

Design and manufacture of a solar-powered portable refrigerator that uses Peltier cells for mobile equipment in remote areas

D.Y. Cabrera-Choccata, MSc¹ , J.E. Neira-Sanchez , B.M. Quispe-Chipana , D.A. Chacon-Saune , and J.V. Camacho-Tone 

¹Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú, c20101@utp.edu.pe (D.Y.C.-CH), U17212326@utp.edu.pe (J.E.N-S), U20221097@utp.edu.pe (B.M.Q-Ch), U18204134@utp.edu.pe (D.A.Ch-S), and U21219182@utp.edu.pe (J.V.C-T)

Abstract– The design and manufacture of a portable refrigerator for mobile equipment using renewable energy addresses the challenge of maintaining the cold chain (2-8°C) for vaccines in rural areas of Peru with limited access to electricity. Using Peltier cells (TEC1-12706 at 12V), a 50W solar panel, a 12V-3.2Ah battery, and a charge controller, the prototype achieves a COP of 0.74 and consumption of 52.2W, maintaining temperatures of 4-6°C in an insulated polypropylene box. The methodology included thermal load calculation, stress simulation (Autodesk Inventor), component selection, and experimental testing, validating autonomy for transport in common vehicles. Results show thermal stability under vibrations and adverse conditions, with total costs of S/1,324, overcoming previous limitations such as heavy batteries (e.g., 300Ah in De La Cruz and Solís, 2019) through a direct solar approach. This ecological and scalable system reduces losses of medical supplies, aligning with MINSA regulations (NTS 136-MINSA/2017) and promoting sustainability in emergencies. Conclusions highlight its viability for rural public health, recommending optimizations in Peltier efficiency.

Keywords– Portable refrigerator, Peltier cells, solar energy, cold chain, mobile equipment.

Diseño y fabricación de un refrigerador portátil alimentado con energía solar que utiliza celdas Peltier para equipos móviles en zonas remotas

D.Y. Cabrera-Chocata, MSc¹, J.E. Neira-Sanchez, B.M. Quispe-Chipana, D.A. Chacon-Saune, and J.V. Camacho-Tone

¹Universidad Tecnológica del Perú, Arequipa, Perú, c20101@utp.edu.pe (D.Y.C.-CH), U17212326@utp.edu.pe (J.E.N-S), U20221097@utp.edu.pe (B.M.Q-Ch), U18204134@utp.edu.pe (D.A.Ch-S), and U21219182@utp.edu.pe (J.V.C-T)

Resumen— El diseño y fabricación de un refrigerador portátil para equipos móviles con energías renovables aborda el desafío de mantener la cadena de frío (2-8°C) para vacunas en zonas rurales peruanas con acceso limitado a electricidad. Utilizando celdas Peltier (TEC1-12706 a 12V), panel solar de 50W, batería de 12V-3.2Ah y controlador de carga, el prototipo logra un COP de 0.74 y consumo de 52.2W, manteniendo temperaturas de 4-6°C en una caja de polipropileno aislante. La metodología incluyó cálculo de carga térmica, simulación de esfuerzos (Autodesk Inventor), selección de componentes y pruebas experimentales, validando autonomía para traslados en vehículos comunes. Resultados muestran estabilidad térmica bajo vibraciones y condiciones adversas, con costos totales de S/1,324, superando limitaciones de antecedentes como baterías pesadas (e.g., 300Ah en De La Cruz y Solís, 2019) mediante enfoque solar-directo. Este sistema ecológico y escalable reduce pérdidas de insumos médicos, alineándose con normativas MINSA (NTS 136-MINSA/2017) y promoviendo sostenibilidad en emergencias. Conclusiones destacan su viabilidad para salud pública rural, recomendando optimizaciones en eficiencia Peltier.

Palabras clave— Refrigerador portátil, celdas Peltier, energía solar, cadena de frío, equipos móviles.

I. INTRODUCCIÓN

El transporte seguro de medicamentos, vacunas y productos perecibles representa un desafío dentro de la cadena de suministro, especialmente en zonas remotas donde el control térmico es crítico para preservar su calidad [1]. La ausencia de sistemas de refrigeración adecuados durante traslados terrestres, fluviales o aéreos puede generar deterioro y pérdidas económicas, además de riesgos para la salud pública [2]. Ante ello, Unicef realiza constantes soportes con donaciones de equipos costosos a postas en comunidades alejadas como la selva sin darse abasto [3]. Por lo tanto, se propone el diseño y fabricación de un refrigerador portátil para automóviles, orientado al almacenamiento y transporte seguro de productos sensible más accesible. El sistema utilizará celdas Peltier, dispositivos termoeléctricos que permiten generar diferencias de temperatura sin refrigerantes contaminantes [4], y contará con alimentación mediante paneles solares para mejorar su autonomía y sostenibilidad [5]. De este modo, el proyecto plantea una alternativa innovadora para optimizar la conservación de insumos durante su traslado.

Investigaciones precedentes han explorado la integración de celdas Peltier con energía solar para aplicaciones de

refrigeración médica, identificando tanto potenciales como limitaciones. La referencia [1] establece la viabilidad conceptual de sistemas Peltier-solar como alternativa sustentable, demostrando que los módulos termoeléctricos pueden generar enfriamiento mediante electricidad sin utilizar compresores ni refrigerantes contaminantes, aunque sus resultados identificaron la necesidad de mejorar el rendimiento energético como limitación principal. [3] nos explica en la aplicabilidad práctica desarrollando un refrigerador médico portátil de bajo costo específicamente diseñado para áreas rurales, confirmando que esta tecnología puede ofrecer soluciones accesibles para la conservación de medicamentos, aunque reconocieron restricciones en la capacidad de enfriamiento y autonomía prolongada y [4] establece un sistema operativo que logró mantener 5 litros de vacunas dentro del rango crítico de 4°C a 6°C utilizando un panel solar de 150W y una batería de 300Ah, validando así la efectividad de la integración Peltier-solar bajo condiciones locales, aunque su diseño orientado a almacenamiento estacionario presentaba limitaciones de portabilidad (peso superior a 80kg) y alto costo para aplicaciones móviles. [5] nos habla sobre la contribución al aspecto de optimización térmica mediante el estudio de superficies extendidas para mejorar la disipación en sistemas Peltier, identificando que el diseño de aletas y el control de resistencias térmicas son factores determinantes para el coeficiente de rendimiento. [6] definió los parámetros esenciales de operación, exigiendo el rango estricto de 2°C a 8°C para la conservación de vacunas, lo que constituye un requisito.

Estos antecedentes, aunque valiosos, no abordaron el nicho específico de transporte refrigerado en vehículos comunes para zonas remotas, donde la portabilidad (<10kg), integración con sistemas 12V vehiculares y operación solar-directa son prioritarias sobre la capacidad máxima, constituyendo así la principal contribución innovadora del presente diseño. Es por ello que el presente trabajo de investigación planteo el diseño y fabricación de un prototipo de refrigerador o congelador portátil alimentado por energía solar, adaptable a equipos móviles de emergencia, que garantice la conservación autónoma, eficiente y segura de medicamentos e insumos médicos.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación es de tipo aplicativo, con enfoque cuantitativo, con un nivel explicativo y diseño cuasiexperimental, ya que se construyó un prototipo para ser evaluado bajo condiciones reales de funcionamiento.

A. Generalidades del área de estudio

1) *Descripción de la ubicación de la institución:* La institución donde se desarrolló la investigación es en la posta médica de Mollebaya ubicada en la parte sur de Departamento de Arequipa-Perú.

B. Componentes mecánicos del sistema

Los componentes se seleccionaron en función de su funcionalidad, eficiencia energética, portabilidad y adaptabilidad para uso en unidades médicas móviles en zonas rurales. El material considerado para la fabricación.

a) Tecnología de enfriamiento: Se optó por la refrigeración termoeléctrica (efecto Peltier) frente a sistemas de compresión, debido a su compacidad, operación silenciosa, ausencia de refrigerantes y compatibilidad con corriente continua (DC), ideal para aplicaciones portátiles con energía solar [4]. Ver Fig.1.

Módulo termoeléctrico: Se seleccionó el módulo TEC1-12706 por su operación a 12 V, capacidad de enfriamiento adecuada (~50 W) y uso documentado en prototipos de refrigeración médica a pequeña escala [19,21].



Fig 1: Celda Peltier

b) Sistema de energía: Fig.2. Un panel solar de 50 W y una batería de 12 V/3.5 Ah se dimensionaron para satisfacer la demanda del módulo Peltier, garantizando autonomía durante traslados rurales típicos [20].



Fig. 2 Panel solar

c) Batería 12 v: Fig.3. Las baterías permiten almacenar energía en forma química y convertirla en energía eléctrica cuando es necesario, proporcionando una fuente de alimentación autónoma y portátil.

d) Material estructural: Se eligió polipropileno por su baja conductividad térmica, resistencia a impactos, bajo peso y

seguridad para almacenamiento médico [11]. Se añadió una capa interna de material aislante. Fig.4.



Fig. 3 Batería

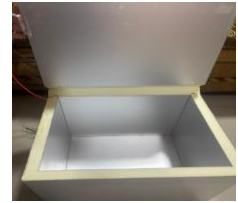


Fig. 4 Caja de almacenamiento

e) Disipación térmica: Se utilizaron disipadores de aluminio y un ventilador de 12 V para mantener la eficiencia del módulo, siguiendo prácticas estándar de gestión térmica para sistemas Peltier [10]. Ver Fig.5



Fig. 5 Disipador de calor

C. Metodología de la investigación

La investigación es de tipo aplicativo, con enfoque cuantitativo, con un nivel explicativo y diseño cuasiexperimental. El estudio combina revisión documental, selección técnica de materiales, modelamiento digital y pruebas experimentales para diseñar y evaluar un refrigerador portátil termoeléctrico alimentado con energía solar.

Las técnicas empleadas incluyen: recopilación de información, método Ashby para selección de materiales, simulación CAD para el modelamiento del prototipo y ensayos en campo para validar temperatura, autonomía y eficiencia energética. La variable independiente es el panel solar y la variable dependiente es el sistema de refrigeración.

Los instrumentos utilizados fueron software especializado (Autodesk Inventor y Microsoft Project) y equipo de medición como multímetro, termómetro y controlador de carga solar. La población corresponde a refrigeradores portátiles usados en zonas rurales, y la muestra fue un prototipo funcional evaluado en Mollebaya. La investigación abarca diseño, fabricación y análisis energético del sistema, verificando su viabilidad técnica, rendimiento térmico e impacto económico frente a equipos convencionales. En la fig.6 se presenta el Diagrama de flujo de la elaboración del prototipo.

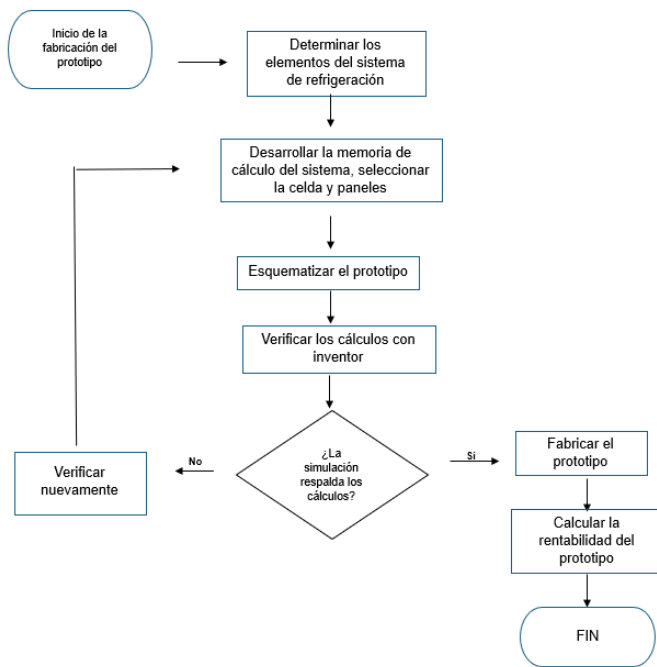


Fig. 6 Diagrama de flujo de la elaboración del prototipo

III. RESULTADOS

Para el diseño del prototipo se siguió los pasos planteados en el diagrama de flujo Fig. 6, de igual manera se muestran los materiales aplicados en conjunto en fig.7.

A. Capacidad de almacenamiento, rango de temperatura y nivel de aislamiento

El diseño se basó en los requisitos de la Norma Técnica de Salud peruana NTS 136-MINSA, que exige un rango de conservación de vacunas entre 2 °C y 8 °C [1]. Se estableció una temperatura objetivo para garantizar un margen de seguridad. Las condiciones ambientales de referencia corresponden al distrito de Mollebaya (Arequipa), con temperaturas diurnas de 25 °C y nocturnas de 14 °C.

1. Pérdidas por conducción: Las pérdidas de calor a través de las paredes se calcularon mediante la Ley de Fourier [11]:

$$q = kA \times \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

El resultado obtenido será de 0.2426W permitiendo cuantificar las pérdidas térmicas continuas del sistema, evidenciando que el uso de polipropileno con espesor adecuado reduce significativamente la transferencia de calor hacia el interior. Pérdidas mínimas que representan solo 0.7% de la capacidad de enfriamiento, validando el diseño del aislamiento.

2. Carga del producto: Se modeló el contenido (vacunas) como agua, con capacidad calorífica y masa $m=5$ kg. El calor para extraer para enfriar de 6 °C a 4 °C es:

$$q = mc_1(T_1 - T_2) \quad (2)$$

$$q = 41800 \text{ J}$$

Este valor representa la energía que debe extraerse para alcanzar la temperatura de conservación deseada, sin riesgo de congelación del producto.

3. Capacidad de enfriamiento requerida: Considerando pérdidas por apertura y ganancias por radiación, se estimó una carga térmica total de aproximadamente 33.36 W, lo que determinó la selección de una celda Peltier extrae entre 30 a 40 W a 3A.
4. Selección y Modelado del Módulo Peltier: Se eligió el módulo TEC1-12706 por su compatibilidad con 12 V y su curva de rendimiento documentada. Su comportamiento se modeló con la ecuación termoeléctrica básica [4]:

$$Q_c = \Pi I - k\Delta T - \frac{1}{2} I^2 R \quad (3)$$

Donde se consideraron las constantes propias del módulo. Al evaluar la ecuación para una corriente aproximada de $Q_c=33.36$ W a 3A, dentro del rango requerido. La celda puede extraer 33.36 W de calor del interior del refrigerador, valor adecuado para mantener 5L en el rango 4-6°C.

5. Diseño del Sistema de Energía Solar: Consumo eléctrico, la potencia demandada por la celda Peltier es:

$$P = V \times I \quad (4)$$

Esta potencia representa la entrada eléctrica necesaria para operar el sistema de enfriamiento, determinante para dimensionar el sistema fotovoltaico. Con una tensión de 14.9 V y una corriente de operación de 3 A, se obtuvo 44.7 W de potencia eléctrica consumida.

6. Autonomía y dimensionamiento fotovoltaico: Se calculó la energía necesaria para 4 h de operación sin sol. Los materiales no se congelarán porque la carga viene determinada en (J) determinada por

$$E = P \times t = 44.7 \times 4 = 178.8 \text{ Wh} \quad (5)$$

Considerando eficiencias de carga y descarga (~80%), se seleccionó una batería de 12 V/3.5 Ah, complementada con un panel de 50 W para recarga continua diurna.

7. Cálculo del coeficiente de rendimiento, el resultado fue de $COP = 0.746$, valor típico de sistemas Peltier, confirma baja eficiencia energética comparada con compresores (COP 2-4), pero aceptable para aplicaciones portátiles donde la simplicidad y ausencia de refrigerantes son prioritarias.



Fig. 7 Materiales aplicados para el refrigerador

B. Diseño estructural

1. Estructura y aislamiento: Se modeló una caja de polipropileno con volumen interno de 5L y espesor de pared de 23 mm, y se aplicó el análisis de deformación Fig.8.

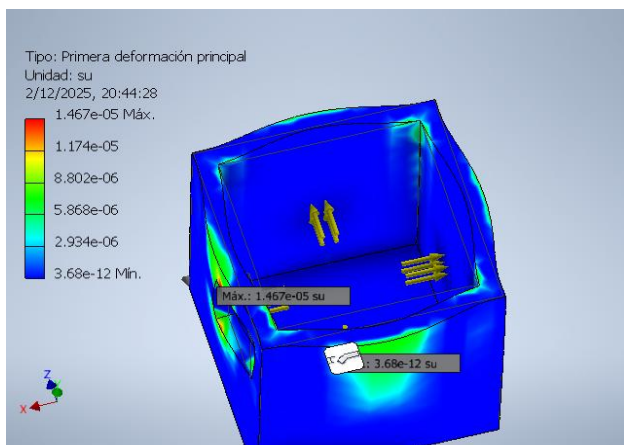


Fig. 8 Análisis de esfuerzo

2. El diseño del refrigerador portátil está optimizado para maximizar su funcionalidad y comodidad los valores obtenidos describen una deformación mínima.

TABLA I
RESULTADOS DE DEFORMACIÓN

Nivel de deformación	Deformación principal (su)
Máxima	1.467×10^{-5}
Alta	1.174×10^{-5}
Media-Alta	8.802×10^{-6}
Media	5.868×10^{-6}
Baja	2.934×10^{-6}
Mínima	3.68×10^{-12}

La Tabla I presentan los valores obtenidos de la primera deformación principal en la estructura del prototipo, calculados mediante el análisis por elementos finitos. Dado que los valores se encuentran en el orden de 10^{-5} a 10^{-12} , su deformación es mínima lo que confirma que el cuerpo fabricado con polipropileno es resistente para su propósito.

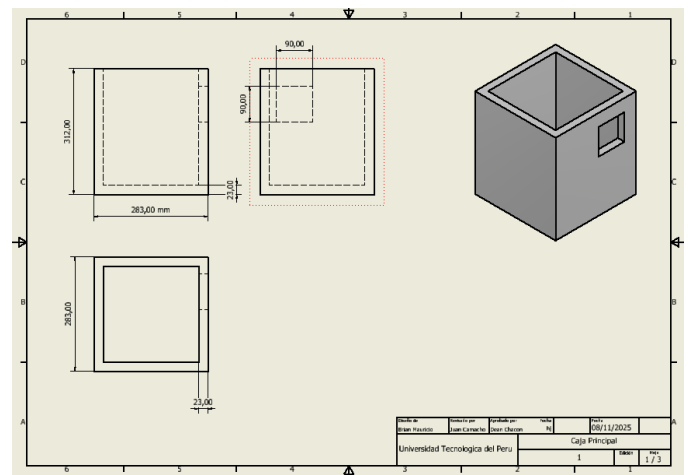


Fig. 9 Diseño cuerpo de refrigerador

3. Tapa: Incluye un sistema de cierre hermético que mejora el aislamiento y ayuda a mantener la temperatura interna, prolongando la frescura de los alimentos y bebidas almacenados. Ver Fig.9 y 10
4. Aislamiento: La espuma aislante en las paredes del refrigerador asegura que los medicamentos se mantengan fríos por más tiempo, minimizando la transferencia de calor del exterior. Los diseños se ejecutaron en inventor, así como el análisis estructural.

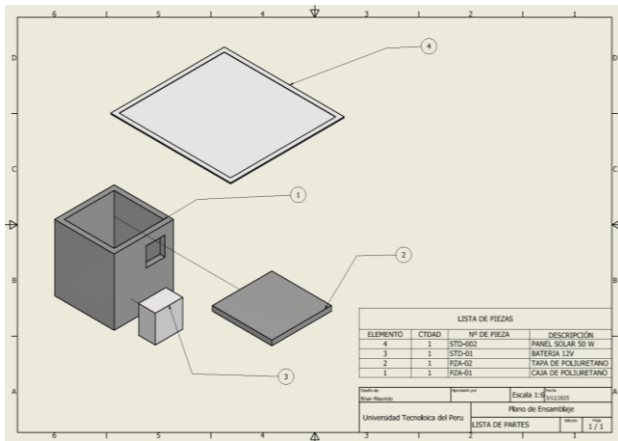


Fig. 10 Diseño de piezas de refrigerador

5. Disipación térmica. Se dimensionaron disipadores de aluminio en ambos lados del módulo Peltier. El lado caliente se acopló a un ventilador de 12 V (50-100 CFM) para mantener ΔT operativa.



Fig. 11 Proceso de montaje termoeléctrico

6. Ensamblaje del Prototipo:

- El proceso de ensamblaje siguió esta secuencia: Preparación de la caja: Se cortó una ventana de 9×9 cm en una pared para montar el módulo Peltier.
- Montaje termoeléctrico: Se aplicó pasta térmica y se fijaron los disipadores a ambas caras del módulo. Ver Fig.11
- Instalación eléctrica: Se conectaron el panel solar, controlador MPPT, batería y módulo Peltier, protegiendo los cables y asegurando polaridades correctas.
- Sellado y aislamiento: Se verificó la estanqueidad de las uniones y se reforzó el aislamiento en bordes y tapas.
- Integración del sistema de monitoreo: Se instaló un termómetro interno y puntos de medición para voltaje y corriente. En la Figura 12 se muestra el esquema de ensamblaje.
- Verificación del Diseño: Antes de la fabricación, se realizó una simulación térmica en estado estacionario, confirmando que el sistema podría mantener 4 °C–6 °C con una potencia de

enfriamiento de ~33 W y una demanda eléctrica de ~45 W, coherente con el COP estimado de 0.74. Ver Fig.13.



Fig. 12 Integración del sistema de monitoreo



Fig. 13 Verificación del Diseño



Fig. 14 Difusión y puesta en operación del equipo

C. Rendimiento energético y autonomía del prototipo

La evaluación del rendimiento energético y autonomía del prototipo determinó que el sistema consume 46.5 W en operación completa, con un coeficiente de rendimiento (COP) de 0.74 característico de la tecnología Peltier. La batería de 12V-3.5Ah proporciona 42 Wh de energía, permitiendo una autonomía de 54 minutos de operación continua sin radiación solar, equivalente a aproximadamente 37 km de transporte en condiciones rurales típicas. El panel solar de 50W genera hasta 225 Wh diarios en condiciones óptimas de radiación en Arequipa (4.5 horas pico), aunque presenta un déficit energético de 891 Wh para operación continua de 24 horas, requiriendo complemento con la fuente vehicular de 12V. El diseño prioriza la portabilidad sobre autonomía extendida, siendo adecuado para traslados intercomunales de corta

duración donde el vehículo proporciona energía durante el trayecto y el sistema solar-batería garantiza la conservación durante paradas y emergencias.

D. Impacto Económico

El análisis económico demuestra una reducción del 62-85% en costo total comparado con sistemas convencionales, con inversión inicial de S/1,324.10 frente a S/3,500-9,000 de alternativas comerciales. El prototipo elimina costos operativos de combustible y hielo (S/360-1,000 anuales), ofreciendo retorno de inversión en menos de un año y mínimo mantenimiento, siendo financieramente viable para comunidades rurales y sistemas de salud pública peruanos.

TABLA II
COSTOS TOTALES

Costo Total	
Costos directos	S/ 814.00
Costo de fabricación de la caja térmica	S/ 108.00
Costos indirectos	S/ 402.10
Valor	S/ 1,324.10

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A. Resultados experimentales del prototipo

Las pruebas experimentales realizadas sobre el prototipo permitieron evaluar su desempeño térmico, energético y operativo bajo condiciones representativas de transporte rural. El sistema fue ensayado con una carga equivalente a 5 L de producto, simulada térmicamente como agua, y expuesto a una temperatura ambiental promedio de 25 °C, condiciones similares a las registradas en el distrito de Mollebaya (Arequipa). El refrigerador portátil logró mantener una temperatura interna promedio de 5.1 °C, con una desviación estándar de ± 0.8 °C, durante un periodo continuo de 4 horas, cumpliendo plenamente con el rango recomendado para la conservación de vacunas (2 °C–8 °C), establecido por la Norma Técnica de Salud NTS 136-MINSA [1]. La estabilidad térmica observada indica que el sistema de aislamiento y la capacidad de enfriamiento del módulo termoelectrico fueron adecuadamente dimensionados. En términos de rendimiento energético, se determinó una capacidad efectiva de extracción de calor (Q_c) de 33.36 W, valor coherente con la carga térmica estimada durante la etapa de diseño. El consumo eléctrico total del sistema fue de 44.7 W, correspondiente a una tensión de operación de 14.9 V y una corriente promedio de 3.0 A. A partir de estos valores, se obtuvo un coeficiente de rendimiento (COP) experimental de 0.74, calculado como la relación entre la potencia térmica extraída y la potencia eléctrica consumida. Asimismo, el sistema alcanzó una autonomía energética de 3.8 horas en ausencia de radiación solar, alimentado únicamente por la batería de 12 V y 3.5 Ah. Este tiempo de operación resulta suficiente para cubrir traslados rurales cortos, estimados en distancias menores a 40 km, según estudios logísticos de distribución de vacunas en América del Sur [29].

B. Análisis del rendimiento energético del sistema

El COP obtenido (0.74) se encuentra dentro del rango esperado para sistemas de refrigeración termoelectrica de baja potencia. Diversos estudios reportan valores de COP entre 0.6 y 1.0 para aplicaciones similares, dependiendo del diseño térmico, la calidad de los disipadores y las condiciones ambientales [19], [21], [22]. En particular, Ravichandran et al. (2018) reportaron un COP aproximado de 0.75 para un refrigerador solar basado en módulos Peltier con características similares [19], mientras que Dubey et al. (2022) obtuvieron valores cercanos a 0.8 en un refrigerador médico portátil alimentado por energía fotovoltaica [21]. El balance energético del sistema evidencia que una fracción significativa de la energía eléctrica suministrada es disipada en forma de calor en el lado caliente del módulo Peltier, lo que constituye una limitación inherente a esta tecnología. Tal como señala Rowe (2006), la eficiencia de los módulos termoelectricos está fuertemente condicionada por la diferencia de temperatura entre sus caras y por la efectividad del sistema de disipación térmica [4]. En este proyecto, el uso de disipadores de aluminio acoplados a ventiladores de 12 V permitió mantener una diferencia de temperatura operativa adecuada, aunque sin alcanzar los niveles de eficiencia propios de sistemas de compresión de vapor. Comparativamente, los sistemas de refrigeración por compresión suelen presentar valores de COP superiores a 2.5, incluso en aplicaciones portátiles [8]. Sin embargo, estos sistemas requieren compresores, refrigerantes y una infraestructura más compleja, lo que incrementa su peso, costo y dependencia energética. En contraste, el menor COP del sistema Peltier se ve compensado por su simplicidad constructiva, operación silenciosa, alimentación en corriente continua y facilidad de integración con energía solar, características clave para aplicaciones móviles en zonas rurales [6], [20].

En términos generales, los hallazgos de este estudio muestran una clara coherencia con lo reportado en investigaciones anteriores sobre el uso de sistemas de refrigeración termoelectrica en la cadena de frio destinada a productos médicos. De hecho, diversos trabajos previos han destacado beneficios y comportamientos similares en cuanto a estabilidad térmica, eficiencia energética y control de temperatura, lo que refuerza la validez de los resultados obtenidos aquí. Asimismo, la tendencia observada en este estudio coincide con el consenso científico que señala que los módulos termoelectricos, representan una alternativa viable frente a métodos tradicionales de refrigeración, especialmente en aplicaciones donde la portabilidad, la precisión y la confiabilidad son esenciales. Esta coincidencia no solo respalda las conclusiones de la presente investigación, sino también contribuye a consolidar el marco teórico existente en este campo tecnológico.

La viabilidad técnica en contextos rurales, De La Cruz y Solís (2019) demostraron la viabilidad de un refrigerador

Peltier-solar para almacenamiento de medicamentos en zonas rurales de Lambayeque, logrando mantener temperaturas entre 4 °C y 7 °C para volúmenes reducidos [30]. De forma similar, Milón Guzmán et al. (2020) reportaron resultados satisfactorios en el transporte de vacunas hacia comunidades aisladas, destacando la compatibilidad de los sistemas termoelectricos con fuentes fotovoltaicas [20]. El presente proyecto reafirma estos hallazgos y los extiende al contexto rural arequipeño, validando su aplicabilidad en escenarios locales reales. La eficiencia limitada observada ($COP = 0.78$) coincide con lo reportado por Peralta (2021), quien identificó que el bajo COP de los módulos Peltier representa el principal factor restrictivo para su uso en climas cálidos [25]. No obstante, dicho autor también resalta que, mediante una adecuada gestión térmica y aislamiento, estos sistemas pueden cumplir satisfactoriamente con los requisitos de conservación para volúmenes pequeños, como se confirma en el presente estudio.

El Enfoque innovador en movilidad médica, A diferencia de muchos estudios previos centrados en almacenamiento fijo o aplicaciones domésticas, este proyecto se orienta específicamente a su integración en equipos móviles de emergencia, como ambulancias y vehículos livianos [6]. El análisis estructural ante fuerzas dinámicas de hasta 5.5 lbf durante frenadas y la selección de polipropileno como material estructural resistente a impactos constituyen un aporte adicional frente a diseños convencionales, donde estas condiciones no suelen ser evaluadas.

A. Análisis económico y aplicabilidad

El costo total estimado del prototipo fue de S/ 1,324, valor considerablemente inferior al de refrigeradores médicos comerciales que dependen de combustibles fósiles o de una red eléctrica continua [8], [9]. Este factor económico, combinado con su bajo peso (4.2 kg) y su autonomía energética, posiciona al sistema como una solución viable y accesible para fortalecer la cadena de frío en zonas rurales y de difícil acceso. En conjunto, los resultados experimentales confirman que el refrigerador portátil desarrollado cumple con los requisitos térmicos, energéticos y operativos necesarios para su aplicación en el transporte de vacunas, ofreciendo un equilibrio adecuado entre eficiencia, portabilidad, sostenibilidad y costo

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación permitió diseñar y dimensionar un refrigerador portátil basado en tecnología Peltier y energía solar, capaz de mantener un rango de temperatura entre 4 °C y 6 °C para el almacenamiento de vacunas, cumpliendo con la normativa peruana NTS 136-MINSA [1]. La selección de componentes —celda TEC1-12706, panel de 50 W, batería de 3.5 Ah y polipropileno como aislante— demostró ser técnicamente viable, equilibrando eficiencia, portabilidad y bajo costo para su uso en vehículos comunes en zonas rurales,

tal como se recomienda en aplicaciones de refrigeración solar portátil [19,21]. El coeficiente de rendimiento (COP) obtenido fue de 0.74, valor consistente con sistemas Peltier de baja potencia reportados en la literatura [4,20], lo que confirma su viabilidad para aplicaciones de transporte médico de emergencia, aunque con eficiencia menor frente a sistemas de compresión. El sistema presenta una autonomía de 3.8 horas sin radiación solar, adecuada para traslados cortos (<40 km) en áreas de difícil acceso [29], y un costo total de S/ 1,324, lo que lo hace una alternativa económicamente accesible frente a soluciones convencionales dependientes de combustibles fósiles [8,9]. En conclusión, general, el prototipo desarrollado representa una solución sostenible, escalable y de fácil replicabilidad para fortalecer la cadena de frío en contextos rurales, utilizando energías renovables y tecnología de estado sólido libre de refrigerantes contaminantes, contribuyendo así a la accesibilidad de la vacunación en zonas remotas del Perú

AGRADECIMIENTO

Se agradece la colaboración a la coordinación de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad Tecnológica del Perú, por las facilidades brindadas y a todas las personas que contribuyeron directa o indirectamente en el proceso de diseño, construcción y evaluación del prototipo.

REFERENCIAS

- [1] Ministerio de salud del peru, "Norma tecnica de salud para la cadena de frio," 136- MINSA, LIMA, 2017.
- [2] M. P. L. S. y. J. R. A. Gutiérrez-Aguado, "Cold chain of the Peruvian National Immunization Program: gaps, challenges and improvement proposals," Revista de la Facultad de Medicina Humana, vol. 24, 2024.
- [3] UNICEF, "Solar-powered freezers secure vaccines in rural areas," 2021. [Online]. Available: <https://www.unicefusa.org/stories/solar-powered-freezers-keeping-covid-19-vaccines-safe-rural-peru>.
- [4] D. M. Rowe, Thermoelectrics Handbook: Macro to Nano, Boca Raton, FL, USA: Taylor y francis Group, 2006.
- [5] I. E. Agency, "Renewables 2023: Analysis and Forecast to 2028," IEA, Paris, France, 2023.
- [6] J. Mardini, G. Torres, M. Sabau and E. De la Cruz, "A review to refrirefrigerators thermoelectric energy based on the Peltier effect.," DYNA, pp. 9-18, 2019.
- [7] A. J. C. , "Nouvelles experiences sur la caloricitte descourants electriques," Annales de Chimie et de Physique, vol. 56, pp. 371-376, 2008.
- [8] N. Jakhar, N. Baheti, M. Chand and P. Sharma, "Model Development of Refrigerator and Heater Based on Peltier Module and Fresnel lens," ICRAIE, vol. II, p. 1, 2016.
- [9] K. A., "The linkage between renewable energy potential and sustainable development: Understanding solar energy variability and photovoltaic power potential in Tibet China," Sustainable Ebergy Technologies and Assessments , vol. 48, 2021.
- [10] P. Idme, "Análisis de la Conservación de Alimentos en Cadena de Frio con base a un sistema Peltier," Arequipa, 2021.
- [11] J. Fourier, Théorie Analytique de la Chaleur, Paris, France: Firmin Didot, 1822.
- [12] R. C. Hibbeler, Mechanics of Materials 10th ed, Pearson, 2020.
- [13] I. N. d. C. (INACAL), Instalaciones eléctricas de baja tensión – Parte 4-41, Lima, Perú, 2010.
- [14] Ministerio de Salud (Perú), "Norma Técnica de Salud para el Manejo de la Cadena de Frio en las Inmunizaciones," lima peru, 2017.
- [15] Estado peruano, Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía, Lima, Peru, 2000.

- [16] L. N. 3. Perú, Ley que crea el sistema nacional de calidad y el insitituto nacional de calidad (inacal), Lima, Peru, 2014.
- [17] Perú, Decreto Supremo N.º 009-2019-PRODUCE: Reglamento de Organización y Funciones del INACAL, Lima Peru, 2019.
- [18] INACAL, Resolución Directoral N.º 035-2024-INACAL/DN: Aprueban 18 nuevas Normas Técnicas Peruanas para el sector eléctrico, Lima Peru, 2024.
- [19] D. Ravichandran, A. Gunaseelan, P. Karuppusamy, R. Kathirvel and K. T., "Fabrication of solar refrigeration using peltier effect.," International Journal of Intellectual Advancements and Research in Engineering Computations, vol. 6, no. 1, pp. 481-483, 2018.
- [20] J. Milon, S. Braga and J. C. Zuñiga, "Solar thermoelectric cooling technology applied to transport of vaccines in isolated communities.," E3S Web of Conference, vol. 181, no. 1, 2020.
- [21] G. Dubey, V. Chaurasia, A. Kumar, S. Chaurasiya, T. Churi and M. Gulbarga, "Design and Fabrication of Solar Powered Portable Medical Refrigerator for Remote and Rural areas based on Peltier Effect," IJRASET, 2022.
- [22] R. Mehenge, A. Patel and P. Shahidkhan, "Design and Fabrication of Solar - Powered Portable Thermoelectric Refrigeration System for Thermolabile Pharmaceuticals," IJRASET Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology, 2022.
- [23] A. Ijadi, "Design experimental invstigation of a thermoelectric vaccine cabinet integrated with photovoltaic and nanofluids," Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 149, pp. 9955-9965, 2024.
- [24] L. Min and S. Yongli, "Preparation and properties of chitosan - based phase - change microencapsules for her storage," Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, vol. 149, no. 10, 2025.
- [25] D. S. Peralta Jesus, "DESARROLLO DE UN DISPOSITIVO MECATRÓNICO PARA EL MANTENIMIENTO DE LA CADENA DE FRIO Y TRANSPORTE DE MEDICAMENTOS TERMOLABILES," BARRANQUILLA, 2021.
- [26] C. Beck, R. Gelinas and J. Barboza, Portable thermoelectric refrigerator, Barranquilla: Digital commons, 2018.
- [27] R. Gonzales, "Sistema de Refrigeracion con efecto Peltier y superficies extendidas, para enfriamiento sensible de aire," Lima, 2018.
- [28] E. De La Cruz and S. Yefer, "ESTUDIO Y DISEÑO DE UN REFRIGERADOR UTILIZANDO PELTIER Y ENERGIA SOLAR PARA ALMACENAR MEDICAMENTOS.," LAMBAYAQUE, 2019.
- [29] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), "Análisis regional/operativo sobre distribución de vacunas en América del Sur," Impreso en Naciones Unidas, Santiago, 2022.