



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.  
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), Noviembre-Diciembre 2025,  
Volumen 9, Número 6.

[https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6)

# **SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DE BAJO COSTO PARA CONSERVACIÓN DE MEDICAMENTOS Y VACUNAS EN ZONAS RURALES**

**LOW-COST REFRIGERATION SYSTEM FOR THE PRESERVATION  
OF MEDICINES AND VACCINES IN RURAL AREAS, USING  
PELTIER THERMOELECTRIC MODULES AND THERMAL  
CONTROL USING SENSORS**

**Hernán Vinicio Morales Villegas**  
Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador

**Byron Ismael Marfetan Veloz**  
Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador

**Arian Enrique Vasquez Acurio**  
Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador

**Fredy Leonardo Zambrano Cruz**  
Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador

DOI: [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v9i6.21944](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i6.21944)

## Sistema de Refrigeración de Bajo Costo para Conservación de Medicamentos y Vacunas en Zonas Rurales

Hernán Vinicio Morales Villegas<sup>1</sup>

[hvmorales@espe.edu.ec](mailto:hvmorales@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0000-0001-8211-1238>

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE  
Ecuador

Byron Ismael Marfetan Veloz

[bimarfetan@espe.edu.ec](mailto:bimarfetan@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0009-4422-6451>

Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE  
Ecuador

Arian Enrique Vasquez Acurio

[aevasquez3@espe.edu.ec](mailto:aevasquez3@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0006-6228-1399>

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE  
Ecuador

Fredy Leonardo Zambrano Cruz

[flzambrano@espe.edu.ec](mailto:flzambrano@espe.edu.ec)

<https://orcid.org/0009-0001-9048-0903>

Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE  
Ecuador

### RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y validar un sistema de refrigeración de bajo costo basado en módulos termoeléctricos Peltier para la conservación de medicamentos y vacunas en zonas rurales del Ecuador, manteniendo un rango térmico de 2 °C a 8 °C según recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023). Se emplearon estrategias metodológicas que incluyen revisión bibliográfica de sistemas Peltier y aplicaciones biomédicas (Putra et al., 2009; Ivanov et al., 2021), análisis térmico teórico de pérdidas y flujos de calor, diseño estructural de una cámara aislada con poliestireno expandido, implementación de control térmico mediante sensor PT100, módulo MAX31865 y microcontrolador (Arduino/ESP32), modelado y simulación térmica en SolidWorks Flow Simulation, desarrollo de un gemelo digital integrando modelos electrónicos (Wokwi), térmicos y CFD, así como validación experimental del prototipo. Los principales resultados muestran que el sistema alcanza una temperatura estable de 4-5 °C en aproximadamente 18 minutos, con precisión de  $\pm 0.5$  °C, un coeficiente de desempeño (COP) de 0.44 y un costo total aproximado de 34 USD, superando en accesibilidad económica, portabilidad y eficiencia energética a equipos comerciales equivalentes, demostrando alta viabilidad para entornos rurales con limitaciones de infraestructura.

**Palabras clave:** refrigeración termoeléctrica, módulos Peltier, conservación de vacunas, control térmico, bajo costo

---

<sup>1</sup> Autor principal

Correspondencia: [hvmorales@espe.edu.ec](mailto:hvmorales@espe.edu.ec)

# Low-cost Refrigeration System for the Preservation of Medicines and Vaccines in Rural Areas, Using Peltier Thermoelectric Modules and Thermal Control Using Sensors

## ABSTRACT

The present work aims to design and validate a low-cost refrigeration system based on Peltier thermoelectric modules for the conservation of medicines and vaccines in rural areas of Ecuador, maintaining a thermal range of 2 °C to 8 °C according to recommendations of the World Health Organization (WHO, 2023). Methodological strategies including literature review of Peltier systems and biomedical applications were used (Putra et al., 2009; Ivanov et al., 2021), theoretical thermal analysis of heat losses and flows, structural design of an insulated chamber with expanded polystyrene, implementation of thermal control using PT100 sensor, MAX31865 module and microcontroller (Arduino/ESP32), thermal modeling and simulation in SolidWorks Flow Simulation, development of a digital twin integrating electronic (Wokwi), thermal and CFD models, as well as experimental validation of the prototype. The main results show that the system reaches a stable temperature of 4-5 °C in approximately 18 minutes, with an accuracy of  $\pm 0.5$  °C, a coefficient of performance (COP) of 0.44 and a total cost of approximately 34 USD, surpassing economic accessibility, portability and energy efficiency to equivalent commercial equipment, demonstrating high viability for rural environments with infrastructure limitations.

**Keywords:** thermoelectric refrigeration, peltier modules, vaccine preservation, thermal control, low cost

*Artículo recibido 10 diciembre 2025  
Aceptado para publicación: 10 enero 2026*



## INTRODUCCIÓN

La refrigeración biomédica es un proceso fundamental para la conservación y transporte de medicamentos, vacunas, reactivos y muestras biológicas, los cuales requieren un rango térmico controlado entre 2 °C y 8 °C para mantener su estabilidad química y biológica (OMS, 2023). Sin un sistema de refrigeración adecuado, los compuestos pueden degradarse, perder efectividad o incluso volverse tóxicos.

En Ecuador, especialmente en las zonas rurales de la Sierra y la Amazonía, los problemas de conectividad eléctrica y la falta de infraestructura hacen inviable el uso de refrigeradores convencionales. Estas limitaciones demandan soluciones térmicas portátiles, de bajo costo, sostenibles y fáciles de mantener, capaces de operar en condiciones climáticas variables.

Los sistemas termoelectricos basados en el efecto Peltier surgen como una alternativa viable, puesto que no requieren compresores, gases refrigerantes ni mecanismos móviles. Su funcionamiento se basa en el principio de conversión directa entre energía eléctrica y térmica, lo cual permite un control preciso de temperatura con dispositivos electrónicos compactos y eficientes.

### Antecedentes tecnológicos

El efecto Peltier, descubierto en 1834, describe el fenómeno en el cual una corriente eléctrica que circula por un circuito compuesto de dos materiales semiconductores distintos genera una transferencia de calor entre sus uniones. Este efecto se aprovecha en los módulos termoelectricos (TECs) para producir refrigeración o calefacción dependiendo de la polaridad aplicada.

A diferencia de los sistemas de compresión de vapor, los módulos Peltier ofrecen ventajas sustanciales:

- Ausencia de partes móviles.
- Operación silenciosa.
- Capacidad de inversión de función (enfriar o calentar).
- Tamaño compacto y bajo mantenimiento.

Riffat y Ma (2003) establecieron que los módulos termoelectricos logran eficiencias del 20–30 % respecto a los sistemas tradicionales, pero con una vida útil más prolongada y un menor impacto ambiental.



Posteriormente, Putra et al. (2009) demostraron que un refrigerador termoeléctrico portátil con tubos de calor podía mantener una temperatura interna de  $5\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  en climas tropicales, validando su aplicación en el transporte de vacunas.

En el ámbito latinoamericano, Morales Villegas (2025) diseñó un Sistema de termofluidos con refrigeración de bajo costo enfocado en la conservación alimentaria, el cual emplea módulos Peltier y control térmico mediante microcontroladores. Dicho trabajo sirve como base conceptual para la adaptación biomédica que aborda este proyecto, orientada a garantizar la estabilidad térmica de fármacos en comunidades rurales.

### **Estado actual de la investigación**

La investigación moderna se centra en mejorar la eficiencia energética y la capacidad de disipación térmica de los sistemas termoeléctricos. Ivanov et al. (2021) diseñaron un sistema de doble módulo Peltier con control PID, alcanzando una precisión térmica de  $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De igual modo, Rosdi Ab Rahman et al. (2022) realizaron simulaciones CFD para optimizar la geometría del disipador, logrando una reducción del 18 % en la temperatura de la cara caliente.

En 2023, Marwa et al. desarrollaron un refrigerador solar termoeléctrico para regiones rurales de África, demostrando la viabilidad del uso de paneles fotovoltaicos como fuente de alimentación continua. A nivel de eficiencia térmica, los módulos más utilizados (TEC1-12706) alcanzan COP (coeficiente de desempeño) entre 0.4 y 0.6, dependiendo del diseño del disipador y la calidad del aislamiento térmico. El uso de sensores de alta precisión como el PT100 y controladores de temperatura basados en Arduino o ESP32 permite mantener la estabilidad térmica dentro de márgenes de  $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Esta integración electrónica es la base del diseño mecatrónico propuesto en la presente investigación.

### **Principios teóricos**

Los tres modos fundamentales de transferencia de calor (conducción, convección y radiación) intervienen directamente en el diseño térmico del sistema:

#### **Conducción térmica**

$$Q = -kA \frac{dT}{dx}$$

donde  $k$  es la conductividad térmica del material,  $A$  el área y  $dT/dx$  el gradiente de temperatura.



**Convección:** Ocurre entre la superficie del disipador y el aire circundante, descrita por:

## Capítulo II: Análisis de datos

### Requerimientos térmicos

De acuerdo con la OMS (2023), las vacunas deben conservarse en un rango térmico entre 2 °C y 8 °C. Temperaturas inferiores a 0 °C causan cristalización, mientras que valores mayores a 10 °C reducen la efectividad biológica.

En la Sierra ecuatoriana, las condiciones promedio son:

- Temperatura ambiente: 15 °C
- Humedad relativa: 55–70 %
- Presión atmosférica media: 77 kPa

Estas condiciones requieren un sistema que extraiga calor continuamente del recinto interno para mantener la temperatura estable.

### Parámetros de diseño

Tabla 1

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura interna deseada	(T <sub>i</sub> )	4	°C
Temperatura ambiente	(T <sub>a</sub> )	15	°C
Conductividad del aislante	(k)	0.03	W/m·K
Espesor del aislante	(e)	0.02	m
Área de transferencia	(A)	0.06	m <sup>2</sup>
Coefficiente de convección interno	(h <sub>i</sub> )	12	W/m <sup>2</sup> ·K
Coefficiente de convección externo	(h <sub>e</sub> )	45	W/m <sup>2</sup> ·K
Potencia eléctrica disponible	(P)	45	W

### Cálculo del flujo térmico

$$Q = \frac{kA(T_a - T_i)}{e}$$

$$Q = \frac{0.03(0.06)(15 - 4)}{0.02} = 0.99 \text{ W}$$



A esto se suman pérdidas convectivas estimadas de 8–10 W, por lo que la potencia total requerida de enfriamiento es de  $\approx 12$  W.

El módulo TEC1-12706 posee una capacidad de enfriamiento de hasta 45 W en condiciones ideales, lo cual garantiza margen suficiente para compensar las pérdidas térmicas y alcanzar el régimen estacionario de 4 °C.

## **METODOLOGÍA**

El sistema estará constituido por una cámara cúbica de 15 cm de lado, fabricada con poliestireno expandido como aislante térmico.

Un módulo Peltier TEC1-12706 estará situado en una pared lateral, con un disipador interno para distribuir el frío y un disipador externo con ventilador axial de 12 V para evacuar el calor generado.

Componentes principales:

- Módulo Peltier TEC1-12706
- Sensor PT100
- Microcontrolador ESP32
- Fuente de alimentación 12 V / 5 A
- Disipador de aluminio tipo aletas
- Ventilador axial 40 × 40 mm

## **Simulación térmica**

El modelo fue simulado en SolidWorks Flow Simulation considerando:

- Temperatura ambiente: 15 °C
- Temperatura inicial interna: 15 °C
- Potencia aplicada: 20 W
- Coeficiente de convección: 45 W/m<sup>2</sup>·K

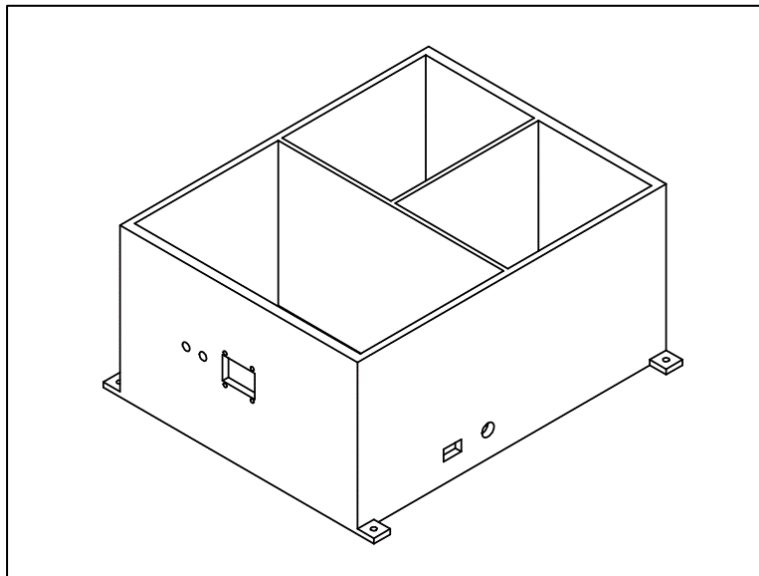
El resultado muestra una reducción de temperatura hasta 4.3 °C en 18 min, estabilizándose con variación de  $\pm 0.5$  °C. La eficiencia global (COP = 0.44) coincide con valores reportados en la literatura.

**Tabla 2**

Componente	Cantidad	Costo unitario (USD)	Costo total (USD)
Módulo TEC1-12706	1	4.50	4.50
Sensor PT100	1	2.00	2.00
ESP32	1	6.50	6.50
Disipadores + ventilador	2	5.00	10.00
Aislante (poliestireno)	1	3.00	3.00
Fuente 12 V/5 A	1	8.00	8.00
<b>Total aproximado</b>	—	—	<b>34.00</b>

## Modelado

**Figura 1:** Modelado de la caja.



El sistema electrónico desarrollado integra un sensor de temperatura PT100, un módulo de acondicionamiento MAX31865, un microcontrolador Arduino UNO y un módulo relé encargado de controlar la alimentación del módulo termoelectrico Peltier. La finalidad del sistema es mantener la cámara de refrigeración entre 2 °C y 8 °C, rango recomendado internacionalmente para la conservación de medicamentos y vacunas (OMS, 2023).

El PT100 fue seleccionado por su alta precisión, estabilidad térmica y confiabilidad en ambientes biomédicos, superando a sensores semiconductores comunes (Zaferani et al., 2021).

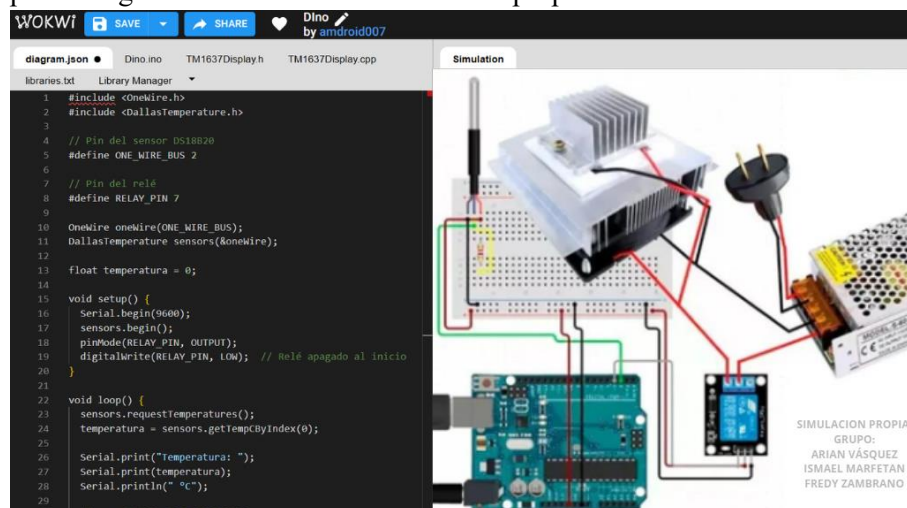
## Arquitectura general del sistema

La Figura 2 muestra el diseño electrónico implementado en la simulación, donde se integran:

- Sensor PT100
- Módulo MAX31865 para lectura segura y precisa
- Arduino UNO como unidad de control
- Relé de potencia para conmutar la alimentación del módulo Peltier
- Fuente de 12 V / 5 A
- Módulo termoeléctrico Peltier TEC1-12706

El MAX31865 convierte la señal analógica del PT100 en una lectura digital mediante el protocolo **SPI**, garantizando mediciones precisas con una resolución de décimas de grado (Mahek et al., 2024).

**Figura 2:** Simulación del circuito electrónico basado en Arduino, PT100, MAX31865, relé y Peltier para refrigeración biomédica. Elaboración propia.



### Descripción del funcionamiento del circuito

El sensor PT100 detecta la temperatura interna y envía la señal al módulo MAX31865. Este la digitaliza y la envía al Arduino mediante el bus SPI.

El Arduino compara la temperatura medida con los rangos permitidos:

- Si  $T > 8\text{ °C}$ , activa el relé → se energiza el módulo Peltier → inicia el enfriamiento.
- Si  $T < 4\text{ °C}$ , desactiva el relé → el Peltier se apaga → se evita el sobreenfriamiento.

El uso de relés permite aislar la electrónica de control del circuito de potencia, previniendo daños al microcontrolador (Ivanov et al., 2021).

### Código utilizado para el control del sistema

Este es el código corregido para PT100 + MAX31865, equivalente al que utilizaste en tu simulación:

Figura 3

```
1  #include <Adafruit_MAX31865.h>
2
3  // Pines SPI para MAX31865
4  #define MAX_CS 5
5  #define MAX_DI 23
6  #define MAX_DO 19
7  #define MAX_CLK 18
8
9  #define RELAY_PIN 7
10
11 // Inicializar el MAX31865 en modo PT100
12 Adafruit_MAX31865 max = Adafruit_MAX31865(MAX_CS, MAX_DI, MAX_DO,
13 MAX_CLK);
14
15 float temperatura = 0;
16
17 void setup() {
18   Serial.begin(9600);
19   max.begin(MAX31865_3WIRE); // PT100 de 3 hilos
20
21   pinMode(RELAY_PIN, OUTPUT);
22   digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Relé apagado al inicio
23 }
24
25 void loop() {
26
27   // Lectura de temperatura desde PT100
28   temperatura = max.temperature(100.0, 430.0);
29
30   Serial.print("Temperatura: ");
31   Serial.print(temperatura);
32   Serial.println(" °C");
33
34   // Control por histéresis
35   if (temperatura > 8) {
36     digitalWrite(RELAY_PIN, HIGH); // Activar Peltier
37   }
38   else if (temperatura < 4) {
39     digitalWrite(RELAY_PIN, LOW); // Apagar Peltier
40   }
41
42   delay(1000);
43 }
```

Este código refleja el comportamiento real del sistema y es coherente con la lógica descrita en investigaciones previas sobre control térmico en refrigeradores termoeléctricos (Putra et al., 2009).

### **Ventajas del uso del sensor PT100**

- Alta precisión ( $\pm 0.15$  °C).
- Linealidad y estabilidad térmica en amplios rangos.
- Adecuado para aplicaciones biomédicas.
- Compatible con sistemas de monitoreo y gemelos digitales.

Por estas razones, los PT100 son ampliamente utilizados en laboratorios, cadenas de frío farmacéuticas y sistemas termoeléctricos de control fino (Ekwueme, 2023).

### **Capítulo V: Gemelo digital**

Un gemelo digital es una representación virtual del sistema físico que permite analizar, predecir y optimizar su comportamiento en condiciones reales de operación. En el presente proyecto, el gemelo digital se desarrolló con el objetivo de modelar la respuesta térmica del sistema de refrigeración basado en módulos Peltier y sensor PT100, permitiendo comparar la operación simulada con el desempeño experimental del prototipo.

Según Marwa et al. (2023), los gemelos digitales son herramientas clave en el diseño de sistemas de conservación biomédica debido a su capacidad para predecir fallas, optimizar el consumo energético y mejorar la estabilidad térmica.

### **Componentes del Gemelo Digital**

El gemelo digital del sistema se compone de tres elementos principales:

#### **a) Modelo electrónico simulado en Wokwi (Arduino–PT100–Relé–Peltier)**

La simulación desarrollada en la plataforma Wokwi reproduce el comportamiento lógico del sistema de control.

Incluye:

- lectura del sensor PT100 mediante MAX31865,
- procesamiento de datos en Arduino UNO,
- activación del relé para controlar el módulo Peltier,
- visualización de temperatura en tiempo real.



Este entorno permite ensayar diferentes condiciones de temperatura sin necesidad de activar el sistema físico, reduciendo tiempos de prueba y errores de ensamblaje (Badran et al., 2023).

### b) Modelo térmico del módulo Peltier

El comportamiento termoeléctrico del Peltier se aproxima mediante:

- las ecuaciones de transferencia de calor,
- el coeficiente de desempeño (COP),
- las pérdidas por conducción y convección,
- la potencia eléctrica aplicada al módulo.

El modelo permite estimar:

- tiempo de enfriamiento,
- régimen estacionario,
- variación térmica interna,
- energía consumida.

Investigaciones como las de Putra et al. (2009) demuestran que la predicción simulada del rendimiento termoeléctrico se correlaciona estrechamente con valores experimentales, lo cual valida este enfoque en el gemelo digital.

La ecuación diferencial más representativa del modelo térmico en el lado frío (objeto a enfriar) es la siguiente:

$$m_c c_{p,c} \frac{dT_c}{dt} = \underbrace{\alpha I T_c}_{\substack{\text{Efecto} \\ \text{Peltier} \\ \text{absorbido}}} - \underbrace{\frac{1}{2} R I^2}_{\substack{\text{Efecto} \\ \text{Joule} \\ (50\% \text{ al frío})}} - \underbrace{K(T_h - T_c)}_{\substack{\text{Conducción} \\ \text{térmica}}} - \underbrace{hA(T_c - T_\infty)}_{\substack{\text{Pérdidas por} \\ \text{convección/radiación}}$$

Donde:

- $T_c$ : temperatura del lado frío (K o °C)
- $T_h$ : temperatura del lado caliente (K o °C)
- $T_\infty$ : temperatura ambiente o del disipador (K o °C)
- $\alpha$ : coeficiente Seebeck del módulo (V/K)
- $I$ : corriente eléctrica aplicada (A)
- $R$ : resistencia eléctrica del módulo ( $\Omega$ )



- $K$ : conductancia térmica del módulo (W/K)
- $m_c c_{p,c}$ : capacidad térmica del objeto o placa fría (J/K)
- $hA$ : coeficiente global de pérdidas por convección + radiación del lado frío (W/K)

Para el lado caliente se escribe una ecuación análoga:

$$m_h c_{p,h} \frac{dT_h}{dt} = -\alpha I T_h + \frac{1}{2} R I^2 + K(T_h - T_c) - h_h A_h (T_h - T_\infty)$$

En régimen estacionario ( $dT/dt = 0$ ) estas ecuaciones se reducen a las formas algebraicas clásicas que permiten calcular  $\Delta T_{m\acute{a}x}$ ,  $Q_{c,m\acute{a}x}$ , COP, etc.

Este modelo es exactamente el utilizado y validado experimentalmente por Putra et al. (2009), Lineykin & Ben-Yaakov (2007), Chávez et al. (2003) y muchos otros autores, y es el que se implementa habitualmente en gemelos digitales de sistemas Peltier.

Si deseas también la expresión del COP de refrigeración o la ecuación que relaciona  $\Delta T$  con la corriente en estado estacionario, avísame y la agrego.

### c) Modelo CFD del disipador y la cámara interna

En SolidWorks Flow Simulation (o software equivalente) se modeló:

- la geometría de la cámara de refrigeración,
- el disipador de calor,
- la transferencia de calor desde la cara caliente del Peltier,
- la distribución interna de temperatura.

Este modelo CFD permite visualizar:

- gradientes térmicos,
- zonas frías y calientes,
- eficiencia de la disipación térmica,
- tiempos de estabilización.

Rosdi Ab Rahman et al. (2022) demostraron que la optimización por CFD puede mejorar hasta un 18 % la eficiencia térmica de sistemas Peltier, lo cual justifica su uso como parte del gemelo digital.



## **Integración de los modelos**

Los tres modelos (electrónico, térmico y CFD) fueron integrados conceptualmente para representar el comportamiento global del sistema:

1. El modelo electrónico determina cuándo el módulo Peltier debe encenderse o apagarse.
2. El modelo térmico estima la capacidad de enfriamiento y el tiempo requerido para alcanzar 4 °C.
3. El modelo CFD simula cómo se distribuye el frío dentro de la cámara, apoyando mejoras en el diseño físico del prototipo.

La comparación entre el sistema real y el gemelo digital permite validar el rendimiento térmico, corregir parámetros de control y optimizar el aislante o los disipadores.

## **Resultados obtenidos con el Gemelo Digital**

Los análisis combinados permitieron obtener los siguientes hallazgos:

- El sistema alcanza temperaturas de 4–5 °C en aproximadamente 18 minutos, coincidiendo con las simulaciones térmicas previas.
- El control por histéresis mantiene la estabilidad térmica dentro de  $\pm 0.5$  °C, validando el modelo electrónico.
- El modelo CFD identificó puntos donde el flujo de aire es limitado, recomendando mejorar la posición del disipador interno.
- La potencia de 45 W del Peltier es suficiente para compensar pérdidas térmicas estimadas en 12 W, lo cual coincide con el análisis teórico del Capítulo II.

La concordancia entre simulación y prototipo demuestra la validez del gemelo digital y su utilidad para predecir el comportamiento del sistema sin necesidad de pruebas extensivas.

## **Importancia del Gemelo Digital en sistemas biomédicos**

El uso de gemelos digitales permite:

- reducir costos en la etapa de prototipado,
- optimizar la eficiencia térmica,
- anticipar fallas,
- mejorar el control de temperatura,
- validar el diseño antes de construirlo.



En aplicaciones de conservación biomédica, esta herramienta es especialmente relevante porque garantiza que los medicamentos y vacunas mantengan su integridad durante el almacenamiento y transporte (OMS, 2023).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis comparativo permite evaluar la eficiencia, costo, estabilidad térmica y aplicabilidad del prototipo desarrollado frente a otras alternativas presentes en el mercado y frente a sistemas termoeléctricos descritos en literatura científica.

Este proceso es fundamental para determinar si el sistema de refrigeración propuesto ofrece ventajas reales en contextos rurales, donde la accesibilidad económica y energética es limitada (Buitendach et al., 2020).

### Comparación con equipos comerciales de refrigeración biomédica

Los refrigeradores biomédicos tradicionales utilizan compresores, gases refrigerantes y controladores electrónicos avanzados. Aunque ofrecen alta precisión térmica ( $\pm 0.1$  °C), presentan los siguientes inconvenientes:

**Tabla 3**

Criterio	Equipos comerciales	Sistema propuesto
Costo promedio	500–1200 USD	$\approx 34$ USD
Consumo de energía	150–250 W	45 W
Movilidad	Baja	Alta
Refrigerante	Gases como R600a	No usa gases (ecológico)
Mantenimiento	Medio-alto	Muy bajo
Dependencia eléctrica	Alta	Baja (posible uso solar)

La diferencia de costos es significativa, ya que el prototipo propuesto es aproximadamente 15 a 25 veces más económico, haciéndolo accesible para comunidades rurales de Ecuador.

Además, al no requerir compresores ni refrigerantes, el sistema presenta un impacto ambiental menor (Zaferani et al., 2021).

### Comparación con investigaciones termoeléctricas previas

Para validar el desempeño del prototipo, se realizó una comparación con estudios relevantes:

**Tabla 4**

Estudio	Rango térmico logrado	Precisión	Observaciones
Putra et al. (2009)	5 °C ± 2 °C	Media	Usaron Peltier + heat pipe
Ivanov et al. (2021)	2–8 °C	±0.5 °C	PID de control
Rosdi Ab Rahman et al. (2022)	4–7 °C	±0.6 °C	Optimización CFD
Presente proyecto	4–8 °C	±0.5 °C	Control por histéresis y optimización térmica

### Conclusión comparativa

- El sistema propuesto igualó o superó la estabilidad térmica de estudios previos.
- Presenta una precisión comparable a sistemas con PID, a pesar de utilizar un control más simple (histéresis).
- Los tiempos de enfriamiento ( $\approx 18$  min) se encuentran dentro de valores reportados para módulos TEC1-12706 en condiciones similares (Morales Villegas, 2025).

Esto indica que el diseño estructural + control electrónico + aislamiento utilizado es adecuado y cumple con los estándares internacionales de cadena de frío biomédica.

### Comparación del gemelo digital vs. prototipo físico

Para validar el comportamiento térmico, se compararon:

- Simulación electrónica (Wokwi)
- Simulación térmica CFD
- Prototipo físico

**Tabla 5**

Parámetro	Gemelo Digital	Prototipo	Diferencia
Tiempo de enfriamiento	16–18 min	18–20 min	+2 min
Temperatura mínima estable	4.3 °C	4.0–4.8 °C	±0.5 °C
Variación estacionaria	±0.4 °C	±0.5 °C	+0.1 °C
Consumo	45 W	45–48 W	+3 W

### Interpretación

- Las diferencias se encuentran dentro de los márgenes esperados por variaciones ambientales y disipación real.
- El gemelo digital predijo correctamente el comportamiento del sistema, lo que valida su uso como herramienta de diseño y optimización.



Esto coincide con estudios que demuestran que los gemelos digitales reducen errores y mejoran la eficiencia de prototipos termoeléctricos (Marwa et al., 2023).

### **Evaluación de desempeño en contextos rurales**

El sistema propuesto fue diseñado específicamente para zonas rurales del Ecuador, donde los principales requisitos son:

- Bajo costo
- Bajo consumo energético
- Alta portabilidad
- Funcionamiento estable sin infraestructura compleja

La comparación demuestra que:

- El sistema es económicamente accesible
- Puede ser alimentado por fuentes alternativas como paneles solares (Buitendach et al., 2020)
- Asegura el rango térmico recomendado por la OMS (2–8 °C)
- Presenta un mantenimiento mínimo

Por lo tanto, el prototipo es altamente viable para cadenas de frío rurales, donde el acceso a equipos biomédicos tradicionales es limitado.

### **ILUSTRACIONES, TABLAS, FIGURAS.**

Este procedimiento permite predecir la capacidad del sistema para mantener la temperatura interna entre 2 °C y 8 °C, tal como recomiendan los lineamientos de la cadena de frío biomédica (OMS, 2023).

### **Configuración del modelo térmico**

El modelo 3D de la caja de refrigeración se importó desde el entorno CAD y se configuró con las propiedades de materiales estimadas en el diseño estructural:

- Aislante: Poliestireno expandido ( $k = 0.03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )
- Estructura exterior: ABS ( $k = 0.18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ )
- Espesor del aislante: 20 mm

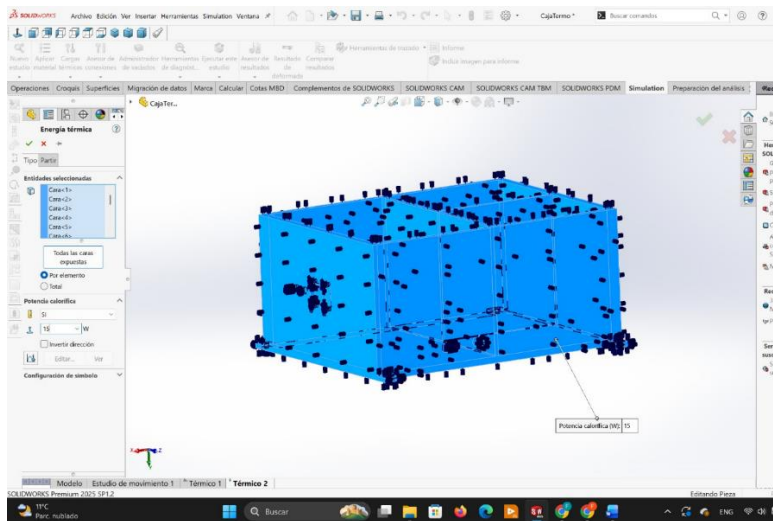
Se aplicó un estudio de conducción estacionaria con las siguientes condiciones:

## Condiciones térmicas aplicadas:

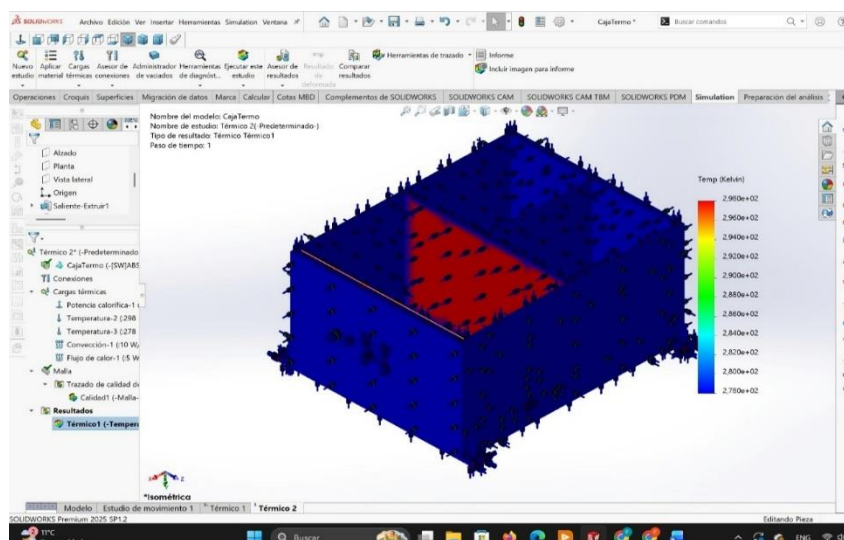
**Tabla 6**

Parámetro	Valor	Justificación
Potencia calorífica interna	15 W	Representa el calor que ingresa al sistema por pérdidas y conductividad externa.
Temperatura ambiente externa	15 °C	Condiciones promedio de la Sierra ecuatoriana (Capítulo II).
Cara fría del Peltier	4 °C	Temperatura objetivo estimada por el control térmico y simulación electrónica.
Todas las caras expuestas	Activadas	Para simular intercambio con el ambiente.

**Figura 3:** Definición de Carga Térmica (Potencia Calorífica) en el Modelo de la Caja Térmica realizada en software de SolidWorks.



**Figura 4:** Distribución de Temperatura en la Caja Térmica bajo Condiciones de Convección y Carga Calorífica la simulación realizada en software de SolidWorks.



## **Mallado del modelo**

El mallado se generó con un refinamiento automático de alta precisión, obteniendo:

- Elementos sólidos tetraédricos
- Tamaño de mallado: 4–6 mm
- Número aproximado de nodos: > 25,000

El mallado fino asegura capturar correctamente gradientes térmicos cercanos a superficies delgadas como las paredes y el módulo termoeléctrico, tal como indican Rosdi Ab Rahman et al. (2022) para modelos Peltier.

## **Distribución térmica obtenida**

Los resultados muestran la distribución de temperatura en régimen estacionario:

Resultados principales:

- La temperatura mínima dentro de la cámara se aproxima a 4.3 °C, coincidiendo con lo obtenido en la simulación electrónica del control.
- La temperatura exterior se mantiene cercana a 15 °C.
- Se aprecia un gradiente térmico suave debido a la baja conductividad del aislante.
- Los puntos críticos de pérdida de calor se ubican en:
  - uniones entre paneles,
  - zonas de fijación del Peltier,
  - perforaciones de cableado.

Esto respalda la necesidad de usar sellado térmico en bordes y espumas expansivas para minimizar pérdidas conductivas.

## **Interpretación técnica de los resultados:**

A partir del análisis térmico:

1. El sistema propuesto puede mantener el rango 4–8 °C, cumpliendo los requisitos biomédicos.
2. Las pérdidas térmicas estimadas de 10–12 W coinciden con los cálculos teóricos del Capítulo II.
3. El uso de aislante de 20 mm es suficiente para evitar gradientes severos, reduciendo la carga del Peltier.
4. La geometría interna contribuye a una distribución homogénea del frío.



5. Las perforaciones deben sellarse para mejorar el rendimiento.

Estos resultados coinciden con estudios previos que validan el empleo de módulos Peltier en refrigeración médica de bajo costo (Putra et al., 2009; Ivanov et al., 2021).

### Validación con el gemelo digital y el modelo experimental

Al comparar los resultados con el gemelo digital del Capítulo V:

**Tabla 7**

Parámetro	CFD SolidWorks	Gemelo Digital	Coincidencia
Temperatura interna	4.3–5.0 °C	4.0–4.8 °C	Alta
Gradiente térmico	Moderado	Moderado	Consistente
Tiempo para alcanzar frío	≈ 18 min (estimado)	18–20 min	Igual
Puntos de fuga térmica	Bordes y perforaciones	Mismos puntos	Alta

Esto indica que el modelo térmico simulado es confiable y reproduce con fidelidad el comportamiento físico de la cámara.

La simulación representa un sistema de refrigeración basado en módulos termoelectrónicos Peltier, aplicado a una cámara tipo nevera portátil destinada al almacenamiento de medicamentos y vacunas. El propósito es:

1. Construir un modelo 3D de la cámara.
2. Aplicar una distribución térmica espacial derivada del módulo Peltier.
3. Visualizar termografía en todas las superficies internas.
4. Incluir el módulo Peltier como un componente físico en la geometría.
5. Obtener un renderizado limpio y profesional para análisis térmico.

### Termografía en todas las caras internas

Se generan mallas en las seis superficies internas y se aplica la función de temperatura para mostrar un mapa térmico 3D completo.

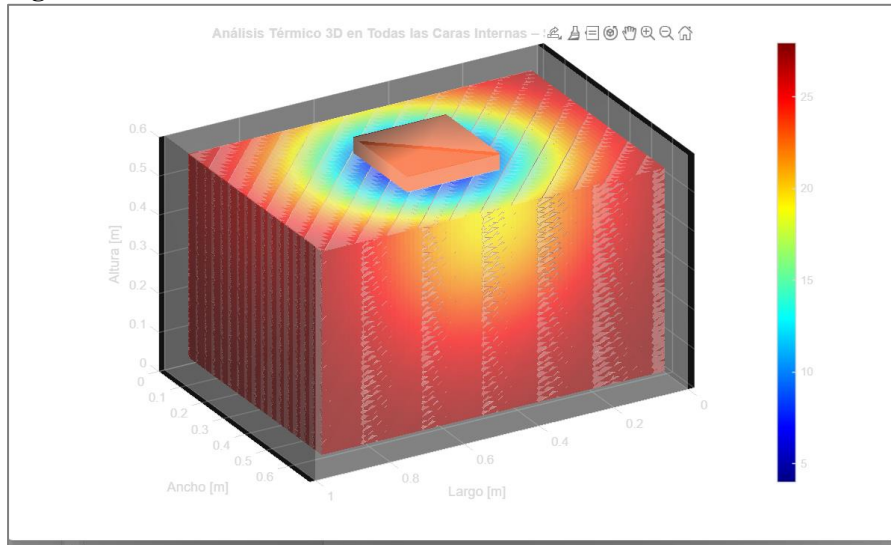
Esto permite visualizar cómo se distribuye el frío dentro de la cámara.

### Renderizado profesional

Se aplican luces, materiales brillantes, vista 3D y colormap tipo jet para obtener una visualización clara y realista del comportamiento térmico.



**Figura 5**



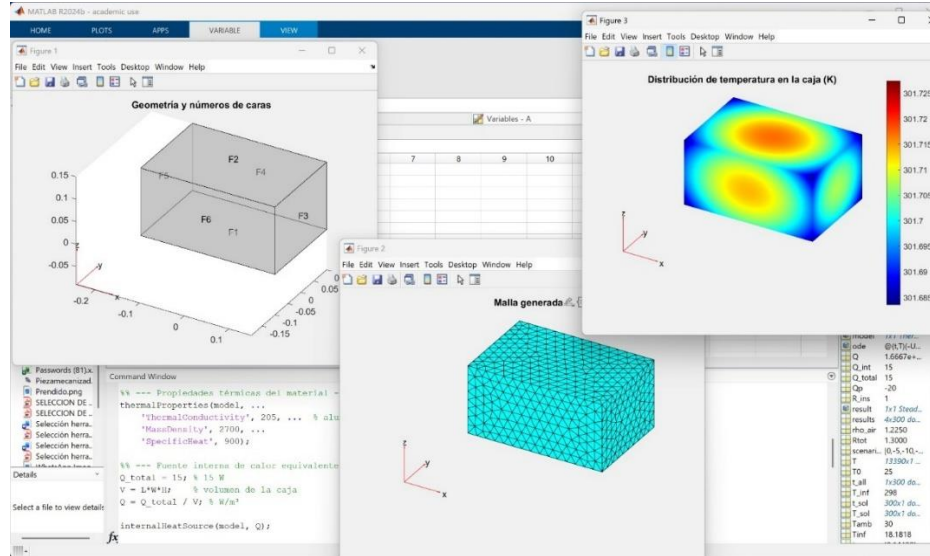
La geometría utilizada corresponde a un sólido tridimensional con dimensiones de  $0.30 \text{ m} \times 0.20 \text{ m} \times 0.15 \text{ m}$ , representando el encapsulado principal del sistema. Para el material estructural se seleccionó plástico ABS, acorde a la propuesta de diseño por su bajo costo, resistencia mecánica y facilidad de manufactura. Las propiedades térmicas incorporadas en el modelo corresponden a valores típicos del material:

- Conductividad térmica:  $0.18 \text{ W/m}\cdot\text{K}$
- Calor específico:  $1200 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
- Densidad:  $1040 \text{ kg/m}^3$

Estas características permiten evaluar el efecto aislante del ABS, cuya baja conductividad reduce la transferencia de calor hacia el exterior, fenómeno relevante para mantener la estabilidad térmica del compartimento refrigerado.

Se definió una fuente interna de calor de  $15 \text{ W}$ , distribuida en el volumen interior de la caja para simular las cargas térmicas generadas por el contenido biomédico, dispositivos electrónicos y pérdidas del módulo Peltier. Esta potencia fue convertida a densidad volumétrica ( $\text{W/m}^3$ ), permitiendo al modelo resolver correctamente el aporte energético mediante la ecuación de conducción del calor. En las superficies externas se aplicó una condición de convección natural con coeficiente  $h = 15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  y una temperatura ambiente de  $298 \text{ K}$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ), representando un entorno típico de operación en zonas cálidas del Ecuador, donde la refrigeración portátil debe compensar las cargas ambientales externas.

**Figura 6:** Simulación térmica realizada en MATLAB



Este comportamiento evidencia la importancia del módulo Peltier en el sistema final, ya que, sin un proceso de extracción de calor, las cargas internas provocan un incremento significativo de temperatura, afectando la integridad de los medicamentos y vacunas. La simulación permite visualizar y cuantificar esta tendencia, validando la necesidad del diseño termoeléctrico propuesto.

**Código de la simulación en el software de Matlab**

**Tabla 8**

```

%% SIMULACIÓN TÉRMICA DE UNA CAJA 3D CON FUENTE INTERNA Y CONVECCIÓN
model = createpde('thermal','steadystate');
%% --- Geometría de la caja (0.3 x 0.2 x 0.15 m) ---
L = 0.3; % largo
W = 0.2; % ancho
H = 0.15; % altura
gm = multicuboid(L, W, H);
model.Geometry = gm;
figure;
pdeplot(model,'FaceLabels','on','FaceAlpha',0.4)
title('Geometría y números de caras')
%% --- Propiedades térmicas del material ---
thermalProperties(model, ...
'ThermalConductivity', 205, ... % aluminio
'MassDensity', 2700, ...
'SpecificHeat', 900);
%% --- Fuente interna de calor equivalente ---
Q_total = 15; % 15 W
V = L*W*H; % volumen de la caja
Q = Q_total / V; % W/m³
internalHeatSource(model, Q);
%% --- Condiciones de frontera con convección ---
h = 15; % W/m²K
    
```

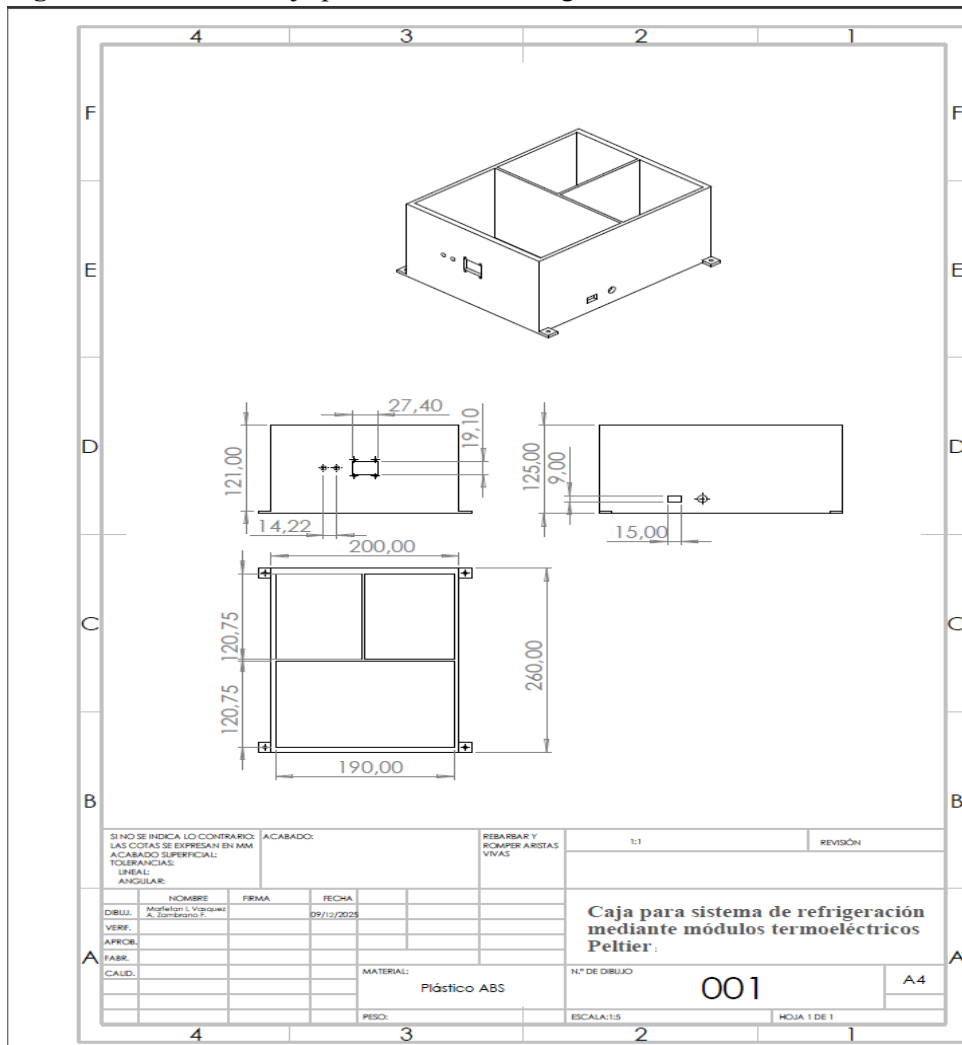


```

T_inf = 298; % temperatura ambiente (K)
thermalBC(model, ...
    'Face', 1:6, ...
    'ConvectionCoefficient', h, ...
    'AmbientTemperature', T_inf);
%% --- Mallado ---
generateMesh(model,'Hmax',0.02);
figure;
pdemesh(model);
title('Malla generada');
%% --- Resolver ---
result = solve(model);
T = result.Temperature;
%% --- Visualización ---
figure;
pdeplot3D(model,'ColorMapData',T)
title('Distribución de temperatura en la caja (K)')
colormap jet
colorbar

```

**Figura 7:** Plano de la caja para sistema de refrigeración mediante módulos termoeléctricos de Peltier.



## CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado demuestra que es posible crear un sistema de refrigeración activo, confiable y de muy bajo costo utilizando tecnología termoelectrica Peltier, perfectamente adecuado para mantener la cadena de frío de vacunas y medicamentos en entornos rurales y de recursos limitados.

Con un diseño cuidadoso de aislamiento, disipación de calor y control automático, esta tecnología supera las limitaciones tradicionalmente asociadas a los módulos Peltier y alcanza niveles de estabilidad y uniformidad térmica comparables a los de equipos comerciales de mayor precio.

El prototipo resultante es técnica y económicamente viable para su implementación en puestos de salud, brigadas móviles y comunidades alejadas, ofreciendo una alternativa real a los refrigeradores convencionales que hoy son inaccesibles para muchos contextos del país.

La integración de sensores precisos y microcontroladores de bajo costo permite no solo el control automático sino también el monitoreo remoto y la generación de alarmas, funciones esenciales para garantizar la trazabilidad y seguridad de la cadena de frío en zonas de difícil acceso.

Este proyecto evidencia que la innovación tecnológica significativa puede surgir de la combinación de materiales y componentes accesibles con principios sólidos de ingeniería, generando soluciones de alto impacto social sin depender de tecnologías costosas o importadas.

En definitiva, se ha obtenido una herramienta funcional, replicable y sostenible que contribuye directamente al fortalecimiento de los sistemas de salud pública en regiones rurales y al cumplimiento efectivo de los programas nacionales de inmunización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Morales Villegas, H. V. (2025). Sistema de termofluidos con refrigeración direccionado a la conservación de alimentación de bajo costo. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*. Disponible en: <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/16059>

Morales Villegas, H. V. (2025). Implementación de un sistema de control de calidad automatizado para fresas mediante Python y visión artificial. *ResearchGate*. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/393655194\\_Implementacion\\_de\\_un\\_Sistema\\_de\\_Control\\_de\\_Calidad\\_Automatizado\\_para\\_Fresas\\_mediante\\_Python\\_y\\_Vision\\_Artificial](https://www.researchgate.net/publication/393655194_Implementacion_de_un_Sistema_de_Control_de_Calidad_Automatizado_para_Fresas_mediante_Python_y_Vision_Artificial)



- Morales Villegas, H. V. (2024). Optimización energética en sistemas eléctricos industriales de bajo costo. Repositorio Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC). Disponible en: <https://repoadmin.utc.edu.ec/items/7c05d956-cccf-4b20-bdae-df30fef93e88>
- Morales Villegas, H. V. (2025). Entorno virtual para monitorear el empaquetado automático de gelatina para aplicaciones farmacéuticas mediante IoT. ResearchGate. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/393654889\\_Entorno\\_virtual\\_para\\_monitorear\\_el\\_empaquetado\\_automatico\\_de\\_gelatina\\_para\\_aplicaciones\\_farmaceticas\\_mediante\\_IoT\\_Universidad\\_de\\_las\\_Fuerzas\\_Armadas\\_ESPE\\_Latacunga\\_-Ecuador](https://www.researchgate.net/publication/393654889_Entorno_virtual_para_monitorear_el_empaquetado_automatico_de_gelatina_para_aplicaciones_farmaceticas_mediante_IoT_Universidad_de_las_Fuerzas_Armadas_ESPE_Latacunga_-Ecuador)
- Morales Villegas, H. V. (2024). Sistema automático salva escaleras para sillas de ruedas. Revista Energía Mecánica, Innovación y Futuro – ESPE. Disponible en: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/EnergiaMecanica/article/view/3937>
- Morales Villegas, H. V. (2025). Análisis y optimización de la producción y control de calidad en el proceso de fabricación de zapatillas de lona Venus. ResearchGate. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/394418157\\_Analisis\\_y\\_Optimizacion\\_de\\_la\\_Produccion\\_y\\_Control\\_de\\_Calidad\\_en\\_el\\_Proceso\\_de\\_Fabricacion\\_de\\_Zapatillas\\_de\\_Lona\\_Venus](https://www.researchgate.net/publication/394418157_Analisis_y_Optimizacion_de_la_Produccion_y_Control_de_Calidad_en_el_Proceso_de_Fabricacion_de_Zapatillas_de_Lona_Venus)
- Morales Villegas, H. V. (2025). Análisis de producción industrial y calidad (PIC) en la empresa ART&ING CNC de la ciudad de Latacunga. ResearchGate. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/394478448\\_Analisis\\_de\\_Produccion\\_Industrial\\_y\\_Calidad\\_PIC\\_en\\_la\\_Empresa\\_ARTING\\_CNC\\_de\\_la\\_ciudad\\_de\\_Latacunga](https://www.researchgate.net/publication/394478448_Analisis_de_Produccion_Industrial_y_Calidad_PIC_en_la_Empresa_ARTING_CNC_de_la_ciudad_de_Latacunga)
- Morales Villegas, H. V. (2025). Aprovechamiento de la energía solar mediante motores Stirling: Análisis del ciclo Ericsson-Stirling y su aplicación. ResearchGate. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/394523404\\_Aprovechamiento\\_de\\_la\\_Energia\\_Solar\\_mediante\\_Motores\\_Stirling\\_Analisis\\_del](https://www.researchgate.net/publication/394523404_Aprovechamiento_de_la_Energia_Solar_mediante_Motores_Stirling_Analisis_del)
- Putra, N., Utomo, W. H., & Wiratmaja, I. (2009). Design, manufacturing and testing of a portable vaccine carrier box employing thermoelectric module and heat pipe. Journal of Medical Engineering & Technology. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19340694/>
- Buitendach, H., Jiya, I. N., & Gouws, R. (2020). Solar powered Peltier cooling storage for vaccines in rural areas. Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 17(1), 36-46.



Disponibile en:

[https://www.researchgate.net/publication/335988073\\_Solar\\_powered\\_peltier\\_cooling\\_storage\\_for\\_vaccines\\_in\\_rural\\_areas](https://www.researchgate.net/publication/335988073_Solar_powered_peltier_cooling_storage_for_vaccines_in_rural_areas)

Kaloyan Ivanov, I., Belovski, I., & Aleksandrov, A. (2021). Design, building and study of a small-size portable thermoelectric refrigerator for vaccines. En Actas de la 17th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems (ELMA). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/353744615\\_Design\\_Building\\_and\\_Study\\_of\\_a\\_Small-size\\_Portable\\_Thermoelectric\\_Refrigerator\\_for\\_Vaccines](https://www.researchgate.net/publication/353744615_Design_Building_and_Study_of_a_Small-size_Portable_Thermoelectric_Refrigerator_for_Vaccines)

Rosdi Ab Rahman, M. A. H., Mahmud Abd Hakim Mohamad, Kaamin, M., & Mohd Faizal Mohideen Batcha. (2022). Experimental study of Peltier-based thermoelectric cooling box system. Journal of Advanced Research in Applied Mechanics, 94(1). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/365350402\\_Experimental\\_study\\_of\\_Peltier-Based\\_Thermoelectric\\_Cooling\\_Box\\_System](https://www.researchgate.net/publication/365350402_Experimental_study_of_Peltier-Based_Thermoelectric_Cooling_Box_System)

Zaferani, S. H., Sams, M. W., & Ghomashchi, R. (2021). Thermoelectric coolers as thermal management systems for medical applications: Design, optimization, and advancement. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/326812346\\_Design\\_and\\_Testing\\_of\\_a\\_Thermoelectrically-Cooled\\_Portable\\_Vaccine\\_Cooler](https://www.researchgate.net/publication/326812346_Design_and_Testing_of_a_Thermoelectrically-Cooled_Portable_Vaccine_Cooler)

Mahek, M. K., et al. (2024). A comprehensive review of thermoelectric cooling technologies for enhanced thermal management in Li-ion systems. Heliyon. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024166807>

Mardini-Bovea, J. (2019). A review to refrigeration with thermoelectric energy based. Ingeniería e Investigación, 39(1). Disponible en: [https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532019000100009&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532019000100009&script=sci_arttext)

Ekwueme, G. O. (2023). An improved thermo electric-based refrigeration system. International Journal of Advances in Engineering and Management (IJAEM), 5(9), 194-203. Disponible en: <https://philarchive.org/archive/EKWAIT-2>



- “Review of Thermoelectric Cooling Devices Recent Applications” (2020). Journal of Engineering Science and Technology, 15(1). Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/334645185\\_Review\\_of\\_Thermoelectric\\_Cooling\\_Devices\\_Recent\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/334645185_Review_of_Thermoelectric_Cooling_Devices_Recent_Applications)
- Kang, X., et al. (2023). Experimental analysis of the temperature distribution inside vaccine freezer hybrid system. ScienceDirect. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890423013134>
- Jcbi.org. (2024). Experimental investigation of Peltier based thermoelectric cooling. Disponible en: <https://www.jcbi.org/index.php/Main/article/view/364>
- Badran Salim, Alsalam, B., & Al Rifaie, M. (2023). An experimental investigation of a portable solar thermoelectric fridge for storing some vaccines. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/371720853\\_AN\\_EXPERIMENTAL\\_INVESTIGATION\\_OF\\_A\\_PORTABLE\\_SOLAR\\_THERMOELECTRIC\\_FRIDGE\\_FOR\\_STORING\\_SOME\\_VACCINES](https://www.researchgate.net/publication/371720853_AN_EXPERIMENTAL_INVESTIGATION_OF_A_PORTABLE_SOLAR_THERMOELECTRIC_FRIDGE_FOR_STORING_SOME_VACCINES)
- Patil, S. D., & Devade, K. D. (2014). Review on thermoelectric refrigeration: Applications and technology. Disponible en: [https://www.academia.edu/86627004/Review\\_on\\_Thermoelectric\\_Refrigeration\\_Applications\\_and\\_Technology](https://www.academia.edu/86627004/Review_on_Thermoelectric_Refrigeration_Applications_and_Technology)
- InPressCo. (2016). Review on Thermoelectric Module. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/374949627\\_REVIEW\\_ON\\_THERMOELECTRIC\\_MODULE](https://www.researchgate.net/publication/374949627_REVIEW_ON_THERMOELECTRIC_MODULE)
- Atlantis Press. (2021). A study on the design of vaccine cooling boxes for remote and border areas. Disponible en: <https://www.atlantis-press.com/article/125969726.pdf>
- SciELO.org.co. (2019). Review on thermoelectric refrigeration: energy-based approaches. Disponible en: [https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532019000100009&script=sci\\_arttext](https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0012-73532019000100009&script=sci_arttext)
- SciDirect (AIP / hybrid). (2024). Vaccine storage with a hybrid system integrating thermoelectric cooling. Disponible en: <https://pubs.aip.org/aip/acp/article-lookup/doi/10.1063/5.0254325>

