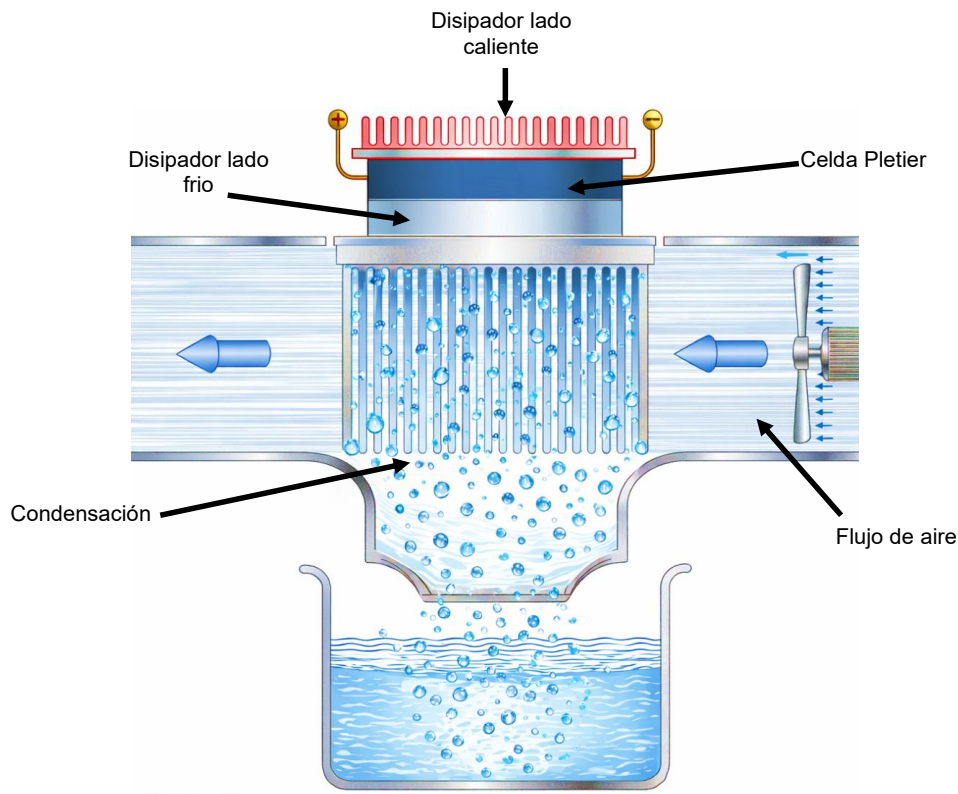


Figura 2.2. Sistema de generación atmosférica de agua (AWG) [23].

2.5.2. Captación pasiva por condensación natural (rocío)

Este método aprovecha el enfriamiento radiactivo nocturno para inducir condensación sobre superficies expuestas al cielo. No requiere energía eléctrica y se basa en materiales con alta emisividad térmica.

Aunque es una tecnología de bajo costo y mantenimiento, su rendimiento depende fuertemente de las condiciones climáticas locales, especialmente de la humedad relativa y la diferencia térmica nocturna [25]

2.5.3. Captación mediante redes atrapanieblas

Las redes de captación de niebla consisten en mallas verticales (**Figura 2.3**) que interceptan microgotas suspendidas en el aire. Las gotas se agrupan en la superficie de la malla y se canalizan hacia sistemas de almacenamiento.

Este método ha sido implementado con éxito en zonas montañosas o costeras con alta frecuencia de niebla, como en Chile y Marruecos. Su eficiencia depende de la densidad de niebla y la velocidad del viento [27].

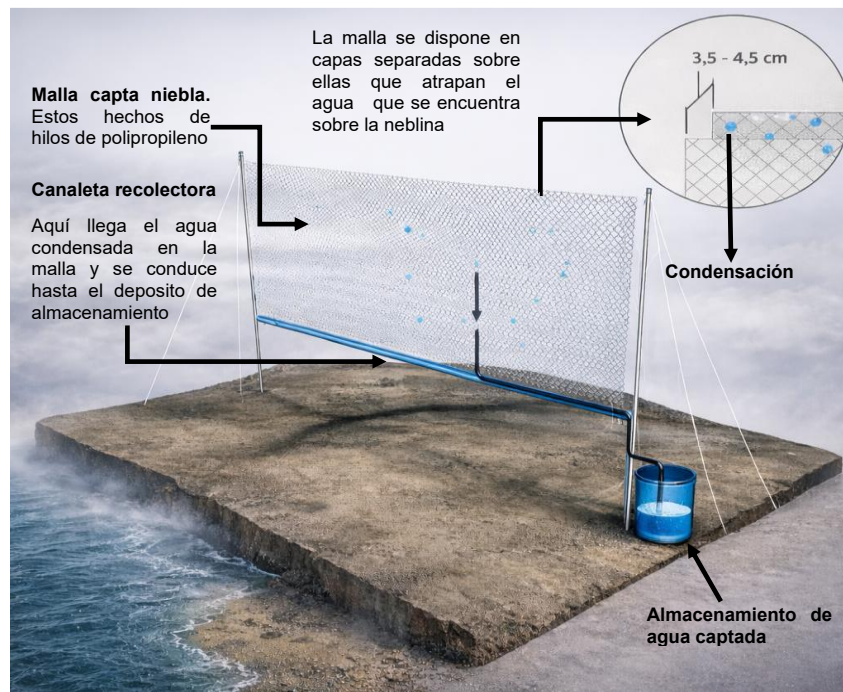


Figura 2.3. Sistema de captación pasiva (atrapa nieblas) [28].

2.5.4. Captación mediante materiales higroscópicos y MOFs

Una tecnología emergente utiliza materiales higroscópicos o estructuras metal-orgánicas (MOFs, *Metal-Organic Frameworks*), capaces de adsorber vapor de agua incluso en condiciones de baja humedad relativa. Posteriormente, el agua es liberada mediante calentamiento controlado.

Estos sistemas muestran gran potencial en ambientes áridos; sin embargo, aún se encuentran en fase de investigación y optimización tecnológica [29].

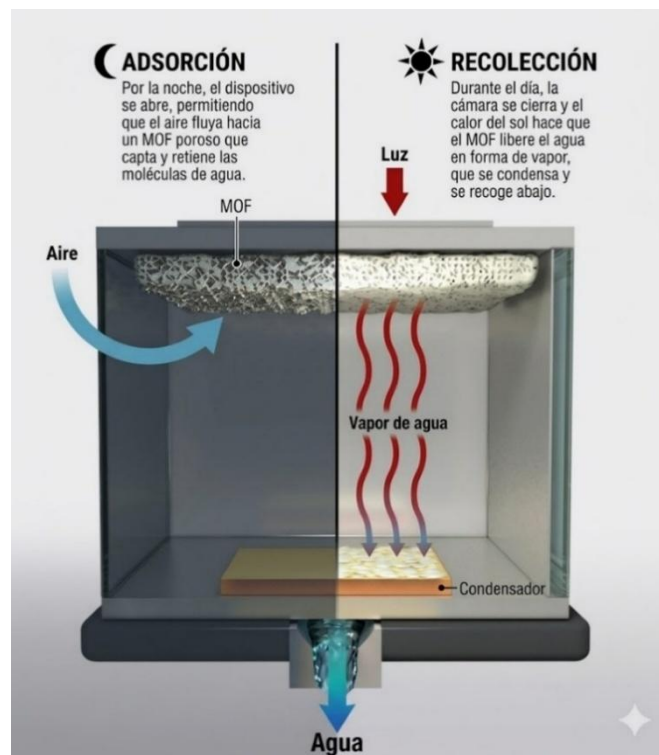


Figura 2.4. Sistema de captación de agua mediante MOFs [30].

Con base en las tecnologías descritas anteriormente, es posible identificar diferentes enfoques para la captación de agua atmosférica, cada uno con características particulares en términos de consumo energético, dependencia de las condiciones climáticas, escalabilidad y complejidad tecnológica. La selección de una tecnología adecuada depende del contexto de aplicación, la disponibilidad de recursos energéticos y las condiciones ambientales del sitio donde se pretende implementar el sistema.

En este sentido, algunas tecnologías, como los sistemas basados en compresión de vapor, presentan altas tasas de producción de agua, aunque con un consumo energético considerable. Por otro lado, métodos pasivos como la captación de rocío o las redes atrapanieblas requieren poca o ninguna energía externa, pero su rendimiento depende en gran medida de factores climáticos específicos. Asimismo, tecnologías emergentes como el uso de materiales higroscópicos y estructuras metal-orgánicas (MOFs) han mostrado resultados prometedores en condiciones de baja humedad relativa, aunque todavía se encuentran en etapas de investigación y desarrollo.

Con el objetivo de resumir y comparar las principales características de estas tecnologías, en la **Tabla 2.1**, se presenta una comparación general considerando criterios relevantes para la implementación de sistemas de captación de agua atmosférica.

Tabla 2.1. Comparación de las tecnologías de captación de agua

Tecnología	Consumo energético	Dependencia climática	Escalabilidad	Complejidad
Compresión de vapor	Alto	Media	Alta	Alta
Peltier	Medio	Media	Media	Media
Rocío pasivo	Nulo	Alta	Baja	Baja
Redes atrapanieblas	Nulo	Muy alta	Media	Baja
MOFs	Bajo-medio	Baja	Experimental	Alta

A partir de la comparación presentada en la tabla anterior, se observa que las tecnologías de captación de agua atmosférica presentan diferentes ventajas y limitaciones dependiendo de su principio de funcionamiento. Los sistemas basados en compresión de vapor destacan por su alta capacidad de producción y

escalabilidad; sin embargo, requieren un consumo energético elevado y una infraestructura más compleja. En contraste, los métodos pasivos como la captación de rocío y las redes atrapanieblas presentan un consumo energético nulo, aunque su rendimiento depende fuertemente de las condiciones climáticas locales, lo que limita su aplicación en ciertas regiones.

Por otro lado, las tecnologías emergentes basadas en materiales higroscópicos y estructuras metal-orgánicas (MOFs) muestran un gran potencial para operar en ambientes con baja humedad relativa; no obstante, su desarrollo aún se encuentra en etapas experimentales y requiere mayor investigación para optimizar su eficiencia y viabilidad a gran escala.

En este contexto, los sistemas de captación basados en celdas termoeléctricas tipo Peltier representan una alternativa intermedia, ya que ofrecen un equilibrio entre consumo energético, modularidad y facilidad de integración con sistemas electrónicos de control. Estas características los hacen particularmente adecuados para sistemas autónomos de pequeña y mediana escala, especialmente cuando se combinan con fuentes de energía renovable, como la energía solar. Por esta razón, la presente investigación se enfoca en el desarrollo y evaluación de un sistema de captación de agua atmosférica basado en celdas Peltier, optimizado mediante estrategias de control y monitoreo de variables ambientales.

Capítulo 3

3. Metodología

Para el monitoreo y control del sistema de captación de agua atmosférica se emplearon diversos sensores y dispositivos electrónicos que permiten medir variables ambientales y operativas del sistema. Entre las principales variables monitoreadas se encuentran la temperatura, la humedad relativa y la temperatura de las superficies de condensación, parámetros fundamentales para analizar el proceso de formación de condensado.

Asimismo, se implementaron dispositivos de control y adquisición de datos que permiten gestionar el funcionamiento de las celdas termoeléctricas Peltier, así como registrar las condiciones de operación durante el desarrollo de los experimentos.

La metodología empleada en esta investigación se enfoca en el diseño, construcción y evaluación experimental de un sistema autónomo para la captación de agua atmosférica mediante celdas termoeléctricas. Para el desarrollo del proyecto, el proceso metodológico se dividió en las siguientes etapas:

1. Diseño de la arquitectura del sistema electrónico.
2. Diseño del prototipo para la condensación de agua atmosférica, el cual incluye las siguientes fases:
 - Selección de materiales.
 - Diseño del prototipo en SolidWorks.
 - Fabricación del prototipo.
3. Diseño del sistema de disipación térmica, con el objetivo de mejorar la transferencia de calor en las celdas termoeléctricas y optimizar el proceso de condensación.
4. Sistema de adquisición de datos, encargado del monitoreo y registro de las variables del sistema durante su operación.
5. Evaluación de la calidad del agua captada, mediante pruebas fisicoquímicas que permiten analizar sus características.

6. Procedimiento experimental, donde se describen las condiciones de operación del sistema, la metodología de prueba y el análisis de los datos obtenidos durante los experimentos.

3.1. Diseño de la arquitectura del sistema electrónico.

3.1.1. Sensores utilizados

Para el monitoreo de las condiciones ambientales y operativas del sistema de captación de agua atmosférica, se emplearon sensores electrónicos capaces de medir variables clave como la temperatura y la humedad relativa. Estas variables son fundamentales para analizar el proceso de condensación del vapor de agua, ya que la formación de agua líquida depende directamente de la relación entre la temperatura del aire y su punto de rocío. En el sistema desarrollado se utilizaron sensores digitales de bajo costo y fácil integración con microcontroladores, lo que permite implementar sistemas de monitoreo y registro de datos en tiempo real.

3.1.2. Sensor de humedad y temperatura DHT11

El sensor DHT11 es un dispositivo digital diseñado para medir temperatura y humedad relativa del aire (**Figura 3**). Este sensor integra un termistor para la medición de temperatura y un sensor capacitivo de humedad, además de un microcontrolador interno que procesa las señales y entrega los datos en formato digital a través de un único pin de comunicación [31].

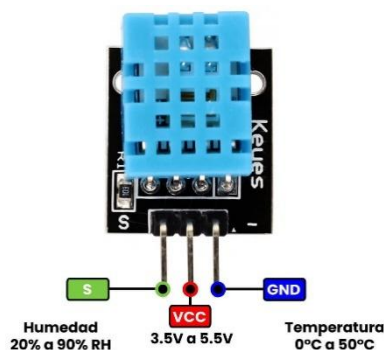


Figura 3. Pines de conexión del sensor DHT11 Sensor de Temperatura y Humedad KY-015 [32].

El sensor presenta un rango de medición de humedad relativa de 20 % a 90 %, con una precisión aproximada de ± 5 %, mientras que la temperatura puede medirse en un rango de 0 °C a 50 °C con una precisión cercana a ± 2 °C [31]. Su bajo consumo energético y su facilidad de integración con plataformas de desarrollo como Arduino lo convierten en una opción adecuada para aplicaciones educativas, prototipos y sistemas de monitoreo ambiental de bajo costo [33].

En el sistema desarrollado, el sensor DHT11 se empleó para medir la temperatura y la humedad relativa del aire ambiente, variables necesarias para estimar las condiciones de condensación y evaluar el desempeño del sistema de captación de agua atmosférica.

3.1.3. Sensor de temperatura DS18B20

El DS18B20 (**Figura 3.1**) es un sensor digital de temperatura de alta precisión ampliamente utilizado en sistemas de monitoreo térmico y aplicaciones embebidas. Este sensor utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire, lo que permite conectar múltiples sensores en una sola línea de datos utilizando un único pin del microcontrolador [34].

El DS18B20 es capaz de medir temperaturas en un rango aproximado de -55 °C a 125 °C, con una precisión típica de ± 0.5 °C en el intervalo de -10 °C a 85 °C [34]. Además, el sensor incluye un convertidor analógico-digital interno, lo que permite entregar directamente los valores de temperatura en formato digital, reduciendo el ruido y mejorando la confiabilidad de las mediciones [35].

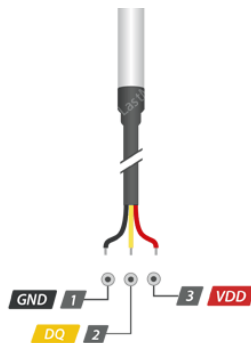


Figura 3.1. Pines de conexión del sensor DS18B20 [36].

Una de las principales ventajas del sensor DS18B20 es que utiliza el protocolo de comunicación 1-Wire, el cual permite que múltiples sensores puedan conectarse en paralelo utilizando una sola línea de datos del microcontrolador. Cada sensor posee un identificador único de 64 bits, lo que permite que el sistema pueda reconocer individualmente cada dispositivo dentro de la misma red de comunicación, facilitando la medición de temperatura en distintos puntos del sistema utilizando un solo pin de entrada digital del microcontrolador.

Para garantizar una comunicación estable en el bus 1-Wire, es necesario utilizar una resistencia de pull-up conectada entre la línea de datos y la alimentación del sistema. Esta resistencia permite mantener la línea en un estado lógico alto cuando no se están transmitiendo datos. Generalmente se emplea una resistencia de aproximadamente 4.7 k Ω , la cual es adecuada para conexiones de corta distancia y un número reducido de sensores [37].

Sin embargo, cuando se utilizan cables de mayor longitud o múltiples sensores en la misma línea, la resistencia puede requerir ajustes para compensar los efectos de la capacitancia y la resistencia del cableado, los cuales pueden afectar la integridad de la señal. En estos casos, la selección del valor de la resistencia de pull-up debe considerar la longitud del cable

En la **Tabla 3.1**, se pueden ver la resistencia más adecuada dependiendo de la longitud del cable de datos.

Tabla 3.1. Valor de resistencia respecto a distancia del cable [38].

Resistencia pull-up	Distancia del cable (metros)
4,7 k Ω	De 0 m a 5 m
3,3 k Ω	De 5 m a 10 m
2,2 k Ω	De 10 m a 20 m
1,2 k Ω	De 20 m a 50 m

En el sistema propuesto, el sensor DS18B20 se utilizó para monitorear la temperatura en puntos específicos del sistema, particularmente en la zona de condensación en el lado frío y caliente de cada celda Peltier, con el fin de evaluar el comportamiento térmico del sistema.

Además, se utilizaron sensores DS18B20 conectados al mismo bus de datos del Arduino Mega, empleando una resistencia pull-up de 4.7 k Ω , lo que permitió simplificar el cableado y realizar mediciones de temperatura en diferentes puntos del sistema de captación de agua.

3.1.4. Dispositivos de control

Para el control y la operación del sistema de captación de agua atmosférica se emplearon diversos dispositivos electrónicos encargados de procesar la información proveniente de los sensores y controlar el funcionamiento de los actuadores del sistema, como las celdas termoelectricas Peltier y los ventiladores de disipación térmica. Estos dispositivos permiten automatizar el funcionamiento del sistema y gestionar la adquisición de datos durante el proceso experimental.

El uso de Arduino facilita la integración de sensores, actuadores y sistemas de almacenamiento de datos, permitiendo el monitoreo y control de bajo costo y alta flexibilidad para aplicaciones experimentales y de investigación.

3.1.5. Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 es una plataforma de desarrollo basada en el microcontrolador ATmega2560, diseñada para aplicaciones que requieren una mayor cantidad de pines de entrada y salida en comparación con otras placas de la familia Arduino. Esta tarjeta cuenta con 54 pines digitales de entrada/salida, de los cuales 15 pueden configurarse como salidas PWM, además de 16 entradas analógicas, lo que permite conectar simultáneamente múltiples sensores, módulos de comunicación y dispositivos de control dentro de un mismo sistema [39].

En términos de memoria, el microcontrolador dispone de aproximadamente 256 KB de memoria flash para almacenamiento del programa, 8 KB de memoria SRAM y 4 KB de memoria EEPROM, lo que permite ejecutar programas relativamente

complejos y manejar múltiples tareas dentro de un sistema embebido. Asimismo, el Arduino Mega incluye varios puertos de comunicación serial, lo cual facilita la integración con sensores, módulos de almacenamiento de datos y otros dispositivos electrónicos [39]. En la **Figura 3.2**, se muestran todos los pines del Arduino mega 2560.

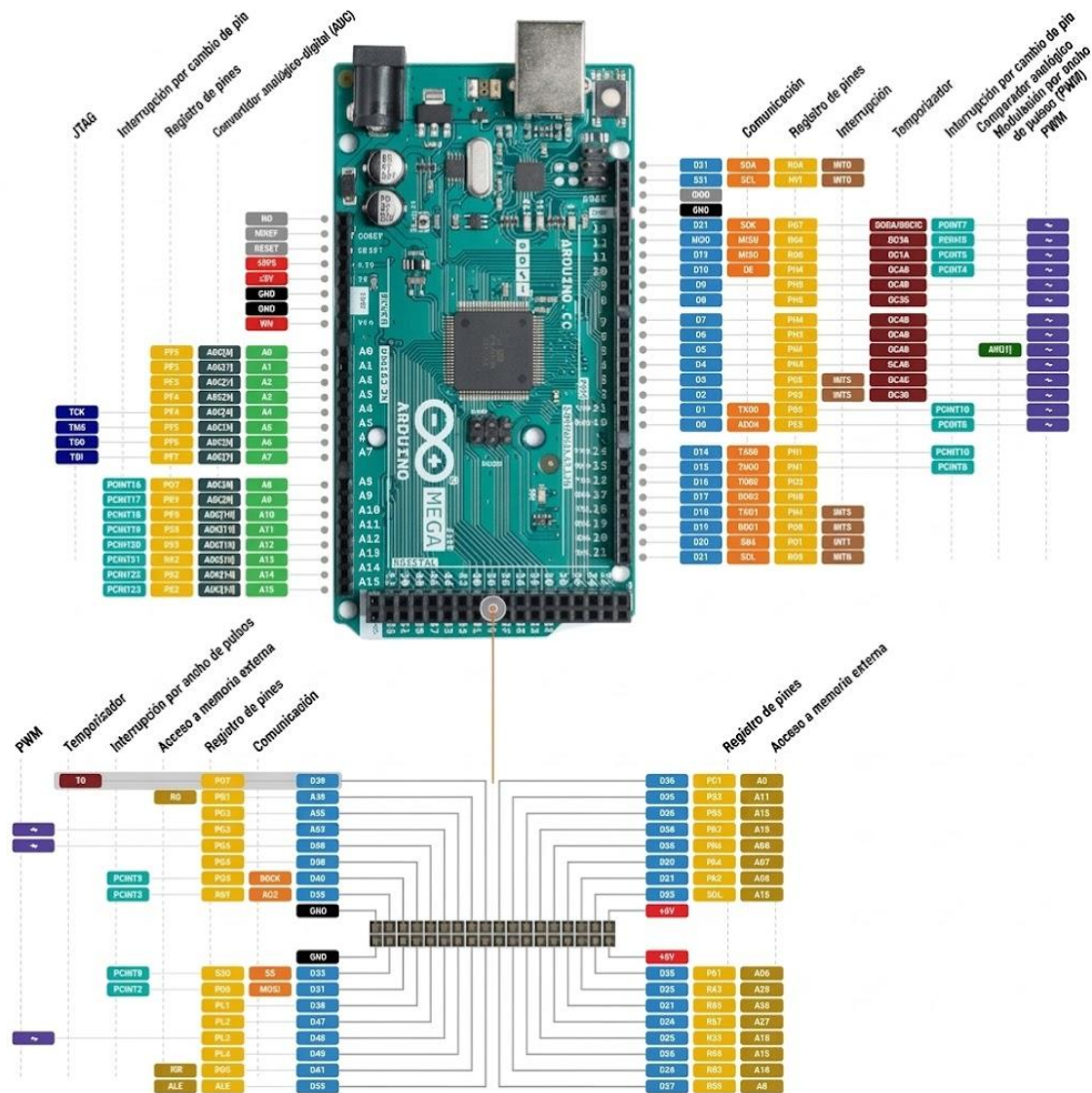


Figura 3.2. Diagrama esquemático de pines del Arduino mega 2560 [40].

Otra característica importante de esta plataforma es su facilidad de programación mediante el Arduino *Integrated Development Environment* (Arduino IDE), el cual

utiliza un lenguaje basado en C/C++ y proporciona diversas bibliotecas que simplifican la interacción con sensores y actuadores. Esto permite desarrollar prototipos de sistemas electrónicos de manera rápida y eficiente, lo cual ha favorecido su uso en proyectos de investigación, automatización y monitoreo ambiental [41].

En el sistema desarrollado en esta investigación, el Arduino Mega 2560 se utilizó como la unidad central de control, encargada de recibir las señales provenientes de los sensores de temperatura y humedad, procesar la información y ejecutar las instrucciones necesarias para controlar los diferentes dispositivos del sistema. De esta manera, Para controlar el sistema de condensación, el Arduino activa los módulos de relevadores que encienden las celdas Peltier y los ventiladores. Esto permite que el equipo se adapte por sí solo a las condiciones ambientales del momento.

3.1.6. Módulo de relevadores

El módulo de relevadores es un dispositivo ampliamente utilizado en sistemas de automatización y control para conmutar cargas eléctricas de mayor potencia mediante señales de bajo voltaje provenientes de un microcontrolador. Su funcionamiento se basa en un relevador electromecánico, el cual consiste en una bobina que, al energizarse, genera un campo magnético que acciona un conjunto de contactos eléctricos, permitiendo abrir o cerrar un circuito eléctrico [42].



Figura 3.3. Módulo de relevador de 2 canales [43].

Una de las principales ventajas del uso de relevadores en sistemas electrónicos es que proporcionan aislamiento eléctrico entre el circuito de control y el circuito de potencia, lo que protege al microcontrolador frente a posibles sobrecorrientes o fluctuaciones de voltaje. Además, muchos módulos comerciales incluyen optoacopladores y circuitos de protección, los cuales mejoran la seguridad y estabilidad del sistema [42].

Los módulos de relevadores utilizados en sistemas basados en microcontroladores suelen operar con señales de control de 5 V, lo que los hace compatibles con plataformas como Arduino. Estos módulos permiten controlar dispositivos que requieren mayores niveles de corriente o voltaje, tales como motores, ventiladores, resistencias de calentamiento o sistemas de refrigeración [44].

En el sistema de captación de agua atmosférica desarrollado en esta investigación, el módulo de relevadores se utilizó para controlar la alimentación eléctrica de las celdas termoeléctricas Peltier y los ventiladores de enfriamiento, permitiendo activar o desactivar estos dispositivos de acuerdo con las condiciones de operación establecidas en el programa de control.

3.1.7. Celda Peltier

Las celdas termoeléctricas Peltier, también conocidas como módulos termoeléctricos (*TEC, Thermoelectric Coolers*), son dispositivos capaces de generar una diferencia de temperatura cuando se les aplica una corriente eléctrica. Su funcionamiento se basa en el efecto Peltier, fenómeno termoeléctrico mediante el cual el paso de corriente a través de la unión de dos materiales semiconductores provoca la absorción de calor en una cara del dispositivo y la liberación de calor en la cara opuesta [45].

Un módulo Peltier está formado por múltiples pares de semiconductores tipo p y tipo n, conectados eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, los cuales se encuentran encapsulados entre dos placas cerámicas que facilitan la transferencia de calor (como se muestra en la **Figura 3.4**). Cuando se aplica una corriente

continúa al módulo, los portadores de carga transportan energía térmica desde un lado del dispositivo hacia el otro, generando una superficie fría y una superficie caliente [47]. Este principio permite utilizar los módulos Peltier como sistemas de enfriamiento sólido sin partes móviles ni refrigerantes químicos.

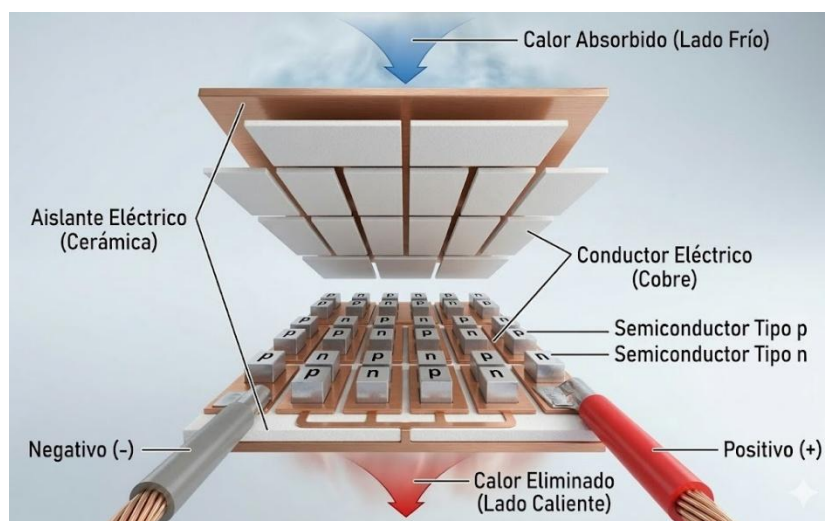


Figura 3.4. Estructura de una celda Peltier [46].

Entre las principales ventajas de los dispositivos termoeléctricos se encuentran su tamaño compacto, bajo mantenimiento, ausencia de refrigerantes y capacidad de control preciso de temperatura, lo que los hace adecuados para aplicaciones en sistemas electrónicos, instrumentación científica, dispositivos médicos y sistemas de refrigeración de pequeña escala [48]. Además, estos dispositivos pueden operar en una amplia variedad de condiciones ambientales y responder rápidamente a cambios en la corriente eléctrica aplicada.

En aplicaciones de captación de agua atmosférica, los módulos Peltier se utilizan para reducir la temperatura de una superficie por debajo del punto de rocío del aire, lo que provoca la condensación del vapor de agua presente en el ambiente. Este principio permite generar agua líquida a partir de la humedad del aire mediante procesos de condensación controlada, especialmente cuando el sistema se combina con disipadores térmicos y ventiladores que mejoran la transferencia de calor en la cara caliente del dispositivo.

En el sistema desarrollado en esta investigación se utilizaron celdas Peltier tipo TEC1-12706, las cuales operan típicamente con un voltaje de aproximadamente 12 V y corrientes de hasta 6 A, permitiendo generar diferencias de temperatura superiores a 60 °C entre sus superficies en condiciones óptimas de operación. Estas características permiten su implementación en sistemas experimentales de captación de agua atmosférica basados en condensación activa.

Sin embargo, uno de los principales desafíos de los módulos Peltier es su eficiencia energética relativamente baja, ya que parte de la energía eléctrica suministrada se disipa en forma de calor debido a las pérdidas resistivas del material semiconductor. Por esta razón, es necesario emplear disipadores de calor y ventilación adecuada en la cara caliente del módulo, con el fin de mantener un gradiente térmico eficiente y mejorar el rendimiento del sistema de enfriamiento.

3.1.8. Potencia térmica máxima

La potencia térmica máxima (Q_c) representa la cantidad máxima de calor que el módulo puede transportar desde la cara fría hacia la cara caliente en condiciones ideales. Para el modelo TEC1-12706 este valor se encuentra alrededor de 60 W, aunque en aplicaciones reales puede variar dependiendo de la temperatura ambiente, la eficiencia del disipador térmico y el flujo de aire disponible [45].

Por otro lado, la diferencia máxima de temperatura (ΔT_{max}) corresponde al gradiente térmico máximo que puede generarse entre la cara fría y la cara caliente del módulo cuando no existe carga térmica significativa. Para este tipo de módulo, el valor típico de ΔT_{max} se encuentra entre 65 °C y 68 °C en condiciones óptimas de operación [49].

En sistemas de captación de agua atmosférica, este gradiente térmico permite reducir la temperatura de la superficie de condensación por debajo del punto de rocío del aire, favoreciendo la formación de gotas de agua mediante el proceso de condensación del vapor presente en el ambiente.

3.1.9. Ecuación del efecto Peltier

El fenómeno físico que describe el funcionamiento de los módulos termoelectricos se conoce como efecto Peltier, el cual establece que el flujo de calor transportado en la unión de dos materiales conductores es proporcional a la corriente eléctrica que circula a través de ellos. De manera simplificada, la potencia térmica asociada al efecto Peltier puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \pi I \quad (4)$$

Donde Q es el flujo de calor transportado (W), π es el coeficiente de Peltier del material (V) e I es la corriente eléctrica aplicada (A).

Esta relación describe el transporte de energía térmica asociado al movimiento de portadores de carga a través de los materiales termoelectricos. En los módulos Peltier comerciales, el rendimiento del sistema depende además de otros fenómenos termoelectricos como el efecto Joule y la conducción térmica interna, los cuales influyen en la eficiencia global del dispositivo [50].

3.1.10. Sistema de adquisición de datos

El sistema de adquisición de datos es una parte fundamental en el desarrollo de sistemas experimentales, ya que permite registrar y almacenar información proveniente de sensores durante el funcionamiento del prototipo. En sistemas de captación de agua atmosférica, el monitoreo continuo de variables como temperatura, humedad relativa y condiciones de operación del sistema resulta esencial para evaluar el rendimiento del dispositivo y analizar el comportamiento del proceso de condensación.

En el sistema desarrollado en esta investigación se implementó un sistema de registro de datos basado en un módulo de almacenamiento en tarjeta SD y un reloj de tiempo real (RTC). Estos dispositivos permiten almacenar la información generada por los sensores junto con la fecha y hora en que se realiza cada medición,

3.1.11. Módulo SD

El módulo de tarjeta SD (**Figura 3.5**) es un dispositivo ampliamente utilizado en sistemas basados en microcontroladores para el almacenamiento de grandes volúmenes de datos. Este módulo permite utilizar tarjetas de memoria tipo *Secure Digital* (SD) como medio de almacenamiento externo, lo que facilita el registro continuo de datos sin depender de la memoria interna del microcontrolador.

La comunicación entre el microcontrolador y el módulo SD generalmente se realiza mediante el protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), el cual permite la transmisión de datos de manera rápida y confiable entre dispositivos electrónicos. Mediante este protocolo, el microcontrolador puede crear archivos, escribir datos y leer información almacenada en la tarjeta SD [51].

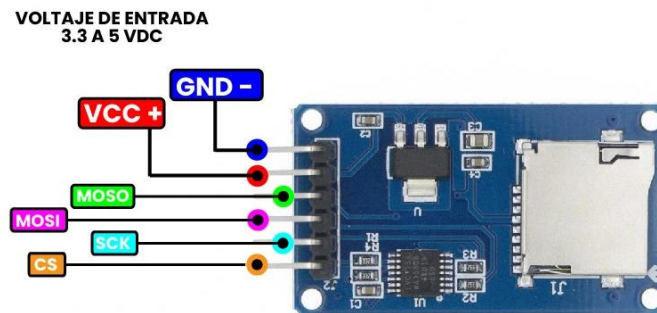


Figura 3.5. Lector de Memorias Micro SD para Arduino [52].

En el Prototipo, el módulo SD se utilizó para registrar los datos obtenidos de los sensores de temperatura y humedad, almacenando la información en archivos de texto dentro de la tarjeta de memoria. Esto permitió contar con un registro de las variables monitoreadas durante los experimentos realizados en el sistema de captación de agua atmosférica.

El uso de tarjetas SD en sistemas de adquisición de datos ofrece diversas ventajas, entre las cuales destacan su alta capacidad de almacenamiento, bajo costo y facilidad para transferir la información a otros dispositivos, como computadoras, para su posterior análisis mediante herramientas de procesamiento de datos [41].

3.1.12. Reloj de tiempo real (RTC)

El reloj de tiempo real (RTC, *Real Time Clock*, el cual se muestra en la **Figura 3.6**) es un dispositivo electrónico diseñado para mantener el registro preciso de la fecha y hora, incluso cuando el sistema principal se encuentra apagado. Esto se logra mediante el uso de una batería de respaldo, la cual permite que el reloj continúe funcionando de manera independiente del microcontrolador.

Los módulos RTC son comúnmente utilizados en sistemas de adquisición de datos para marcar temporalmente las mediciones registradas, permitiendo identificar el momento exacto en el que se obtuvo cada dato. Esta información es especialmente importante en experimentos donde las variables analizadas dependen del tiempo o de las condiciones ambientales [53].

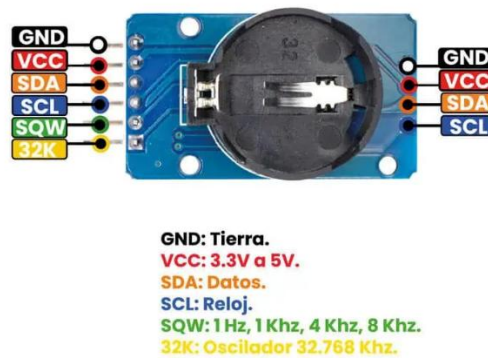


Figura 3.6. DS3231 Reloj de Tiempo Real RTC [54].

Durante el funcionamiento del sistema, el módulo RTC proporciona la fecha y hora exacta de cada medición, información que posteriormente es almacenada junto con los datos de los sensores en la tarjeta SD. De esta manera, es posible generar registros del comportamiento del sistema de captación de agua atmosférica y analizar su desempeño bajo diferentes condiciones ambientales.

3.1.13. Arquitectura del sistema electrónico

El sistema electrónico para el dispositivo de captación de agua atmosférica está compuesto por diversos elementos de medición, control y adquisición de datos que permiten monitorear y regular el funcionamiento del sistema de condensación. El

sistema integra: celdas termoelectricas Peltier, sensores de temperatura, sensores de humedad, módulos de control(relevadores) y un sistema de almacenamiento de datos, todos gestionados mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560.

El sistema cuenta con cuatro celdas termoelectricas Peltier, cada una equipada con su respectivo ventilador, cuya función es favorecer la disipación del calor generado en la cara caliente del módulo termoelectrico.

Para el monitoreo térmico del sistema se emplean ocho sensores de temperatura DS18B20, los cuales se encuentran distribuidos de manera estratégica en las celdas Peltier. En cada celda se instalaron dos sensores, uno colocado en la cara fría y otro en la cara caliente, con el objetivo de registrar la diferencia de temperatura generada por el módulo termoelectrico y analizar el comportamiento térmico del sistema durante su operación.

Adicionalmente, el sistema incorpora un sensor de temperatura y humedad DHT11, el cual permite medir las condiciones ambientales del entorno. Los valores de temperatura ambiente y humedad relativa obtenidos mediante este sensor se utilizan como variables de entrada para el cálculo del punto de rocío, parámetro fundamental para determinar las condiciones necesarias para la condensación del vapor de agua presente en el aire.

El control de las celdas Peltier y de los ventiladores se realiza mediante cuatro módulos de relevadores dobles, donde cada módulo se encarga de controlar una celda termoelectrica y su ventilador correspondiente. Este sistema de control permite activar o desactivar los dispositivos de acuerdo con las condiciones de operación establecidas en el programa implementado en el microcontrolador.

Para el registro de los datos experimentales, el sistema incorpora un módulo de almacenamiento en tarjeta SD, el cual permite guardar la información generada por los sensores durante el funcionamiento del dispositivo. Asimismo, se utiliza un módulo de reloj de tiempo real (RTC) que proporciona la fecha y hora exacta de cada medición, permitiendo generar un registro cronológico de las variables monitoreadas.

Entre los datos almacenados se incluyen la temperatura de la cara fría y la cara caliente de cada celda Peltier, la temperatura ambiente, la humedad relativa, el cálculo de la temperatura del punto de rocío y el análisis del punto de rocío en relación con cada celda termoeléctrica. Toda esta información es procesada y gestionada por el Arduino Mega 2560, el cual actúa como la unidad central de control del sistema electrónico.

Todo el sistema electrónico es alimentado mediante una fuente de alimentación de 12 V con una capacidad de 50 A, la cual proporciona la energía necesaria para el funcionamiento de las celdas termoeléctricas Peltier, los ventiladores y los demás componentes del sistema. Asimismo, se emplea un regulador de voltaje de 12 V a 5 V, encargado de suministrar la tensión adecuada para los dispositivos de control y los sensores utilizados en el sistema, garantizando un funcionamiento estable del microcontrolador y de los módulos electrónicos.

El diagrama electrónico del prototipo que muestra la interconexión de los diferentes componentes del sistema se presenta en la **Figura 3.7**.

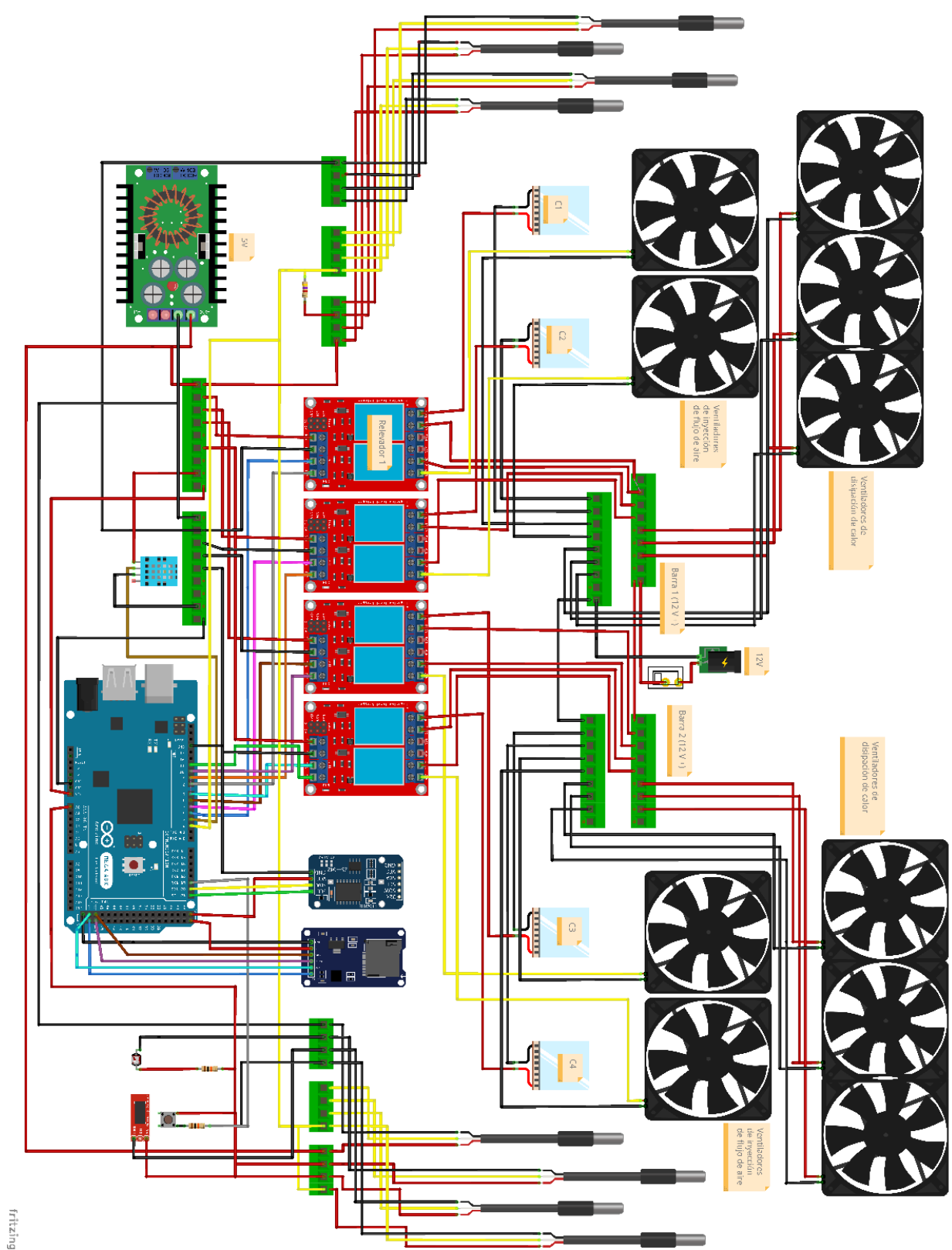


Figura 3.7. Diagrama electrónico del sistema de captación de agua atmosférica [fuente: elaboración propia en Fritzing 1.0.1.]

3.2. Diseño del prototipo para la condensación de agua atmosférica

El diseño del prototipo de condensación constituye una etapa fundamental en el desarrollo del sistema de captación de agua atmosférica mediante celdas termoelectricas. En esta fase se establecieron los criterios de diseño necesarios para garantizar una adecuada transferencia de calor, una correcta circulación del aire húmedo y un sistema eficiente de recolección del agua condensada.

Durante el desarrollo del sistema de captación de agua atmosférica se diseñaron y construyeron dos prototipos experimentales con el objetivo de evaluar diferentes configuraciones del sistema de condensación y mejorar el desempeño del proceso de captación de agua.

El primer prototipo permitió analizar el comportamiento inicial del sistema de enfriamiento termoelectrico y evaluar la viabilidad del uso de celdas Peltier para inducir la condensación del vapor de agua presente en el aire. A partir de los resultados obtenidos, se desarrolló un segundo prototipo con mejoras en el número de celdas, la superficie de intercambio térmico y el sistema de flujo de aire, con el fin de incrementar la eficiencia del proceso de condensación.

El proceso de diseño se llevó a cabo mediante tres fases principales: selección de materiales, modelado del sistema y fabricación del prototipo, las cuales se describen a continuación.

3.2.1. Selección de materiales

En esta fase se realizó la selección de los materiales y componentes necesarios para la construcción del prototipo, considerando criterios como conductividad térmica, resistencia mecánica, disponibilidad comercial y costo. Entre los principales elementos seleccionados se encuentran las celdas Peltier, disipadores de calor de aluminio, ventiladores para la circulación del aire, placas de acrílico para la estructura de la cámara de condensación y componentes fabricados mediante impresión 3D para el soporte estructural del sistema.

La selección de los materiales utilizados en el prototipo se realizó considerando principalmente sus propiedades térmicas, ya que estas influyen directamente en la

eficiencia del proceso de condensación del vapor de agua atmosférico. En particular, se evaluó la conductividad térmica de distintos materiales, con el objetivo de seleccionar aquellos que favorecieran tanto el aislamiento térmico de la cámara de condensación como la transferencia eficiente de calor en los disipadores.

3.2.2. Selección de materiales para la cámara de condensación

Para la estructura de la cámara de condensación se analizaron diversos materiales comúnmente utilizados en aplicaciones estructurales ligeras, entre los que se incluyen acrílico, madera, vidrio, fibra de vidrio y polietileno de baja densidad. El análisis se enfocó en determinar su conductividad térmica, con el propósito de identificar el material que permitiera reducir las pérdidas de calor entre el interior del sistema y el ambiente externo, favoreciendo así la estabilidad térmica dentro de la cámara de condensación.

La transferencia de calor por conducción a través de un material puede describirse mediante la ley de Fourier, la cual establece que la tasa de transferencia de calor es proporcional al área de contacto, a la conductividad térmica del material y al gradiente de temperatura a través del mismo [55].

A partir de esta relación se puede observar que los materiales con mayor conductividad térmica permiten una transferencia de calor más eficiente, mientras que aquellos con baja conductividad térmica tienden a actuar como aislantes térmicos [56]. Por esta razón, en el diseño del prototipo se evaluaron diferentes materiales tanto para la estructura de la cámara de condensación como para los disipadores de calor, con el objetivo de seleccionar aquellos que favorecieran el comportamiento térmico adecuado del sistema.

El fenómeno de conducción térmica en los materiales puede describirse mediante la ley de Fourier de conducción de calor, la cual establece que la tasa de transferencia de calor a través de un material es proporcional al gradiente de temperatura y a la conductividad térmica del material [57]. Esta relación se expresa mediante la ecuación:

$$Q = kA \frac{T_1 - T_2}{L} \quad (5)$$

Donde Q representa la tasa de transferencia de calor, k la conductividad térmica del material, A el área de transferencia, $T_2 - T_1$ la diferencia de temperatura entre las superficies y L el espesor del material.

En la **Tabla 3.2**, se presentan los valores de conductividad térmica correspondientes a los diferentes materiales evaluados para la construcción de la estructura del prototipo. Con base en estos valores, se realizó un análisis comparativo de la conductividad térmica de cada material con el objetivo de identificar la opción más adecuada para la cámara de condensación.

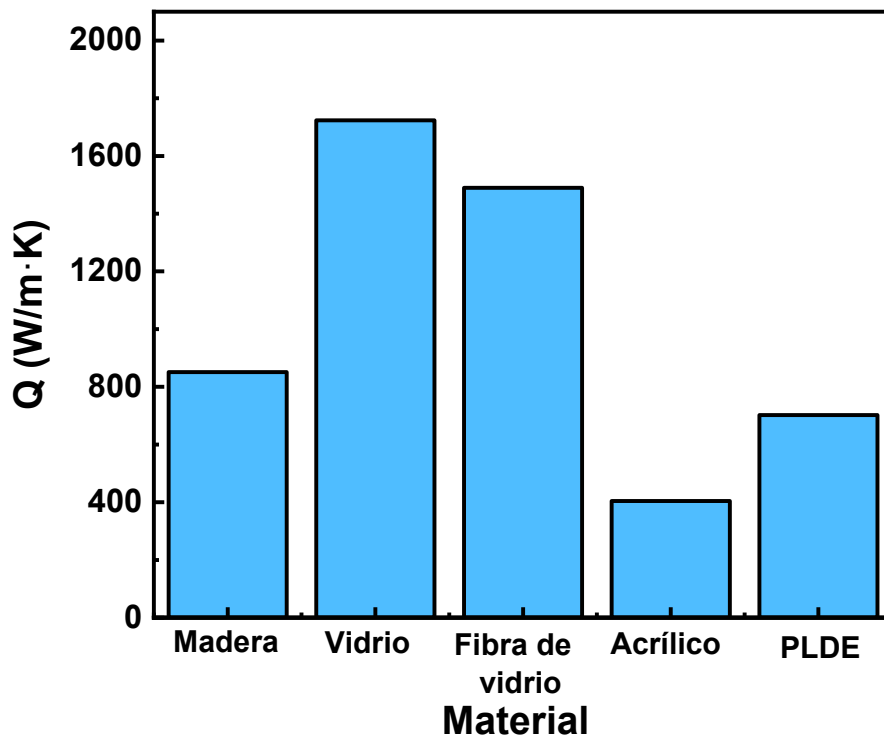
Tabla 3.2. Conductividad térmica de los materiales evaluados para la estructura del prototipo [58].

Material	Conductividad térmica (W/m·K)
Madera	0.4
Vidrio	0.81
Fibra de vidrio	0.7
Acrílico	0.19
PLDE (Polietileno de baja densidad)	0.33

A partir de los resultados obtenidos se determinó que el acrílico presenta una menor conductividad térmica en comparación con los demás materiales analizados, lo cual lo convierte en una opción adecuada para la construcción de la estructura del prototipo. Debido a esta propiedad, el acrílico puede actuar como aislante térmico, reduciendo la transferencia de calor entre el interior del sistema y el ambiente externo, lo que contribuye a mantener condiciones térmicas favorables dentro de la cámara de condensación.

En la **Gráfica 3.1**, se muestran los resultados obtenidos del análisis de conductividad térmica (Q) de los materiales propuestos. Estos valores fueron determinados mediante la sustitución de los parámetros experimentales en la

Ecuación 5. La representación gráfica permite comparar el comportamiento térmico de cada material, facilitando la identificación del material más adecuado para la construcción de la estructura del prototipo.



Gráfica 3.1. Comparación de la conductividad térmica de los materiales evaluados para la estructura del prototipo [fuente: elaboración propia].

A partir del análisis de los resultados obtenidos de conductividad térmica de los materiales evaluados, se determinó que el acrílico presenta el menor valor de conductividad térmica en comparación con los demás materiales analizados, como madera, vidrio, fibra de vidrio y polietileno de baja densidad. Esta característica indica que el acrílico posee una menor capacidad para transferir calor, lo que lo convierte en un material adecuado para aplicaciones donde se requiere reducir la transferencia térmica entre dos medios.

En el contexto del prototipo desarrollado para la captación de agua atmosférica, es importante mantener condiciones térmicas estables dentro de la cámara de condensación, con el fin de favorecer el proceso de enfriamiento generado por las celdas Peltier. Debido a su baja conductividad térmica, el acrílico actúa como un aislante térmico, lo que permite disminuir las pérdidas de frío hacia el ambiente

externo y contribuir a mantener una temperatura interna más baja dentro del sistema.

Además de sus propiedades térmicas, el acrílico presenta otras ventajas para la construcción del prototipo, como alta transparencia, buena resistencia mecánica, bajo peso y facilidad de mecanizado, lo que facilita la fabricación y el ensamblaje de la estructura del sistema.

Por estas razones, y con base en los resultados obtenidos del análisis de conductividad térmica, se seleccionó el acrílico como material para la construcción de la cámara de condensación del prototipo.

3.2.3. Selección de materiales para disipadores de calor del área de condensación

Por otra parte, para el diseño de los disipadores de calor se realizó una comparación entre distintos materiales metálicos caracterizados por su capacidad de conducción térmica. Entre los materiales analizados se encuentran aluminio, cobre, hierro, acero y acero inoxidable. En este caso, el objetivo fue seleccionar el material que permitiera maximizar la transferencia de calor, tanto en la disipación térmica de la cara caliente de las celdas Peltier como en el enfriamiento de las superficies destinadas a la condensación.

En la **Tabla 3.3** se presentan los valores de conductividad térmica de los diferentes materiales evaluados para la fabricación de los disipadores de calor ubicados en el lado frío del sistema. A partir de estos datos, se realizó un análisis comparativo con el propósito de determinar el material más adecuado para la construcción de los disipadores, los cuales constituyen la superficie donde se produce el proceso de condensación del vapor de agua presente en el aire.

Tabla 3.3. Conductividad térmica de los materiales evaluados para la construcción del disipador [58].

Material	Conductividad térmica (W/m·K)
Acero	50
Acero inoxidable	17
Aluminio	217
Cobre	380
Hierro	80

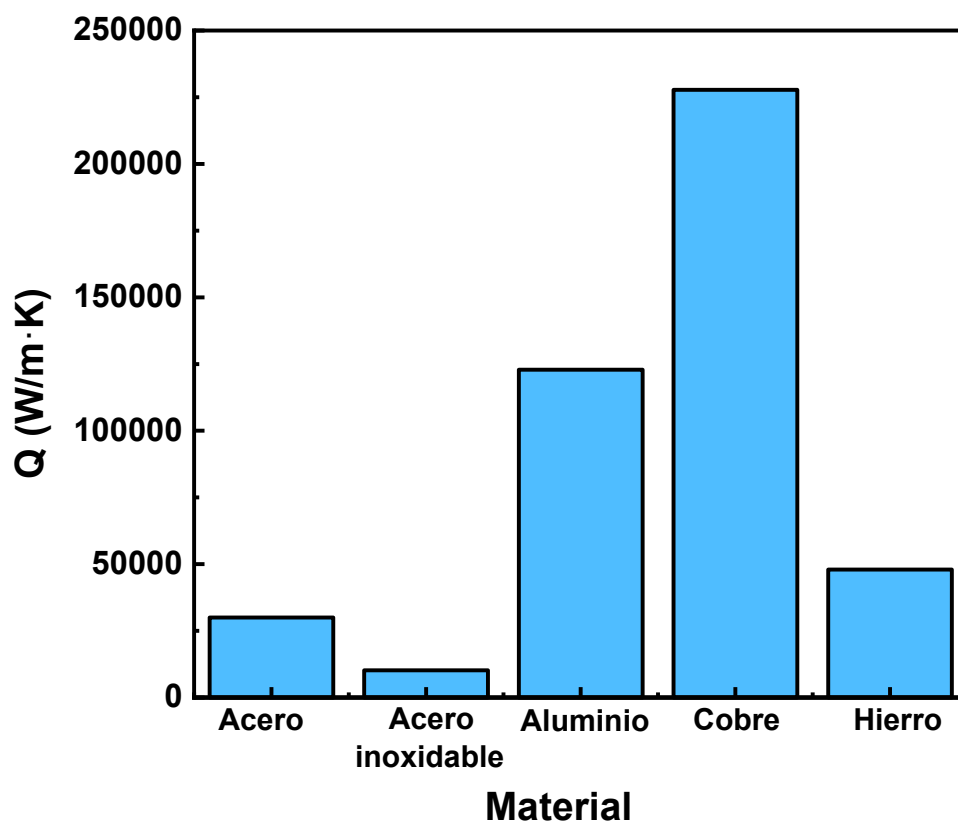
A partir del análisis de los resultados obtenidos de conductividad térmica de los materiales evaluados, se determinó que el cobre presenta la mayor conductividad térmica, lo que lo convierte en el mejor conductor de calor entre los materiales analizados. Sin embargo, debido a su alto costo, su utilización en la fabricación de los disipadores de calor resulta menos viable para el desarrollo del prototipo.

Por otra parte, el aluminio presenta una conductividad térmica elevada, ubicándose como el segundo material con mejor capacidad de conducción térmica entre los evaluados. Además, el aluminio ofrece ventajas adicionales como menor costo, bajo peso, buena resistencia a la corrosión y facilidad de mecanizado.

Por estas razones, el aluminio fue seleccionado como el material más adecuado para la fabricación de los disipadores de calor del prototipo, ya que permite lograr una transferencia de calor eficiente manteniendo un equilibrio entre desempeño térmico y viabilidad económica.

En la **Gráfica 3.2**, se muestran los resultados del análisis de conductividad térmica de los materiales evaluados para la fabricación de los disipadores de calor. Los valores presentados fueron obtenidos mediante la sustitución de los parámetros experimentales en la Ecuación (5). La representación gráfica permite realizar una comparación del comportamiento térmico de cada material, lo que facilita la

selección del material más adecuado para la construcción de los disipadores donde se llevará a cabo el proceso de condensación.



Gráfica 3.2. Comparación de la conductividad térmica de los materiales evaluados para la construcción de los disipadores [fuente: elaboración propia]

3.3. Diseño del prototipo en SolidWorks

Una vez seleccionados los materiales y definidos los componentes principales del sistema, se procedió al diseño del prototipo mediante herramientas de modelado tridimensional asistido por computadora (CAD). Para esta etapa se utilizó el software SolidWorks con licencia de estudiante, el cual permitió desarrollar el modelo tridimensional del sistema de captación de agua atmosférica y visualizar la disposición de cada uno de los elementos que conforman el prototipo.

Mediante el uso de este software se diseñaron las diferentes partes estructurales del sistema, tales como la base del prototipo, soportes para las celdas Peltier, estructura de los disipadores de calor, canal de recolección de agua y la cámara de condensación. El modelado tridimensional permitió definir con precisión las dimensiones de cada componente, así como verificar el correcto ensamblaje de las piezas antes de su fabricación.

El diseño en SolidWorks facilitó la optimización de la distribución de los componentes dentro del sistema, permitiendo mejorar aspectos como la circulación del aire, la ubicación de los ventiladores y la integración de los disipadores de calor.

Otra ventaja del modelado en SolidWorks fue la posibilidad de visualizar el prototipo completo en un entorno virtual, lo que permitió detectar posibles interferencias entre componentes y realizar ajustes en el diseño antes de pasar a la etapa de fabricación. Esto contribuyó a reducir errores durante la construcción del sistema y optimizar el proceso de ensamblaje del prototipo.

Finalmente, el diseño desarrollado en el software sirvió como base para la fabricación de algunas piezas mediante tecnología de impresión 3D, lo que permitió materializar el modelo digital y construir la estructura del prototipo experimental.

El prototipo desarrollado está constituido por tres secciones principales. La primera corresponde al Módulo de condensación (conjunto de disipadores de calor y la celda Peltier), donde se lleva a cabo el proceso de condensación del vapor de agua presente en el ambiente. La segunda sección está conformada por la base estructural, la cual sirve de soporte para los disipadores, ventiladores y sensores,

además de incorporar el sistema de recolección del agua condensada. Finalmente, la tercera sección corresponde al gabinete de control, donde se encuentran alojados los componentes eléctricos y electrónicos encargados de la alimentación, monitoreo y control del sistema.

3.3.1. Módulo de condensación

El módulo de condensación constituye la parte principal del prototipo, ya que es el encargado de generar las condiciones térmicas necesarias para la condensación del vapor de agua presente en el aire atmosférico. Este módulo está integrado por la celda Peltier, los disipadores de calor del lado frío y del lado caliente, el disipador intermedio, los ventiladores y los elementos de sujeción que permiten mantener un adecuado contacto térmico entre los componentes.

El principio de funcionamiento de este módulo se basa en el efecto Peltier, mediante el cual la celda termoeléctrica genera una diferencia de temperatura entre sus dos caras. La cara fría reduce su temperatura hasta alcanzar valores cercanos o inferiores al punto de rocío del aire, favoreciendo la condensación de la humedad ambiental sobre la superficie del disipador frío. Simultáneamente, la cara caliente transfiere el calor generado hacia el disipador del lado caliente, el cual, con ayuda de los ventiladores y los tubos de calor (*heat pipes*), disipa el calor para mantener el lado caliente lo más frío posible.

Para mejorar la transferencia de calor, se incorporó un disipador intermedio entre la celda Peltier y el disipador principal del lado caliente. Este elemento permite distribuir de manera más uniforme el flujo térmico, reduciendo las pérdidas de energía y favoreciendo el desempeño del sistema de enfriamiento.

La **Figura 3.8**, se muestra el modelo tridimensional del módulo de condensación desarrollado en SolidWorks, donde se identifican los principales componentes que intervienen en el proceso de enfriamiento y condensación del vapor de agua.

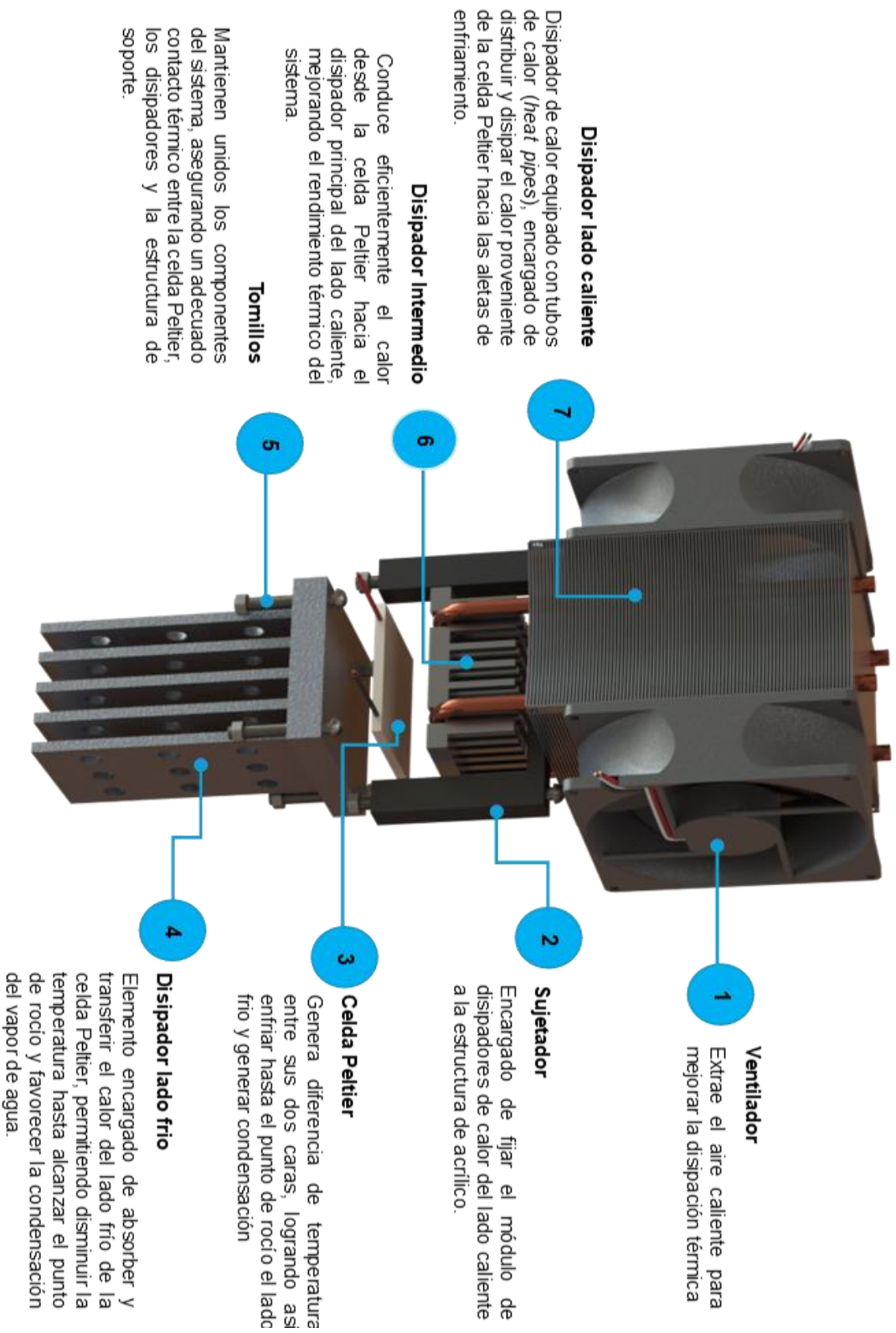


Figura 3.8. Módulo de condensación del prototipo de captación de agua atmosférica [fuente: elaboración propia].

3.3.2. Módulo estructural y de recolección

El módulo estructural y de recolección tiene como función proporcionar soporte mecánico a los diferentes componentes que conforman el prototipo, así como permitir la captación y conducción del agua obtenida durante el proceso de condensación. Este módulo constituye la base sobre la cual se ensamblan el módulo de condensación, los sensores de monitoreo y los ventiladores auxiliares del sistema.

Durante la etapa de diseño se consideró una estructura capaz de soportar el peso de los disipadores de calor, las celdas Peltier y los elementos de fijación. Asimismo, se diseñaron los soportes necesarios para la instalación de los sensores encargados de monitorear las variables ambientales y térmicas del sistema.

Además, este módulo incorpora el sistema de recolección de agua condensada. Para ello, se diseñó una superficie inclinada y canales de conducción que permiten dirigir el agua formada sobre el disipador frío hacia un recipiente de almacenamiento, minimizando pérdidas y evitando la acumulación de agua dentro del sistema.

El diseño tridimensional realizado en SolidWorks permitió verificar la correcta ubicación de cada elemento y realizar ajustes antes de la fabricación del prototipo.

Finalmente, este módulo sirve como elemento de integración entre el módulo de condensación y el módulo de control, proporcionando una plataforma estable para el funcionamiento del sistema de captación de agua atmosférica.

El módulo estructural y de captación (**Figura 3.9**) se fabricó principalmente con dos materiales: acrílico transparente de 3 mm de espesor y filamento PLA. La selección del acrílico se realizó a partir del análisis de conductividad térmica de los materiales evaluados, determinándose que presenta el menor valor de conductividad térmica. Esta característica permite reducir la transferencia de calor entre el interior y el exterior del sistema, por lo que fue utilizado para la fabricación de la caja donde se instalaron los módulos de disipación de calor.

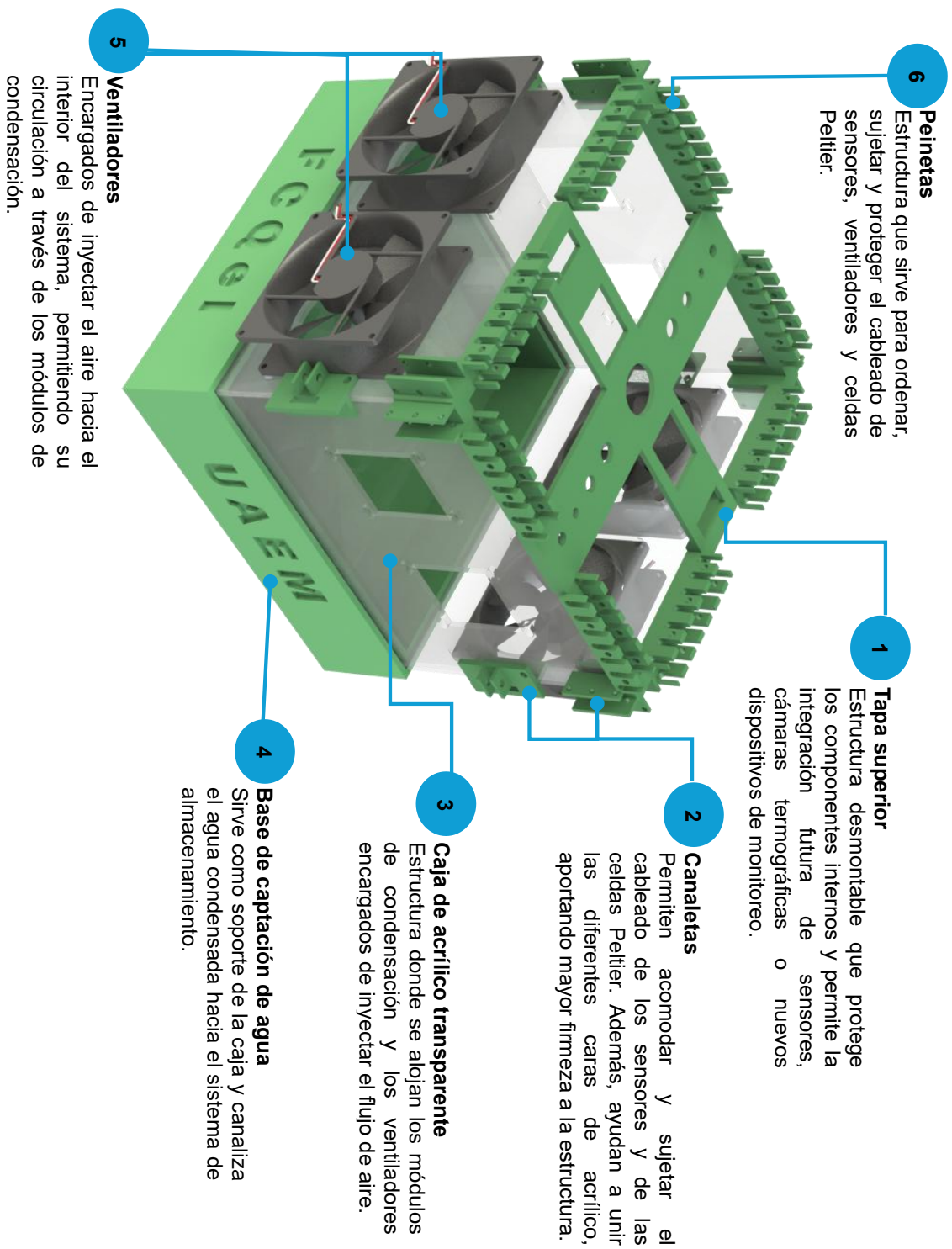


Figura 3.9. Componentes principales del módulo estructural y de captación [fuente: elaboración propia].

Por otra parte, el PLA se empleó como material para la fabricación mediante impresión 3D de diversos componentes del prototipo. La elección de este material se debió a su facilidad de manufactura, bajo costo y a la posibilidad de diseñar y fabricar piezas personalizadas de acuerdo con los requerimientos específicos del proyecto. Gracias a ello, todos los elementos impresos fueron desarrollados a la medida de las necesidades del sistema, optimizando la integración de los diferentes componentes.

Entre las piezas fabricadas en PLA se encuentra la base del prototipo, la cual proporciona soporte a los distintos componentes y funciona como sistema de captación y conducción del agua condensada hacia el depósito de almacenamiento. Asimismo, se diseñaron e imprimieron peinetas y canaletas para la organización y protección del cableado de los sensores y de la alimentación de las celdas Peltier, contribuyendo además al refuerzo estructural del conjunto.

De igual manera, se fabricó una tapa superior con orificios estratégicamente distribuidos para facilitar futuras modificaciones o ampliaciones del sistema, como la incorporación de sensores adicionales, cámaras termográficas u otros dispositivos de monitoreo.

Las dimensiones de la caja de acrílico fueron de 20 cm de largo, 20 cm de ancho y 20 cm de altura. Por su parte, la base de captación, mostrada en la **Figura 3.10**, se diseñó con dimensiones de 22 cm × 22 cm × 5 cm. Para favorecer la recolección del agua condensada, la base incorpora una pendiente de 8° hacia el centro, permitiendo que el agua escurra de forma natural hacia el punto de captación.

Adicionalmente, la base cuenta con una ranura perimetral diseñada para el ensamblaje a presión de las paredes de acrílico, lo que facilita el montaje y proporciona mayor estabilidad a la estructura.

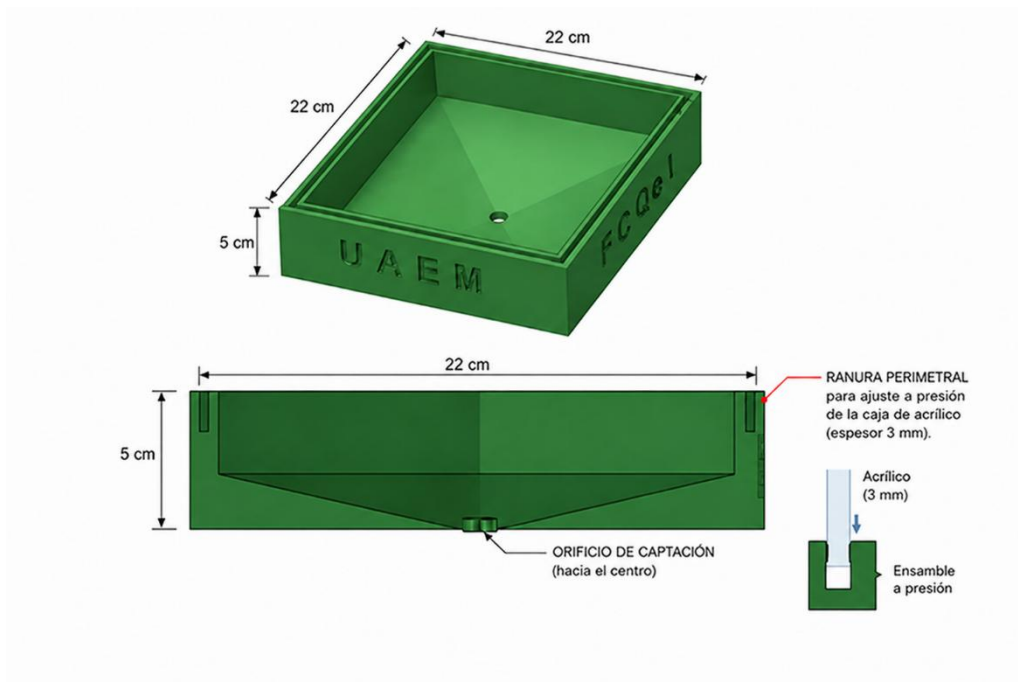


Figura 3.10. Diseño de la base de captación fabricada en PLA [Fuente: elaboración propia].

3.3.3 Fabricación del prototipo

Una vez concluido el diseño del sistema en SolidWorks, se procedió a la fabricación del prototipo. En primer lugar, se realizó la fabricación de los disipadores del lado frío se llevó a cabo mediante un proceso de fundición utilizando aluminio reciclado como materia prima. Para ello, se diseñó y fabricó un molde de acuerdo con los requerimientos del proyecto. El proceso de fabricación se muestra en la **Figura 3.11**. Cada disipador tiene dimensiones de 5 cm de ancho, 5 cm de alto y 9 cm de largo. Además, cuenta con cinco aletas de 5 mm de espesor, distribuidas uniformemente para incrementar el área de transferencia de calor. Cada aleta incorpora nueve perforaciones de 3/8 de pulgada de diámetro, separadas entre sí por una distancia de 1 cm, con el propósito de favorecer la circulación del aire a través del disipador.

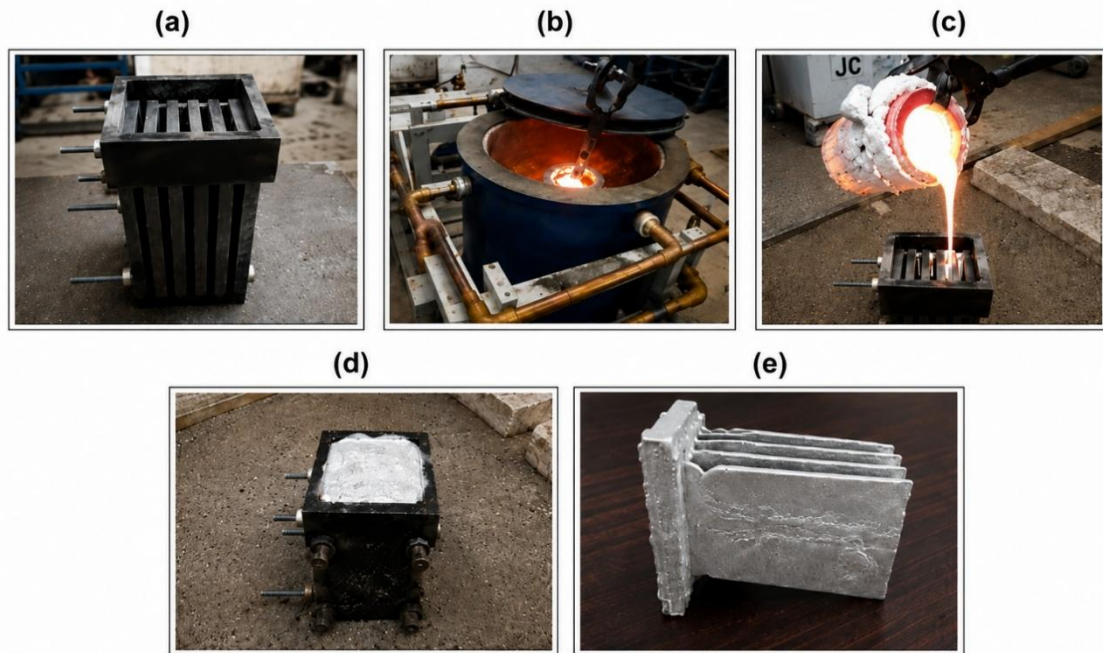


Figura 3.11. Fabricación del disipador de aluminio por fundición utilizando aluminio reciclado como materia prima. (a) Molde de fundición, (b) horno de fundición, (c) vertido del aluminio fundido, (d) solidificación de la pieza y (e) disipador obtenido [Fuente: elaboración propia con fotografías obtenidas en colaboración con el Dr. Jesús Mario Colín de la Cruz de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos]

La fabricación de la base de captación, las regletas, las canaletas para cableado y la tapa superior se llevó a cabo mediante tecnología de impresión 3D), utilizando una impresora Creality Ender 3. Previamente, cada uno de los componentes fue diseñado en el software SolidWorks y posteriormente exportado a un software laminador (*slicer*), donde se configuraron los parámetros de impresión, tales como el porcentaje de relleno, la velocidad de impresión, la altura de capa y el material empleado.

Para la fabricación de todas las piezas se seleccionó un relleno del 10 %, valor que permitió obtener componentes con la resistencia mecánica requerida, optimizando al mismo tiempo el consumo de material y el tiempo de impresión.

El procedimiento general de fabricación de los componentes impresos en 3D, desde la etapa de diseño hasta la obtención de la pieza final, se muestra en la **Figura 3.12**.

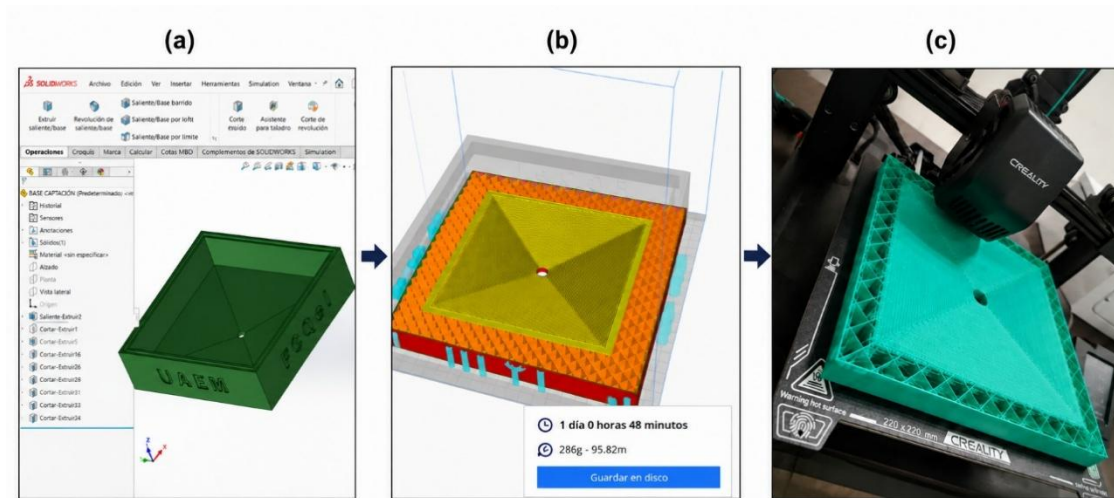


Figura 3.12. Etapas del proceso de fabricación de la base de captación: (a) diseño CAD, (b) laminado del modelo y (c) fabricación mediante impresión 3D [fuente: elaboración propia].

Finalmente, una vez fabricadas todas las piezas mediante impresión 3D, realizados los cortes de acrílico y reunidos los componentes necesarios para la construcción del sistema, se procedió al ensamblaje del prototipo. Durante esta etapa se integraron los elementos estructurales y mecánicos, verificando el correcto acoplamiento de cada componente y el funcionamiento adecuado del sistema. El proceso de ensamblaje del prototipo se muestra en la **Figura 3.13**.



Figura 3.13. Ensamblaje general del prototipo de captación de agua atmosférica [fuente: elaboración propia].

Para la implementación del sistema electrónico de control y potencia, se optó por integrar todos los componentes dentro de una caja NEMA, con el propósito de proteger los dispositivos frente a factores ambientales externos, facilitar las labores de mantenimiento y mejorar la organización general del prototipo. En el interior de la caja se instalaron los elementos de control, adquisición de datos y alimentación eléctrica, incluyendo el microcontrolador, los módulos de acondicionamiento de señales, los dispositivos de protección, los relevadores y la fuente de alimentación requerida para el funcionamiento del sistema.

Con el fin de asegurar una adecuada distribución de los componentes y optimizar el espacio disponible, se diseñaron y fabricaron mediante impresión 3D diversos soportes y bases de montaje personalizados.

El proceso de montaje, cableado e integración de los componentes electrónicos dentro de la caja NEMA, se muestra en la **Figura 3.14**.

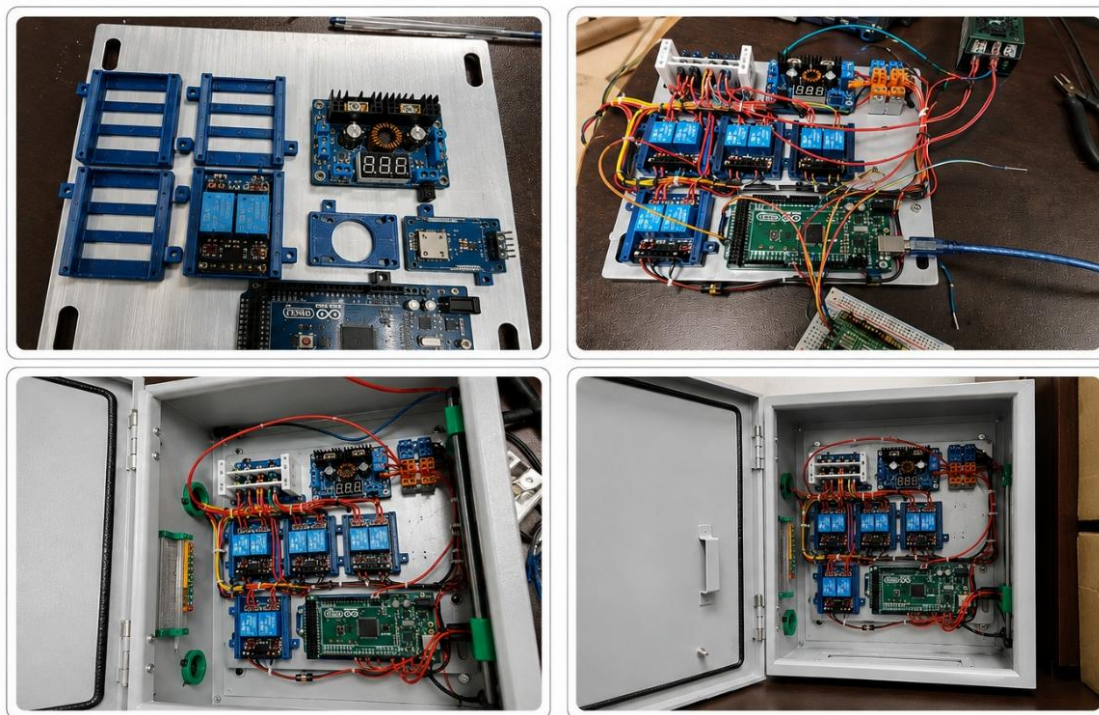


Figura 3.14. Vistas del proceso de fabricación, cableado e integración del sistema electrónico de control [fuente: elaboración propia].

En la **Figura 3.15**, se muestra el prototipo final desarrollado para la captación de agua atmosférica. El sistema quedó integrado por cuatro elementos principales: el módulo de condensación, conformado por las celdas Peltier y los disipadores de calor; el módulo de captación de agua, encargado de recolectar y conducir el agua condensada; el sistema electrónico y de control, responsable de la adquisición de datos y la gestión de los actuadores; y una base de madera diseñada para alojar los componentes auxiliares del sistema.

La base de madera se dividió en dos compartimentos independientes. En el primero se instaló el sistema de conteo de agua captada, mientras que en el segundo se ubicó la fuente de alimentación externa encargada de suministrar energía a los diferentes componentes del prototipo. Esta configuración permitió una distribución ordenada de los elementos, facilitando las tareas de mantenimiento, monitoreo y operación del sistema.

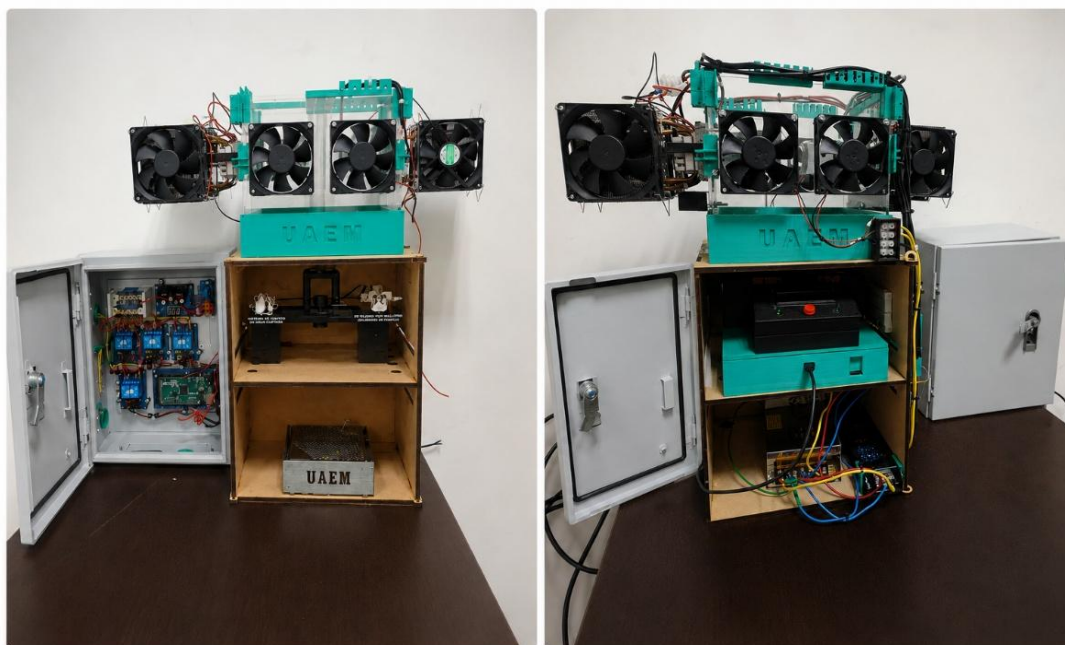


Figura 3.15. Prototipo final del sistema autónomo para la captación de agua atmosférica, integrado por el módulo de condensación, el módulo de captación de agua, el sistema electrónico de control y la base de soporte [fuente: elaboración propia].

CAPITULO 4

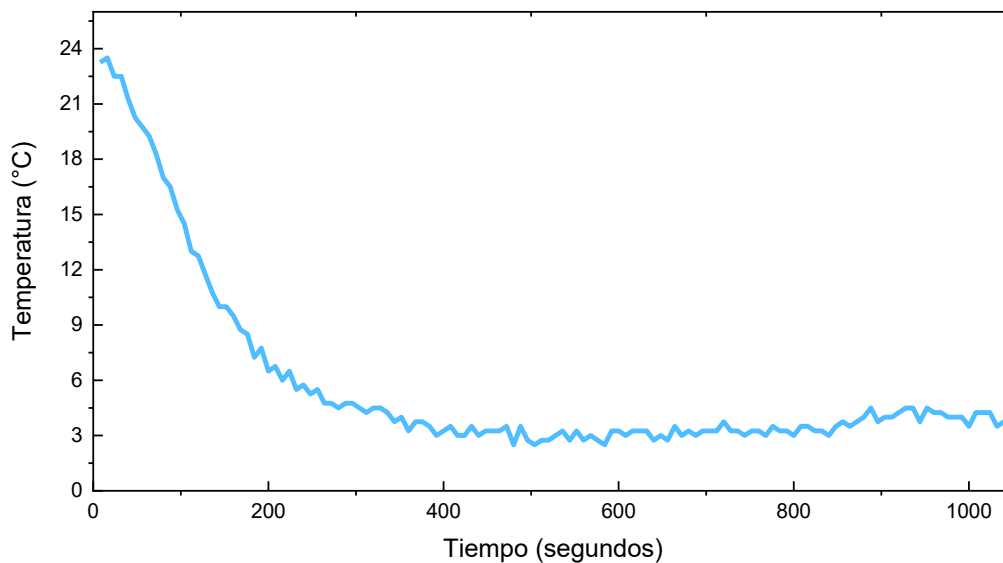
4. PRUEBAS Y RESULTADOS

4.1. Comportamiento térmico del módulo de condensación

Con el fin de evaluar la capacidad de enfriamiento del sistema, se realizaron pruebas experimentales monitoreando la temperatura del disipador acoplado al lado frío y caliente de las celdas Peltier.

Para el lado frio los resultados obtenidos mostraron una disminución progresiva de la temperatura, pasando de un valor inicial máximo de 23.5 °C a una temperatura mínima de 2.5 °C, lo que representa una reducción total de 21.0 °C respecto a la condición inicial.

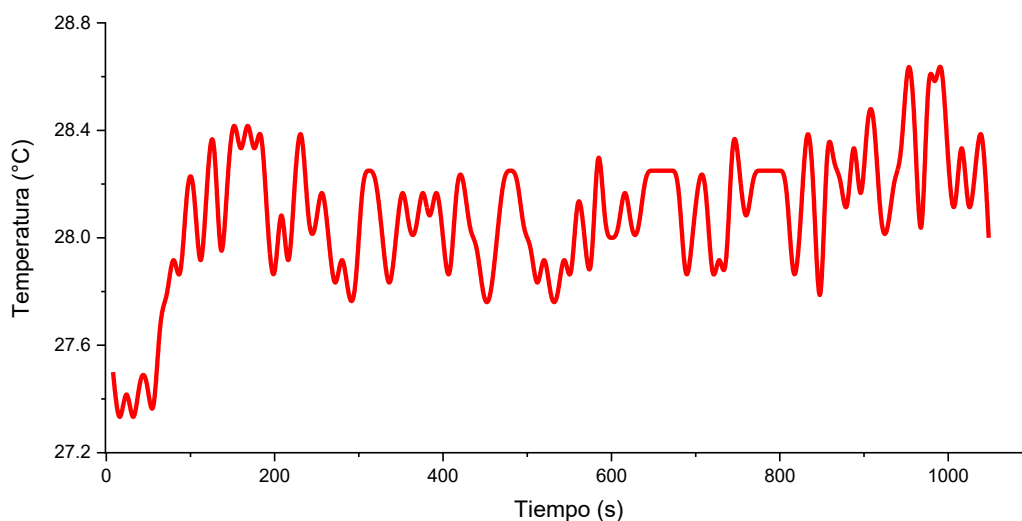
El comportamiento de la temperatura del disipador durante la prueba se presenta en la **Gráfica 4.1**, donde se observa que la temperatura mínima fue alcanzada aproximadamente a los 480 s de operación. Posteriormente, el sistema mantuvo la temperatura en un intervalo comprendido entre 2.5 °C y 4.5 °C, evidenciando una operación térmicamente estable.



Gráfica 4.1. Respuesta térmica del disipador acoplado al lado frío de la celda Peltier.

Estos resultados demuestran la capacidad del sistema para alcanzar y mantener temperaturas significativamente inferiores a la temperatura ambiente y por debajo del punto de rocío del aire circundante, condición indispensable para promover la condensación del vapor de agua atmosférico y, en consecuencia, la captación de agua mediante el proceso de enfriamiento termoeléctrico.

Respecto al comportamiento térmico del lado caliente de la celda Peltier, los resultados obtenidos muestran que la temperatura permaneció relativamente estable durante toda la prueba experimental, oscilando entre **27.3 °C y 28.6 °C**, como se observa en la **Gráfica 4.2**. La diferencia máxima registrada fue de aproximadamente **1.3 °C**, lo que indica una baja variación térmica a lo largo del periodo de operación.



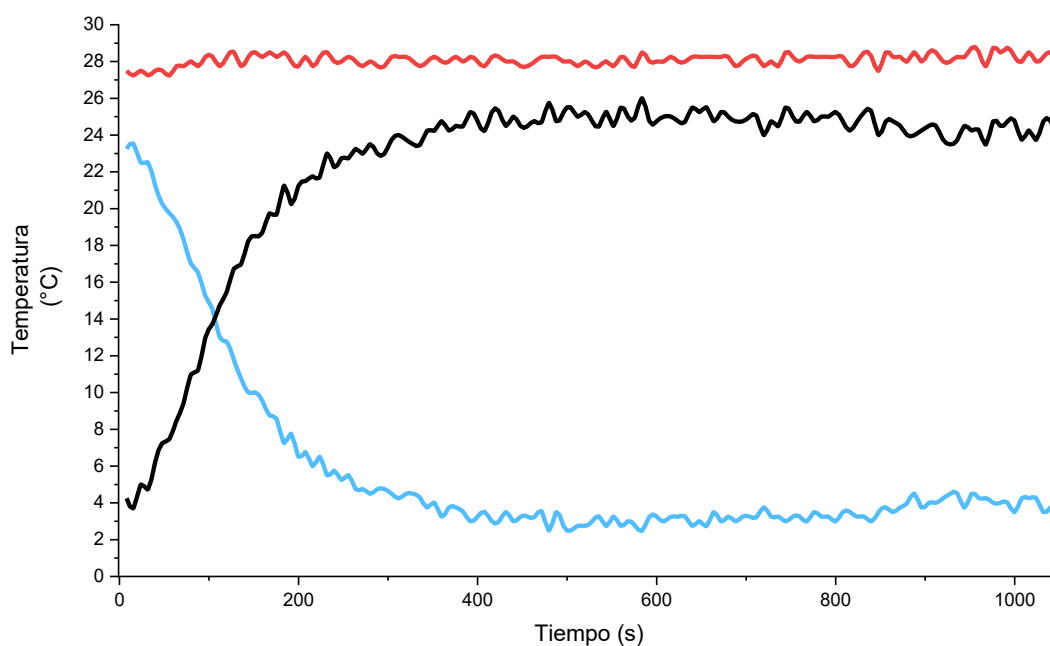
Gráfica 4.2. Respuesta térmica del disipador acoplado al lado caliente de la celda Peltier

Este comportamiento evidencia que el sistema de disipación de calor, conformado por los disipadores y ventiladores instalados en el lado caliente de las celdas Peltier, fue capaz de evacuar de manera eficiente la energía térmica generada durante el proceso de enfriamiento.

Asimismo, la estabilidad observada en la temperatura del lado caliente contribuyó a mantener un funcionamiento continuo y uniforme de las celdas Peltier, favoreciendo la obtención de temperaturas significativamente menores en el lado frío. Esto permitió que la superficie de condensación operara por debajo del punto de rocío del aire circundante, generando las condiciones necesarias para la formación y captación de agua atmosférica.

En conjunto, estos resultados confirman la efectividad del sistema de disipación térmica implementado y demuestran que el diseño propuesto permite mantener condiciones adecuadas de operación para el proceso de condensación.

La **Gráfica 4.3**, muestra la evolución de la temperatura en los lados frío (línea azul) y caliente (línea roja) de la celda Peltier, así como la diferencia de temperatura (línea negra) generada entre ambas superficies durante la prueba experimental.



Gráfica 4.3. Comparación de las temperaturas del lado frío y caliente de la celda Peltier y de la diferencia de temperatura entre ambas superficies durante la prueba experimental.

Al inicio de la prueba, ambos lados de la celda presentaban temperaturas cercanas a la temperatura ambiente. Sin embargo, una vez energizada la celda Peltier, se observó una disminución progresiva de la temperatura en el lado frío, pasando de aproximadamente 23.5 °C a valores cercanos a 2.5 °C. En comparación, la temperatura del lado caliente permaneció relativamente estable, oscilando entre 27.3 °C y 28.6 °C.

Como resultado de este comportamiento, la diferencia de temperatura entre ambas caras de la celda aumentó gradualmente hasta alcanzar valores cercanos a 25 °C. Posteriormente, el gradiente térmico se mantuvo prácticamente constante.

La generación y mantenimiento de este gradiente térmico resulta fundamental para el proceso de captación de agua atmosférica, ya que permite que la superficie fría opere a temperaturas inferiores al punto de rocío, favoreciendo la condensación del vapor de agua sobre los disipadores de aluminio.

4.2. Resultados de captación de agua atmosférica

Con el propósito de evaluar el desempeño del sistema de captación de agua atmosférica bajo diferentes condiciones ambientales, se realizaron pruebas experimentales en dos intervalos horarios: de 00:19 a 01:19 horas y de 14:12 a 15:12 horas. Durante la primera prueba (00:19–01:19 h), se registraron un total de 720 mediciones con un intervalo de muestreo de 4 segundos entre cada lectura, utilizando un sistema de adquisición de datos con almacenamiento en memoria microSD.

Los valores registrados al inicio y al final de la prueba se presentan en la **Tabla 4.1**.

Tabla 4.1 Parámetros registrados durante la prueba 1.

	Inicio	Final
Fecha	21/05/2024	21/05/2024
Hora	00:19:59	01:19:09
Temperatura celdas Peltier (°C)	7.25	7.75
Temperatura 1, parte superior (°C)	30.87	30.19
Temperatura 2, parte inferior (°C)	29.69	29.44
Temperatura ambiente (°C)	30.8	30.2
Humedad relativa (%)	45	47
Temperatura promedio (°C)	30.28	29.81
Temperatura punto de rocío (°C)	17.00	17.3

Los resultados obtenidos muestran que la temperatura de las celdas Peltier se mantuvo entre 7.25 °C y 7.75 °C durante todo el periodo de evaluación. Estos valores fueron considerablemente inferiores a la temperatura de punto de rocío calculada, la cual osciló entre 17.0 °C y 17.3 °C. La diferencia térmica cercana a 10 °C entre la superficie de condensación y el punto de rocío evidencia que el sistema fue capaz de generar y mantener las condiciones necesarias para favorecer la condensación del vapor de agua presente en el aire.

Por otra parte, la temperatura ambiente presentó una ligera disminución, pasando de 30.8 °C al inicio de la prueba a 30.2 °C al finalizar. De igual forma, la temperatura

promedio registrada dentro del sistema descendió de 30.28 °C a 29.81 °C. La humedad relativa se mantuvo relativamente estable, registrando valores entre 45 % y 47 %, condiciones que permitieron una operación continua del proceso de condensación.

La combinación de una superficie fría con temperaturas inferiores al punto de rocío y una humedad relativa cercana al 50 % favoreció la formación constante de gotas de agua sobre los disipadores del lado frío como se observa en la **Figura 4.1**.

Durante esta prueba se obtuvo una producción de 15 mL de agua en un periodo de una hora. Considerando las condiciones ambientales registradas, así como la diferencia térmica alcanzada entre la temperatura de condensación y el punto de rocío, los resultados confirman que el prototipo fue capaz de inducir la condensación del vapor de agua.

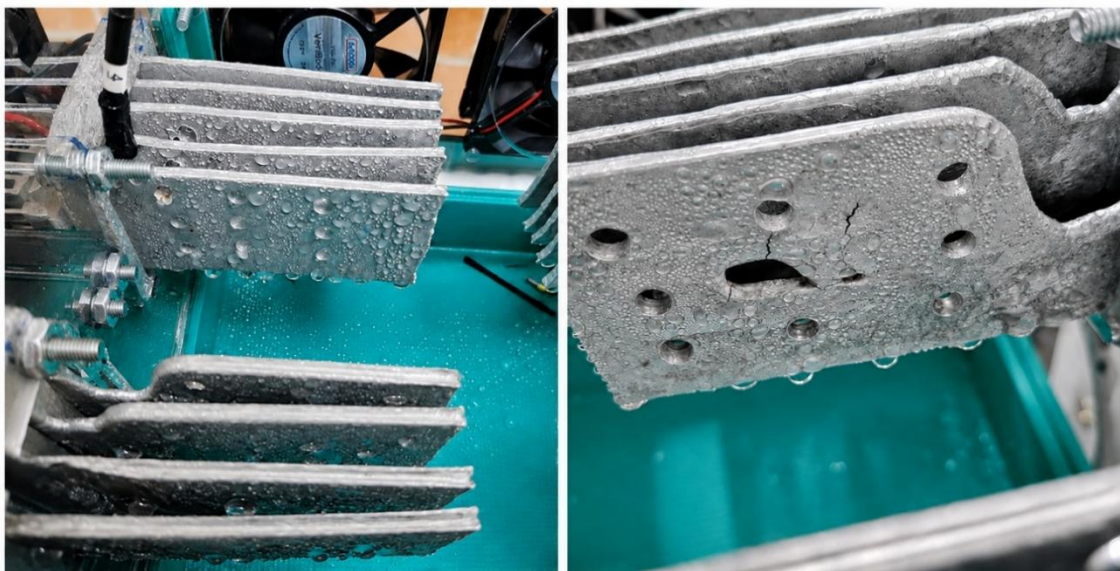
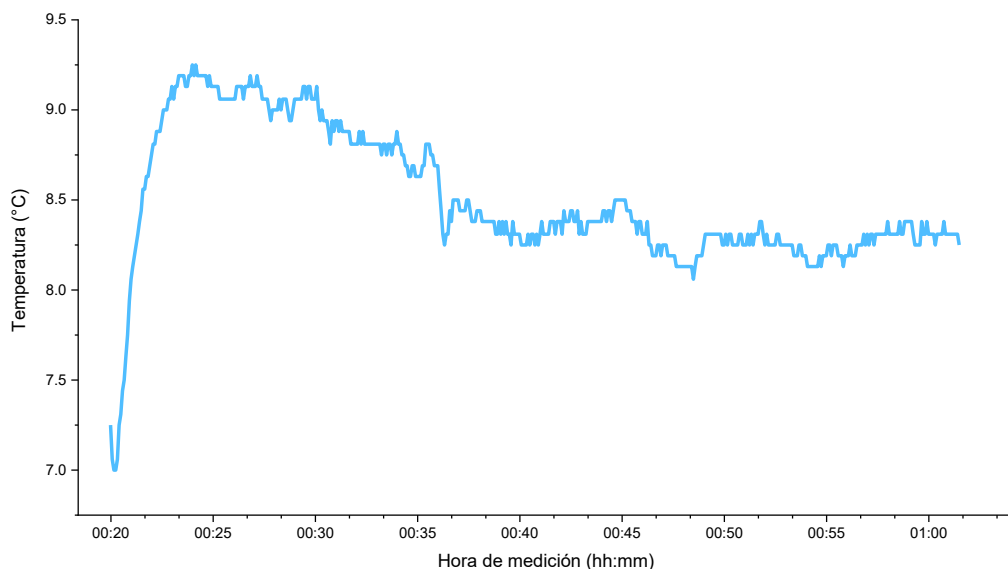


Figura 4.1. Formación de gotas de agua en los disipadores del lado frío del sistema, resultado de la condensación del vapor de agua atmosférico-inducida por las celdas Peltier [fuente: elaboración propia].

Como se aprecia en la **Gráfica 4.4**, la temperatura del lado frío de la celda Peltier registró un incremento inicial desde aproximadamente 7.0 °C hasta 9.2 °C, asociado al proceso de estabilización térmica del sistema. Posteriormente, la temperatura

disminuyó gradualmente y se mantuvo en un intervalo cercano a 8.1–8.4 °C durante la mayor parte de la prueba. Este comportamiento evidencia que el sistema alcanzó un régimen de operación estable, sin fluctuaciones significativas que comprometieran el proceso de condensación.

Asimismo, la temperatura de la superficie fría permaneció varios grados por debajo del punto de rocío calculado para las condiciones ambientales registradas, lo que permitió mantener una diferencia térmica suficiente para promover la condensación del vapor de agua de forma continua y garantizar la captación sostenida de agua atmosférica.



Gráfica 4.4. Comportamiento de la temperatura del lado frío de la celda Peltier durante la Prueba 1

Para la segunda prueba experimental, realizada entre las 14:12 y las 15:12 horas, se mantuvo el mismo esquema de adquisición de datos empleado en la prueba anterior, registrándose un total de 720 mediciones con un intervalo de muestreo de 4 segundos entre cada lectura. Los datos fueron almacenados automáticamente en una memoria microSD para su posterior análisis. Los valores iniciales y finales de las variables monitoreadas se presentan en la **Tabla 4.2**.

Tabla 4.2. Parámetros registrados durante la prueba 2.

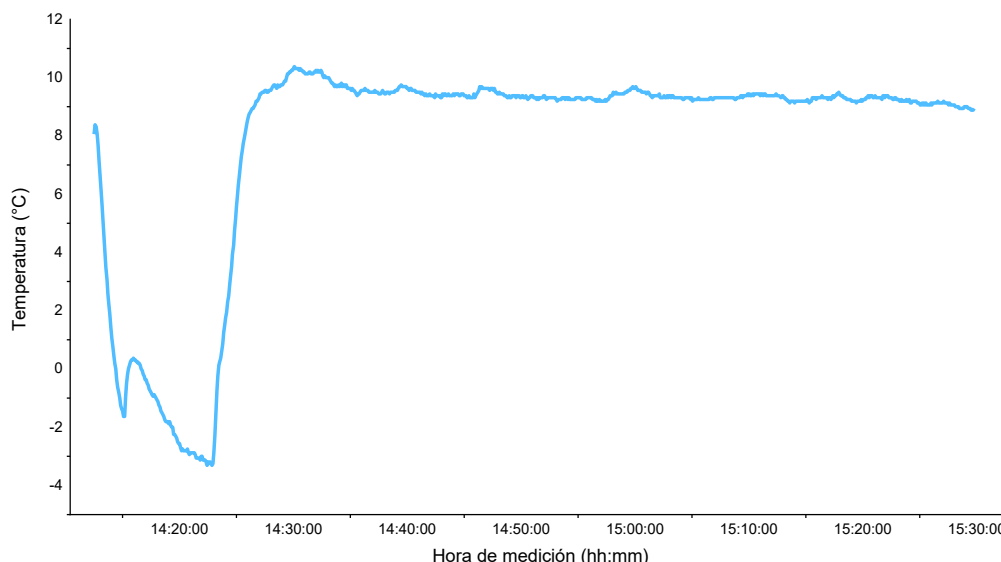
	<i>Inicio</i>	<i>Final</i>
Fecha	07/06/2024	07/06/2024
Hora	14:12:25	15:12:02
Temperatura celdas Peltier (°C)	7.25	9.38
Temperatura 1, parte superior (°C)	27.50	28.37
Temperatura 2, parte inferior (°C)	28.44	29.44
Temperatura ambiente (°C)	27.9	27.6
Humedad relativa (%)	57	61
Temperatura promedio (°C)	27.96	28.19
Temperatura punto de rocío (°C)	18.6	19.99

De acuerdo con los resultados obtenidos, la temperatura de las celdas Peltier se mantuvo en un intervalo comprendido entre 7.25 °C y 9.38 °C durante todo el periodo de evaluación. Por su parte, la temperatura de punto de rocío calculada a partir de las condiciones ambientales osciló entre 18.6 °C y 19.99 °C, valores superiores a los registrados en la prueba nocturna debido al incremento de la humedad relativa, la cual pasó de 57 % a 61 %.

La temperatura ambiente permaneció relativamente estable, registrando valores entre 27.9 °C y 27.6 °C, mientras que la temperatura promedio medida en el interior del sistema presentó una ligera variación de 27.96 °C a 28.19 °C. Asimismo, las temperaturas medidas en la parte superior e inferior del sistema mostraron incrementos moderados, atribuibles a la carga térmica generada durante la operación continua de las celdas termoeléctricas.

Como se muestra en la **Gráfica 4.5**, durante los primeros minutos de operación la temperatura del lado frío de la celda Peltier disminuyó rápidamente hasta alcanzar un valor mínimo de aproximadamente -3.2 °C. Posteriormente, la temperatura aumentó gradualmente debido a la transferencia de calor desde el ambiente hacia la superficie fría, estabilizándose alrededor de 9 °C. A partir de este punto, el sistema presentó un comportamiento térmico estable, manteniendo condiciones adecuadas

para la condensación durante todo el periodo de evaluación. A pesar de que las temperaturas registradas fueron ligeramente mayores que las observadas en la prueba nocturna, la diferencia respecto al punto de rocío permaneció superior a 10 °C, lo que permitió conservar una capacidad de condensación favorable y asegurar la producción continua de agua condensada.



Gráfica 4.5. Comportamiento de la temperatura del lado frío de la celda Peltier durante la Prueba 2

Durante la primera prueba experimental se obtuvo una captación de 15 mL de agua en un periodo de una hora, mientras que en la segunda prueba se recolectaron 14 mL en el mismo intervalo. Aunque la producción registrada en la segunda evaluación fue ligeramente menor, la diferencia entre ambas mediciones fue mínima, lo que evidencia un comportamiento consistente del sistema bajo distintas condiciones ambientales. En conjunto, las pruebas arrojaron una producción promedio de 14.5 mL/h, demostrando que el prototipo fue capaz de mantener el proceso de condensación de manera continua y estable. Estos resultados indican una adecuada reproducibilidad del sistema y confirman su capacidad para captar agua atmosférica de forma sostenida dentro de los rangos de temperatura y humedad evaluados.

Una vez concluidas las pruebas de una hora de duración, se llevó a cabo una evaluación de larga duración con el propósito de analizar el comportamiento del sistema bajo condiciones de operación continua. Para ello, el prototipo permaneció en funcionamiento durante 12 horas ininterrumpidas el día 10 de septiembre de 2024.

Durante este periodo se registraron de forma automática 40,438 mediciones, correspondientes a variables como la temperatura ambiente, la humedad relativa, la temperatura de las celdas Peltier y el punto de rocío calculado. La información fue almacenada en una memoria microSD para su posterior análisis.

La **Tabla 4.3**, muestra los valores iniciales y finales registrados durante la prueba de operación continua de 12 horas. A partir de estos datos puede observarse que las condiciones ambientales variaron significativamente a lo largo del periodo de evaluación. La temperatura ambiente disminuyó de 30.8 °C al inicio de la prueba a 22.4 °C al finalizar, lo que representa una reducción de aproximadamente 8.4 °C. De manera similar, la temperatura promedio del aire dentro del sistema pasó de 30.28 °C a 21.69 °C.

Las temperaturas medidas en la parte superior e inferior de la cámara también mostraron una disminución progresiva, siguiendo la tendencia de enfriamiento del ambiente conforme transcurrió la prueba. Por su parte, la temperatura del lado frío de la celda Peltier se mantuvo en valores bajos durante todo el periodo, pasando de 5.88 °C al inicio a 2.21 °C al final de la evaluación.

En cuanto a la humedad relativa, esta permaneció prácticamente constante en 67 %, mientras que el punto de rocío calculado disminuyó de 18.66 °C a 16.31 °C, como consecuencia de la reducción de la temperatura ambiente. A pesar de estas variaciones, la temperatura de las celdas Peltier se mantuvo considerablemente por debajo del punto de rocío durante toda la prueba, conservando una diferencia térmica superior a 10 °C, condición que favorece la condensación continua del vapor de agua atmosférico.

Tabla 4.3. Valores iniciales y finales de temperatura, humedad relativa y punto de rocío registrados durante la prueba de operación continua del prototipo.

Fecha	Hora	Temperatura celda Peltier(°C)	Temperatura Parte superior(°C)	Temperatura Parte inferior (°C)	Temperatura ambiente (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura promedio (°C)	Temperatura punto de rocío(°C)
10/09/2024	14:20:19	5.88	30.87	29.69	30.8	67	30.28	18.66
10/09/2024	2:19:09	2.21	21.69	21.81	22.40	67	21.69	16.31

Una vez analizados los datos experimentales, se realizó una simulación térmica del módulo. La finalidad de esta simulación fue analizar la distribución de temperatura en los disipadores y verificar que el sistema mantuviera la superficie de condensación por debajo del punto de rocío durante todo el periodo de evaluación.

La **Figura 4.2 (a)** presenta la distribución de temperatura correspondiente al inicio de la prueba, considerando una temperatura ambiente de **30.8 °C**, una temperatura del lado frío de **5.88 °C** y una temperatura del lado caliente cercana a **29 °C**. Se observa un gradiente térmico claramente definido entre ambos disipadores, donde las mayores temperaturas se concentran en el disipador del lado caliente, mientras que el disipador del lado frío permanece a temperaturas considerablemente menores, condición necesaria para iniciar el proceso de condensación.

Por otra parte, la **Figura 4.2 (b)** muestra la simulación realizada con las condiciones registradas al finalizar la prueba, cuando la temperatura ambiente disminuyó a 22.4 °C y la temperatura del lado frío alcanzó 2.21 °C. A pesar de la disminución de la temperatura ambiente, el comportamiento térmico del sistema se mantuvo estable, observándose nuevamente una adecuada transferencia de calor desde la cara fría hacia la cara caliente de la celda Peltier. De igual manera, la temperatura del disipador frío permaneció muy por debajo del punto de rocío (16.31 °C), favoreciendo la condensación continua del vapor de agua presente en el aire.

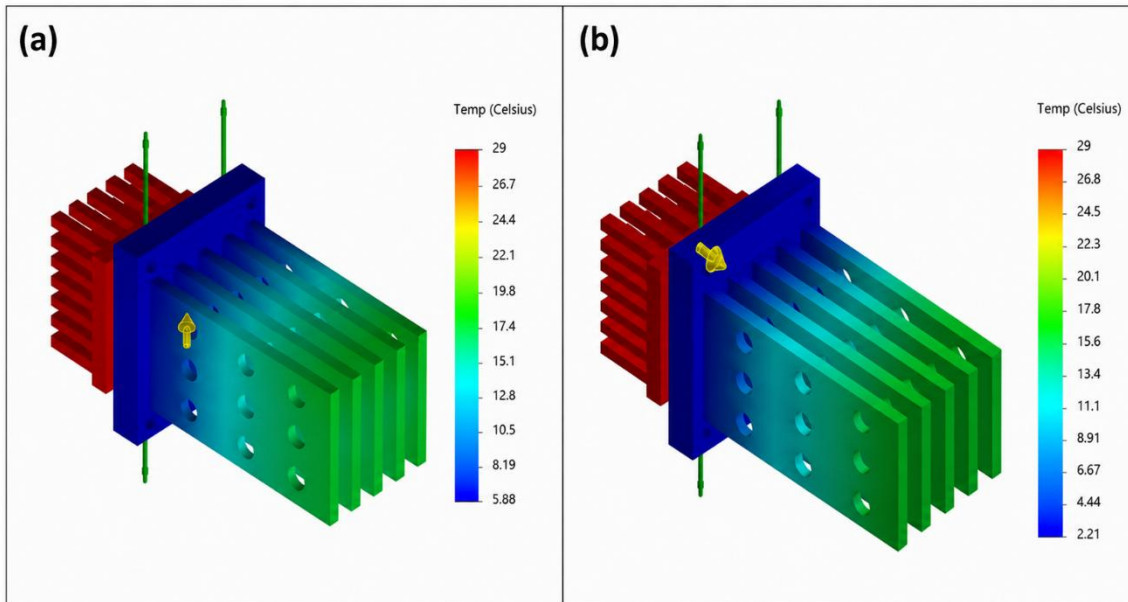


Figura 4.2. Distribución de temperatura del módulo de condensación obtenida mediante SolidWorks Simulación bajo las condiciones experimentales registradas (a) al inicio de la prueba (14:20 h) y (b) al finalizar la prueba de operación continua de 12 horas (02:19 h).

Estos resultados concuerdan con las mediciones experimentales y confirman la capacidad del sistema para mantener la superficie de condensación por debajo del punto de rocío, condición indispensable para la producción continua de agua atmosférica.

Durante esta prueba de operación continua se obtuvo una captación aproximada de 120 mL de agua en un periodo de 12 horas, lo que equivale a una tasa promedio de producción cercana a 10 mL/h. Con el objetivo de verificar la reproducibilidad y consistencia del sistema, la prueba fue repetida en dos ocasiones adicionales, los días 15 y 17 de septiembre, manteniendo las mismas condiciones generales de operación.

Los resultados obtenidos en estas evaluaciones complementarias fueron similares, registrándose volúmenes de agua condensada comprendidos entre 100 y 120 mL al término de las 12 horas de funcionamiento.

Estos resultados confirman la capacidad del sistema para mantener el proceso de condensación durante periodos prolongados de operación, conservando una producción constante de agua atmosférica.

4.3. Pruebas de alcalinidad y dureza del agua captada

Una vez concluida la captación de agua atmosférica, se realizaron mediciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura, así como pruebas de alcalinidad y dureza, con el objetivo de evaluar las propiedades fisicoquímicas del agua obtenida mediante el sistema de condensación. Para ello, se analizaron muestras correspondientes a las tres pruebas de captación realizadas. Los resultados obtenidos se presentan en la **Tabla 4.4** para alcalinidad y **Tabla 4.5** para dureza.

Tabla 4.4. Parámetros y resultados de alcalinidad de las muestras de agua captada.

Fecha	Muestra(ml)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/m)	Ácido sulfúrico(ml)	Alcalinidad	pH alcalinidad	Reactivo
10-sep-24	45	6	21	119.8	1.1	24.44	6	naranja de metilo
15-sep-24	45	6	25	36.6	0.3	6.6	6	naranja de metilo
17-sep-24	45	6.5	24	24	0.2	4.44	6	naranja de metilo

Tabla 4.5. Parámetros y resultados de dureza de las muestras de agua captada.

Fecha	Muestra(ml)	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (μS/m)	EDTA	Dureza	pH dureza	Reactivo	buffer(ml)
10-sep-24	35	6	25	125.1	0.7	15.41	11	negro de eriocromo	2
15-sep-24	45	6	25	36.6	0.25	5.5	11	negro de eriocromo	2
17-sep-24	45	6	25	24	0.2	4.44	11	negro de eriocromo	2

La determinación de la alcalinidad se efectuó mediante una titulación ácido-base utilizando anaranjado de metilo como indicador, mientras que la dureza total se determinó mediante una valoración con EDTA y negro de eriocromo como indicador. Las **Figura 4.3** y **Figura 4.4** muestran las principales etapas de los procedimientos experimentales empleados para ambas determinaciones. En la **Figura 4.3** se presenta el método utilizado para la prueba de alcalinidad, incluyendo la muestra de agua captada, la adición del indicador y la reacción observada durante la titulación con ácido sulfúrico. Por su parte, la **Figura 4.4** muestra el procedimiento seguido para la determinación de la dureza, donde se observa la muestra de agua, la adición

del negro de eriocromo y el cambio de color producido al alcanzar el punto final de la titulación con EDTA.

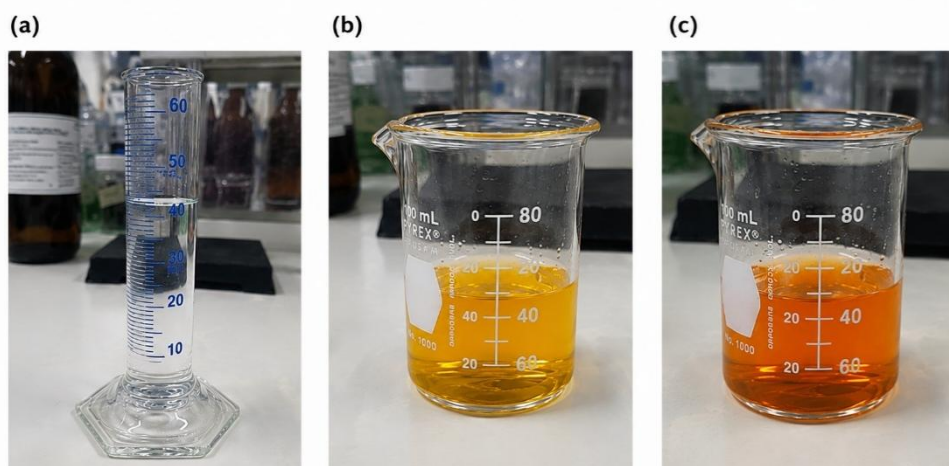


Figura 4.3. Procedimiento utilizado para la determinación de la alcalinidad del agua captada: (a) muestra de agua condensada (45 mL), (b) adición de anaranjado de metilo, (c) reacción de la muestra

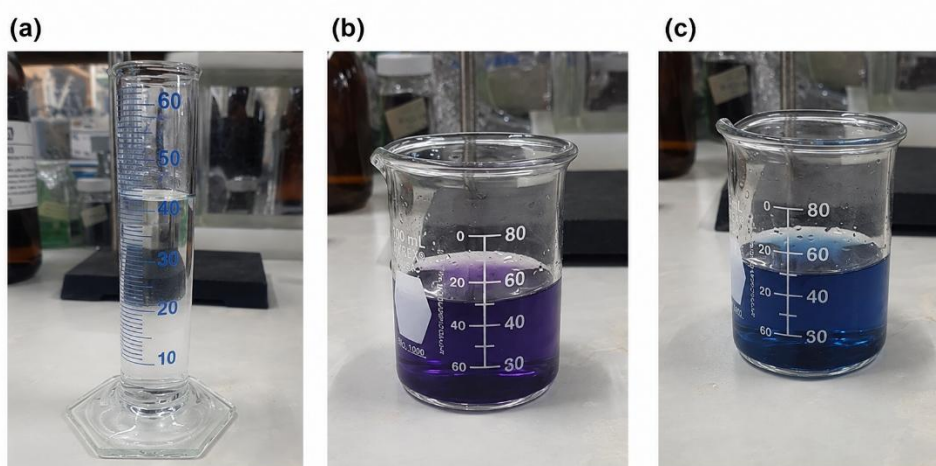


Figura 4.4. Procedimiento empleado para la determinación de la dureza del agua captada: (a) muestra de agua condensada (45 mL), (b) adición de negro de eriocromo como indicador y (c) reacción de la muestra durante la titulación con EDTA para la determinación de la dureza total

Los resultados obtenidos muestran que el agua captada mediante el sistema de condensación atmosférica presenta una baja concentración de sales y minerales disueltos. Los valores de alcalinidad determinados para las muestras analizadas oscilaron entre 4.44 y 24.44 mg/L como CaCO_3 , mientras que la dureza total se

encontró en un intervalo de 4.44 a 15.41 mg/L como CaCO_3 . Estos valores son considerablemente inferiores a los reportados comúnmente para aguas superficiales y subterráneas, las cuales suelen contener mayores concentraciones de minerales provenientes del contacto con suelos y formaciones geológicas.

La baja alcalinidad observada indica una capacidad amortiguadora reducida frente a cambios de pH, característica esperada en el agua obtenida por condensación atmosférica debido a la escasa presencia de bicarbonatos y carbonatos. De manera similar, los bajos valores de dureza reflejan una concentración mínima de calcio y magnesio, principales responsables de este parámetro.

De acuerdo con la clasificación de dureza en función de la concentración de CaCO_3 , todas las muestras analizadas pueden clasificarse como agua blanda, ya que los valores obtenidos fueron inferiores a 17 mg/L como CaCO_3 . Este comportamiento es consistente con el origen del agua captada, puesto que el proceso de condensación del vapor atmosférico genera agua con una baja concentración de minerales disueltos.

Adicionalmente, las muestras presentaron valores de pH comprendidos entre 6.0 y 6.5, lo que indica un carácter ligeramente ácido. Este comportamiento es característico del agua obtenida mediante condensación atmosférica, ya que durante su formación puede absorber dióxido de carbono presente en el aire, formando pequeñas cantidades de ácido carbónico y provocando una ligera disminución del pH. No obstante, los valores registrados se mantienen cercanos a la neutralidad.

Por otra parte, la conductividad eléctrica osciló entre 24 y 125.1 $\mu\text{S}/\text{cm}$, evidenciando una baja concentración de sales y minerales disueltos. Esta característica es consistente con los resultados de alcalinidad y dureza obtenidos, los cuales también mostraron valores reducidos.

En conjunto, los resultados obtenidos confirman que el sistema desarrollado es capaz de producir agua con un bajo contenido de sales minerales, presentando características similares a las del agua destilada. Sin embargo, debido a sus bajos

valores de alcalinidad y dureza, podría ser recomendable considerar un proceso de remineralización en aplicaciones destinadas al consumo humano continuo, con el fin de mejorar sus propiedades químicas, nutricionales y organolépticas.

4.4 Eficiencia energética y costo de producción del agua captada

Para evaluar la eficiencia energética del sistema desarrollado, se consideró el consumo eléctrico de los principales componentes del prototipo, integrado por cuatro celdas Peltier de 12 W cada una y diez ventiladores de 12 V con una potencia de 2.5 W por unidad. En conjunto, estos elementos representan una potencia instalada aproximada de 73 W.

Durante la prueba de operación continua de 12 horas, el sistema consumió aproximadamente 0.876 kWh de energía eléctrica y produjo 120 mL de agua condensada. A partir de estos valores se determinó un consumo energético específico de 7.3 kWh por litro de agua captada.

Considerando una tarifa eléctrica residencial comprendida entre 0.98 y 1.15 MXN/kWh, el costo estimado de producción del agua obtenida mediante el sistema de condensación atmosférica se encuentra entre 7.15 y 8.40 MXN por litro. Estos resultados muestran que, aunque el sistema requiere un consumo energético significativo para generar agua a partir de la humedad ambiental, el costo de producción se mantiene dentro de un rango accesible para aplicaciones de pequeña escala.

Asimismo, los resultados obtenidos permiten identificar áreas de oportunidad para incrementar la eficiencia del sistema, principalmente mediante la optimización de la transferencia de calor, la mejora del aislamiento térmico y el aumento de la tasa de condensación sin incrementar el consumo energético.

Capítulo 5

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

En el presente trabajo se diseñó, construyó y evaluó un sistema autónomo para la captación de agua atmosférica mediante el empleo de celdas Peltier, con el propósito de aprovechar la humedad presente en el ambiente como una fuente alternativa de agua. Los resultados obtenidos demuestran la viabilidad técnica del sistema para producir agua condensada bajo diferentes condiciones ambientales.

El prototipo desarrollado integró módulos de condensación, ventilación, monitoreo y almacenamiento de datos, permitiendo el control y seguimiento de variables como temperatura, humedad relativa y punto de rocío. La implementación de sensores y sistemas de registro permitió evaluar el comportamiento térmico del sistema y verificar que las temperaturas alcanzadas por las superficies de condensación permanecieran por debajo del punto de rocío durante la operación, condición indispensable para la formación de agua condensada.

1. Las pruebas experimentales realizadas mostraron una producción de agua de entre 14 y 15 mL/h en evaluaciones de una hora de duración. Asimismo, en pruebas de operación continua de 12 horas se obtuvieron volúmenes de captación comprendidos entre 100 y 120 mL, confirmando la capacidad del sistema para mantener el proceso de condensación durante periodos prolongados y evidenciando un comportamiento estable y reproducible.
2. Los resultados de caracterización fisicoquímica indicaron que el agua obtenida presenta valores bajos de alcalinidad y dureza, con concentraciones entre 4.44 y 24.44 mg/L como CaCO_3 y 4.44 a 15.41 mg/L como CaCO_3 , respectivamente. De igual manera, los valores de pH se encontraron entre 6.0 y 6.5, mientras que la conductividad eléctrica osciló entre 24 y 125.1 $\mu\text{S/cm}$, lo que evidencia una baja concentración de sales minerales disueltas. Estas características son consistentes con las esperadas para el agua obtenida mediante condensación atmosférica.

3. Desde el punto de vista energético, el sistema presentó un consumo aproximado de 0.876 kWh durante una prueba de 12 horas de operación continua, equivalente a un consumo específico de 7.3 kWh por litro de agua producido. Considerando tarifas eléctricas residenciales, el costo estimado de producción se encontró entre 7.15 y 8.40 MXN por litro, proporcionando una referencia para futuras optimizaciones orientadas a mejorar la eficiencia energética del sistema.

Finalmente, se concluye que la captación de agua atmosférica mediante celdas Peltier constituye una alternativa técnicamente viable para la obtención de agua en zonas con disponibilidad limitada de recursos hídricos convencionales. Aunque la producción obtenida es modesta, los resultados demuestran el potencial de esta tecnología y establecen una base para futuras investigaciones.

5.2. Recomendaciones

Con base en los resultados obtenidos durante el desarrollo y evaluación del sistema de captación de agua atmosférica, se proponen las siguientes recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras del prototipo:

1. Optimizar el sistema de transferencia de calor, mediante el uso de disipadores con mayor área superficial o materiales con mejores propiedades térmicas, con el fin de incrementar la capacidad de condensación y mejorar la producción de agua.
2. Implementar estrategias de control más avanzadas, como algoritmos PID o control adaptativo, que permitan regular de manera más eficiente el funcionamiento de las celdas Peltier en función de las condiciones ambientales y del punto de rocío.
3. Evaluar el uso de fuentes de energía renovable, particularmente sistemas fotovoltaicos, para alimentar el prototipo y reducir los costos de operación, favoreciendo su implementación en zonas aisladas o con acceso limitado a la red eléctrica.

4. Realizar pruebas en diferentes condiciones climáticas, incluyendo distintas épocas del año, niveles de humedad relativa y temperaturas ambientales, con el propósito de determinar el comportamiento del sistema bajo escenarios más diversos y establecer su potencial de aplicación en distintas regiones.
5. Incrementar la capacidad de producción del sistema mediante la incorporación de un mayor número de módulos de condensación o el escalamiento de las superficies de intercambio térmico, manteniendo un equilibrio adecuado entre producción de agua y consumo energético.
6. Ampliar la caracterización de la calidad del agua obtenida, incorporando análisis microbiológicos y parámetros fisicoquímicos adicionales, tales como sólidos disueltos totales, turbidez, oxígeno disuelto y contenido de metales, con el fin de evaluar su aptitud para diferentes aplicaciones.
7. Incorporar sistemas de monitoreo remoto e Internet de las Cosas (IoT) que permitan supervisar en tiempo real variables como temperatura, humedad, producción de agua y consumo energético, facilitando la gestión y mantenimiento del sistema.
8. Desarrollar modelos predictivos basados en Redes Neuronales Artificiales (RNA) para estimar la cantidad de agua que puede ser captada en función de variables ambientales como temperatura, humedad relativa, punto de rocío, velocidad del viento y radiación solar. La implementación de estas herramientas permitiría optimizar la operación del sistema, anticipar periodos de mayor producción y mejorar la toma de decisiones para el control energético del prototipo.

La implementación de estas recomendaciones permitirá mejorar el desempeño del prototipo, incrementar la producción de agua condensada y contribuir al desarrollo de sistemas más eficientes y sostenibles para el aprovechamiento de la humedad atmosférica como fuente alternativa de abastecimiento de agua.

Referencias

- [1] UNESCO. (2023). *Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2023: Asociación y cooperación para el agua*. UNESCO. <https://www.unesco.org/es/days/water-day>
- [2] Sanaye, S., Shourabi, A., & Borzuei, D. (2023). Sustainable water production with an innovative thermoelectric-based atmospheric water harvesting system. *Energy Reports*, 10, 1339–1355.
- [3] Gómez, J., & García, F. (2021). Diseño y evaluación de un sistema de captación de agua atmosférica basado en módulos Peltier. *Revista de Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12(2), 55–64.
- [4] López, R., & Martínez, A. (2020). Controladores PID aplicados a sistemas de refrigeración con celdas termoeléctricas. *Ingeniería Electrónica Aplicada*, 18(1), 22–30.
- [5] Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2022). *Estadísticas del agua en México 2022*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/conagua>
- [6] Instituto de Recursos Mundiales (WRI). (s.f.). *World Resources Institute*. <https://es.wri.org/>
- [7] Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de las Naciones Unidas (WWAP). (2021). *El valor del agua: Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo 2021*. UNESCO. <https://www.unwater.org/publications>
- [8] United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Freshwater strategy 2020–2025: A framework for action*. UNEP. <https://www.unep.org/resources/freshwater-strategy-2020-2025>
- [9] United States Geological Survey (USGS). (s.f.). *Where is Earth's water?* U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/where-earths-water>

- [10] Shafeian, N., Dehghan, A. A., & Amanowicz, Ł. (2021). Design and implementation of a new portable hybrid solar atmospheric water-generation system. *Journal of Cleaner Production*, 281, 125233. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125233>
- [11] Aly, A. A., Kabeel, A. E., & Omara, Z. M. (2022). Advancements in active atmospheric water harvesting systems: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159, 112215. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112215>
- [12] World Health Organization. (2021). *Water, sanitation and hygiene: Strategy 2021–2025*. WHO. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240029392>
- [13] Noar Sensors. (2023). *Formación de gotas por condensación* [Imagen]. Noar Sensors Artículos. <https://noarsensors.com>
- [14] Kabeel, A. E., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2019). Water recovery from air using renewable energy-driven systems: A review. *Energy Conversion and Management*, 199, 111973. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111973>
- [15] Ahmed, A., Mohammed, A., & Bawazir, S. (2023). A review on IoT-based smart environmental monitoring and water harvesting systems. *Journal of Cleaner Production*, 389, 136110. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136110>
- [16] Zhou, Y., Zheng, Y., & Huang, L. (2020). Design and control of a thermoelectric cooling-based atmospheric water generator. *Renewable Energy*, 162, 1190–1202. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.108>
- [17] Sharan, G., Clus, O., Singh, S., & Muselli, M. (2017). A review of fog water collection as a sustainable source of water in arid and semi-arid regions. *Water Supply*, 17(6), 1498–1511.
- [18] Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–233. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>

- [19] Stull, R. (2017). *Practical meteorology: An algebra-based survey of atmospheric science*. University of British Columbia. https://www.eoas.ubc.ca/books/Practical_Meteorology
- [20] Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [21] Kalogirou, S. A. (2005). Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 31(3), 242–281. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2005.03.001>
- [22] Wang, J., Zhang, L., & Zhao, Y. (2019). Performance analysis of thermoelectric cooling systems for water harvesting from air. *Applied Thermal Engineering*, 148, 133–142. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.11.063>
- [23] Saad, F. A. (2020). *Generador de agua atmosférica con elementos Peltier* [Ilustración]. Shutterstock. <https://www.shutterstock.com>
- [24] Venkatesan, R., & Ramesh, R. (2020). Experimental investigation of thermoelectric cooling module for atmospheric water generation. *Materials Today: Proceedings*, 33, 457–462. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.276>
- [25] Beysens, D. (2018). Dew water harvesting for drinking water production. *Journal of Water and Climate Change*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.2166/wcc.2017.008>
- [26] Tu, Y., Wang, R., Zhang, Y., & Wang, J. (2018). Progress and expectation of atmospheric water harvesting. *Joule*, 2(8), 1452–1475. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.07.015>
- [27] Schemenauer, R. S., & Cereceda, P. (1994). A proposed standard fog collector for use in high-elevation regions. *Journal of Applied Meteorology*, 33(11), 1313–1322. <https://doi.org/10.1175/1520-0450>
- [28] Martos. (2009). *Sistema de captación de agua de niebla* [Ilustración]. ResearchGate. <https://www.researchgate.net>

- [29] Kim, H., Yang, S., Rao, S. R., Narayanan, S., Kapustin, E. A., Furukawa, H., & Yaghi, O. M. (2017). Water harvesting from air with metal-organic frameworks powered by natural sunlight. *Science*, 356(6336), 430–434. <https://doi.org/10.1126/science.aam8743>
- [30] Kim, H., Rao, S. R., Kapustin, E. A., Zhao, L., Yang, S., Yaghi, O. M., & Wang, E. N. (2018). Adsorption-based atmospheric water harvesting device for arid climates. *Nature Communications*, 9, 1191. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03162-7>
- [31] ElectronicsHub. (2024). *DHT11 temperature and humidity sensor: Features, specifications and applications*. <https://www.electronicshub.org>
- [32] uElectronics. (s.f.). *DHT11 sensor de temperatura y humedad KY-015*. <https://uelectronics.com/producto/dht11-sensor-de-temperatura-y-humedad-ky-015/>
- [33] Components101. (2022). *DHT11 temperature and humidity sensor: Working and applications*. <https://components101.com>
- [34] Maxim Integrated. (2021). *DS18B20 programmable resolution 1-Wire digital thermometer* (Datasheet). Analog Devices. <https://www.analog.com>
- [35] LastMinuteEngineers. (2023). *DS18B20 temperature sensor with Arduino: Tutorial and technical specifications*. <https://lastminuteengineers.com>
- [36] ResearchGate. (2024). *Figura 4.4. Diagrama de pines del sensor DS18B20* [Imagen]. https://www.researchgate.net/figure/Figura-4-4-Diagrama-de-pines-del-sensor-de-Temperatura-DS18B20_fig9_382367755
- [37] Analog Devices. (2021). *DS18B20 programmable resolution 1-Wire digital thermometer* (Datasheet). <https://www.analog.com>
- [38] Programar Fácil. (2024). *Sensor de temperatura DS18B20 con Arduino*. <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>

- [39] Arduino. (2023). *Arduino Mega 2560 Rev3: Technical specifications*. Arduino Documentation. <https://docs.arduino.cc>
- [40] DevBoards. (2024). *Arduino Mega 2560 Rev3*. <https://devboards.info/boards/arduino-mega2560-rev3>
- [41] Monk, S. (2021). *Programming Arduino: Getting started with sketches* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- [42] ElectronicsHub. (2022). *Relay module working and interfacing with microcontrollers*. <https://www.electronicshub.org>
- [43] Songle Electronics. (s.f.). *SRD-05VDC-SL-C relay module* [Fotografía]. Alldatasheet. <https://www.alldatasheet.com>
- [44] LastMinuteEngineers. (2023). *Relay module with Arduino: Working and interfacing tutorial*. <https://lastminuteengineers.com>
- [45] Shilpa, M. K., Raheman, M. A., Aabid, A., Baig, M., Veerasha, R. K., & Kudva, N. (2022). A systematic review of thermoelectric Peltier devices: Applications and limitations. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*. <https://doi.org/10.32604/fdmp.2022.020351>
- [46] Profesional Review. (2018, 16 de octubre). *Estructura interna de una célula termoeléctrica* [Infografía]. <https://www.profesionalreview.com>
- [47] Gong, X., Qian, R., Xue, H., Lu, W., & An, Z. (2021). *Progress of microscopic thermoelectric effects studied by micro- and nano-thermometric techniques*. arXiv.
- [48] Luo, J., & Lee, J. (2024). *Machine learning-assisted thermoelectric cooling for thermal management*. arXiv.
- [49] Analog Devices. (2023). *Thermoelectric cooling and Peltier devices: Fundamentals and applications*. Analog Devices Technical Documentation.
- [50] Liu, W., Yan, X., Chen, G., & Ren, Z. (2021). Recent advances in thermoelectric materials and devices. *Materials Today Physics*, 20, 100394.

- [51] LastMinuteEngineers. (2023). *SD card module with Arduino: Data logging tutorial*. <https://lastminuteengineers.com>
- [52] uElectronics. (s.f.). *Lector de memorias micro SD para Arduino*. <https://uelectronics.com/producto/lector-de-memorias-micro-sd-para-arduino/>
- [53] Random Nerd Tutorials. (2022). *DS3231 RTC module with Arduino: Complete guide*. <https://randomnerdtutorials.com>
- [54] Adafruit Industries. (s.f.). *DS3231 High Precision RTC Pinout* [Ilustración]. Adafruit Learning System. <https://learn.adafruit.com>
- [55] Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2020). *Heat and mass transfer: Fundamentals and applications* (6th ed.). McGraw-Hill Education.
- [56] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2021). *Fundamentals of heat and mass transfer* (9th ed.). Wiley.
- [57] Holman, J. P. (2020). *Heat transfer* (11th ed.). McGraw-Hill Education.
- [58] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). Wiley.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

PROGRAMAS EDUCATIVOS DE CALIDAD RECONOCIDOS POR CIEES, CACEI Y SECIHTI

SGI Certificada en las Normas ISO 9001:2015, ISO 21001:2018 y NMX-R-025-SCFI-2015

FORMATO T-2

NOMBRAMIENTO DE COMISIÓN REVISORA

Y DICTAMEN DE REVISIÓN

Cuernavaca, Mor., a 02 de julio del 2026.

DR. ROY LÓPEZ SESENE (DIRECTOR)
DR. OUTMANE OUBRAM (CODIRECTOR)
DRA. MARÍA DEL CÁRMEN TORRES SALAZAR
DR. JOSÉ GERARDO VERA DIMAS
DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA
DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS
DR. MOHAMMED MINIYA
P R E S E N T E

Por este conducto, me permito informarle que ha sido asignado como integrante de la comisión revisora de la tesis que presenta Yair Alejandro Gutiérrez Álvarez titulado: SISTEMA AUTÓNOMO PARA LA CAPTACIÓN DE AGUA MEDIANTE AIRE ATMOSFÉRICO, realizada bajo la dirección del Dr. Roy López Sesenes y la Co-dirección del Dr. Outmane Oubram, del Programa Educativo del Doctorado en Ingeniería Ambiental y Tecnologías sustentables. Agradezco su valiosa participación en esta Comisión y quedo a sus órdenes para cualquier aclaración o duda al respecto.

ATENTAMENTE

Por una humanidad culta

DRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI

DICTAMEN

DRA. ANGELICA GALINDO FLORES
DIRECTORA DE LA FCQEI
P R E S E N T E

En respuesta a su amable solicitud para formar parte de la Comisión Revisora de la tesis mencionada y una vez realizada la revisión correspondiente, me permito informarle que mi VOTO es:

DICTAMEN

NOMBRE	VOTO	FIRMA
DR. ROY LÓPEZ SESENE	APROBADO	
DR. OUTMANE OUBRAM	APROBADO	
DRA. MARÍA DEL CÁRMEN TORRES SALAZAR	APROBADO	
DR. JOSÉ GERARDO VERA DIMAS	APROBADO	
DR. HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA	APROBADO	
DR. LUIS CISNEROS VILLALOBOS	APROBADO	
DR. MOHAMMED MINIYA	APROBADO	

Se anexan firmas electrónicas



Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209, Facultad de Ciencias
Químicas e Ingeniería, Tel. (777) 329 70 00, Ext. 7039/ fcqei@uaem.mx

UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

ANGELICA GALINDO FLORES | Fecha:2026-07-02 17:46:55 | FIRMANTE

awUd/c8lPo8/ctsklNMKOCAG4YrmAgVWCZ9On1HbU8+BURsDyaq1LgbQ8/jCHkC/d3DChg6WbrMd4j9k20KH937e9nXOfutlMyDhog3ssDyq'8lRqbl+KNy0RScS3dnGcl24aIF+qbbCmosCK97'INjGDdkRpkll4nm0ygsY/pqZ8zrU88nlGZJuaQ2Qr75ZojYQpylaF3gZ3UmuPZG8sQnd7A.7/R987GluHaEzjmNF1v3FaONyRlu1YEOWqdEPvgY6Px8dCqpw1PCotcJ2z9kblFBPCFQDJv69xGpOln571mwNMh1Qd2U5uNKQgEqEliUde8KzRLw==



Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:

8A36ZvYHm

<https://e.firma.uaem.mx/noReputido/hspTVqmgGDBv3y129XzrzGZBuB0hFAIT>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento con firma electrónica UAEM, soportada por el certificado vigente a la fecha de su elaboración y con efectos plenos de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS PUBLICADOS en el ÓRGANO INFORMATIVO UNIVERSITARIO "ADOLFO MENÉNDEZ SAMARÁ" número 117 de fecha 20 de abril de 2021.

Sello electrónico

JOSE GERARDO VERA DIMAS | Fecha:2026-07-02 20:09:27 | FIRMANTE

lyz2f9ArzcDD0dJdyqEj4t0DmMtyDua/GJwu3zpt+p301YsYR0jdRCF/20dCyJ56sktDcl8Zs8pvBA4pf17ZQIQkCSkhSaf0+gxu5AGBM5VmEfmkXUAJmPwGVVAhZwXUReeBPVP8BLKzhk/MLGEQ806+9l8HXBXM0Ne2xs2xwU5VEstMb2lyPvBEMmAfG21Ce+ZtkNvlqY/GxoqNO11rW8z4IN0anyHdV90IDkRE4CJPKRnJLr1VAI6popsDaEJDQYO1F3qBquUWd1831y4EoAccyMeLHsbz+5TCz8IEbA9B38f1rO9hpjKW0t4DqzUlkcpwS3Dw--

LUIS CISNEROS VILLALOBOS | Fecha:2026-07-02 20:56:29 | FIRMANTE

R3ZrEPVQ6V630d9BnARF6UvJzXeLCSW2Vpe69UvXjymXnVJ83ewnrGIMrncU3vLZsih9Aedbnw6dNqLn6VvkTnefHnXMSMH2IXIOVOkGYFuVNL536hKOnLHVwGW4tk0E bCe7wF84yNt+Tcd++ejwUwN11rNt7hzXQ0ol+avpKQn62uQJk55VzdeD4GL1DcQaekgJTNlUZYbR4pgvW6nVzHyhM8g0ZCdLzJKwNvnEi5nwkNpYdcoX157Pe8+rdgGg2Uit+pu3laLEONZza8e49S9mTODhdMfP02dYr+Ma5duMrywxKQ77e9AaZc0xeNqHVQXWbZ5CyEw--

OUTMANE OUBRAM | Fecha:2026-07-02 21:57:17 | FIRMANTE

bzS1SiU+98oKbZ6dY09dQ+U7LA0+cNdmX5g8yIz87Q2BcM6gBZ9Hkabh0wy+L165v+Uubx7G0ILbZ1yvoC6HBVzSLLiCBG6n0bkZhtv7yNW49Y4O9cJWY7iCzJB8NGAd7BRo oFJrOHYF3RpoY1YPP9CvKixlavIPYNLHD9fSkM8yApwo1b4aDMJ5pbAg4BsAM232kvpDITKMTibQFtcW2tRVWmCgYeTRQ6IL5QV294Wrks2AeFbi0dY9DTIUoEyPqrJhGcplD4 Gf8Y2Bx7eeJ6M5o53xXdiOubLDh41RtPRRDc7BDKLwMvWZc6UQs4y3FJae98HbQ2A--

ROY LOPEZ SESENE | Fecha:2026-07-02 22:27:51 | FIRMANTE

ZZ4Qxw9KLGNuG7iU9xWnPPZPfeFus/znt4fz7bPGv9r6CwekHoloU53hpR7xMTvgufRx2luUy3/1+SGUUNtm+oro9wV/uKYUoFM03XXoGmv1Ag2MJCoOjrrctm2LgdzHGgJXpR1 Uo0R0XJnbMd3Eraqp98WskBM7eQZAd1r5wpOxB+WQL/TQ+hVDGpuqPBXJ6TFNd9b29iCzkcDIOiWHeKYPwtwJG00uApOH47eITRBxVty5UP+XjL0mxzmiVVYk6IWa0ZUf g86n3ZNFhWbPswLontlg5WlxoyvSoVpak56uQsLW37+PUfWP0UYdIK7W3v2aakuJIY2sE4g--

MARIA DEL CARMEN TORRES SALAZAR | Fecha:2026-07-03 09:36:48 | FIRMANTE

CnS3z30le+D57xvM6FYOKhwx89qVRU9YUHo6Ehkh7R1R95WQoOD2PrzPYdNSdUEIOxx9y29P30C64zYvmxCoYacqyUwp2VIBha2FvZiSwPukzVbvkWLcbXivup8nONR3 9JltakO3vdiRxEFA4FWPnDCIMiluswgmB2WT1waFQNJ0SIWV/Elv4/a9M0MrgcWE5H3BB3LE44v11u2qBtUJT4lufbgWvAF11mbxIOgOo/2dPxuCbndfphHdmRi/+6Lz/zWK48uF PYa28iv6NBSiYsSaOHuWk/FpP3rMOPWQAO4vWGW3CkXWwLcX1Lq6HCePVJBKd93HBcQ--

HUGO ALBEIRO SALDARRIAGA NOREÑA | Fecha:2026-07-03 10:15:26 | FIRMANTE

hEIJEFKt5+YJB4RQmOXh1GMUknXnLEmkUHKAAenLO/JI4X5Ww8tCOVPgYUuqPIOGC7aZm75YeTQp9Xwn3i3w8tnkITpxqHyELSpeP58fR4hP7cNbzwtB2mwKBn7iV0tE+cRyC NErjpp9p9AXZJ/KDAE/t29aaKObpBRHSDC7Dy9yleggVWudvudMhBdOTJl9WITM9P+eIQXOWzKsZXCNLIPIjBdWdE36veHTB9mtzGqJvIZZevQnoMJB4v4B5m+yujvD29/QNb3 TUCxnteJQICkPUK3H3YPkAdXs1E3VeMmoHGgy711YH2wxHwZ+PLOY9rcDOloal+mw6u1xyA--

MOHAMMED MINIYA | Fecha:2026-07-06 11:36:36 | FIRMANTE

UTV/QZ7f8d0nb+dBs/LOZ8vQgTijWKNP2SpqKu5pzFEeAFrgQpJmtlSvkvGFzTtG5Zd3cr6IPIOPRbeloUPGrHpxnfxUqKa9ugSwQJPTGr9gTDxeykZsJPPbJctHwQK09BRIHMF /YctBX4eU40uacE5Ptm2mYMO+jex6vVPTLrBk82UogSkYHtAkd3aM5wAYJG2QKdIWovufAxxu74v54gk9yXV2oJCIHDFFFUwzhmNUXMLKbcJ14heWJAC54sUsg7gUvBbc3N uWmdOiqB5pZzGNo+Ncl7Ii++aH11rSUSPmMtuU/Dvi+odyet/QJ2YAIOpvaVERx0tg--

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



32mBLAJK

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/RWFQoSzRzhpDmP2XgpR9j52IhPzhJsD4>



UAEM
RECTORÍA
2023-2029