

## Estudio experimental de los refrigerantes R1234ze(E) y R516A para el reemplazo del R134a en un refrigerador doméstico

Experimental study of refrigerants R1234ze(E) and R516A for the replacement of R134a in a domestic refrigerator

Juan Manuel Belman-Flores<sup>\*1</sup>, María Fernanda Meza Enríquez<sup>2</sup>, Uriel Arredondo-Gutiérrez<sup>2</sup>, Christian Arturo Campos-Vega<sup>2</sup>, Emilio Galván-Rentería<sup>2</sup>, David Rodríguez-Valderrama<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de investigación IRSE. Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. CP. 36885, México.

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. CP. 36885, México.

\*Autor de correspondencia

### Resumen

Este trabajo presenta la viabilidad de los refrigerantes R1234ze(E) y R516A para ser usados en la refrigeración doméstica como reemplazo directo del R134a. Se evaluó un refrigerador doméstico instrumentado con el fin de caracterizar su desempeño. Se definió la carga óptima de refrigerante a través del mínimo consumo de energía, resultando una carga de 80 g para el R516A y 84 g para el R1234ze(E), lo que representó una carga menor con respecto al R134a (90 g). Acorde a la carga óptima, los principales resultados indicaron que ambos refrigerantes son viables para ser usados en la refrigeración doméstica, mostrando comportamientos térmicos similares en ambos compartimentos del refrigerador. Además, estos refrigerantes presentaron un menor consumo de energía en comparación al R134a. El R1234ze(E) mostró un incremento del 8% en el coeficiente de desempeño (COP, por sus siglas en inglés) con respecto al R134a. Así, el R1234ze(E) puede ser considerado como un refrigerante a largo plazo, mientras que el R516A puede ser una mejor opción mediante modificaciones al diseño del refrigerador, lo que ayuda a mejorar su COP.

**Palabras clave:** Consumo de energía; temperatura; refrigerador doméstico; R516A; R1234ze(E).

### Abstract

This paper presents the feasibility of R1234ze(E) and R516A refrigerants for use in domestic refrigeration as a direct replacement for R134a. A domestic refrigerator was evaluated and instrumented to characterize its operating conditions. The optimal refrigerant charge was defined based on the minimum energy consumption of the refrigerator, resulting in a charge of 80 g for R516A and 84 g for R1234ze(E), representing a lower charge for R134a (90 g). The refrigerator was evaluated under the optimal charge, and the main results showed that both alternative refrigerants are viable to be used in domestic refrigeration, showing similar thermal behaviors in both refrigerator compartments. In addition, these refrigerants had lower energy consumption compared to R134a. R1234ze(E) showed an 8% increase in coefficient of performance (COP) over R134a. Thus, R1234ze (E) can be considered a long-term refrigerant, while the use of R516A can be a more viable option through some modifications in the refrigerator design, thus improving its COP.

**Keywords:** Energy consumption; temperature; domestic refrigerator; R516A; R1234ze(E).

Recibido: 13 de diciembre de 2022

Aceptado: 27 de marzo de 2023

Publicado: 17 de mayo de 2023

**Cómo citar:** Belman-Flores, J. M., Meza Enríquez, M. F., Arredondo-Gutiérrez, U., Campos-Vega, C. A., Galván-Rentería, E., & Rodríguez-Valderrama, D. (2023). Estudio experimental de los refrigerantes R1234ze(E) y R516A para el reemplazo del R134a en un refrigerador doméstico. *Acta Universitaria* 33, e3757. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2023.3757>

## Introducción

Desde los inicios de la refrigeración artificial, basada en compresión de vapor, se ha investigado la mejora en condiciones de operación que permitan un mejor desempeño térmico y energético del sistema de refrigeración. Estos sistemas trabajan con fluidos llamados refrigerantes, los cuales pueden contribuir de forma directa y negativa al medio ambiente cuando se presenta una fuga en el sistema. En este sentido, una de las áreas de investigación de gran interés en la industria del frío tiene que ver con el desarrollo y evaluación de nuevos refrigerantes alternos (Heredia-Aricapa *et al.*, 2020).

Dentro de la amplia variedad de los refrigerantes, los hidrofluorocarbonos (HFC) han sido los fluidos más ampliamente usados en los sistemas de refrigeración y aire acondicionado; surgieron como resultado de las restricciones del Protocolo de Montreal. Sin embargo, estos refrigerantes favorecen al efecto invernadero debido a sus altos valores del potencial de calentamiento global (*global warming potential*, GWP). Entre los HFC, el R134a ha sido el refrigerante más dominante en la industria del frío debido a sus excelentes propiedades termofísicas y alta eficiencia según la aplicación y condiciones de operación. Sin embargo, el R134a contribuye considerablemente al efecto invernadero por su alto valor de GWP de 1300; además, presenta una permanencia alta en la atmósfera de aproximadamente 14 años (Intergovernmental Panel of Climate Change [IPCC], 2013).

Actualmente, existen regulaciones a nivel mundial que restringen el uso de refrigerantes con altos valores de GWP. Por ejemplo, la regulación europea No. 517/2014 (F-Gas) restringe el uso de HFC con un valor de 150 o más en equipos de refrigeración y aire acondicionado (Official Journal of the European Union, 2014), o la enmienda de Kigali, donde se propone la disminución del 80% a 85% en la producción y consumo de los HFC para mediados del siglo XXI (Birmipili, 2018). Así, se estima una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero en un 61% para el periodo establecido (Höglund-Isaksson *et al.*, 2017). Para el caso de México, la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) también estableció una hoja de ruta para la ejecución de la enmienda de Kigali en los diferentes sectores de la refrigeración y aire acondicionado (Semarnat, 2019). En el caso particular de la refrigeración doméstica, el R134a es el refrigerante que más se ha usado. De acuerdo con la hoja de ruta, los nuevos refrigeradores deben usar un hidrocarburo como el R600a, y de manera muy limitada se menciona el uso de la hidrofluoroolefina R1234yf, lo anterior sin presentar una justificación clara o limitantes en el valor del GWP. Otro aspecto importante para resaltar es el consumo energético que representa el sector de la refrigeración doméstica en México, alrededor del 30% del consumo eléctrico del sector residencial (Comisión Federal de Electricidad [CFE], 2022).

En los últimos años se han desarrollado nuevos refrigerantes, entre los que destacan las hidrofluoroolefinas, refrigerantes de cuarta generación con valores de GWP muy bajos cercanos a la unidad, así como el desarrollo de mezclas con propiedades termofísicas muy interesantes y similares a los refrigerantes convencionales HFC (Nair, 2021). En el caso particular de la refrigeración doméstica, se han evaluado nuevos refrigerantes sintéticos con valores bajos de GWP. Entre estos se encuentra el R1234yf, que presenta un GWP de 1, además de una nula destrucción a la capa de ozono (Honeywell, 2023). En este sentido, Belman-Flores *et al.* (2017a) evaluaron el R1234yf en refrigeradores domésticos con la finalidad de comparar el desempeño térmico y energético con relación al R134a. Los resultados mostraron que los comportamientos térmicos de ambos compartimentos del refrigerador son muy similares entre ambos refrigerantes. Sin embargo, el consumo de energía del R1234yf incrementó en un 4% en comparación al R134a, lo que lo limita inicialmente para considerarse como un reemplazo directo del R134a. Aprea *et al.* (2017) evaluaron el desempeño energético de las mezclas binarias R1234ze(E) como reemplazo directo del R134a, con lo que se obtuvo un menor impacto ambiental en términos del calentamiento global y una reducción en el consumo energético del 14% para el R1234ze(E). Más tarde, los autores estudiaron experimentalmente el desempeño climático del ciclo de vida del R1234yf y la mezcla R1234yf/R134a, concluyendo que el desempeño climático usando la mezcla arrojó una disminución del 17% con respecto al R134a (Aprea *et al.*, 2018). Karber *et al.* (2012) evaluaron el desempeño de un refrigerador doméstico usando los refrigerantes R1234yf y R1234ze(E) como reemplazos directos del R134a. Los autores comprobaron que el R1234yf es un reemplazo adecuado para el R134a desde el punto de vista del consumo energético, caso contrario al R1234ze(E).

Otros estudios recientes en la refrigeración doméstica han mostrado resultados interesantes sobre el comportamiento de refrigerantes alternos. Por ejemplo, el R152a es un fluido cuyas propiedades termodinámicas son muy similares al R134a, por lo que su evaluación experimental mostró un incremento del 26% en la razón de eficiencia energética en comparación al R134a (Chen *et al.*, 2022). La mezcla R513A (R1234yf/R134a) con un GWP de 573 es otro refrigerante alternativo para reemplazar al R134a. Recientemente, Belman-Flores *et al.* (2022) evaluaron experimentalmente el R513A como reemplazo directo del R134a en un refrigerador doméstico, resultando que el R513A mostró una reducción del 9% en el consumo de energía respecto al R134a. Lo anterior también se vio reflejado en un menor impacto del calentamiento total equivalente (*total equivalent warming impact*, TEWI), lo que proyecta al R513A como una opción viable a corto plazo como reemplazo directo del R134a en la refrigeración doméstica. Otro refrigerante de reciente creación es el R516A (R1234yf/R134a/R152a), el cual es una mezcla azeotrópica alterna con un GWP de 131 (Yang *et al.*, 2021), aspecto atractivo para el reemplazo del R134a. De tal manera que el desarrollo de nuevos refrigerantes, en este caso enfocados al reemplazo del R134a, brinda la oportunidad de evaluar su viabilidad técnica en la refrigeración doméstica.

Debido al estudio limitado de esta nueva generación de refrigerantes en la refrigeración doméstica y a la variación entre los resultados reportados, en este trabajo se presenta la evaluación experimental del R1234ze(E) y R516A (fluido de reciente creación y novedoso en la refrigeración doméstica) como reemplazo directo del refrigerante R134a en un refrigerador doméstico de pequeña capacidad volumétrica. El objetivo del estudio consiste en comprobar la viabilidad térmica y energética de estos refrigerantes alternos como sustitutos directos del R134a y analizar el valor del TEWI para el caso de México. Las pruebas experimentales se enfocan en determinar la carga óptima de los refrigerantes para el refrigerador de prueba; y una vez definida, se evalúan las condiciones de operación del refrigerador como las temperaturas y presiones de trabajo, el consumo de energía y el coeficiente de desempeño (COP) entre los refrigerantes evaluados.

## Propiedades de los refrigerantes alternos

Es bien conocido que las propiedades termodinámicas y de transporte del refrigerante determinan el desempeño de un sistema de refrigeración basado en compresión de vapor, además de sus aspectos de seguridad y de condiciones ambientales. Por lo tanto, es muy importante seleccionar adecuadamente el fluido más idóneo para cada aplicación de la refrigeración y aire acondicionado. En este trabajo se evalúa el R1234ze(E) y la nueva mezcla R516A, donde en la Tabla 1 se indican las propiedades más relevantes de estos refrigerantes en comparación al R134a. Cabe mencionar que los refrigerantes alternos son compatibles con el lubricante POE10 que viene cargado en el refrigerador de prueba.

Tabla 1. Propiedades de los refrigerantes R134a, R516A y R1234ze(E).

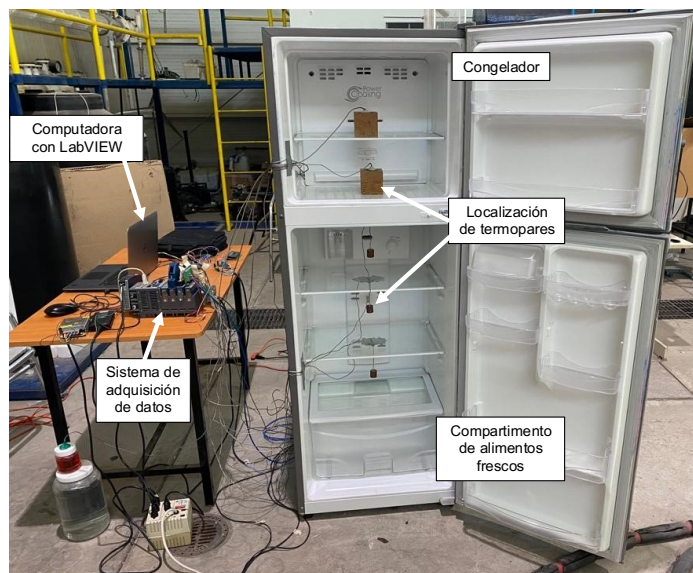
Propiedad	R134a	R516A	R1234ze(E)
Composición	—	R1234yf/ R134a/ R152a	—
Porcentaje de masa	—	(77.5/8.5/14)	—
Punto de ebullición [K]	247.08	243.8	254.18
Temperatura crítica [K]	374.21	369.78	382.51
Presión crítica [kPa]	4059.3	3615.2	3634.9
Densidad líquida [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	1206.7	1066.8	1163.1
Densidad de vapor [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	32.35	34.57	26.32
Calor latente [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]	216.91	202.83	195.62
$C_p$ líquido [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	1.4246	1.4563	1.3856
$C_p$ vapor [ $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	1.0317	1.0890	0.9758
Conductividad térmica líquida [ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	81.133	70.092	74.216
Conductividad térmica vapor [ $\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]	13.825	14.380	13.590
Viscosidad dinámica líquida [ $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	194.88	154.84	190.50
Viscosidad dinámica vapor [ $\mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ]	11.693	11.416	12.228
GWP	1300	131	6
Clase (ASHRAE)	A1	A2L	A2L

Fuente: Elaboración propia con uso de REFPROP v10 (Lemmon *et al.*, 2018) a temperatura de 298.15 K.

Mediante una inspección rápida de la Tabla 1, se observa que el valor del GWP de los refrigerantes alternos es mucho más bajo que el del R134a, aspecto importante con respecto al impacto ambiental. En cuanto al tema de seguridad, el R134a tiene una clasificación A1, indicando que es uno de los refrigerantes más seguros para trabajar. Los refrigerantes alternos presentan una clasificación A2L, lo que significa que son de baja toxicidad y ligeramente inflamables, aptos para funcionar en equipos de refrigeración y aire acondicionado. Por otro lado, el calor latente es una propiedad que, mientras más grande sea su valor, mayor capacidad tendrá el refrigerante de absorber calor, es decir, una mayor capacidad de enfriamiento, por lo que el R134a tiene un mayor calor latente en comparación a los refrigerantes alternos. En la Tabla 1 también se observa que la densidad de los refrigerantes alternos presenta cierta reducción respecto al R134a, por ejemplo, para el R516A se reduce en 11.6% y 3.6% para el R1234ze(E). Lo anterior se podrá reflejar en la cantidad de refrigerante con la que opere el refrigerador doméstico. En general, se puede observar que las propiedades de los refrigerantes alternos son similares dentro de cierto rango al R134a, por lo que brinda la oportunidad de evaluarse como posibles reemplazos directos del R134a.

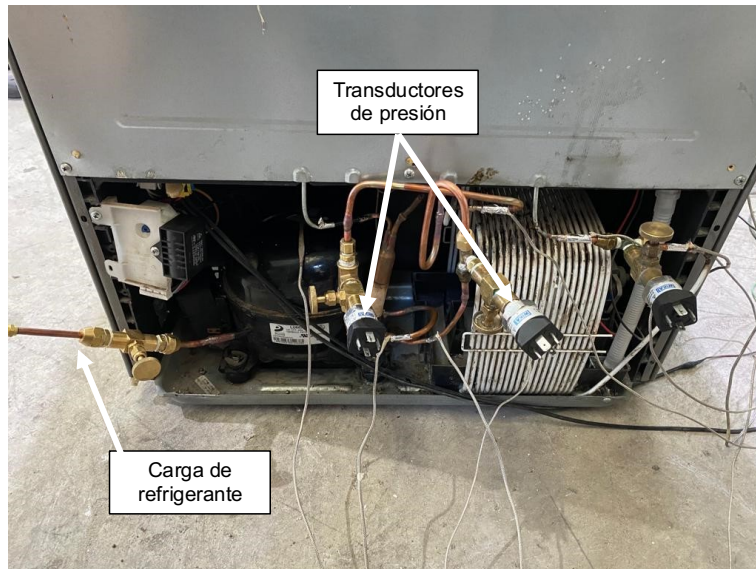
## Materiales y métodos

Para la evaluación de los refrigerantes alternos se construyó un banco experimental formado por un refrigerador doméstico comercial marca DAEWOO tipo top-mounted cuya capacidad volumétrica es de 300 L. Este refrigerador consta de un sistema de descongelación automático (*no-frost*), un congelador en la parte superior y un compartimento de alimentos frescos en la parte inferior. El refrigerador tal y como sale de fábrica trabaja con el refrigerante R134a y lubricante POE10 (lubricante compatible con los refrigerantes alternos en este estudio). Desde fábrica se especifica que el refrigerador trae una carga de 90 g de R134a. La Figura 1 ilustra el refrigerador de prueba y la instrumentación empleada para su evaluación.



**Figura 1.** Banco experimental.  
Fuente: Elaboración propia basada en el banco experimental.

El refrigerador está completamente instrumentado para el monitoreo en tiempo real del comportamiento del refrigerante en el desempeño térmico y energético del refrigerador. Para evaluar el comportamiento térmico se emplearon 15 termopares tipo K con una incertidumbre de  $\pm 0.03$  °C distribuidos dentro y fuera del refrigerador. Cinco termopares se ubicaron dentro de los dos compartimentos, dos en el congelador y tres en el compartimento de alimentos frescos. Acorde a la disponibilidad en el laboratorio, los termopares en el congelador fueron introducidos en un cubo de madera de 5 cm x 5 cm, ya que la madera por su calidad de absorber humedad del entorno circundante permite que la lectura de temperatura por el termopar no presente variaciones. En contraste, los termopares en el compartimento de alimentos frescos se fijaron a cilindros de cobre de 2.9 cm de diámetro por 2.9 cm de altura. Los termopares se ubicaron acorde a la norma mexicana NOM-015-ENER-2018 (Figura 1). El resto de los termopares se fijaron con cinta dieléctrica en la entrada y salida de cada equipo principal del ciclo de compresión de vapor, con los cuales se mide aproximadamente la temperatura del refrigerante. Otro termopar se empleó para medición de la temperatura ambiente como referencia. Las pruebas se realizaron dentro de un espacio cuya condición ambiental fue de  $26$  °C  $\pm$   $2$  °C. Además de la temperatura, también se midieron las presiones de trabajo del refrigerador, para lo cual se usaron transductores de presión marca WIKA modelo A-10 con un rango de medición de 0-25 bar y una incertidumbre del  $\pm 1\%$ . Los transductores de presión se colocaron en la línea de succión y en la descarga del compresor, como se aprecia en la Figura 2. Además, en la figura se observa la válvula de servicio donde se realiza la carga de refrigerante y vacío del sistema.



**Figura 2.** Ubicación de los transductores de presión y servicio de carga.  
Fuente: Elaboración propia basada en el banco experimental.

La medición de la energía eléctrica consumida por el refrigerador se realizó mediante un sensor de corriente ACS 712 de 30A, un transformador de voltaje ZMPT101B y un microcontrolador Arduino uno. Las señales generadas por los sensores fueron procesadas por medio de Arduino uno, y junto con el desarrollo del código se estimó el consumo de energía. El código desarrollado en Arduino fue utilizado para la estimación de la potencia consumida, arrojando un error aproximado al 1%. Además, los datos se almacenaron mediante un microSD para mostrarse en tiempo real en una pantalla LCD.

Para el procesamiento de las mediciones de temperatura y presión se usó un sistema de adquisición de datos NI cRIO-9030 integrado con la interfaz gráfica de LabVIEW. La señal de los transductores de presión se recibe a través del módulo NI 9201 y la temperatura mediante el módulo NI9217. Los datos de temperatura, presión y consumo de energía del refrigerador fueron registrados cada 10 segundos y almacenados en un archivo Excel por medio de LabVIEW. Así, la Figura 1 muestra el banco experimental completamente instrumentado usado en este trabajo.

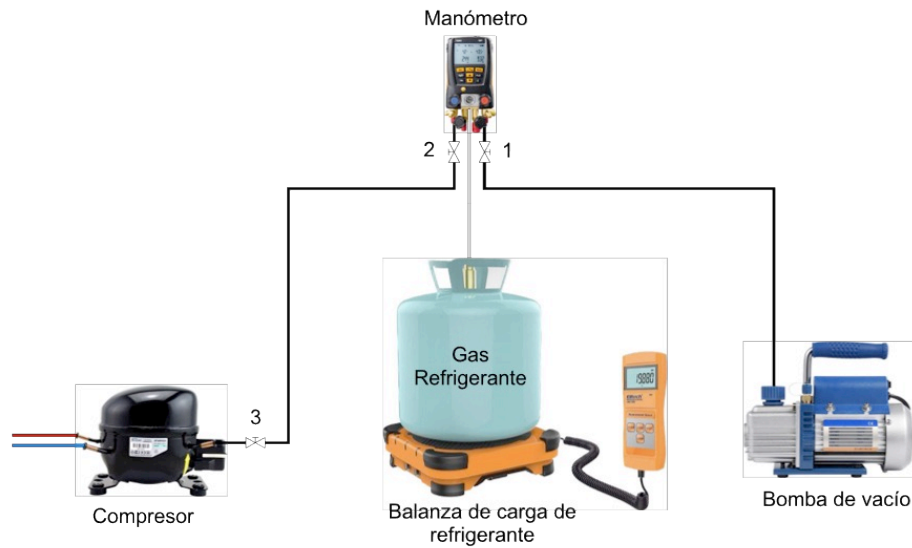
## Proceso de carga de refrigerante

La carga óptima de refrigerante dentro de un sistema de refrigeración es de suma importancia para su adecuado funcionamiento, así, en este trabajo se definen las cargas óptimas para los refrigerantes R1234ze(E) y R516A. Es importante mencionar que el refrigerador de prueba trae 90 g de R134a, por lo que esa es la carga óptima reportada desde fábrica. Para los refrigerantes alternos se propone una metodología donde la carga óptima corresponda a aquella que represente el menor consumo de energía en un tiempo de 24 h de funcionamiento, esto considerando la estabilidad térmica en ambos compartimentos del refrigerador. Las pruebas realizadas fueron con una carga inicial de 70 g, con aumento gradual entre las pruebas de 10 g, hasta llegar a una condición adecuada para la estimación de la carga óptima.

Para definir la carga de refrigerante, se realiza inicialmente un proceso de vacío en el sistema de refrigeración antes de cada evaluación de carga, esto con el propósito de eliminar el porcentaje de humedad dentro del mismo, lo cual también evita que el compresor sufra daños. Las pruebas se realizaron con la configuración actual del refrigerador, es decir, sin realizar cambios en el diseño del sistema de refrigeración (reemplazo directo del R134a).



El proceso de vacío y de carga se evaluó mediante la siguiente metodología. Inicialmente se realiza el vacío considerando las líneas de servicio a través de las tres válvulas abiertas hasta llegar a un vacío de alrededor de 0.8 bar (Figura 3). Luego, se cierran las válvulas 1 y 3 dejando abierta la válvula 2. Dado que las líneas de servicio están vacías, la válvula del cilindro de refrigerante está abierta. Así, se toma la masa del refrigerante y se inicia el proceso de carga ajustando manualmente la válvula 3. Una vez que se carga el refrigerador, verificado a través de una balanza digital, se cierra la válvula 3. La balanza digital tiene una incertidumbre de medición de  $\pm 0.01$  g. El proceso de vacío y carga de los refrigerantes fue con el uso de una válvula de servicio puesta en el compresor (Figura 2). Una vez definida la carga óptima del refrigerante, se procede a evaluar el refrigerador para conocer su comportamiento térmico y energético. Para esto, el tiempo promedio de las pruebas fue de alrededor de 6 h, donde el refrigerador alcanzó prácticamente la estabilidad térmica en ambos compartimentos.



**Figura 3.** Proceso de vacío y llenado de refrigerante.  
Fuente: Elaboración propia.

## Resultados

### Efecto de la carga de refrigerante en las condiciones de operación

La variación de carga de refrigerante puede presentar cierto efecto en el funcionamiento del refrigerador. En la Figura 4 se muestra el comportamiento de las presiones de trabajo del refrigerador respecto a la variación de la carga de los refrigerantes R1234ze(E) y R516A. Se debe resaltar que solo se muestra el caso de los refrigerantes alternos, ya que para el R134a se tiene definida la carga por parte del fabricante. Además, los resultados mostrados corresponden al promedio de un par de pruebas con fines de confiabilidad en los datos. En la Figura 4 se presenta la presión de descarga, donde se observa que existe un ligero incremento en la presión conforme aumenta la carga de refrigerante. A mayor carga, más refrigerante se acumula en los equipos de intercambio de calor, lo que provoca un aumento en la presión. Lo anterior también se ve reflejado en la presión de succión donde se presenta un ligero incremento conforme aumenta la carga de refrigerante. Además, en la Figura 4 se observa que el R516A presenta presiones de trabajo más altas que el R1234ze(E). En promedio, el R516A refleja un incremento del 50% para la presión de descarga y del 25% para la presión de succión en comparación con el R1234ze(E).

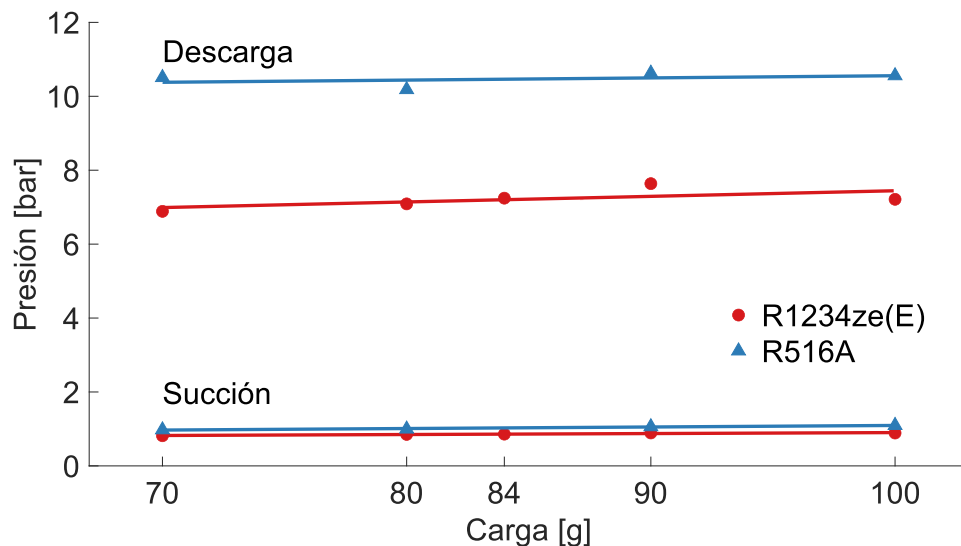


Figura 4. Presiones de trabajo en el refrigerador doméstico.  
Fuente: Elaboración propia.



Otra condición de interés son las temperaturas del refrigerante en la succión y descarga del compresor. En la Figura 5 se muestra la temperatura de succión y de descarga para ambos refrigerantes conforme varía la carga del refrigerante. Se puede observar que la temperatura de succión presenta una disminución, más notable para el R1234ze(E), donde a mayor carga de refrigerante ocurre un desbordamiento en el evaporador, lo que reduce la calidad del vapor y provoca una disminución en la temperatura. Por otro lado, la temperatura de descarga incrementa conforme aumenta la carga, ya que los equipos de intercambio de calor tienen más refrigerante acumulado. Finalmente, en la Figura 5 se observa que el R516A presenta condiciones térmicas más calientes que el R1234ze(E).

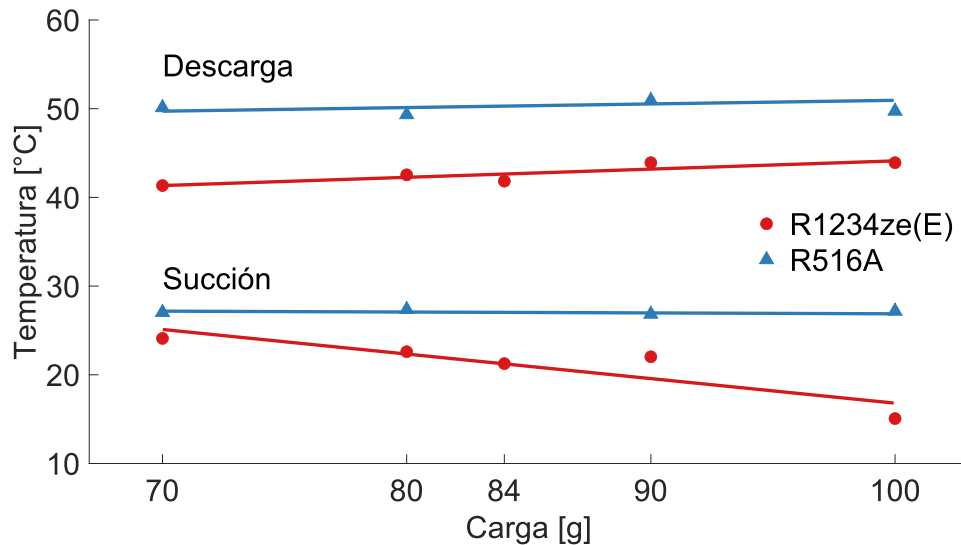


Figura 5. Temperatura de succión y de descarga.  
Fuente: Elaboración propia.

### Carga óptima de refrigerante

En este trabajo se propone la estimación de la carga óptima de cada refrigerante como aquella que corresponda al menor consumo de energía realizado por el refrigerador en un lapso de 24 h de prueba. Así, la Figura 6 muestra el consumo energético del refrigerador conforme varía la carga para ambos refrigerantes. Los puntos corresponden al promedio del consumo energético y las curvas son regresiones cuadráticas que definen el consumo mínimo de energía del refrigerador. Cabe recalcar que para el R1234ze(E) se evaluó una carga intermedia entre 80 g y 90 g para definir de mejor manera la regresión cuadrática y, por lo tanto, la carga de refrigerante. Además, para el R516A solo se muestran tres cargas evaluadas, esto se debe a que se tiene identificado de mejor manera el mínimo consumo de energía. Por lo tanto, de acuerdo con la Figura 5, se obtiene una carga de 84 g para el R1234ze(E), mientras que para el R516A se define una carga de 80 g. Ambos refrigerantes alternos presentan una carga menor en comparación al R134a (90 g).

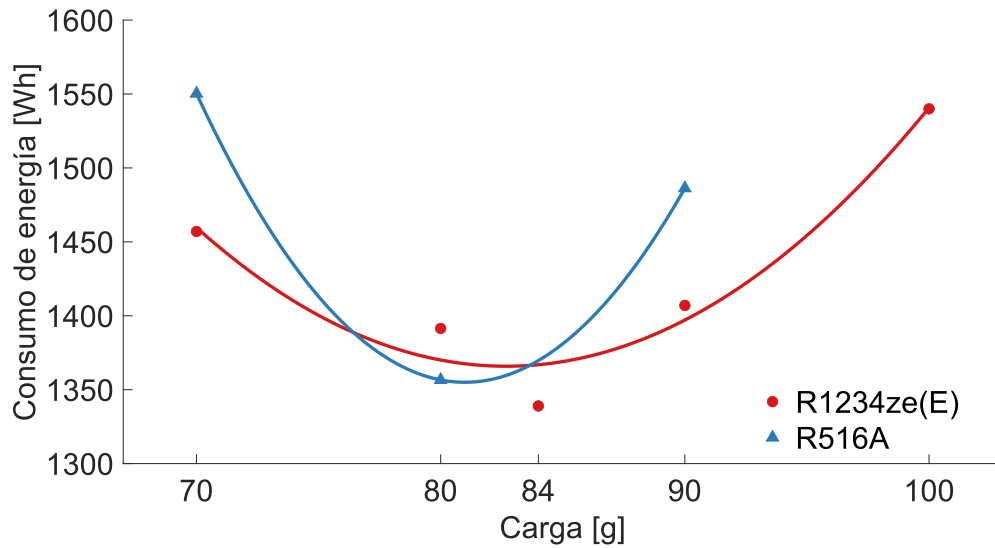
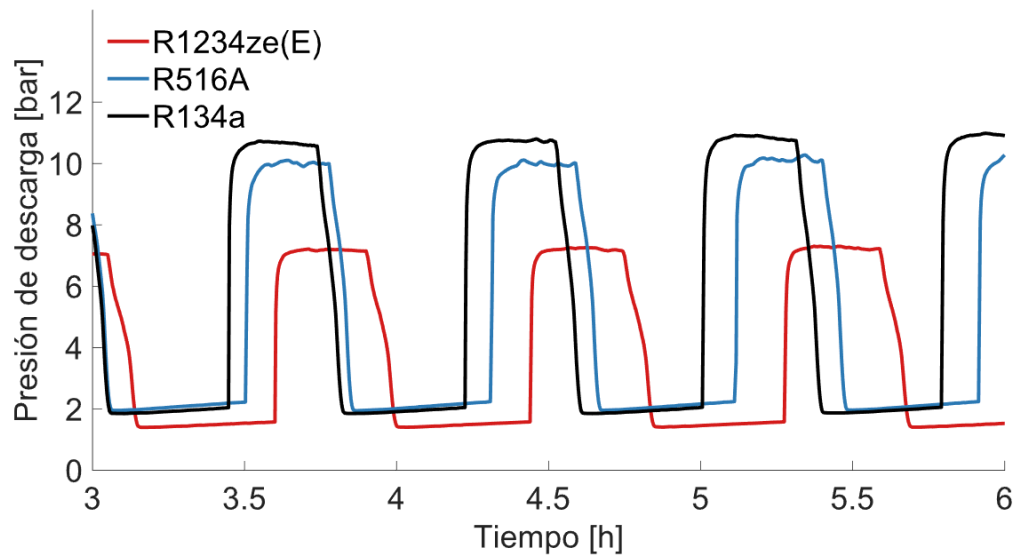


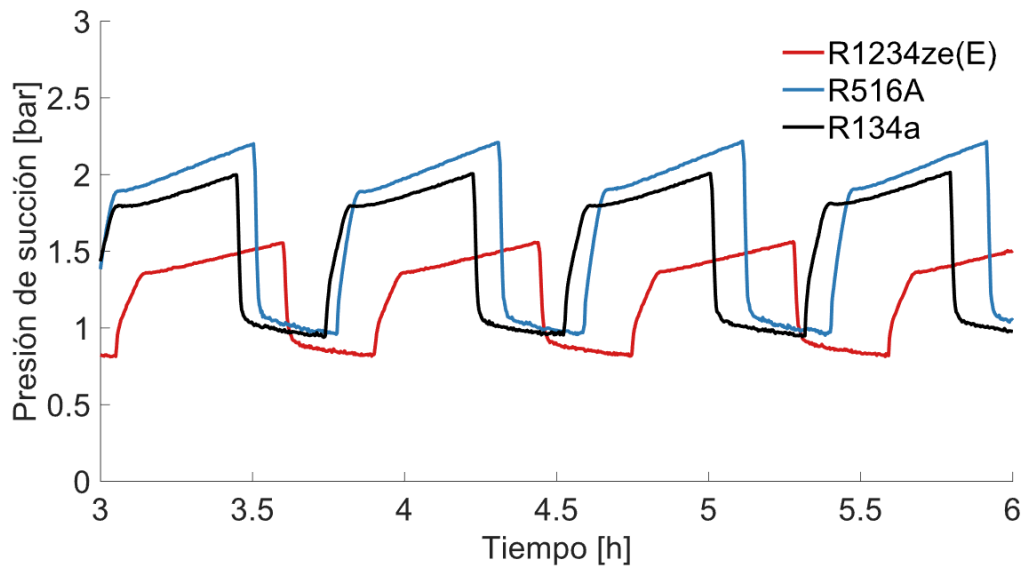
Figura 6. Estimación de la carga óptima de refrigerante: consumo de energía vs. carga de refrigerante.  
Fuente: Elaboración propia.

## Condiciones de operación del refrigerador

Una vez definida la carga óptima para los refrigerantes alternos, se procede a evaluar el refrigerador doméstico con cada uno de ellos para la comparación operacional con el R134a. La Figura 7 muestra las presiones de succión y descarga para los refrigerantes evaluados. Mediante una inspección rápida de la figura se observa que el refrigerador trabajando con el R1234ze(E) presenta las presiones de operación más bajas, lo cual tiene que ver con la menor densidad que tiene este refrigerante en comparación al R134a y R516A (Tabla 1). Por ejemplo, la presión de descarga del R1234ze(E) muestra una reducción del 33.5% con relación al R134a, mientras que la presión de succión se redujo en un 13.2% en comparación al R134a. Por lo que respecta al refrigerador funcionando con el R516A, se observa un comportamiento más parecido al R134a.



a)



b)

Figura 7. Presiones de trabajo en funcionamiento estable: a) presión de descarga, b) presión de succión.  
Fuente: Elaboración propia.

Cabe mencionar que las pruebas se realizaron con el termostato del refrigerador en la posición (5/5), lo que representa una condición térmica promedio en el compartimento de alimentos frescos de 3 °C y de -18 °C en el congelador (Belman-Flores *et al.*, 2017b). Así, la Figura 8 ilustra la temperatura de los compartimentos del refrigerador trabajando con cada uno de los refrigerantes evaluados y para un periodo de estabilidad térmica de aproximadamente 3 h. Se puede observar que el comportamiento térmico de los refrigerantes R516A y R134a es muy similar en ambos compartimentos, mientras que el R1234ze(E) muestra un comportamiento ligeramente distinto. Sin embargo, para fines prácticos y acorde a lo mostrado en la Figura 8, los refrigerantes alternos R1234ze(E) y R516A son adecuados para ser usados en la refrigeración doméstica, ya que permiten mantener condiciones térmicas similares al R134a. La temperatura promedio en el congelador es de -16.17 °C, -17.94 °C y -18.16 °C para el R1234ze(E), R516A y R134a, respectivamente. En cambio, la temperatura del compartimento de alimentos frescos es de 0.88 °C para el R1234ze(E), 2.13 °C para el R516A y 1.90 °C para el R134a.

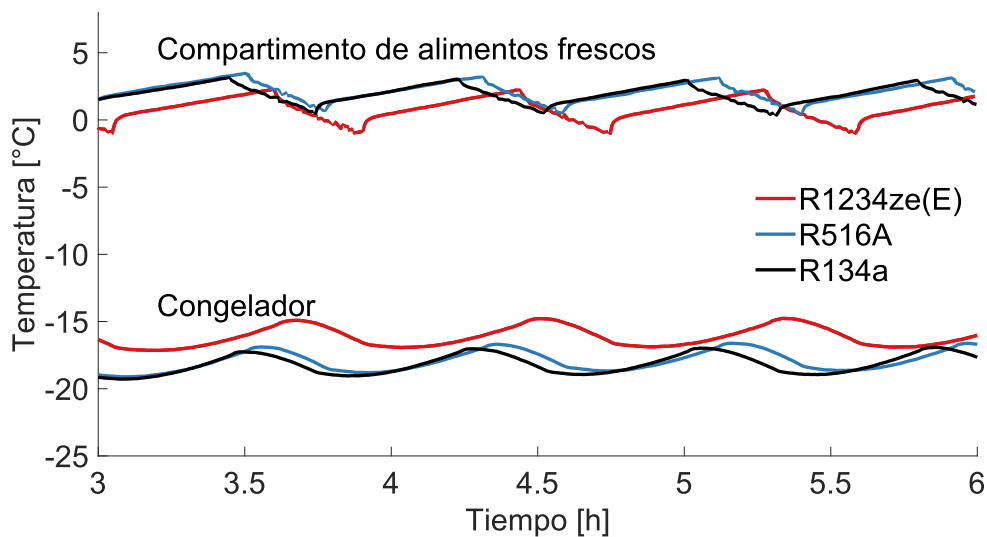


Figura 8. Temperaturas en los compartimentos del refrigerador.  
Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9 muestra el consumo de energía del refrigerador en un periodo aproximado de 6 h de prueba. Mediante una inspección rápida se observa que el refrigerante R134a provoca un mayor consumo de energía que los refrigerantes R1234ze(E) y R516A; de hecho, el consumo por parte de los refrigerantes alternos es muy similar. Desde este punto de vista energético, los refrigerantes alternos muestran un aspecto interesante con fines de proyectar un refrigerador doméstico sostenible, más aún por el alto consumo energético que representa en los hogares.

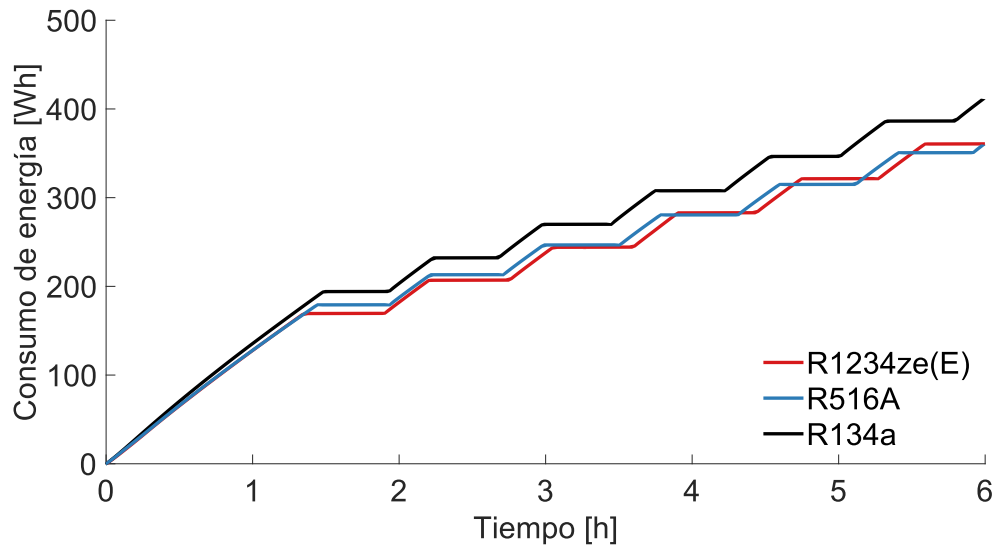
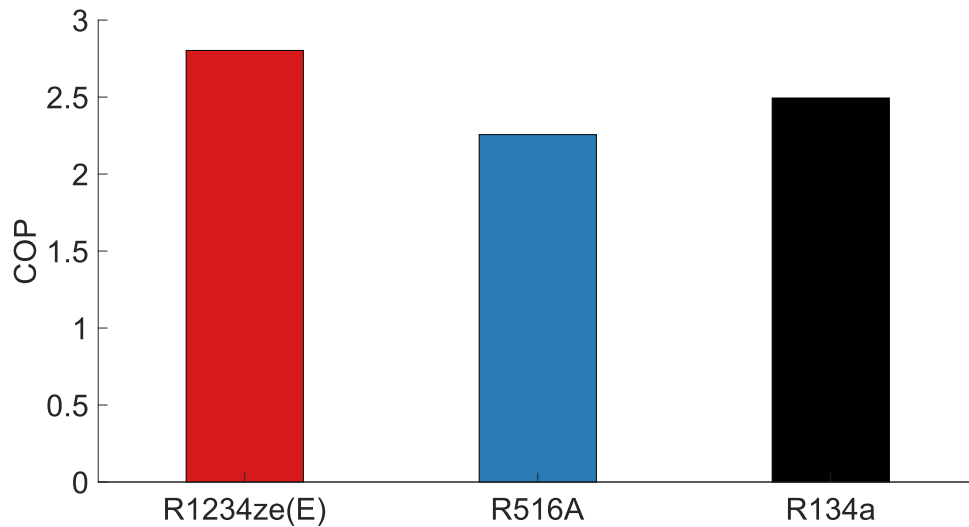


Figura 9. Consumo de energía del refrigerador.  
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, el coeficiente de desempeño es otro parámetro de interés en cualquier sistema de refrigeración, por lo que en este estudio se plantea un COP aproximado mediante la siguiente ecuación:

$$COP = \frac{h_{salida\_evap} - h_{entrada\_evap}}{h_{descarga\_comp} - h_{succión\_comp}} \quad (1)$$

Con base en la ecuación 1, el numerador indica la capacidad frigorífica del refrigerador por unidad de masa representada por la diferencia de entalpías entre la entrada y salida del refrigerante en el evaporador. El denominador representa el trabajo por unidad de masa a través de la diferencia de entalpías entre la descarga y succión del compresor. Así, la Figura 10 representa el COP del refrigerador con cada refrigerante, se observa que el R516A tiene un COP de 2.25, menor al registrado por el R134a (2.49), mientras que el R1234ze(E) presenta un incremento del COP del 8% comparado con el R134a. El refrigerante R1234ze(E) se posiciona como la mejor opción entre las dos alternativas, siendo un refrigerante que también ha mostrado resultados energéticos favorables en estudios previos como reemplazo directo del R134a (Aprea *et al.*, 2017).



**Figura 10.** COP del refrigerador vs. refrigerantes evaluados.  
Fuente: Elaboración propia.

## Contribución al calentamiento atmosférico

En este trabajo se evalúa el TEWI del refrigerador para una proyección de vida útil de 15 años. El TEWI representa la combinación de las emisiones directas debido a las fugas de refrigerante a la atmósfera y las emisiones indirectas debido a la generación y tipo de energía consumida por el refrigerador. Así, la estimación del TEWI se define mediante la siguiente ecuación (Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating [AIRAH], 2012):

$$TEWI = (GWP \cdot n \cdot L + GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha)) + (E \cdot \beta \cdot n) \quad (2)$$

De la ecuación 2, el primer término representa el impacto directo y el último el impacto indirecto.  $GWP$  es el potencial de calentamiento global del refrigerante relativo al  $CO_2$ ,  $n$  es el tiempo de vida útil del refrigerador,  $L$  es la razón de fuga anual del refrigerante (2%),  $m$  es la carga de refrigerante y  $\alpha$  es el factor de recuperación del refrigerante al final de la vida útil del equipo. Del impacto indirecto,  $E$  representa el consumo de energía por año y  $\beta$  el factor de emisión indirecta, el cual depende de cada país.

En la Tabla 2 se definen los valores de los parámetros involucrados en la estimación del TEWI. Para el sistema eléctrico nacional de México el factor de emisión indirecta en promedio se considera de  $0.423 \text{ kg CO}_2\text{-eq kWh}^{-1}$  (Comisión Reguladora de Energía [CRE], 2022).

Tabla 2. Análisis TEWI, caso específico México.

Parámetro	R134a	R516A	R1234ze(E)
GWP	1300	131	6
L [kg por año]	0.00180	0.00160	0.00168
n [años]	15	15	15
m [kg]	0.090	0.080	0.084
$\alpha$ [%]	70	70	70
E [kWh por año]	567.74	495.18	488.73
$\beta$ [kg CO <sub>2</sub> -eq kWh <sup>-1</sup> ]	0.423	0.423	0.423
Emisiones directas [CO <sub>2</sub> -eq]	70.2024	6.2880	0.3024
Emisiones indirectas [CO <sub>2</sub> -eq]	3602.3103	3141.9171	3101.0235
TEWI [CO <sub>2</sub> -eq]	3672.5103	3148.2051	3101.3259

Fuente: Elaboración propia.

Acorde a la información de la tabla se puede identificar que existe una gran diferencia entre las emisiones directas e indirectas. Para las emisiones directas, el R516A y R1234ze(E) presentan una reducción del 91% y 99.5%, respectivamente, en comparación al R134a. Lo anterior se debe a la gran diferencia que hay en los valores del GWP, aspecto de interés con el desarrollo y propuestas de nuevos refrigerantes. En cuanto a las emisiones indirectas, se observa una diferencia menor entre los refrigerantes, la reducción máxima del 14% es cuando el refrigerador usa el R1234ze(E) en comparación con el R134a. El análisis TEWI indica claramente que los refrigerantes alternos R516A y R1234ze(E) son fluidos viables desde el punto de vista ambiental, siendo su contribución total menor que la del R134a.

Acorde a lo presentado en este estudio, los refrigerantes alternos muestran condiciones viables tanto térmicamente como ambientalmente para ser usados en la refrigeración doméstica, esto sin haber realizado ningún cambio al diseño del refrigerador, es decir, un reemplazo directo del R134a. El R1234ze(E) resulta ser una opción viable a largo plazo, sin embargo, el R516A puede ser más prometedor a corto y mediano plazo si se realizan mejoras al ciclo de compresión de vapor con el fin de mejorar su COP en comparación al R134a.



## Conclusiones

En este trabajo se ha presentado el estudio experimental de un refrigerador doméstico considerando el uso de refrigerantes alternos de bajo GWP. Los refrigerantes evaluados fueron el R1234ze(E) y el R516A, los cuales se propusieron como reemplazo directo del R134a, es decir, sin realizar modificación al diseño del refrigerador. Los aspectos más relevantes del trabajo se comentan a continuación:

- Se construyó un banco experimental formado por un refrigerador de mediana capacidad volumétrica, el cual se instrumentó para su evaluación térmica y energética.
- Se definió la carga óptima de cada refrigerante como aquella que representó el mínimo consumo de energía del refrigerador. Para ello, los refrigerantes alternos presentaron una menor carga en comparación al R134a (90 g), 80 g para el R516A y 84 g para el R1234ze(E).
- La temperatura promedio de los compartimentos del refrigerador resultó ser similar entre los refrigerantes evaluados, siendo el comportamiento del R516A el más parecido al R134a. En cuanto al consumo energético, los refrigerantes alternos mostraron un menor consumo de energía respecto al R134a.
- El R1234ze(E) presentó un incremento del COP del 8% en comparación con el R134a, mientras que el COP del R516A se redujo en un 9.6% con relación al R134a.
- Desde el punto de vista ambiental, ambos refrigerantes alternos presentaron un menor TEWI en comparación con el R134a, debido al bajo valor del GWP.

De acuerdo con los resultados, se puede decir que los refrigerantes R1234ze(E) y R516A son viables para ser usados en la refrigeración doméstica, lo cual brinda más opciones para el caso de México sobre el uso de refrigerantes sintéticos propuestos a corto y largo plazo. De manera general, los resultados de este estudio permitieron mayor conocimiento sobre el desempeño térmico y energético de refrigerantes alternos de bajo GWP en la refrigeración doméstica.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Guanajuato a través de la convocatoria institucional CIIC 2022 el apoyo para realizar esta investigación. También se agradece el apoyo por parte de la compañía Arkema por la donación del refrigerante R516A al Dr. Vicente Pérez García.

## Conflicto de interés

Los autores declaramos que no tenemos ningún conflicto de interés.

## Referencias

- Apréa, C., Greco, A., & Maiorino, A. (2018). HFOs and their binary mixtures with HFC134a working as drop-in refrigerant in a household refrigerator: energy analysis and environmental impact assessment. *Applied Thermal Engineering*, 141, 226–233. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.02.072>
- Apréa, C., Greco, A., & Maiorino, A. (2017). Comparative performance analysis of HFO1234ze/HFC134a binary mixtures working as a drop-in of HFC134a in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 82, 71–82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.07.001>
- Australian Institute of Refrigeration, Air Conditioning and Heating (AIRAH). (2012). *Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI) 2012*. AIRAH.
- Birmipili, T. (2018). Montreal protocol at 30: the governance structure, the evolution, and the Kigali Amendment. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(7), 425–431. doi: <https://doi.org/10.1016/j.crte.2018.09.002>
- Belman-Flores, J. M., Rodríguez-Muñoz, A. P., Gutiérrez, C., & Mota-Babiloni, A. (2017a). Experimental study of R1234yf as drop-in replacement for R134a in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 81, 1–11. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.05.003>
- Belman-Flores, J. M., Ledesma, S., Gallegos-Muñoz, A., & Hernandez, D. (2017b). Thermal simulation of the fresh food compartment in a domestic refrigerator. *Energies*, 10(1), 1–14. doi: <https://doi.org/10.3390/en10010128>
- Belman-Flores, J. M., Heredia-Aricapa, Y., Pardo-Cely, D., Rodríguez-Valderrama, D. A., De Alba-Rosano, M., & Silva-Romero, J. C. (2022). Experimental evaluation of R513A as a low GWP refrigerant to replace R134a in a domestic refrigerator. *International Journal of Refrigeration*, 142, 148–155. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2022.06.019>
- Chen, X., Liang, K., Li, Z., Jiang, H., & Xu, J. (2022). Energy and exergy analysis of domestic refrigerators using R152a to replace R134a. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29, 101235. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101235>
- Comisión Federal de Electricidad (CFE). (25 de julio de 2022). *En esta temporada de calor, la CFE te invita a realizar un uso eficiente y responsable de la energía eléctrica* (Comunicado de prensa). <https://www.cfe.mx/Pages/default.aspx>
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). (2022). *Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2021*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/706809/aviso\\_fesen\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/706809/aviso_fesen_2021.pdf)
- Heredia-Aricapa, Y., Belman-Flores, J. M., Mota-Babiloni, A., Serrano-Arellano, J., & García-Pabón, J. J. (2020). Overview of low GWP mixtures for the replacement of HFC refrigerants: R134a, R404A and R410A. *International Journal of Refrigeration*, 111, 113–123. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.11.012>
- Honeywell. (2023). [Refrigerants]. Honeywell-Refrigerants.com. <https://www.honeywell-refrigerants.com/europe/product/solstice-yf-refrigerant/>.
- Höglund-Isaksson, L., Purohit, P., Amann, M., Bertok, I., Rafaj, P., Schöpp, W., & Borken-Kleefeld, J. (2017). Cost estimates of the Kigali Amendment to phase-down hydrofluorocarbons. *Environmental Science & Policy*, 75, 138–147. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.05.006>
- Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC). (2013). Climate change: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth Assessment Report of the intergovernmental panel on climate change. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>
- Karber, K. M., Abdelaziz, O., & Vineyard, E. A. (2012). *Experimental performance of R-1234yf and R-1234ze as drop-in replacements for R-134a in domestic refrigerators*. International Refrigeration and Air Conditioning Conference at Purdue.
- Lemmon, E. W., Huber, M. L., & McLinden, M. O. (2018). NIST standard reference database 23: reference fluid thermodynamic and transport properties-REFPROP, version 10.0. National Institute of Standards and Technology.
- Nair, V. (2021). HFO refrigerants: a review of present status and future prospects. *International Journal of Refrigeration*, 122, 156–170. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.10.039>

- Official Journal of the European Union. (2014). Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 (Text with EEA relevance). The European Parliament and the Council of the European Union. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32014R0517>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2019). *Roadmap to implement the Kigali Amendment in Mexico*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://dsiappsdev.semarnat.gob.mx/datos/portal/publicaciones/2019/Roadmap\_EK\_English\_May\_2019.pdf
- Yang, Z., Feng, B., Ma, H., Zhang, L., Duan, C., Liu, B., Zhang, Y., Chen, S., & Yang, Z. (2021). Analysis of lower GWP and flammable alternative refrigerants. *International Journal of Refrigeration*, 126, 12-22. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.01.022>