

Evaluación del desempeño energético de un refrigerador solar usando refrigerantes de bajo GWP

Energy Performance Evaluation of a Solar Refrigerator Using Low-Gwp Refrigerants

Daniela Rangel Acosta¹, Vicente Pérez García²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca, Universidad de Guanajuato.
d.rangel.acosta@ugto.mx¹, v.perez@ugto.mx²

Resumen

La refrigeración solar representa una alternativa tecnológica limpia y sostenible frente a los sistemas convencionales de enfriamiento, especialmente en zonas con acceso limitado a infraestructura eléctrica. En este trabajo se presenta la evaluación energética de un refrigerador solar fotovoltaico portátil que opera con refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP). Se diseñó y construyó un prototipo basado en un sistema de compresión de vapor alimentado por energía solar, probado con los refrigerantes R134a y R1234ze(E) bajo distintas condiciones de carga térmica. Los resultados mostraron que el sistema con R134a alcanzó temperaturas en el evaporador cercanas a -15 °C, con un comportamiento estable y eficiente, mientras que el R1234ze(E) presentó un desempeño térmico menor debido a una limitación energética durante la prueba, aunque mantuvo una diferencia térmica significativa respecto al ambiente. Estos resultados permiten analizar el impacto energético del tipo de refrigerante sobre la eficiencia del sistema y demuestran que el uso de alternativas de bajo GWP es técnicamente viable para aplicaciones de refrigeración solar sostenible, reduciendo el impacto ambiental sin comprometer la funcionalidad del equipo.

Palabras clave: refrigeración solar; GWP; R134a; R1234ze(E); sistema fotovoltaico; refrigerante alternativo.

Contexto tecnológico y ambiental

La refrigeración solar constituye una alternativa tecnológica emergente que aprovecha la energía del sol como fuente principal para generar frío, ya sea mediante procesos térmicos o mediante la conversión fotovoltaica de la radiación en electricidad. Este tipo de soluciones resulta especialmente relevante ante el aumento de la demanda energética global y la urgencia de mitigar los efectos del cambio climático, al proporcionar una opción de enfriamiento limpia, sostenible y replicable en diversos contextos (Álvarez, 2019).

Su aplicación cobra particular relevancia en regiones con alta irradiación solar y limitada infraestructura eléctrica, donde la disponibilidad de soluciones autónomas y descentralizadas es fundamental. Además de reducir la dependencia de los combustibles fósiles, la refrigeración solar contribuye significativamente a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), alineándose con los compromisos internacionales de sostenibilidad energética y resiliencia climática (Chile, 2017).

Existen dos enfoques principales para la implementación de esta tecnología: la refrigeración solar térmica, que emplea colectores solares para activar ciclos termofísicos o termoquímicos (como los de absorción, adsorción o por eyector), y la refrigeración solar fotovoltaica, que utiliza energía eléctrica generada por módulos solares para alimentar sistemas de compresión de vapor convencionales (Álvarez, 2019). Ambos enfoques han demostrado viabilidad técnica, aunque su adopción depende de factores como la disponibilidad de recursos, las condiciones climáticas, la escala de uso y los costos asociados (Coils, 2022).



Figura 1. Colectores solares

Según su principio de operación, las tecnologías de refrigeración solar se clasifican en: enfriamiento evaporativo, refrigeración por eyector, sistemas por compresión de vapor y tecnologías por sorción. Entre estas, el sistema de compresión de vapor acoplado a módulos fotovoltaicos se destaca por su versatilidad, madurez tecnológica y eficiencia, lo cual lo convierte en una opción viable para aplicaciones domésticas y comerciales, especialmente en contextos que requieren autonomía energética y confiabilidad operativa (Theory, 2022).

La expansión a nivel mundial de la refrigeración solar ha permitido su integración en diversos sectores. En África, se utiliza en la cadena de frío para vacunas en zonas rurales; en América Latina y Asia, en cámaras frías agrícolas para reducir pérdidas postcosecha; y en Europa y Medio Oriente, en edificios que integran sistemas solares térmicos para climatización pasiva o activa. Las capacidades de estos sistemas oscilan desde unidades portátiles de 30–150 litros hasta soluciones industriales para cámaras frigoríficas o producción de hielo a gran escala (HVAC&R, 2007).

Un aspecto técnico esencial en la operación de estos sistemas es el almacenamiento de energía térmica, que permite extender su funcionamiento durante la noche o en días nublados. Para ello, se emplean técnicas de almacenamiento de calor sensible, calor latente (mediante materiales de cambio de fase) o almacenamiento químico. En los sistemas fotovoltaicos, los componentes fundamentales incluyen paneles solares, controladores de carga, baterías de ciclo profundo e inversores, cuya configuración varía según la demanda energética y las características del refrigerador utilizado (Engineering, 2020).

A pesar de los avances en la integración de fuentes limpias, gran parte de los sistemas de refrigeración actuales siguen operando con refrigerantes de alto potencial de calentamiento global (GWP), como el R134a (GWP $\approx$ 1430). Esta contradicción entre una fuente de energía sostenible y un fluido de trabajo con alto impacto ambiental ha impulsado la búsqueda de refrigerantes alternativos de bajo GWP. Entre ellos, el hidrofluoroolefínico R1234ze(E), con un GWP cercano a 6, representa una opción prometedora para reducir el impacto climático sin comprometer el desempeño del sistema (Coils, 2022). La Tabla 1 presenta las principales características de ambos refrigerantes.

Tabla 1. Principales características de los refrigerantes utilizados en este estudio (Coils, 2022).

Propiedad	R1234ze(E)	R134a
Temperatura de ebullición	255.4 K (-19 °C)	247.0 K (-26 °C)
Temperatura crítica	229°F (109 °C)	214°F (101 °C)
Presión crítica	3.63 MPa (527 PSI)	4.06 MPa (589 PSI)
Potencial de calentamiento global (GWP)*	<10	~1300
Potencial de agotamiento del ozono (ODP)	0	0
Clasificación de seguridad ASHRAE	A2L	A1

Valores estimados de GWP calculados a un horizonte de 100 años según IPCC.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el comportamiento energético de un refrigerador solar fotovoltaico móvil, al sustituir el R134a por R1234ze(E), considerando diferentes niveles de carga térmica. Los resultados permitirán analizar el impacto energético del cambio de refrigerante sobre la eficiencia del sistema y su viabilidad como tecnología sostenible, tanto en términos energéticos como ambientales (UNAM-Zaragoza, 2021).

Metodología y caracterización del sistema

Con el objetivo de evaluar el comportamiento energético de un refrigerador solar fotovoltaico operando con refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global (GWP), se llevó a cabo la caracterización técnica del sistema a estudiar. Este análisis incluye tanto la descripción de los componentes principales como el funcionamiento del ciclo de refrigeración por compresión, el cual fue alimentado a través de un sistema fotovoltaico autónomo.

A fin de garantizar una comparación objetiva entre el refrigerante convencional (R134a) y la alternativa propuesta (R1234ze(E)), se mantuvieron constantes las condiciones de operación, modificando únicamente el fluido de trabajo. Esta estrategia experimental permite observar de manera directa el impacto del refrigerante sobre el desempeño térmico y energético del sistema bajo distintos niveles de carga térmica.

La siguiente sección presenta una descripción detallada del sistema de refrigeración solar utilizado, incluyendo su arquitectura energética, características técnicas, y criterios de selección, con el propósito de sustentar el análisis posterior de resultados.

Esquema funcional del sistema

El sistema se compone de los siguientes subsistemas integrados:

Generación fotovoltaica: Conformada por módulos solares capaces de convertir la radiación solar en energía eléctrica de corriente directa (CD). Esta energía constituye la fuente primaria de alimentación para el sistema de refrigeración.

Controlador de carga: Dispositivo electrónico encargado de regular el flujo energético entre los paneles solares y el banco de baterías. Su función principal es proteger las baterías de sobrecargas o descargas profundas, maximizando su vida útil.

Banco de baterías: Conjunto de baterías de ciclo profundo utilizadas para almacenar la energía generada durante las horas de mayor irradiación solar, asegurando la operación del sistema en periodos nocturnos o en condiciones de baja radiación.

Inversor: En caso de que el compresor opere con corriente alterna (CA), se incluye un inversor que convierte la energía almacenada en las baterías de CD a CA.

Unidad de refrigeración por compresión de vapor: Dispositivo térmico encargado del proceso de enfriamiento. Está constituido por un compresor hermético, un condensador, un dispositivo de expansión y un evaporador.

Descripción del prototipo

El prototipo desarrollado consiste en un sistema de refrigeración solar móvil diseñado para aplicaciones en zonas con acceso limitado a infraestructura eléctrica. Su arquitectura combina un sistema de compresión de vapor con alimentación fotovoltaica, todo integrado en una estructura portátil para entornos rurales o semiurbanos.

La estructura principal del prototipo está compuesta por un chasis de material PTR, el cual sostiene los diferentes componentes del sistema. Se incorpora una cabina térmicamente aislada en el compartimento central, diseñado para conservar productos sensibles a la temperatura, como alimentos o medicamentos. Este se conecta a un sistema de refrigeración que permite el intercambio de fluido refrigerante.

El sistema cuenta con una cubierta inclinada superior que permite el montaje de uno o varios paneles solares fotovoltaicos, cuya orientación busca maximizar la captación de energía solar. Esta energía es regulada mediante un controlador de carga, almacenada en un banco de baterías ubicado en el compartimento inferior, y posteriormente suministrada al compresor del sistema de refrigeración.

La estructura está montada sobre dos ruedas principales y una rueda guía, lo que facilita su movilidad manual en distintos terrenos. También se incorporan elementos funcionales como un manillar trasero, que permite manipular el sistema de forma segura, y un espacio para incorporar instrumentación adicional para la medición del desempeño térmico.

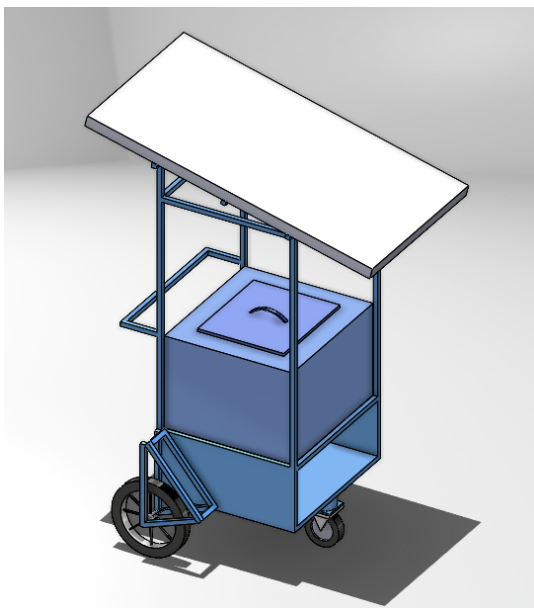


Figura 2. Vista lateral del modelo del prototipo en SolidWorks

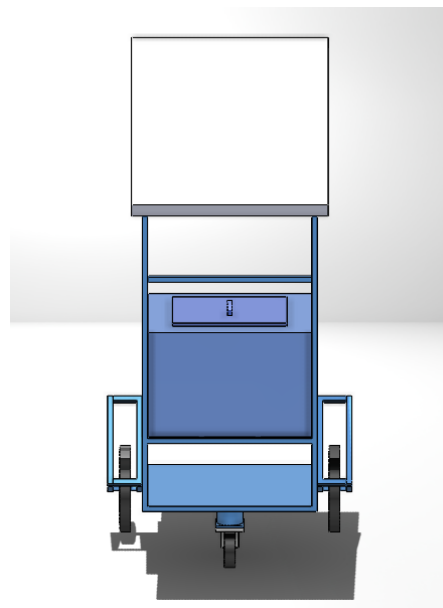


Figura 3. Vista frontal del modelo del prototipo en SolidWorks

Determinación experimental de la carga óptima de R134a

Con el propósito de establecer una condición base adecuada para la comparación entre el refrigerante convencional (R134a) y el refrigerante alternativo de bajo GWP (R1234ze(E)), se realizó una etapa de calibración experimental destinada a determinar la carga óptima de R134a. Esta carga debía permitir alcanzar el punto de operación definido para el sistema, correspondiente a una temperatura interna en el evaporador de -15°C , condición representativa del régimen de funcionamiento en aplicaciones de refrigeración doméstica.

La metodología aplicada consistió en la ejecución de ensayos empíricos sucesivos, en los que se introdujeron diferentes masas de refrigerante al sistema, partiendo de una cantidad inicial de 40 g. Durante cada ensayo, se monitoreó la temperatura alcanzada en el evaporador bajo condiciones ambientales controladas y sin carga térmica interna, con el fin de evitar perturbaciones durante el proceso de estabilización térmica.

En la prueba inicial con 40 g de R134a, el sistema logró una temperatura mínima de -10°C , insuficiente para cumplir con el criterio de operación establecido. Se procedió entonces a realizar incrementos graduales de carga, observando el comportamiento térmico en cada caso. El análisis de los resultados permitió identificar que la temperatura objetivo de -15°C se alcanzaba de manera estable cuando la carga total del sistema era de 43 g de R134a. Esta masa fue adoptada como valor de referencia para todas las pruebas posteriores.

Las pruebas de desempeño se realizaron bajo un nivel de carga térmica representativo, con duración específicas para permitir el análisis del comportamiento en régimen permanente:

- Carga nula: Prueba sin contenido en el refrigerador, con una duración de 3 horas.

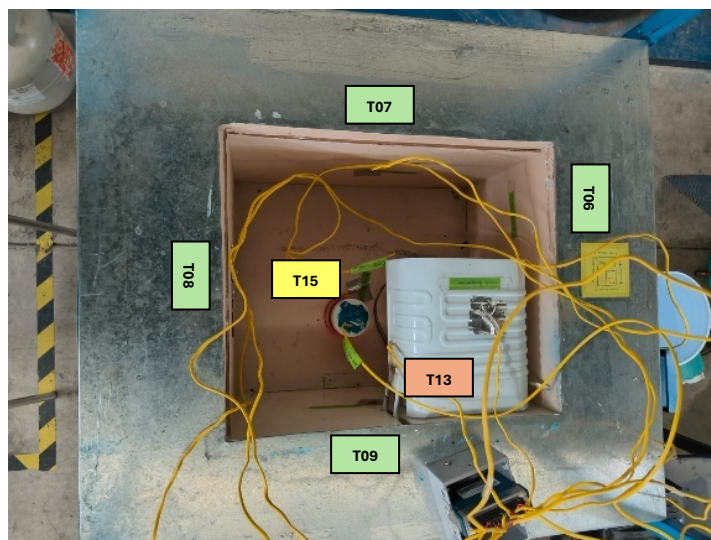


Figura 4. Carga nula del refrigerador

En la Figura 4 se observa el interior del refrigerador solar durante la condición de carga nula. Se distingue el compartimiento aislado térmicamente, donde se realizaron las mediciones, así como el evaporador instalado en la parte posterior. También se aprecian los termopares distribuidos en puntos estratégicos para registrar la evolución de la temperatura, y el frasco con anticongelante utilizado como medio de simulación térmica. Esta configuración permitió analizar el comportamiento térmico del sistema en ausencia de carga interna.

Para el registro y análisis de datos, se utilizó el software SignalExpress en conjunto con un módulo de adquisición de datos NI 9213, el cual permite la lectura de múltiples canales de termopares tipo K. La instalación de los sensores se diseñó para cubrir tanto las temperaturas internas como las condiciones de operación del ciclo de refrigeración, con las conexiones distribuidas según la Tabla 2.

Tabla 2 Distribución de termopares y ubicación de medición

Termopar	Ubicación de medición
T02	Temperatura ambiental
T03	Succión del compresor
T04	Tapa del refrigerador
T05	Interior del refrigerador
T06	Pared lateral 4
T07	Pared lateral 3
T08	Pared lateral 2
T09	Pared lateral 1
T11	Descarga del compresor
T12	Base del refrigerador
T13	Superficie del evaporador
T15	Medio de simulación térmica (anticongelante)

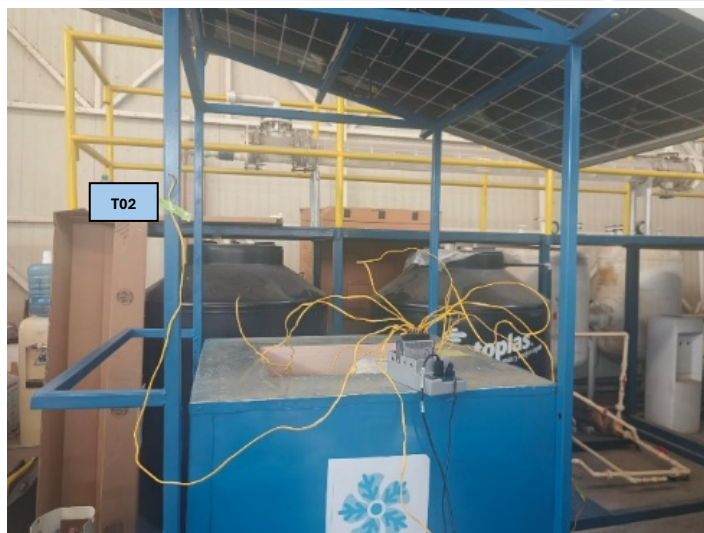


Figura 5. Distribución de termopares

En la Figura 5 se muestra el prototipo completo del refrigerador solar durante la etapa experimental. En la parte superior se observa el panel fotovoltaico inclinado, encargado de captar la radiación solar y suministrar energía al sistema. Debajo, se encuentra la estructura metálica que sostiene el compartimiento aislado, donde se realiza el proceso de refrigeración. Sobre la tapa del compartimiento se aprecian los cables de los termopares, conectados a distintos puntos del interior para registrar temperaturas en el evaporador, las paredes laterales y el medio de simulación térmica (anticongelante). En el costado se observa el módulo de adquisición de datos que recibe las señales de los sensores. Esta configuración experimental permitió monitorear simultáneamente el comportamiento térmico del sistema y validar el desempeño energético del refrigerador.

Con la ejecución de las pruebas en las condiciones establecidas, fue posible registrar el comportamiento térmico del sistema en función del tiempo para cada escenario de carga. La información obtenida mediante la instrumentación instalada permitió generar los perfiles de temperatura correspondientes, los cuales se presentan a continuación para analizar la respuesta del sistema bajo operación con R134a.

Resultados experimentales del R134a

Durante la prueba de carga nula, se obtuvo un conjunto de datos que permite caracterizar el comportamiento térmico del sistema en ausencia de masa térmica interna. Las siguientes gráficas muestran la evolución temporal de la temperatura en el evaporador y en el centro del refrigerador, en comparación con la temperatura ambiente.

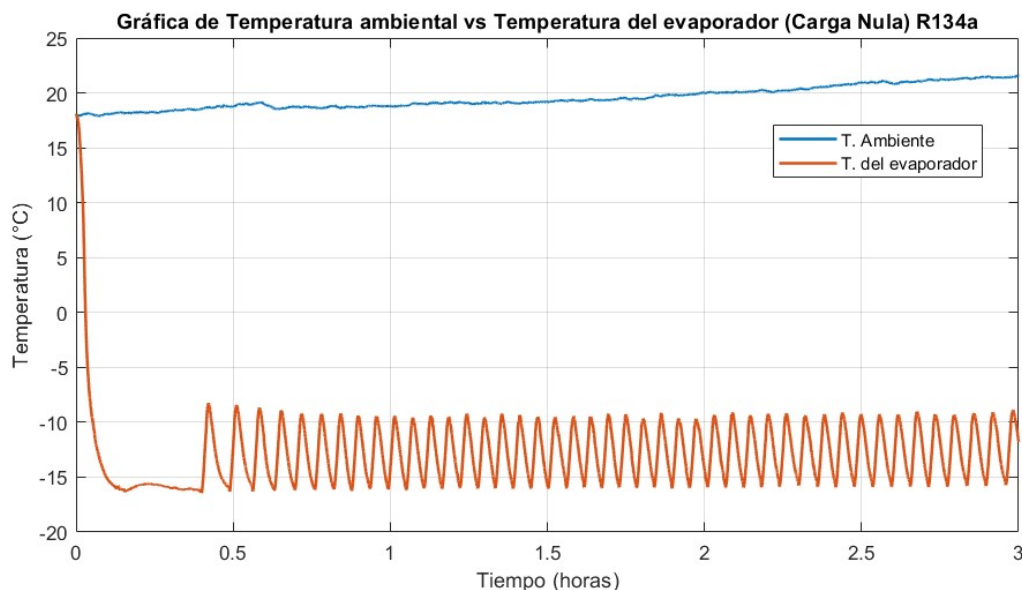


Figura 6. Temperatura ambiental vs Temperatura interior.

En la Figura 6 se presenta la evolución de la temperatura medida sobre la superficie del evaporador (T13) frente a la temperatura ambiente (T02), durante un periodo de aproximadamente cuatro horas.

A partir de este punto, se observa un comportamiento cíclico típico de un sistema con control por temperatura, donde el compresor se activa y desactiva de forma intermitente para mantener la temperatura dentro de un rango definido.

Este patrón de oscilaciones térmicas refleja el comportamiento del sistema para extraer el calor del interior de la cabina, indicando un control funcional del ciclo de encendido y apagado del compresor. Las fluctuaciones regulares de temperatura del evaporador permiten mantener condiciones estables, aun cuando la temperatura ambiente se mantuvo relativamente constante, oscilando ligeramente entre 18 y 21 °C durante todo el periodo de prueba (3 horas).

El análisis de este comportamiento permite inferir que el sistema alcanza la estabilidad térmica durante los primeros 25 minutos y a partir de aquí se presenta una periodicidad en los valores máximos y mínimos de temperatura en el evaporador.

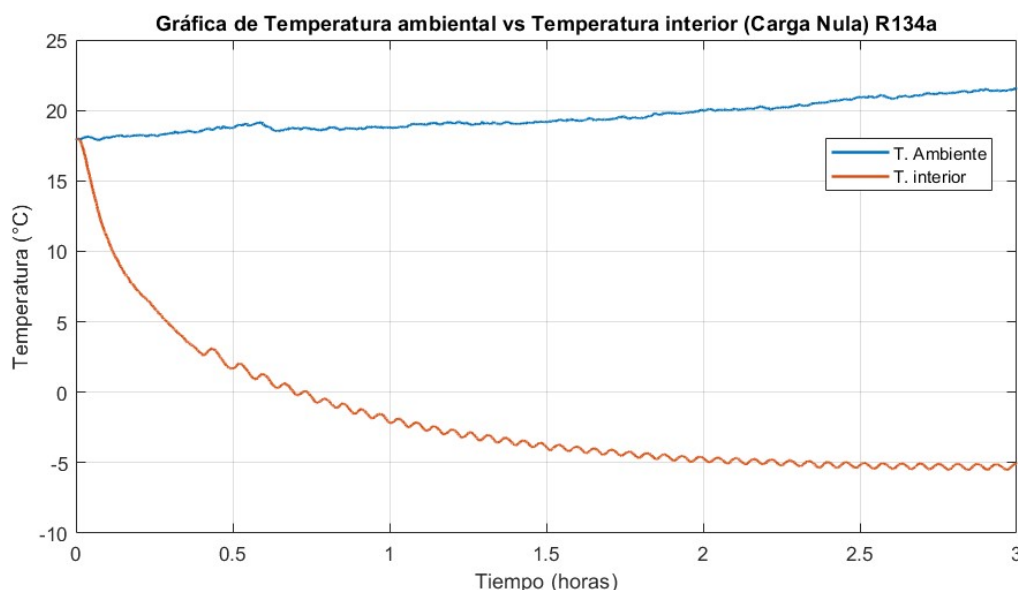


Figura 7. Temperatura ambiental vs Temperatura del evaporador.

La Figura 7 muestra la evolución térmica registrada en el centro del refrigerador (T05), comparada nuevamente con la temperatura ambiente (T02). Se observa como a partir de las 2.5 horas se alcanza una estabilidad térmica con una temperatura de -5.5°C . Esta tendencia confirma que el sistema, aun en ausencia de carga térmica interna, logra mantener el compartimento por debajo de la temperatura de congelación del agua.

A diferencia del evaporador, el perfil térmico del centro del refrigerador no presenta oscilaciones marcadas, debido a la ubicación central del sensor. No obstante, se evidencian pequeñas fluctuaciones que reflejan los ciclos de activación del compresor, aunque atenuadas por la capacidad térmica del espacio interno.

Resultados experimentales del R1234ze(E)

Una vez establecida la referencia de desempeño con el refrigerante R134a, se procedió a realizar una serie de pruebas utilizando el refrigerante alternativo R1234ze(E), con el objetivo de analizar su comportamiento térmico bajo condiciones similares de operación. Este refrigerante representa una opción de bajo impacto ambiental, al contar con un GWP considerablemente menor, lo que lo convierte en un candidato viable para su uso en sistemas de refrigeración solar sostenibles.

Para mantener una comparación objetiva, se replicaron las condiciones establecidas en la fase inicial del experimento, respetando los mismos parámetros de carga base y monitoreo. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la condición de carga nula, los cuales permiten observar el desempeño del sistema operando con R1234ze(E) en términos de enfriamiento y estabilidad térmica.

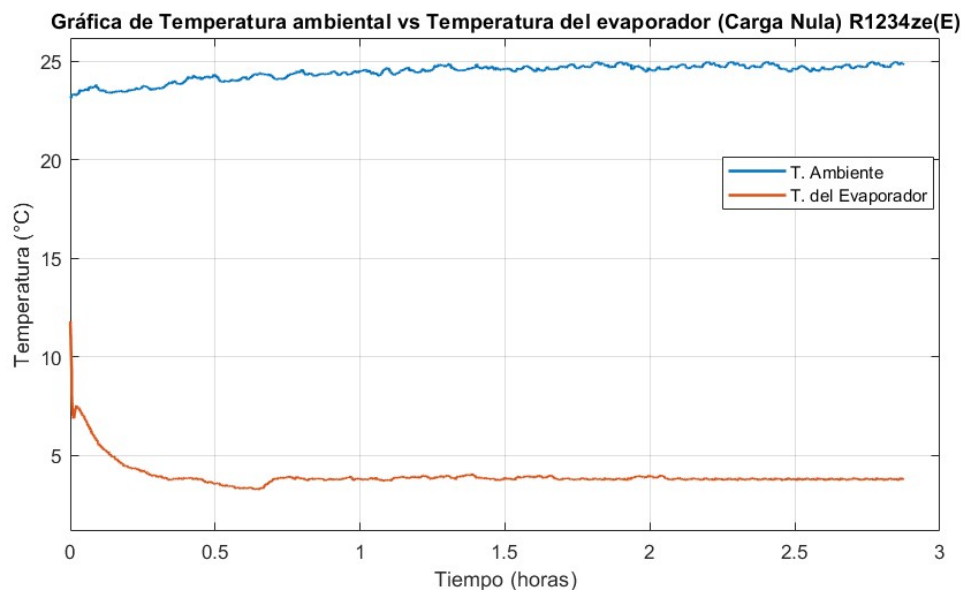


Figura 8. Temperatura ambiental vs Temperatura del evaporador

La Figura 8 muestra el comportamiento de la temperatura superficial del evaporador (T13) en comparación con la temperatura ambiente (T02), durante la prueba con carga nula utilizando el refrigerante R1234ze(E). Esta medición permite observar de forma directa el funcionamiento térmico del evaporador, encargado de absorber el calor del interior del compartimento.

Durante los primeros minutos de operación se observa una disminución inicial en la temperatura del evaporador, alcanzando valores cercanos a 5 °C. Sin embargo, a diferencia de lo esperado para este componente, no se registraron descensos pronunciados ni ciclos térmicos marcados durante el resto de la prueba. Este comportamiento atípico se debió a una condición imprevista durante la prueba, en la cual una de las baterías del sistema dejó de operar correctamente, limitando la capacidad del refrigerador para trabajar a su máxima potencia.

Como resultado, el compresor no pudo ejecutar ciclos completos de encendido y apagado de manera eficiente, lo que repercutió directamente en la estabilidad térmica del evaporador. Aun así, se logró mantener una temperatura por debajo de la ambiental, lo que indica que el sistema conservó cierto grado de funcionalidad bajo condiciones de alimentación energética parcial.

Durante todo el periodo de prueba, la temperatura ambiente se mantuvo estable entre 23.5 °C y 24.8 °C, sin representar un factor externo significativo en la respuesta observada.

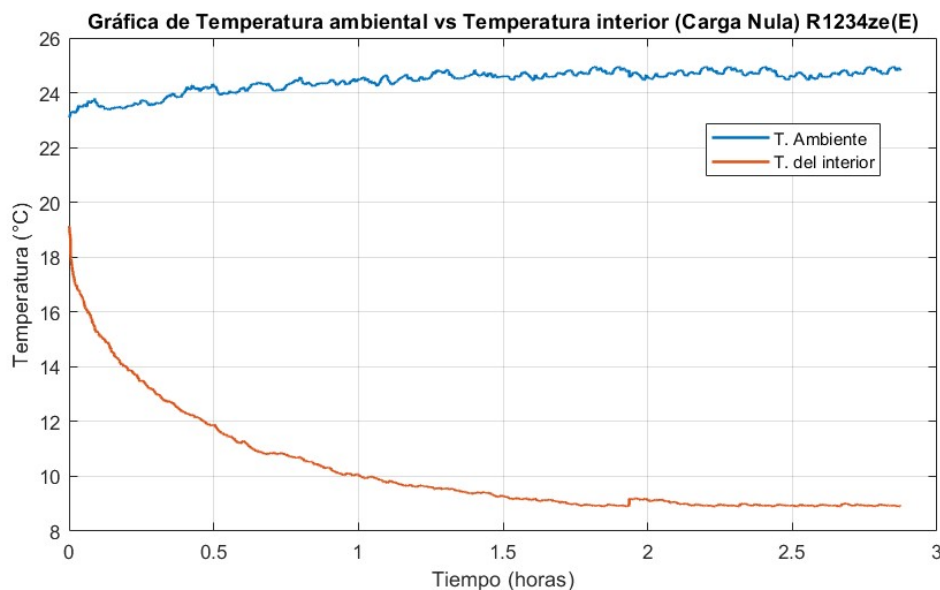


Figura 9. Temperatura ambiental vs Temperatura interior

La Figura 9 presenta la evolución de la temperatura en el centro del compartimento del refrigerador (T05), comparada con la temperatura ambiente (T02), durante la prueba sin carga térmica utilizando el refrigerante R1234ze(E). Esta medición permite evaluar el comportamiento general del sistema en condiciones ideales, es decir, sin productos que actúen como masa térmica.

Se observa que la temperatura interior inicia alrededor de 23 °C y desciende progresivamente durante los primeros minutos de operación, alcanzando valores mínimos cercanos a 18 °C. A pesar de este descenso inicial, la curva no muestra un comportamiento cíclico ni una reducción significativa por debajo de los 15 °C, como se esperaría en condiciones normales de operación.

Este resultado se vio influenciado por una limitación técnica durante la prueba, ya que una de las baterías encargadas de alimentar el sistema dejó de funcionar completamente, lo que impidió que el compresor operara a su capacidad máxima. Como consecuencia, el proceso de enfriamiento se ralentizó y no se logró alcanzar temperaturas suficientemente bajas en el compartimento.

A lo largo de la prueba, la temperatura ambiente se mantuvo relativamente estable, con variaciones mínimas entre 23.5 °C y 24.8 °C, lo que permitió aislar el efecto del inconveniente energético como la principal causa del desempeño reducido

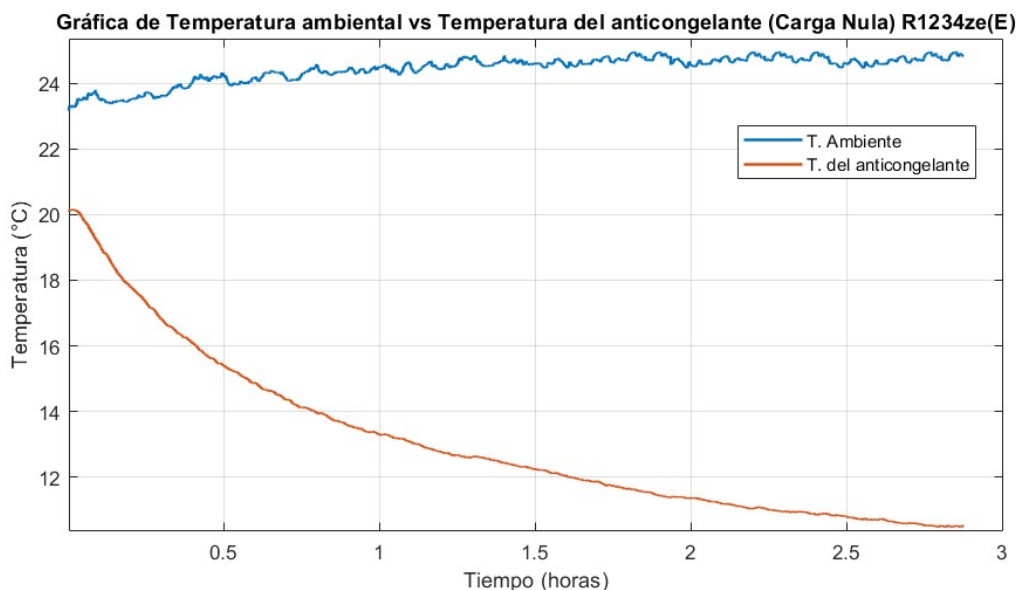


Figura 10. Temperatura ambiental vs Temperatura del anticongelante

La Figura 10 muestra la evolución de la temperatura del medio de simulación térmica (anticongelante), registrada por el sensor (T15), en comparación con la temperatura ambiente (T02), durante la prueba en condición de carga nula con el refrigerante R1234ze(E). El anticongelante se colocó dentro de un frasco ubicado a media altura en el compartimento del refrigerador, con el objetivo de simular el comportamiento térmico de un líquido almacenado.

Desde el inicio del ensayo se observa una disminución continua en la temperatura del anticongelante, que parte de aproximadamente 20 °C y desciende hasta alcanzar un valor cercano a los 10 °C al cabo de tres horas de funcionamiento. Este descenso progresivo refleja la capacidad del sistema para extraer calor del interior del compartimento, incluso sin la presencia de una masa térmica significativa.

A lo largo de la prueba, la temperatura ambiente se mantuvo relativamente estable, con variaciones menores entre 23.5 y 24.5 °C, lo cual permite asegurar que el comportamiento térmico registrado se debe principalmente al desempeño del sistema de refrigeración.

Comparación de resultados

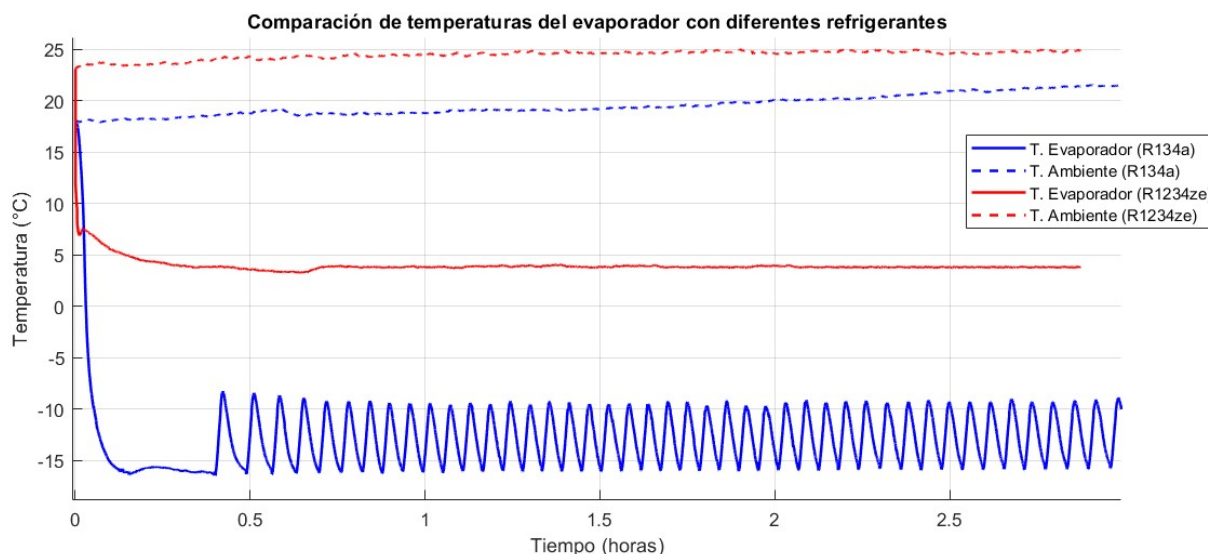


Figura 11. Comparación de temperaturas del evaporador con diferentes refrigerantes

En la Figura 11, al comparar el comportamiento del sistema de refrigeración solar bajo condición de carga nula con ambos refrigerantes, es posible identificar contrastes importantes en cuanto al desempeño térmico alcanzado. Durante la prueba con R134a, el sistema mostró un enfriamiento rápido y eficiente; la temperatura en el evaporador descendió hasta alcanzar valores cíclicos en torno a los -15°C , evidenciando una operación controlada en la que el compresor se activaba y desactivaba de manera periódica para mantener un rango térmico estable.

En cambio, al utilizar R1234ze(E), el descenso de temperatura fue más limitado. El evaporador apenas alcanzó temperaturas cercanas a los 5°C , y no se observaron oscilaciones cíclicas propias del encendido y apagado del compresor, lo que sugiere que el sistema no llegó a operar en su régimen habitual. A pesar de esto, se mantuvo una diferencia térmica clara respecto a la temperatura ambiente, lo que indica que, aunque el sistema no logró alcanzar su desempeño óptimo, sí conservó una funcionalidad básica. Esta diferencia en el comportamiento puede explicarse, al menos parcialmente, por una condición técnica durante la prueba con R1234ze(E) que limitó el suministro energético disponible.

El contraste también se refleja en la temperatura del centro del compartimento. Con R134a, el sensor instalado en esa zona mostró un descenso sostenido hasta estabilizarse alrededor de los -5.5°C , mientras que con R1234ze(E) la reducción fue más moderada, alcanzando apenas los 18°C . Una tendencia similar se observó en el medio de simulación térmica (anticongelante): en el primer caso, se registró una disminución hasta temperaturas cercanas al punto de congelación, mientras que, en el segundo caso, el anticongelante alcanzó un mínimo aproximado de 10°C tras tres horas de operación.

En conjunto, los resultados muestran que el sistema, con R134a, fue capaz de alcanzar condiciones térmicas adecuadas para aplicaciones de conservación en ambientes sin carga térmica, mientras que con R1234ze(E), si bien no se logró un enfriamiento tan pronunciado, sí se mantuvo un comportamiento coherente con el tipo de refrigerante y con las condiciones energéticas bajo las cuales se desarrolló la prueba. Esta diferencia no invalida el potencial del R1234ze(E), pero sí señala la necesidad de asegurar un entorno operativo adecuado para evaluar plenamente su desempeño en igualdad de condiciones.

Es importante destacar que, tras la prueba con el refrigerante R1234ze(E), el sistema permaneció en condiciones operativas y pudo haber sido sometido a una nueva evaluación una vez resuelto el fallo en las baterías; sin embargo,

por limitaciones de tiempo y recursos experimentales, no fue posible realizar una segunda prueba. Aun así, los resultados obtenidos permitieron observar tendencias relevantes sobre el comportamiento térmico del sistema. Si las baterías hubiesen operado con normalidad, se habría esperado un desempeño más estable del R1234ze(E), con temperaturas en el evaporador comparables, aunque ligeramente superiores, a las del R134a, tal como se reporta en la literatura. Estudios previos (Triki, 2024) señalan que el R1234ze(E) puede alcanzar eficiencias cercanas a las del R134a bajo condiciones de operación adecuadas, confirmando que el comportamiento observado en este trabajo se alinea con los resultados documentados en investigaciones similares.

Conclusiones

El desarrollo de un sistema de refrigeración solar portátil que opera con refrigerantes de bajo GWP constituye un paso importante hacia tecnologías energéticas más limpias y sostenibles, especialmente en regiones con acceso limitado a la red eléctrica. Los resultados obtenidos demostraron que el tipo de refrigerante influye significativamente en el comportamiento térmico del sistema: el R134a ofreció un desempeño estable y eficiente, mientras que el R1234ze(E), pese a las limitaciones técnicas que redujeron su potencia operativa, evidenció un alto potencial ambiental y funcionalidad bajo condiciones parciales de energía. Para fortalecer el desempeño global del sistema, se recomienda optimizar la capacidad de almacenamiento eléctrico y ajustar la carga del refrigerante, con el fin de lograr una evaluación más equilibrada entre ambos fluidos. En conjunto, el estudio confirma la viabilidad del uso de refrigerantes de bajo GWP en sistemas de refrigeración solar, resaltando su papel en la mejora de la eficiencia energética y en la disminución del impacto ambiental asociado a los sistemas de enfriamiento convencionales.

Referencias

- Álvarez, J. R. (2019). *Sistema de refrigeración por compresión de vapor operado con energía solar: Una propuesta para comunidades rurales*. Obtenido de Memorias SOMIM 2019: https://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A4_139.pdf
- Chile, F. (2017). *Informe CSET-2017-PU-003-SP: Estudio de tecnologías para refrigeración solar*. Obtenido de Fraunhofer Chile Research – Centro de Tecnologías para Energía Solar.
- Coils, S. R. (1 de June de 2022). *R-1234ze: Pros, cons, & comparisons*. Obtenido de Super Radiator Coils: <https://www.superradiatorcoils.com/blog/r-1234ze-pros-cons-comparisons>
- Ecoinventos. (2021). *¿Cómo funcionan las instalaciones de refrigeración solar?* Obtenido de Ecoinventos: <https://ecoinventos.com/frio-solar/>
- Engineering, T. (2020). *6 métodos de enfriamiento en ingeniería térmica*. Obtenido de Thermal Engineering: <https://www.thermal-engineering.org/es/6-metodos-de-enfriamiento-en-ingenieria-termica/>
- Froztec. (2019). *Sistemas de enfriamiento para procesos industriales*. Obtenido de Froztec: <https://blog.froztec.com/sistemas-de-enfriamiento-para-procesos-industriales-es>
- HVAC&R, M. (Octubre de 2007). *La refrigeración solar*. Obtenido de Mundo HVAC&R: <https://www.mundohvacr.com/2007/10/la-refrigeracion-solar/>
- Inestroza-Lizardo, S. V. (2016). *Uso de tecnologías de refrigeración en productos hortofrutícolas en Mesoamérica*. Obtenido de Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha: <https://www.redalyc.org/pdf/813/81349041003.pdf>
- López, G. I. (2017). *Informe CSET-2017-PU-003-SP: Estudio de tecnologías para refrigeración solar*. Obtenido de Fraunhofer Chile.

Theory, E. (2022). *¿Qué se entiende por refrigeración solar?* Obtenido de Energy Theory:

<https://energytheory.com/es/%C2%BFQu%C3%A9-se-entiende-por-refrigeraci%C3%B3n-solar/>

Triki, Z. S. (2024). Exergy analysis of a solar vapor compression refrigeration system using R1234ze(E) as an environmentally friendly replacement of R134a. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 22.

UNAM-Zaragoza. (2021). *Unidad 1.1.6: Enfriamiento en la industria química*. Obtenido de Blog de Química Industrial:

<https://blogceta.zaragoza.unam.mx/quimicaindustrial/unidad1/unidad-11/ou16/>