

## Energy-thermal characterization of a solar refrigerator of 50 liters

### Caracterización térmica-energética de un refrigerador solar de 50 litros

Meily Yoselin Manzano Muñoz<sup>1</sup>, María de Jesús Galindo Aguilar<sup>1</sup>, Eduardo Villagómez Cintora<sup>2</sup>, Fátima Valeria Callejas Juárez<sup>2</sup>, Vicente Pérez García<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, <sup>2</sup> Universidad de Guanajuato  
[ma440623@uaeh.edu.mx](mailto:ma440623@uaeh.edu.mx), [ga441564@uaeh.edu.mx](mailto:ga441564@uaeh.edu.mx), [v.perez@ugto.mx](mailto:v.perez@ugto.mx)

## Resumen

En el presente trabajo se realiza la caracterización térmica-energética de un refrigerador solar de 50 litros el cual tiene la capacidad de ser móvil y no depender de energía eléctrica convencional. La caracterización considera: carga óptima del refrigerante en el sistema, comportamiento térmico en el interior de la cabina y desempeño energético del sistema con y sin carga térmica. Los resultados muestran que la masa óptima para conseguir las temperaturas deseadas de refrigeración fue de 20 g de refrigerante R-134a, también se encontró que la temperatura de estabilización en el interior del refrigerador fue de -9.14 °C y -10.34 °C con y sin carga térmica, respectivamente. Finalmente el COP alcanzado en ambos casos fue de 3.11 y 3.22 respectivamente.

**Palabras clave:** Abatimiento de temperatura, refrigeración solar, desempeño energético, masa óptima de refrigerante.

## Introducción

Día a día la refrigeración forma una parte esencial de nuestra vida, esta se encuentra presente en la mayoría de los sectores, lo que puede abarcar desde equipos grandes usados en industrias hasta pequeños como electrodomésticos. El proceso que genera la refrigeración se le puede dar más de una aplicación, como por ejemplo en el área de la climatización, refrigeración de productos perecederos, al igual utilizando el mismo proceso y con los equipos adecuados se puede llegar a temperaturas de congelación [1]. La refrigeración llega a ser necesaria para la producción y conservación de alimentos perecederos, siendo uno de los sectores con mayor peso. Uno de los propósitos de este método de conservación es retardar los cambios fisicoquímicos de alimentos perecederos, por ejemplo; el reducir su tiempo de maduración, la actividad enzimática, al igual evitar la proliferación de los microorganismos y/o bacterias que causan el deterioro del alimento, esto sin alterar considerablemente su contenido nutricional [2].

El proceso que genera la refrigeración consigue disminuir la temperatura de un ambiente determinado, así como fluido y/o productos. En México 29 millones de viviendas cuentan con refrigeradores convencionales por compresión de vapor, equipo que se considera indispensable en cualquier hogar, llegando a ser uno de los electrodomésticos que más consumen una gran cantidad de energía eléctrica, con un consumo aproximado de 250 – 500 W/h, lo que representaría un 30.6 % de la energía eléctrica usada en un hogar [3]. Los equipos de refrigeración se componen a partir de diferentes componentes como lo son: un evaporador, un dispositivo de expansión, un condensador y por último un compresor, como se menciona con anterioridad el tener un refrigerador doméstico termina representando un gasto energético considerable para una vivienda debido a que es necesaria la electricidad para que el compresor pueda operar y por consiguiente termina representando una alta cantidad de consumo a nivel nacional [4].

De acuerdo con las Normas Oficiales Mexicanas de Eficiencia Energética las cuales establecen requerimientos mínimos para el desempeño energético de los refrigeradores, lo que asegura su calidad y que cumplen el servicio energético para el que fueron fabricados; son de aplicación obligatoria para todos los productos e instalaciones en la República Mexicana comprendidos en su campo de aplicación [5]. El uso de las energías renovables puede ser dirigido hacia los sistemas de refrigeración con lo cual se disminuye el impacto ambiental que estos generan con el consumo de energía convencional, que se emplea para alimentar sistemas de refrigeración, principalmente al compresor; componente encargado de que el refrigerante pueda fluir por el sistema, evitando el consumo de fuentes de energía que no resultan renovables y de igual manera

disminuyendo el impacto ambiental. Mencionando el uso de energías renovables representa una solución sostenible y eficiente con lo cual la aplicación de este tipo de tecnología puede ser sostenible y eficiente e, trayendo consigo grandes beneficios ya que se emplearía principalmente en zonas marginadas donde son limitados los recursos, así como el acceso a energía llega a ser limitado o inexistente [6]. En este contexto una de las aplicaciones que tiene las energías renovables es la energía solar, la cual podemos convertir en energía eléctrica a partir de un sistema fotovoltaico.

En el presente trabajo, se realiza la integración de tecnología fotovoltaica y de compresión de vapor para conocer el comportamiento energético y térmico de un refrigerador solar el cual podemos observar en la Error! Reference source not found.



Figura 1. Refrigerador solar de 50 litros.

La evaluación experimental del refrigerador solar permite analizar el desempeño energético del sistema, en donde el COP (*coeficiente de rendimiento*) será la variable energética presentada en este trabajo. De acuerdo con lo anterior será necesario medir la temperatura y considerar condiciones de saturación tanto a la salida del condensador como a la salida del evaporador. Para el análisis térmico se emplearán sensores de temperatura que se colocaran en el interior de la cavidad del refrigerador solar, con lo cual se obtendrá la curva de abatimiento de temperatura, y con ello determinar el punto de estabilización térmica. El equipo está construido a partir de un panel solar, dos baterías y un controlador. Las baterías están conectadas en serie y su función principal es almacenar la energía captada por el panel y de esta manera dotar al sistema de autonomía eléctrica cuando las condiciones climáticas no ofrezcan buena irradiación solar, inclusive las baterías ofrecen energía al sistema por las noches. Un esquema representativo del refrigerador solar se muestra en la Figura 2.



Figura 2 Componentes del refrigerador solar.

## Descripción del Proyecto

El estudio se desarrolló en la Universidad de Guanajuato - División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca DICIS. Para alcanzar los objetivos planteados, se evaluó un refrigerador solar de 50 litros, (Figura 1) el tamaño del contenedor se determinó en función de la cantidad de producto a almacenar. El material para el recubrimiento aislante del contenedor fue el poliestireno expandido, este material se produce a partir de un polímero termoplástico, que se expande mediante la incorporación de un agente espumante, generalmente pentano. Esto crea una estructura celular cerrada que es excelente para el aislamiento térmico.

En la Tabla 1 se muestran las dimensiones de la cabina a refrigerar, cabe mencionar que el diseño de este prototipo está pensado para almacenar productos pequeños ya que la idea principal es que el sistema sea móvil y fácil de transportar

**Tabla 1.** Dimensiones de la cabina del refrigerador.

Dimensiones	Valor
Alto	0.50 m
Ancho	0.69 m
Largo	0.76 m
Área	0.84 m <sup>2</sup>

El panel fotovoltaico del sistema de refrigeración cuenta con una potencia de 405 Watts, un voltaje de 49.8 V y una corriente de 9.58 A y es el responsable de la captura de energía solar y convertirla en energía eléctrica de corriente directa. El esquema del acomodo de los elementos que lo constituyen se muestra en la Figura 2. El proyecto no solo promueve el uso de energías renovables, sino que también ofrece una solución sostenible para la refrigeración.

## Pruebas

Se realizaron pruebas de desempeño energético y de funcionamiento en el equipo de refrigeración conforme a la Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2018, la cual establece los límites de eficiencia energética, métodos de prueba y requisitos de etiquetado para refrigeradores y congeladores electrodomésticos [7]. Esta norma fue seleccionada porque garantiza que los equipos sean evaluados de manera estandarizada, asegurando la comparabilidad y confiabilidad de los resultados. La NOM-015-ENER-2018 estipula que las pruebas deben durar 24 horas para simular un ciclo completo de uso diario, lo cual permite obtener una medición precisa del consumo energético bajo condiciones de operación realistas y constantes.

Para la operación del refrigerador solar en días nublados, se cuenta con un set de baterías que ofrecen autonomía para que el equipo trabaje incluso con poca radiación solar.

Las pruebas realizadas para el funcionamiento fueron:

1. Determinación de la masa óptima de refrigerante para alcanzar las condiciones de operación deseadas
2. Comportamiento térmico del interior de la cabina.
3. Evaluación del desempeño energético del equipo sin carga térmica.
4. Evaluación del desempeño energético del equipo con carga térmica.

### Determinación de la masa óptima de refrigerante

Para maximizar la eficiencia y el rendimiento del sistema de refrigeración, es crucial determinar la masa óptima del fluido de trabajo. Este proceso implica realizar pruebas con diferentes cantidades de refrigerante y evaluar el impacto en las temperaturas alcanzadas y la estabilidad térmica del sistema. Se realizaron pruebas con tres diferentes cantidades de refrigerante (R-134a): 20 g, 30g, y 40g.

### Evaluación térmica del Sistema de Refrigeración

Para evaluar el rendimiento energético del sistema de refrigeración, se realizaron dos pruebas: una sin carga térmica y otra utilizando medias pintas de agua con glicol, con una concentración de glicol del 33.33% y de agua del 66.67%. Utilizar medias pintas de agua con glicol es fundamental para simular carga térmica en un refrigerador, ya que proporciona un entorno controlado con temperatura estable y uniforme, esencial para realizar pruebas precisas. El glicol actúa como anticongelante, permitiendo realizar pruebas a temperaturas bajas sin riesgo de congelación del agua, la concentración mencionada anteriormente permite realizar pruebas a una temperatura de hasta  $-16.2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [8]. Esta práctica permite verificar la capacidad del refrigerador para manejar diferentes niveles de carga térmica, asegurar la precisión de las mediciones y evaluar la eficiencia del sistema en condiciones extremas. En resumen, las medias pintas de agua con glicol garantizan una evaluación confiable y representativa del rendimiento del refrigerador.

Para evaluar el rendimiento térmico del sistema de refrigeración, se midió la temperatura en diferentes zonas del sistema. Estas mediciones se realizaron tanto en el interior como en el exterior del contenedor. Se utilizaron termopares estratégicamente ubicados para asegurar la precisión de las lecturas. Las posiciones de los sensores se detallan en la Figura 3, estas mediciones permitieron obtener un perfil térmico detallado del refrigerador. De esta manera, se pudo monitorear y analizar cómo se distribuía el calor en el sistema y cómo variaban las temperaturas en los diferentes puntos críticos, lo que es fundamental para la caracterización térmica del sistema y para entender su eficiencia y comportamiento energético.

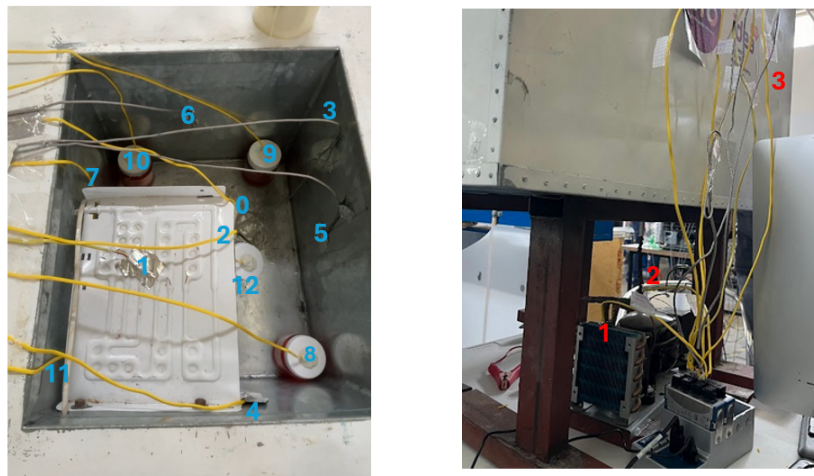


Figura 3. Ubicación de termopares en el interior (azul) y exterior (rojo) del refrigerador.

Los equipos e instrumentos que se utilizaron en este experimento incluyen sensores de temperatura tipo K, conocidos por su alta precisión y fiabilidad en un rango amplio de temperaturas. Estos sensores fueron adaptados a un sistema de adquisición de datos marca National Instruments, específicamente en un chasis cDAQ – 9174 CompactDAQ, el cual ofrece una plataforma modular y flexible para la recolección de datos en tiempo real. El módulo de entrada de temperatura de 16 canales, modelo NI-9213, es un componente clave de este sistema, ya que permite la entrada simultánea de múltiples termopares, facilitando así la monitorización de varias zonas del refrigerador de manera simultánea. Este módulo es ideal para aplicaciones de termopares debido a su alta precisión y baja deriva térmica [9].

Para la interpretación y análisis de los datos obtenidos, se utilizó el software NI SignalExpress, que proporciona una interfaz intuitiva para configurar las mediciones, visualizar los datos en tiempo real y realizar análisis posteriores. Este software es esencial para procesar la gran cantidad de datos recolectados y para asegurar que las lecturas sean precisas y útiles para el estudio.

En la Tabla 2. se presenta la ubicación específica de cada sensor dentro del refrigerador, así como su correspondiente canal en el módulo NI-9213. Esta tabla es fundamental para entender la distribución de los puntos de medición y para correlacionar los datos de temperatura con las distintas zonas del sistema de refrigeración.

**Tabla 2.** Ubicación de los termopares en el contenedor.

Ubicación	Termopares
0	Mide la temperatura en el centro del recipiente
1	Mide la temperatura arriba del evaporador
2	Mide la temperatura a bajo del evaporador
3	Mide la temperatura en la base del contenedor
4 - 7	Miden la temperatura en las paredes del equipo
8-12	Miden la temperatura en las medias pintas
1	Mide la temperatura en la línea de succión hacia el evaporador
2	Mide la temperatura en la línea de descarga hacia el condensador
3	Mide la temperatura del ambiente

La Figura 4 muestra el módulo de entrada de temperatura con los canales correspondientes.

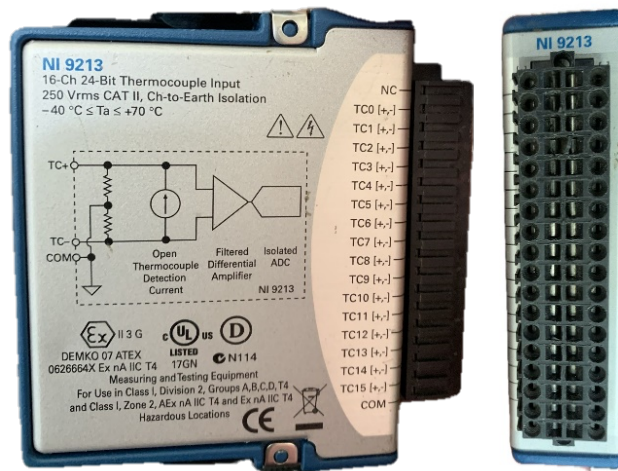


Figura 4. Módulo de entrada de temperatura modelo NI-9213.  
 Fuente: Elaboración propia.



## Evaluación Energética del Sistema de Refrigeración

El contenedor opera con un sistema de refrigeración por compresión de vapor simple, el cual se muestra a continuación en la Figura 5. Este diagrama representa las relaciones entre la presión, la entalpía, la temperatura, la entropía y la calidad del vapor, permitiendo visualizar y calcular los cambios de estado del refrigerante en el ciclo de refrigeración. El diagrama permite trazar el ciclo de refrigeración completo, incluyendo los procesos de compresión (1-2), condensación (2-3), expansión (3-4) y evaporación (4-1). También facilita la determinación de las propiedades termodinámicas del refrigerante en diferentes puntos del ciclo, como entalpía, presión, temperatura y entropía.

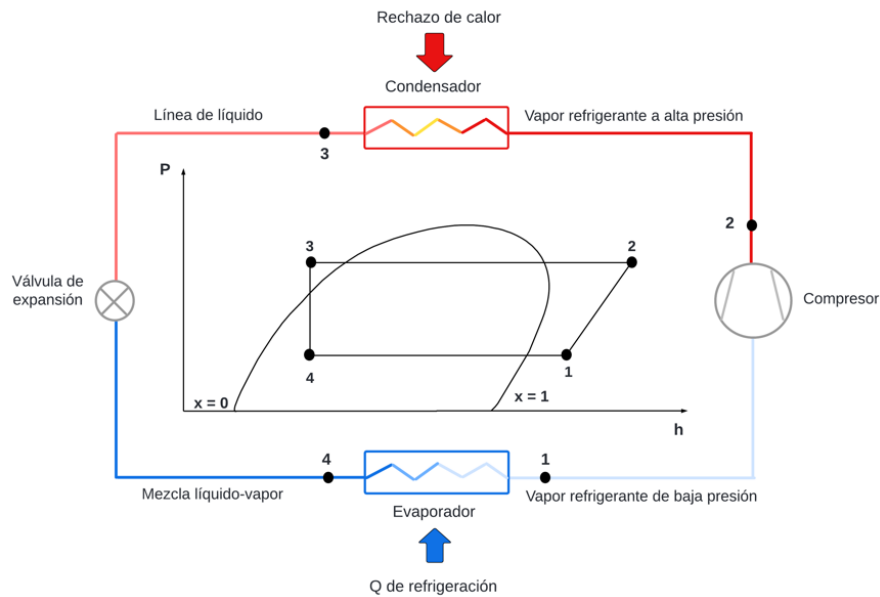


Figura 5. Procesos termodinámicos en el refrigerante.

Mediante el uso del software Engineering Equation Solver (EES), se evaluó el rendimiento energético del sistema de refrigeración, para esto se llevó la creación de un modelo analítico del ciclo de refrigeración, como se mencionó con anterioridad se basó en el ciclo de compresión de vapor. Para esta evaluación se consideró temperatura de descarga en el compresor y temperatura de salida en el condensador, valores adquiridos de manera experimental obtenidos en las anteriores pruebas realizadas, con lo cual se desarrolló la siguiente Tabla 3. *Propiedades de estados termodinámicas R-134a*. Donde podemos observar valores de temperatura empleados, presión, entalpía, entropía y calidad.

Tabla 3. *Propiedades de estados termodinámicas R-134a*.

Estado	Temperatura (°C)		Presión (kPa)		Entalpía (kJ/kg)		Entropía (kJ/kg)		Calidad	
	Sin producto	Con producto	Sin producto	Con producto	Sin producto	Con producto	Sin producto	Con producto	Sin producto	Con producto
1	-10.34	-9.14	198.1	207.6	244.3	245	0.9379	0.9371	1	1
2 (ideal)	54	54	1225	1232	282.3	282.2	0.9379	0.9371		
2 (real)					295	294.6				
3	21	28	1225	1232	95.03	90.69			0	0
4	-10.34	-9.14	198.1	207.6	95.03	90.69				

A partir de la Tabla 3. *Propiedades de estados termodinámicas R-134a*. se llevaron a cabo diversos cálculos, tanto para el sistema que no se considera carga térmica del producto como donde si la considera. Los cálculos que se realizaron; fueron la capacidad de enfriamiento (Ql), el trabajo (Wc) que se le proporciona al sistema, así como el cálculo del Coeficiente de Rendimiento (COP). Para determinar la potencia del sistema se realizó el cálculo del estado termodinámico 2 real (h2r) mediante la ecuación (1) donde para ellos se consideró (h2i) como parte de un proceso isoentrópico, (h1) estado termodinámico a la entrada del compresor y con una eficiencia isentrópica ( $\eta$ ) de 75% en el compresor.

$$h_{2r} = \frac{h_{2i} - h_1}{\eta} + h_1 \quad (1)$$

De igual manera el cálculo del COP, el cual se obtuvo mediante la ecuación (2) en función de las entalpías ecuación (3).

$$COP = \frac{Q_l}{W_c} \quad (2)$$

$$COP = \frac{h_{2r} - h_1}{h_1 - h_4} \quad (3)$$

## Resultados

### Masa Óptima de Refrigerante

Las pruebas de masa óptima de refrigerante son esenciales para maximizar la eficiencia y el rendimiento de un sistema de refrigeración. En el estudio realizado, se evaluaron las temperaturas alcanzadas con 20 g, 30 g y 40 g de refrigerante, obteniéndose -14.01°C, -17.18°C y -21.21°C respectivamente. Aunque el aumento de refrigerante mejora el enfriamiento, la relación no es lineal, y el incremento de 20 g a 40 g no produce el doble de enfriamiento, lo cual se muestra en la Figura 6. Aumentar la cantidad de refrigerante puede conllevar costos adicionales y posibles problemas operativos. Por ello, es crucial encontrar un balance entre la cantidad de refrigerante, la eficiencia energética y el rendimiento del sistema para determinar la masa óptima que maximice la eficiencia sin sobrecargar el equipo.

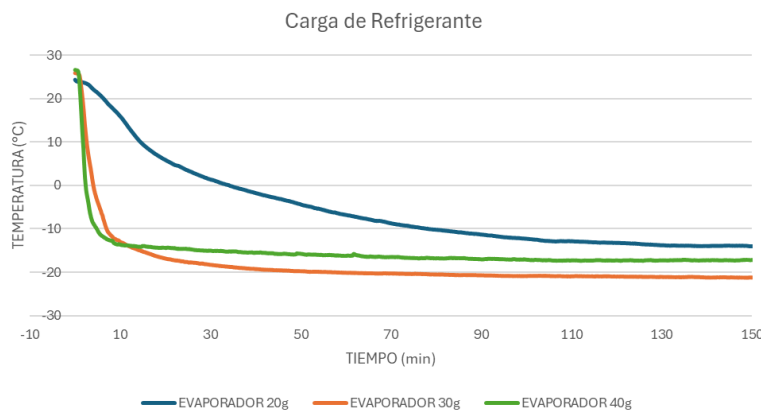


Figura 6. Evaluación de la masa óptima del refrigerante.

### Prueba 1 sin carga térmica

El sistema de refrigeración completa su primer ciclo en 82.56 minutos. Posteriormente, cada ciclo de operación tiene una duración aproximada de 34 minutos. A medida que el sistema continúa operando, se observa que alcanza la estabilidad térmica alrededor del minuto 179. En este punto, la temperatura dentro de la cabina del contenedor se estabiliza, manteniéndose constante. Esto demuestra que, tras un periodo inicial de ajuste, el sistema es capaz de mantener un control térmico preciso. Lo anterior se ilustra en la Figura 7, donde se muestra el comportamiento al interior de la cabina del contenedor para el primer ensayo, sin carga térmica en el cual se obtiene el tiempo que toma al sistema llegar a la estabilidad térmica. Durante la prueba se observó que el comportamiento de la temperatura ambiente fue prácticamente constante, manteniendo un valor entre los 25°C durante toda la prueba.

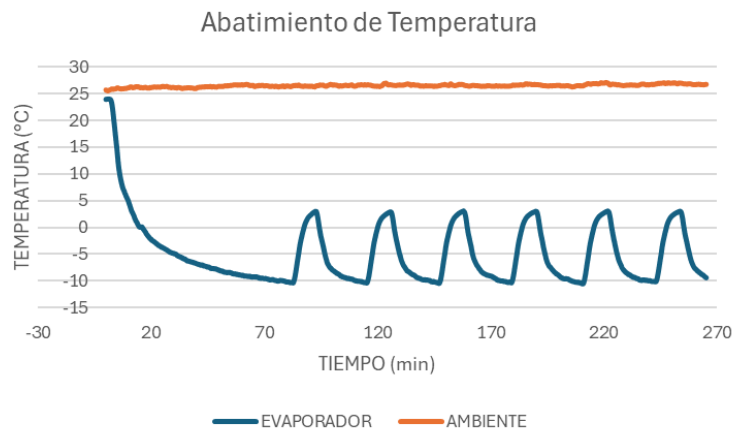


Figura 7. Prueba 1 Comportamiento de la temperatura en el interior del refrigerador en función del tiempo.

### Prueba 2 con carga térmica

El sistema de refrigeración completa su primer ciclo en 87.03 horas. Posteriormente, cada ciclo de operación tiene una duración aproximada de 28.6 minutos. A medida que el sistema continúa operando, se observa que alcanza la estabilidad térmica alrededor del minuto 174. Lo anterior se ilustra en la Figura 8, donde se muestra el comportamiento al interior de la cabina del contenedor para la prueba con carga térmica. Durante la prueba se observó que el comportamiento de la temperatura ambiente fue prácticamente constante, manteniendo un valor entre los 24°C durante toda la prueba.

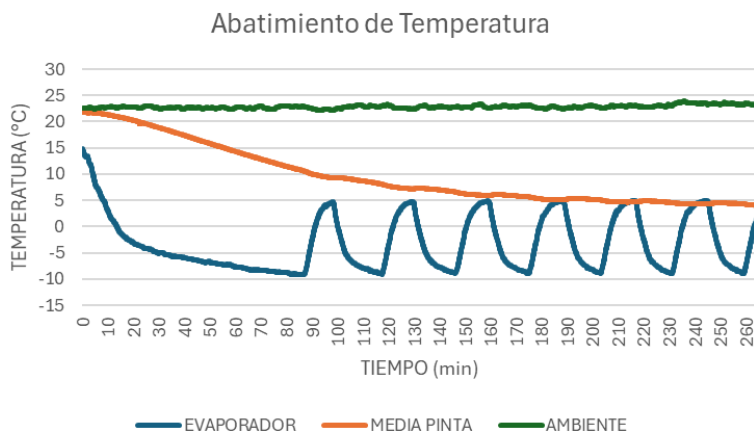


Figura 8. Prueba 2. Comportamiento de la temperatura en el interior del refrigerador en función del tiempo.



Los resultados obtenidos de la caracterización energética indican que el cálculo del Coeficiente de Rendimiento (COP) del refrigerante R-134a, es mayor cuando no existe carga térmica, mientras que al introducir una masa al sistema el COP se ve reducido en un 3.4%, con lo cual queda evidenciado la influencia de la carga térmica en el sistema; lo anterior se observa en la Figura 9.

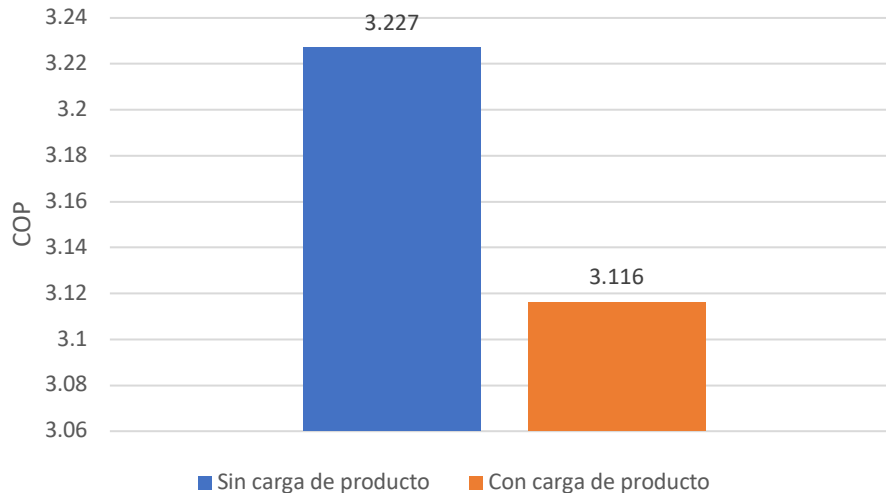


Figura 9. Caracterización energética.

El valor del COP calculado refleja la capacidad del sistema para proporcionar enfriamiento en relación con la energía eléctrica consumida. Este estudio confirma la viabilidad del uso de temperaturas experimentales para el modelado y cálculo de desempeño de sistemas de refrigeración mediante EES. Un COP más alto indicaría una mayor eficiencia energética y un rendimiento más favorable del sistema, pero cabe aclarar que esto solo podría ser posible en ciclos de refrigeración ideales; ya que en los modelos teóricos ideales asumen condiciones perfectas de operación, también se toma como proceso ideal, donde se considera que no habría pérdidas de energía, en un proceso ideal toda la energía suministrada se convierte en energía útil para el sistema.

## Conclusiones

La cantidad de refrigerante necesaria para alcanzar la temperatura objetivo se debe determinar experimentalmente en función de la prestación energética requerida. Siendo la masa de 20 g la que se obtuvo en este trabajo.

La estabilidad térmica del sistema se alcanza a partir del minuto 179 en la prueba 1, con lo cual a partir de ese momento el sistema mantiene la temperatura constante.

La influencia de carga térmica en el sistema produjo un aumento en el tiempo en el que se presenta el primer ciclo, dicho aumento fue de 5 minutos aproximadamente.

Los resultados obtenidos revelaron un COP de [3.227] para el sistema sin carga de producto y un COP [3.116] indicando una eficiencia considerable del sistema para poder generar refrigeración mediante el uso de energía solar como fuente de electricidad, El valor del COP es relevante ya que además de poder evaluar la eficiencia del sistema, podemos comparar el desempeño con otros sistemas convencionales que utilizan energía eléctrica de corriente alterna.

## Bibliografía/Referencias

- [1]. Carel. (2021), ¿Qué es la refrigeración?, Recuperado el 10 de Julio del 2024, de <https://www.carel.es/what-s-refrigeration#:~:text=La%20refrigeraci%C3%B3n%20es%20el%20proceso.a%20temperaturas%20inferiores%20a%20%2D60%C2%BAC>.
- [2]. Molina, J. M. (2023), La importancia de la congelación de alimentos INTARCON, Recuperado el 10 de Julio del 2024, de <https://www.intarcon.com/congelacion-de-alimentos/>
- [3]. CGE. (2018), Electrodoméstico que consumen más energía eléctrica, Recuperado el 10 de Julio del 2024, de <https://www.cge.cl/electrodomesticos-que-consumen-mas-energia-electrica/#>
- [4]. DANFOSS. (2020), ENGINEERIG TOMORROW, Recuperado el 12 de Julio del 2024, de <https://www.danfoss.com/esmx/about-danfoss/our-businesses/cooling/the-fridge-howitworks/#:~:text=Los%20refrigeradores%20funcionan%20haciendo%20que.y%20produce%20el%20efecto%20deseado>.
- [5]. CNUEE. (2022), Servicios energéticos, Refrigeración, Recuperado el 12 de Julio del 2024 de <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/servicios-energeticos-refrigeracion>
- [6]. Pacheco, G. (2016), CCEEA, Recuperado el 12 de Julio del 2024 de <https://ccea.mx/blog/energia-solar-termica/aireacondicionado-y-refrigeracionsolarfototermica#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20refrigeraci%C3%B3n%20solar.energ%C3%ADa%20solar%20fotot%C3%A9rmica%20y%20fotovoltaica>
- [7]. NOM-015-ENER-2018. (2018) Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado, diario oficial de la federación. Recuperado 10 de Julio, 20204.
- [8]. CORECHEM (2020), Propylene Glycol Heat Transfer Fluid. Recuperado 23 de Julio, 2024, <https://corecheminc.com/wp-content/uploads/2020/06/Freeze-Point-Chart-GlycoChill-Propylene-Glycol-Heat-Transfer-Fluid.pdf>
- [9]. Halvorsen, H. P. (2016). Data Acquisition. University College of Southeast Norway. Recuperado 23 de Julio, 2024.