

Evaluación de refrigerantes de bajo impacto ambiental en refrigeradores domésticos

Uriel Arredondo Gutiérrez¹, Christian Arturo Campos Vega², Emilio Galván Rentería³, María Fernanda Meza Enríquez⁴, Miriam Yamileth Martínez Iza⁵, Dr. Juan Manuel Belman Flores⁶

Universidad de Guanajuato
u.arredondogutierrez@ugto.mx¹
ca.camposvega@ugto.mx²
e.galvanrenteria@ugto.mx³
mf.mezaenriquez@ugto.mx⁴
martizayamileth@gmail.com⁵
fbelman@ugto.mx⁶

Resumen

En el siguiente documento se presenta un estudio experimental de la evaluación del consumo energético y comportamientos térmicos de un refrigerador doméstico en condiciones ambientales, utilizando R516A como alternativa del R134a. Durante el desarrollo del estudio se evaluó el sistema de refrigeración con el refrigerante R134a en su carga óptima propuesta por el fabricante y posteriormente se realizó la sustitución por el R516A a diferentes cargas para observar su comportamiento y comparar los análisis.

En los resultados del estudio podemos destacar que el refrigerante R516A resulta como una gran alternativa de reemplazo inmediato del R134a, obteniendo comportamientos térmicos muy similares y disminuyendo considerablemente el impacto ambiental.

Palabras clave: GWP; mezcla refrigerante; refrigerador doméstico; TEWI

Nomenclatura

C_p	Calor específico [kJ kg ⁻¹ K ⁻¹]
E_{anual}	Consumo de energía [kWh año ⁻¹]
L_{anual}	Tasa de fuga anual de refrigerante [kg año ⁻¹]
m	Masa de refrigerante [g]
n	Tiempo de vida del sistema [año]
P	Presión [bar]
T	Temperatura [°C]
α	Factor de recuperación/reciclado [%]
β	Factor de emisión indirecta [kgCO ₂ -eq kWh ⁻¹]

Abreviaciones

COP	Coefficient of performance (Coeficiente de rendimiento)
DL	Discharge line (Línea de descarga)
SL	Suction line (Línea de succión)
FF	Fresh food compartment (Compartimiento de alimentos frescos)
FZ	Freezer compartment (Compartimiento congelador)
GWP	Global warming potential (Potencial de calentamiento global)

- ODP Ozone depletion potential (Potencial de agotamiento de la capa de ozono)
TEWI Total equivalent warming impact (Impacto total de calentamiento equivalente) [kgCO₂-eq]

Introducción

La refrigeración es una parte vital para el funcionamiento actual de la sociedad, es aplicable en diversos sectores que van desde comerciales, industriales, domésticos, aire acondicionado, entre otros. Su influencia ha dado pauta a una evolución a lo largo de la historia según las necesidades del ser humano, siendo la conservación de alimentos una de las principales.

Actualmente, la mayor parte de los refrigeradores domésticos utiliza tecnología por compresión de un vapor refrigerante, empleando para esto un compresor con motor eléctrico, que, en conjunto con un condensador, un tubo capilar y un evaporador hace posible la generación sintética del frío. Su evolución ha sido constante a pesar de mantener el principio de funcionamiento; los avances tecnológicos impulsados por la necesidad de mitigar el cambio climático han dado pauta al cumplimiento de las normativas que respectan al consumo energético, buscando eficiencia y comportamientos adecuados basados en la sustentabilidad. En México, se estiman que cerca de 29 millones de viviendas cuentan con un refrigerador y poco menos de 4 millones no cuentan con este importante electrodoméstico [1]. En países en desarrollo, la mayoría de los sistemas de refrigeración, aire acondicionado y bombas de calor, basados en compresión de vapor, continúan funcionando con refrigerantes halogenados, los cuales tienen un bajo costo y excelentes propiedades termodinámicas y termofísicas [2].

De momento, el hidrofluorocarbono R134a ha sido el refrigerante predominante en electrodomésticos, sin embargo, este refrigerante presenta un GWP de 1300 [3], el cual es bastante elevado considerando el propósito de los avances mencionados, es decir, es importante iniciar el desarrollo de refrigerantes alternativos que cumplan con las necesidades actuales del cuidado ambiental, y, que a su vez, sean congruentes con las normativas que restringen el uso de refrigerantes con alto potencial de calentamiento global. Una de estas nuevas normativas es la Normativa Europea F-gas 517/2014 donde básicamente se busca reducir para el 2030 un 74% el uso de gases fluorados, por ende, restringe el uso de hidrofluorocarbonos, HFC, con un GWP de 150 o mayor [4].

Por otro lado, el protocolo de Kioto sobre el Cambio Climático, el cual entró en vigor el 16 de febrero de 2005, se enfoca en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que causan el calentamiento global [5]. Este acuerdo aplica a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero con nuevos gases refrigerantes. El protocolo ha tenido revisiones y enmiendas, como la enmienda de Kigali (2016) para la reducción de consumo de refrigerantes HFC. Un estudio más profundo de las restricciones del uso de refrigerantes nos lleva al protocolo de Montreal, que entró en vigor en 1989, relativo a las sustancias agotadoras de la capa de ozono, teniendo como objetivo eliminar los refrigerantes CFC y, posteriormente, los HCFC [6].

Al quedar restringido el empleo de algunos refrigerantes en sistemas de refrigeración y aire acondicionado, es indispensable voltear la mirada hacia nuevas alternativas que puedan sustituir a los fluidos convencionales de manera eficiente y rentable. La evolución de los refrigerantes ha ido de la mano con los acuerdos internacionales para la reducción de uso de refrigerantes contaminantes, como se mencionó previamente.

Los refrigerantes se dividen en dos tipos, naturales (como el CO₂, hidrocarburos y amoníaco) y sintéticos. Los HC y el amoníaco son refrigerantes naturales cuyas características de ODP y GWP los hacen opciones bastante prometedoras [7], aunque, al ser sustancias altamente tóxicas e inflamables los convierten en fluidos poco convencionales con los cuales trabajar, los refrigerantes hidrocarburos están clasificados en el nivel A3 por el Estándar 34-2010 de ASHRAE. En otras palabras, el uso de refrigerantes naturales, básicamente amoníaco (R717), dióxido de carbono (R744) e hidrocarburos (isobutano R600a, propano R290, propileno R1270), está aumentando en función de sus características ambientales y de desempeño favorables, sin embargo, el inconveniente del R1270 y de otros hidrocarburos es su inflamabilidad [8], por tanto, su uso es dependiente de la aplicación de medidas de control y mantenimiento, los sistemas deberían ser diseñados específicamente para usarlos, lo cual, no resulta rentable para usarlos como sustitutos inmediatos de los HFC como el R134a. Las nuevas generaciones de refrigerantes se direccionan a los refrigerantes sintéticos, en particular la familia de las hidrofluoroolefinas, HFO, como reemplazo viable para los HFC. En la actualidad, aún están en desarrollo los sustitutos HFO como el R1234yf.

Es aquí donde aparecen las mezclas refrigerantes a base de HFO y HFC, las cuales resultan muy atractivas como opción en la reducción del impacto ambiental y con la posibilidad de lograr mejor rendimiento que los

refrigerantes puros. En este sentido, el refrigerante R516A (R1234yf/R134a/R152a) con un GWP de 131 y cero ODP, resulta atractivo como reemplazo inmediato al R134a.

Con el propósito de seguir las investigaciones actuales respecto a los nuevos refrigerantes con bajo impacto ambiental, este trabajo busca evaluar las propiedades de la mezcla refrigerante R516A en un refrigerador doméstico, buscando comparar comportamientos térmicos y energéticos con el R134a. El reemplazo del refrigerante se considerará sin ninguna modificación al electrodoméstico en cuestión. Por su parte, el estudio experimental, otorgará la posibilidad de determinar una carga de masa “óptima”, que finalmente dará pauta a realizar los análisis correspondientes en la búsqueda del mejor funcionamiento posible y la máxima disminución del impacto ambiental.

Propiedades de los refrigerantes a evaluar

El refrigerante R516A es una mezcla azeotrópica que consta de 77.5% en peso de R1234yf, 14% de R152a y 8.5% de R134a. Es un refrigerante que se presume ser un sustituto inmediato al R134a en aplicaciones comerciales e industriales.

A continuación, en la Tabla 1, se muestran las propiedades termofísicas de ambos refrigerantes y su porcentaje de diferencia entre cada una.

Tabla 1. Datos obtenidos mediante REFPROP v10 [9] a temperatura de 298.15 K.

Propiedad	R134a	R516A	% aumento del R516A con respecto al R134a
Composición	–	R1234yf/ R134a/ R152a	–
Porcentaje de masa	–	(77.5/8.5/14)	–
Punto de ebullición [K]	247.08	243.8	-1.33
Temperatura crítica [K]	374.21	369.78	-1.2
Presión crítica [kPa]	4059.3	3615.2	-10.94
Densidad líquida [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	1206.7	1066.8	-11.59
Densidad de vapor [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]	32.35	34.576	+6.88
Calor latente [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]	216.9	202.83	-6.49
C_p líquido [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	1.4246	1.4563	+2.23
C_p vapor [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]	1.0317	1.089	+5.55
Conductividad líquida [$\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	81.133	70.092	-13.61
Conductividad de vapor [$\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	13.825	14.38	+4.01
Viscosidad líquida [$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$]	194.88	154.84	-20.55
Viscosidad de vapor [$\mu\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$]	11.693	11.416	-2.37
GWP	1300	131	-89.92
Clase (ASHRAE)	A1	A2L	A2L

Se puede notar en la tabla que en la mayoría de las propiedades entre ambos refrigerantes tienen una diferencia mínima. La mayor variación se encuentra en la viscosidad líquida, en donde el R516A tiene un decremento del 20% con respecto al R134a. La presión crítica y la densidad líquida presentan un decremento del 10% y 11%, respectivamente. Por último, la conductividad líquida es la última propiedad con un cambio considerable, obteniendo un decremento del 13%.

Nuestra gran apuesta es, como ya se mencionó anteriormente, la sostenibilidad. En este caso, el GWP, muestra una disminución de casi el 90%, un aspecto fundamental en el reemplazo del R134a a corto plazo.

Procedimiento experimental

El refrigerador utilizado en este caso es marca DAEWOO modelo DFR-1110DN con capacidad volumétrica de 319.2 L, tipo no-frost (descongelación automática). Trabaja con un sistema de refrigeración por compresión de vapor y la distribución del caudal de aire es por convección forzada. En condiciones de diseño de fábrica, opera con refrigerante R134a y lubricante tipo POE10, el cual indica una carga óptima de 90 g.

Instrumentación y medidas

Los materiales utilizados para realizar la evaluación son enlistados en seguida:

- Arduino uno
- Sensor de corriente ACS ASCT 720 30A
- Transformador de voltaje ZMPT101B
- Módulo micro SD
- Pantalla LCD
- Termopares tipo K
- Chasis NI cRIO-9030
- Fuentes de chasis NI PS-15. AC 100-120/200-240V
- Fuentes de energía S-60-12. AC INPUT: 110/220V \pm 15%. DC OUTPUT: 12V 5A
- Transductores de presión tipo A "25 bar"

En la Figura 1 se muestra el esquema que representa el refrigerador experimental, la instrumentación y el sistema de adquisición de datos.

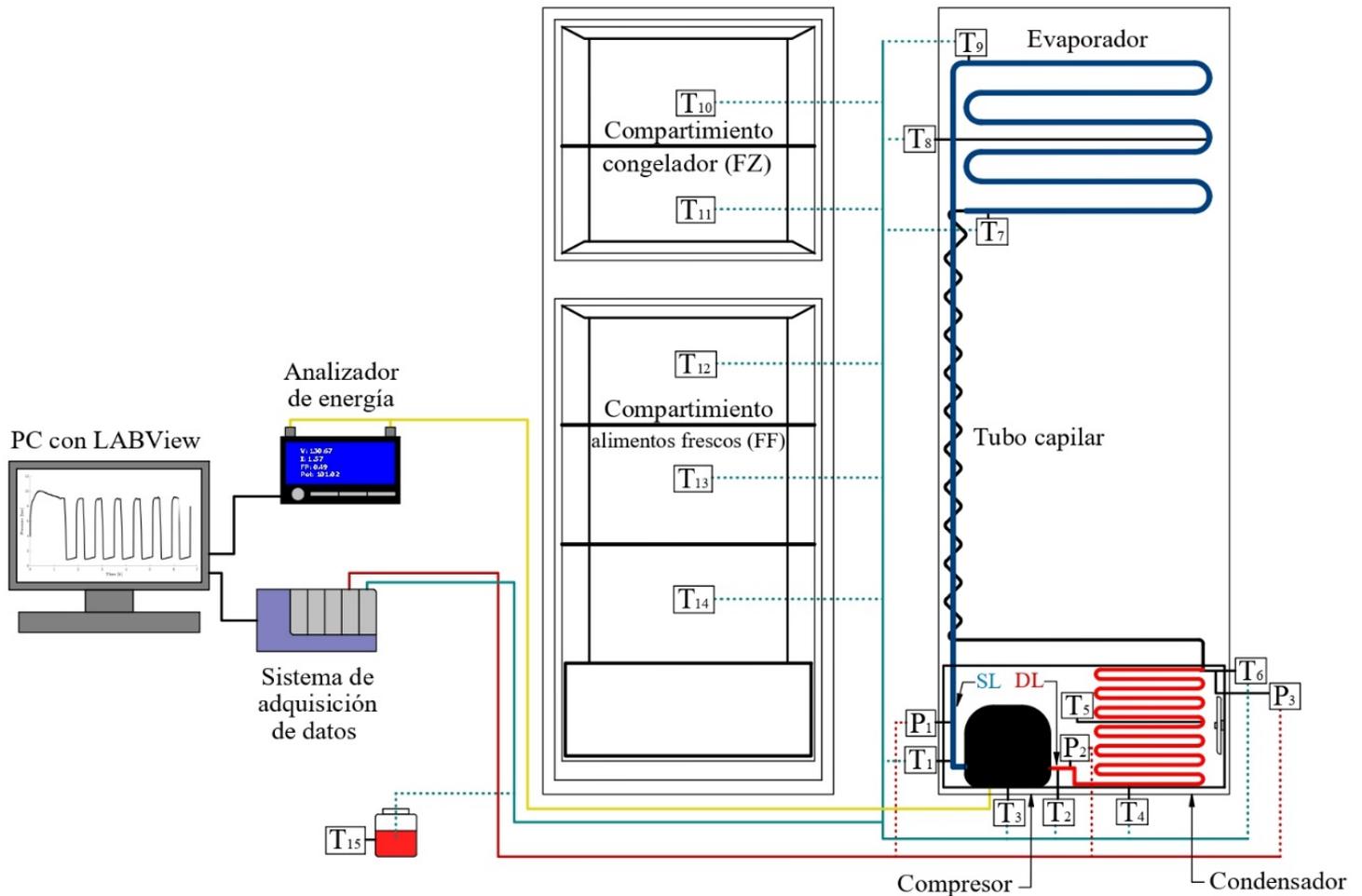


Figura 1. Esquema de los puntos de medida de temperatura, presión e instrumentación.

- | | |
|---|--|
| T1: Temperatura a la entrada del compresor. | T10: Temperatura del FZ superior. |
| T2: Temperatura a la salida del compresor. | T11: Temperatura del FZ inferior. |
| T3: Temperatura de la carcasa del compresor. | T12: Temperatura del FF superior. |
| T4: Temperatura a la entrada del condensador. | T13: Temperatura del FF medio. |
| T5: Temperatura en medio del condensador. | T14: Temperatura del FF inferior. |
| T6: Temperatura a la salida del condensador. | T15: Temperatura ambiente. |
| T7: Temperatura a la entrada del evaporador. | P1: Presión línea de succión. |
| T8: Temperatura en medio del evaporador. | P2: Presión línea de descarga. |
| T9: Temperatura a la salida del evaporador. | P3: Presión de salida del condensador. |

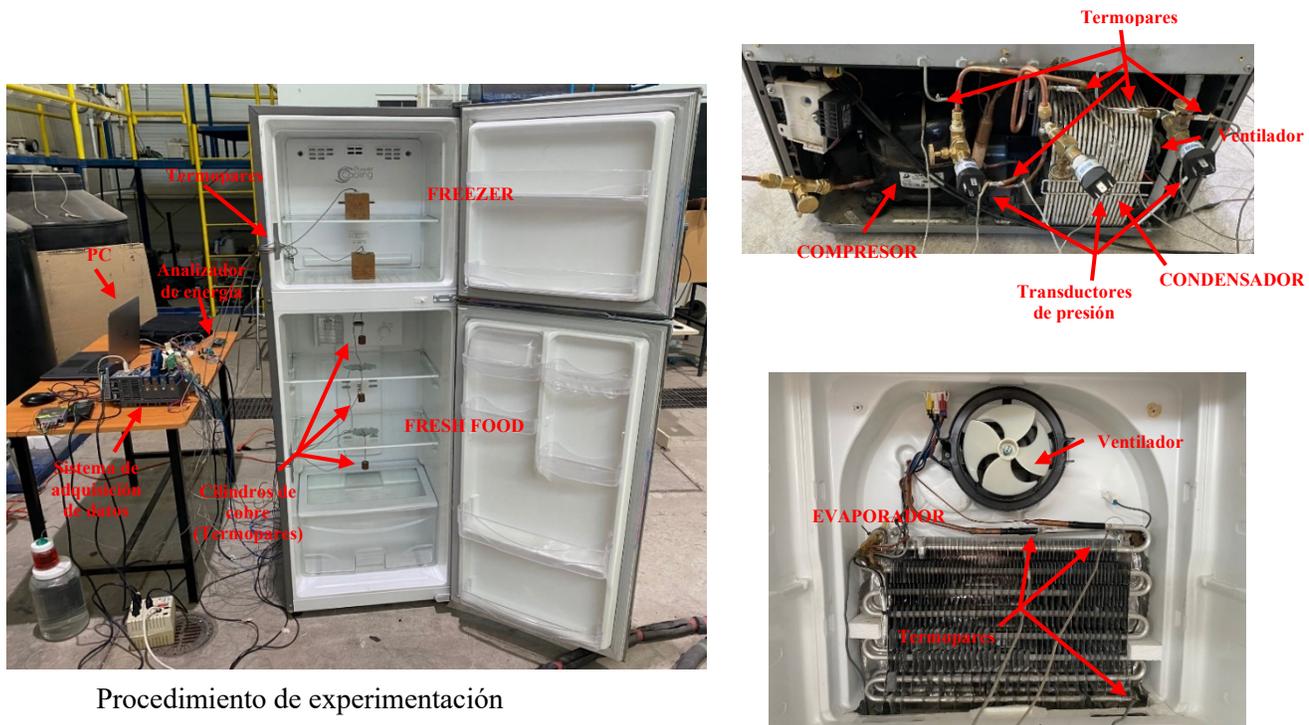
Los termopares utilizados (tipo K) cuentan con incertidumbre de ± 0.03 °C. La distribución de los mismos fue según se menciona en la tabla anterior. En general, cinco termopares dentro del frigorífico (dos en el FZ y 3 en el FF), los termopares fueron ubicados en cubos de madera y en cilindros de cobre de 2.9 cm de diámetro para el FZ y el FF, respectivamente, su distribución de acuerdo a la norma mexicana NOM-015-ENER-2018. Para el análisis del comportamiento térmico del refrigerante en los intercambiadores de calor, se utilizaron tres termopares instalados uniformemente con respecto a la longitud del tubo en el condensador y en evaporador (entrada, punto medio y salida). También se ubicaron tres termopares en el compresor, uno en la línea de succión, otro en la línea de descarga y uno en la carcasa del mismo, estos termopares fueron

fijados a la pared del tubo con cinta dieléctrica. Además, se hizo la medición de tres presiones, utilizando transductores con un rango de medición de 0-25 bar y una incertidumbre de $\pm 1\%$, para medir la presión de las líneas de succión (SL) y descarga del compresor (DL), y la presión de salida del condensador.

Para la estimación del consumo de energía del refrigerador se instrumentó en conjunto el Arduino uno, el sensor de corriente ACS ASCT 720 30A, el transformador de voltaje ZMPT101B, el módulo micro SD y la pantalla LCD, que, junto a un código, permite calcular la potencia consumida en una unidad de tiempo definida con un error $<1\%$.

Las señales salientes de cada instrumento fueron almacenadas en la computadora por conducto del sistema de adquisición de datos NI cRIO-9030 y su procesamiento en LabVIEW. La recopilación de datos se llevó a cabo en intervalos de diez segundos durante la duración de toda la prueba.

La Figura 2 muestra la instrumentación real en el interior de los compartimientos, el evaporador y el condensador.



Procedimiento de experimentación

Figura 2. Instrumentación real.

A lo largo del presente documento se hizo la evaluación del comportamiento térmico y energético de un refrigerador doméstico con especificaciones previamente señaladas, el cual, en primera instancia trabaja con refrigerante R134a. Este análisis estudia el refrigerante R516A con bajo GWP como posible sustituto directo del R134a.

Como ya se mencionó en la introducción, la evaluación del refrigerante no involucra algún cambio en el diseño del refrigerador (mantiene su diseño de fábrica). Las características del R516A hacen posible la compatibilidad entre el refrigerante y el frigorífico a prueba, pues, no hay inconveniente con el lubricante POE10.

En un principio se evaluó el comportamiento del refrigerador para la carga de diseño utilizando R134a (90 g) con el fin de tener una base comparativa en función de las pruebas con el refrigerante alternativo. Fue instalada una válvula de servicio en el compresor para efectuar el procedimiento de carga del R516A, estableciendo una carga inicial de 70 g, con un aumento gradual de 10 g, hasta la carga de 90 g. Este procedimiento de carga fue utilizado debido a la practicidad durante la carga y medición de refrigerante en cada una de las pruebas.

Para cada una de las evaluaciones con el refrigerante alternativo bajo estudio, se efectuó un vacío en todo el

sistema por medio de la válvula de servicio instalada en el compresor, este extrae la humedad del interior del sistema y evita posibles daños al compresor.

Las figuras siguientes muestran un diagrama del proceso de vacío y carga del refrigerante.

1. Primero se realiza el vacío considerando las líneas de servicio a través de las tres válvulas abiertas hasta llegar a un vacío de alrededor de 250 micras.

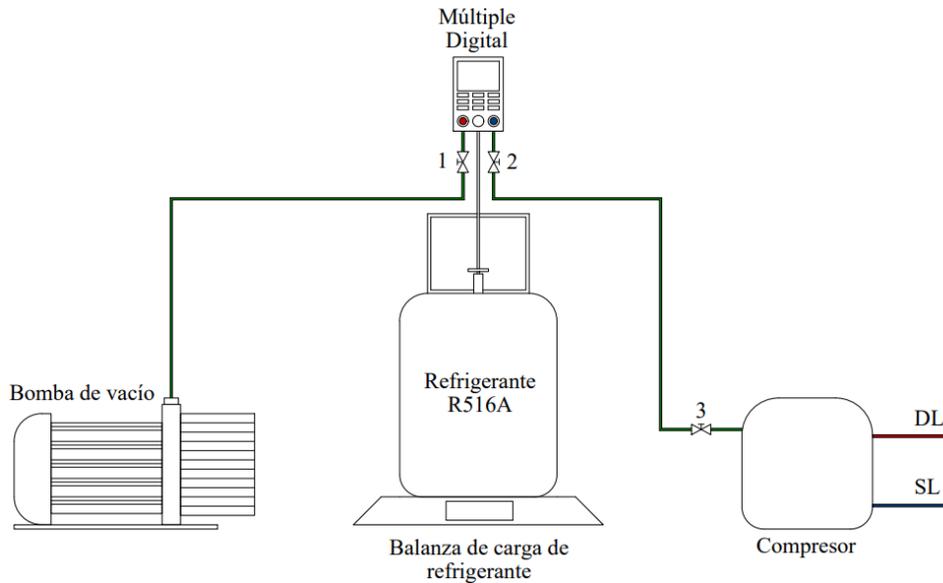


Figura 3. Proceso de vacío.

2. 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 lograda la carga deseada en el frigorífico (verificando a través de la báscula), se cierra la válvula 3 y se apaga el sistema. Las medidas de masa de refrigerante se realizaron con una balanza digital con una incertidumbre de ± 0.01 g.

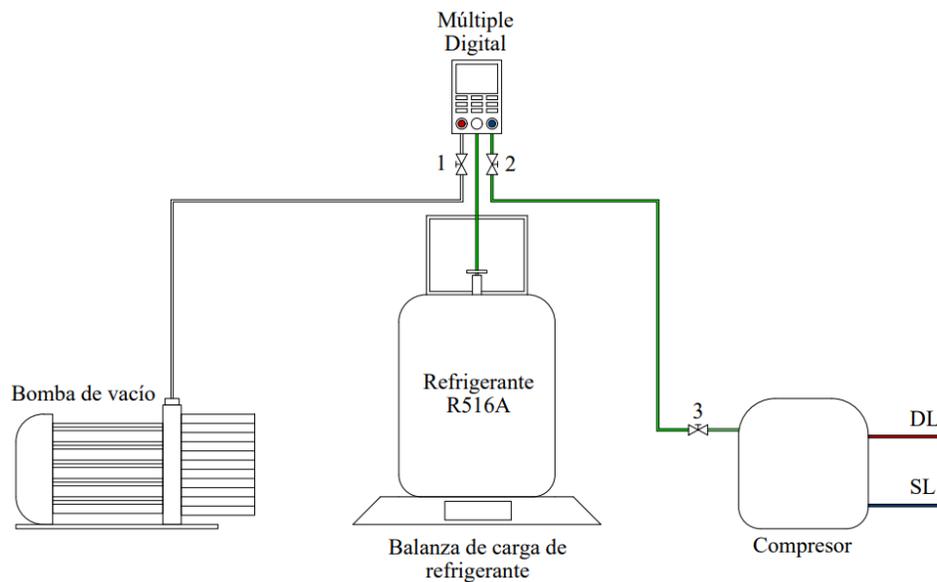


Figura 4. Proceso de carga.

Las pruebas realizadas con ambos refrigerantes se realizaron en las mismas condiciones, sin abrir las puertas del frigorífico, a una temperatura ambiente de $25 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del $65 \pm 5\%$, correspondiente a la ciudad de Salamanca. Cada análisis duró 7 horas, durante las cuales se definió el consumo de energía y las temperaturas medias del aire en ambos compartimentos frigoríficos.

La carga “óptima” del R516A para comparar el rendimiento con el R134a se definió con base al consumo mínimo de energía del refrigerador prolongado a un tiempo de 24 horas considerando la estabilidad del ciclo.

Resultados

A continuación, se discuten los principales resultados experimentales del trabajo de investigación. Se analiza el efecto de la variación de la carga del R516A en los compartimentos del refrigerador considerando efectos térmicos y comparativas energéticas con el objetivo de definir una carga adecuada que nos proporcione un rendimiento similar al R134a.

Influencia de la carga de refrigerante

Para iniciar son presentados los resultados experimentales de la distribución de carga de masa de refrigerante en un refrigerador doméstico en los casos del sobrecalentamiento (SH) y subenfriamiento (SC). Se encontró que la cantidad de refrigerante dependía principalmente del volumen del evaporador y del condensador [10]. Además, se desarrolló un método para evaluar la carga de refrigerante R516A, consistía en realizar pruebas con incrementos de carga de 10 g, desde un mínimo de 70 g a un máximo de 90 g. La Figura 5 muestra el comportamiento para el grado de subenfriamiento en el condensador y el grado de sobrecalentamiento en el evaporador. Como se comentó anteriormente, se emplearon termopares en puntos estratégicos dentro de los compartimentos para poner definir la estabilidad térmica, con la cual podemos definir los puntos que se presentan en la figura. Estos puntos representan un promedio del periodo de estabilidad de cada prueba.

Considerando el cálculo del sobrecalentamiento como la temperatura del refrigerante en la línea de succión del condensador menos la temperatura del refrigerante a la salida del evaporador, podemos concluir que mediante el aumento de la carga de refrigerante existe un incremento en el SH ya que se muestra un ligero crecimiento de la temperatura con el aumento de la carga. El aumento del flujo másico resulta por una mayor ocupación de refrigerante en el evaporador.

Por otro lado, el comportamiento del SC refleja un decremento mientras aumenta la carga de refrigerante. El cálculo del SC fue considerado como la diferencia entre las temperaturas de saturación del refrigerante y la salida del condensador, por lo que, al haber un aumento en la temperatura en el condensador en función de

la carga resulta lógico este decremento.

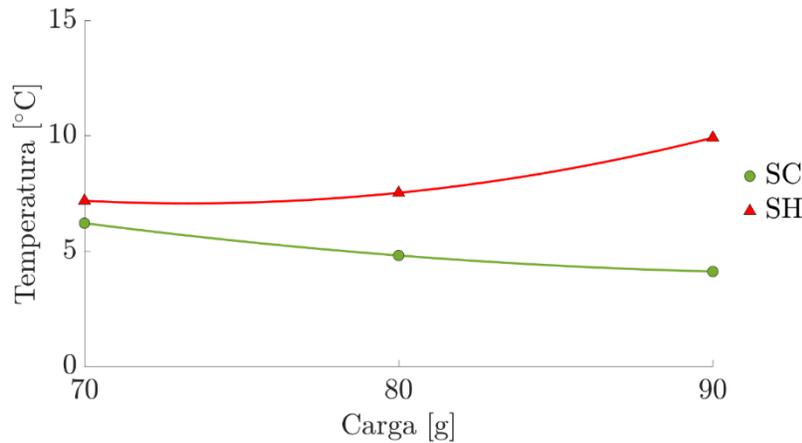


Figura 5. Grado de subenfriamiento y sobrecalentamiento vs carga de refrigerante.

La Figura 6 muestra la capacidad de enfriamiento (CC) en función de la carga de refrigerante. Con una carga de refrigerante baja, el sistema proporciona un efecto de refrigeración bajo y, a medida que aumenta, el efecto frigorífico se eleva hasta alcanzar un valor máximo.

Conforme incrementa la masa de refrigerantes está más lleno el evaporador, por lo que se presenta una mayor capacidad frigorífica.

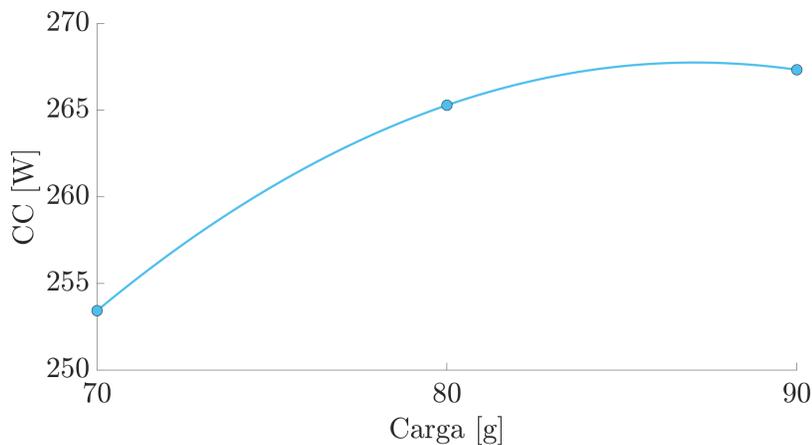


Figura 6. Capacidad de enfriamiento (CC) vs carga de refrigerante

La Figura 7 muestra el comportamiento de las presiones de trabajo en el refrigerador. Se puede notar que el comportamiento de la presión de descarga es prácticamente constante, esto se atribuye a que en un principio el diseño del refrigerador está pensado para una carga máxima de 90 g independientemente del refrigerante. Cuanto más refrigerante haya agregado al sistema, se acumula en forma líquida en el condensador, reduciendo la eficiencia en el área de intercambio de calor, lo que genera un aumento en la presión de descarga. Esto incluso puede afectar el tiempo que el compresor está encendido en cada ciclo, aumentando así el consumo de energía. De manera similar, la presión de succión permanece casi constante durante la variación de la carga de refrigerante.

Por otro lado, las temperaturas de succión y de descarga muestran un comportamiento casi uniforme a medida que aumenta la carga de refrigerante, como se muestra en la Figura 8.

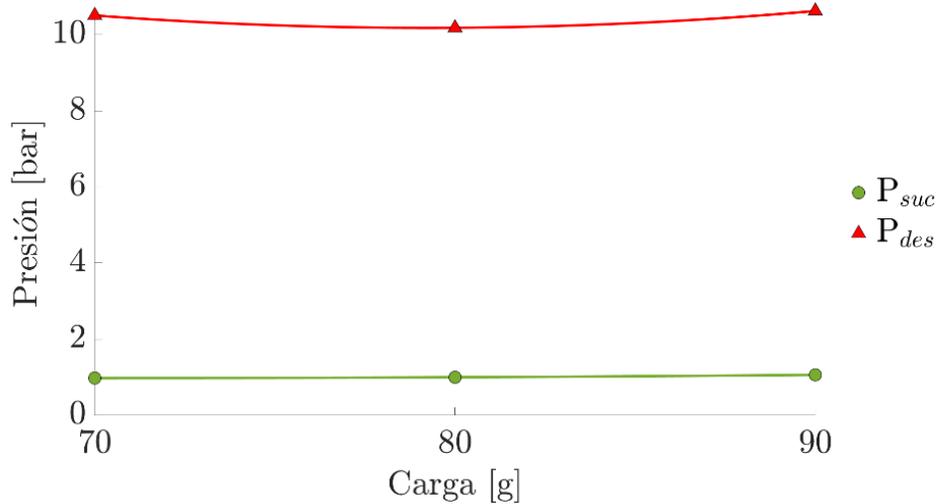


Figura 7. Presión de succión y descarga vs carga de refrigerante.

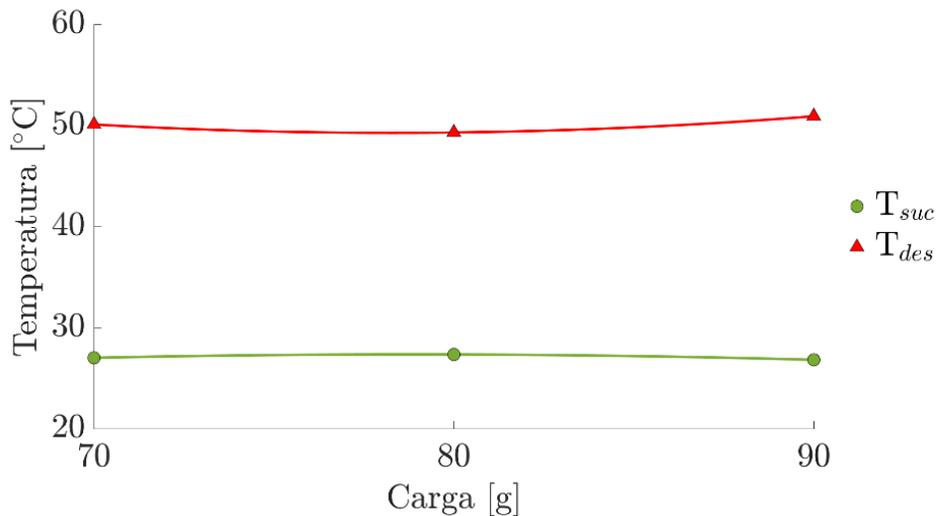


Figura 8. Temperatura de succión y descarga vs carga de refrigerante.

Carga “óptima” de refrigerante

La minimización de la carga de refrigerante es un factor importante en el diseño de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. En este trabajo de investigación, la carga “óptima” del refrigerador utilizando R516A fue determinada a través de un mínimo consumo de energía, por ello, fueron realizadas las pruebas energéticas en cada carga de refrigerante. Cada prueba tuvo una duración de 6 horas, entonces, para el cálculo del consumo fue usada la condición de estabilidad del refrigerador y se replicó durante 24 horas, se debe resaltar que la condición ambiental rondaba en 25 ± 5 °C.

La Figura 9 muestra el consumo de energía por día del refrigerador a medida que varía la carga de refrigerante. Los puntos corresponden a los datos medidos experimentalmente y la curva representa la regresión cuadrática que permite visualizar fácilmente la condición de carga que representa el mínimo consumo de energía. Considerando esto, se concluye que el refrigerador trabajará con 80 g de refrigerante R516A. Este valor representa 11.11% menos que la carga con R134a (90 g) propuesta de fábrica.

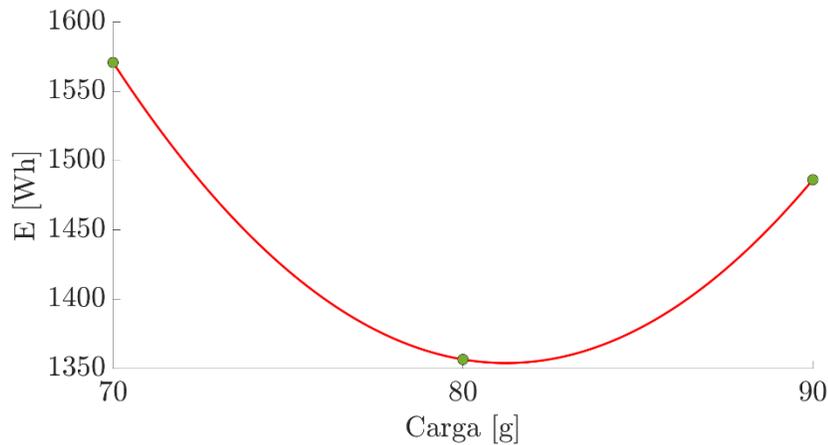


Figura 9. Consumo energético (24 horas) vs carga de refrigerante.

Comparación operativa entre los refrigerantes analizados

Después de definir la carga “óptima” del refrigerante R516A con base en los resultados del consumo mínimo de energía, y de realizar una prueba en el refrigerador con la carga asignada por el fabricante del refrigerante R134a bajo las mismas condiciones mencionadas previamente en la sección 4.2, se procede a realizar una comparación del comportamiento entre ambos refrigerantes. En la Figura 10 se muestra el comportamiento térmico inicial del compartimiento del congelador (FZ) y de los alimentos frescos (FF) desde el arranque del compresor hasta que éste se detiene por primera vez. Cabe aclarar que los resultados mostrados en esta gráfica son el promedio de los datos obtenidos de los termopares colocados en cada compartimiento. Tras analizar esta gráfica, se observa que el comportamiento térmico de los refrigerantes es prácticamente idéntico. En el compartimiento de los alimentos frescos existe una diferencia de 0.4 °C y en el congelador de 0.3 °C.

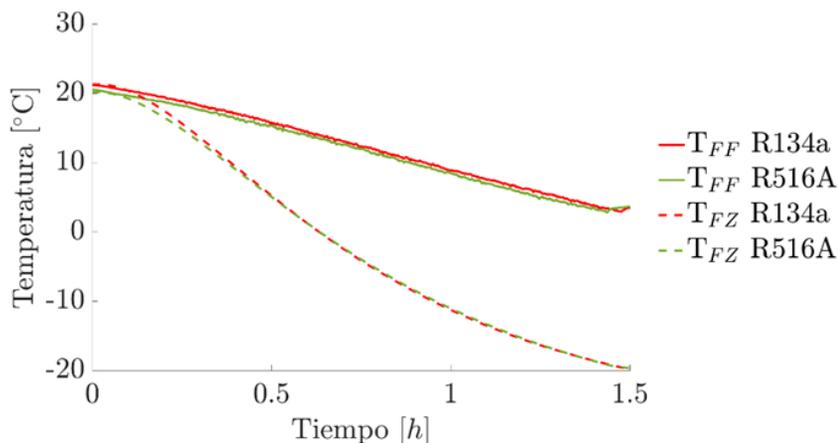


Figura 10. Temperatura de los compartimientos hasta la primera parada del compresor.

La Figura 11 presenta las presiones de trabajo de succión y de descarga del refrigerador trabajando con R516A y R134a. En la Figura 11a se observa que la presión de succión cuando el compresor está funcionando es bastante similar, siendo apenas 17.94% más alta la presión del refrigerador con R516A. Sin embargo, en la Figura 11b se nota un comportamiento distinto, donde la presión de descarga para el R134a es 4.43% mayor respecto a la del R516A. Finalmente, los comportamientos presentados en estas gráficas reflejan que durante las seis horas de prueba los ciclos de operación del compresor con el refrigerante R516A son 8.41% más cortos respecto a los del R134a.

En ambas figuras también es posible apreciar que el tiempo de operación del primer ciclo es muy similar entre ambos refrigerantes, al refrigerador con R516A le toma 1.43 h mientras que al refrigerador con R134a le toma 1.47 h. Lo anterior refleja una reducción del tiempo de arranque de aproximadamente un 2.8 % cuando el

refrigerador trabaja con R516A.

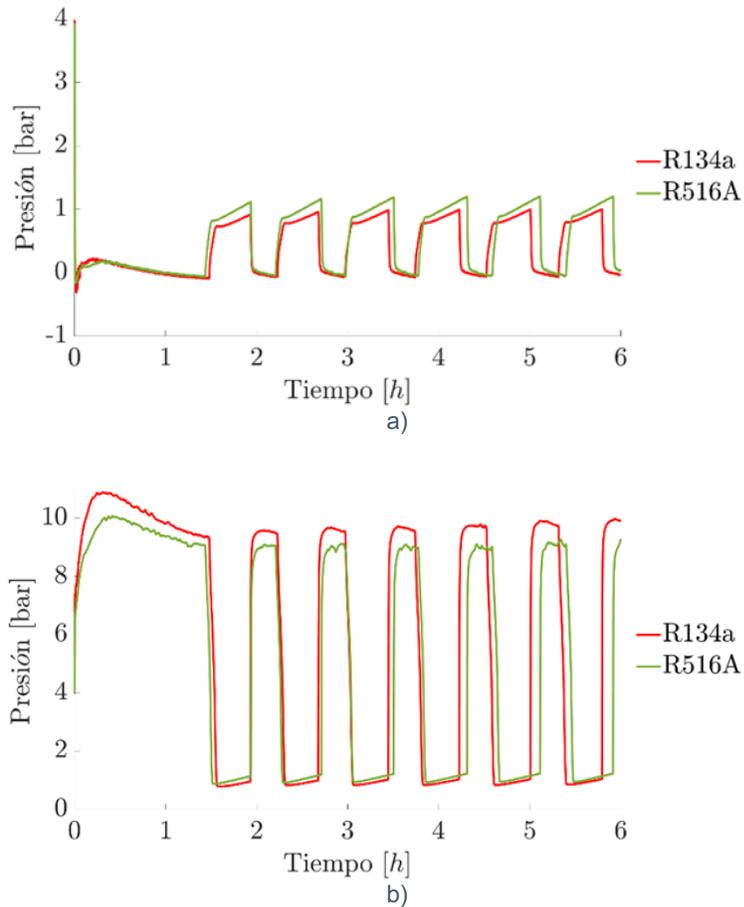


Figura 11. Presiones de operación, a) Succión b) Descarga.

Ahora, la Figura 12 muestra el promedio de las temperaturas de cada compartimiento del refrigerador. La temperatura promedio en compartimiento de los alimentos frescos es 0.32 °C menor para el refrigerador que trabaja con R516A. En tanto que para el congelador la diferencia entre ambos refrigerantes es de 0.4 °C. Por lo tanto, se puede precisar que, bajo las condiciones de estudio, el refrigerador cargado con R516A demuestra que tiene un compartimiento térmico adecuado que cumple con los estándares solicitados para un refrigerador doméstico [11].

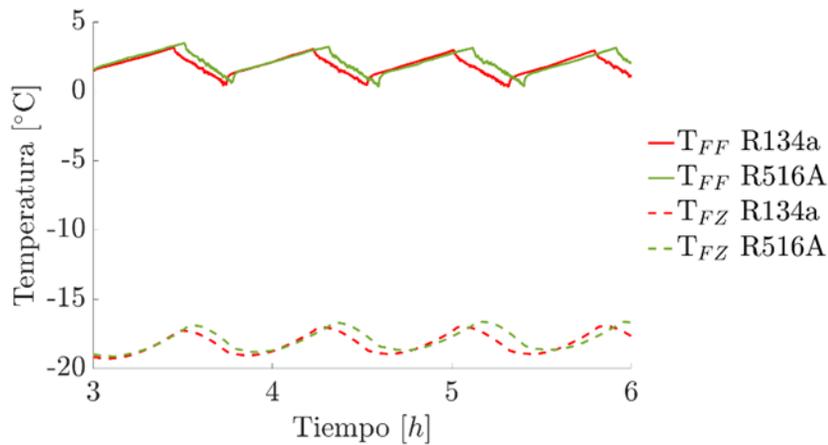
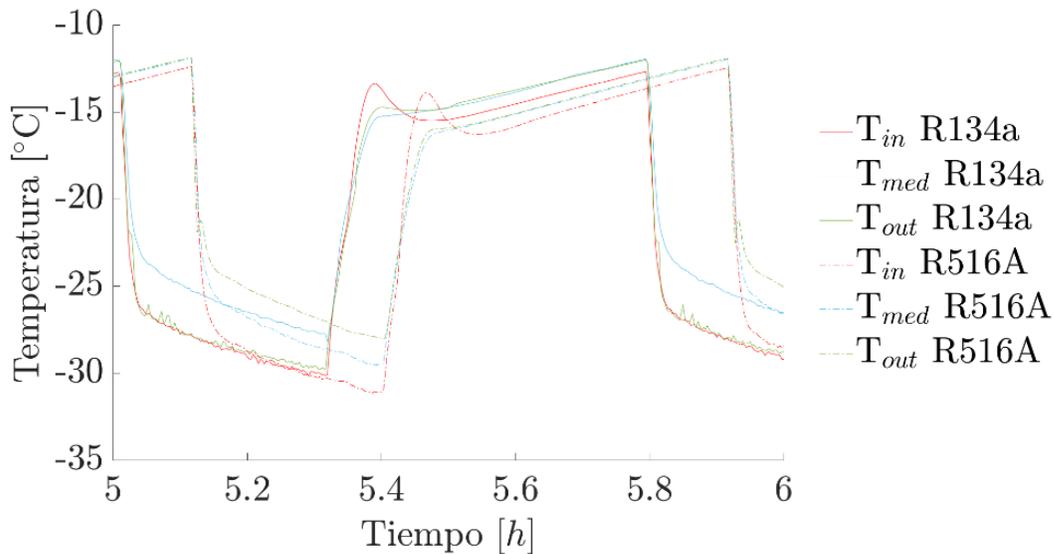


Figura 12. Temperatura en los compartimientos del refrigerador

La Figura 13 muestra el comportamiento térmico del refrigerante a lo largo del evaporador y del condensador, considerando la localización uniforme de los termopares con respecto de la longitud de los equipos de intercambio de calor (ver la Figura 1). Para el evaporador, se encuentra que existe una variación máxima de 0.5 °C para cada posición (Figura 13a). En cambio, para el condensador la variación máxima de temperatura en cada posición fue de 2.73 °C (Figura 13b).



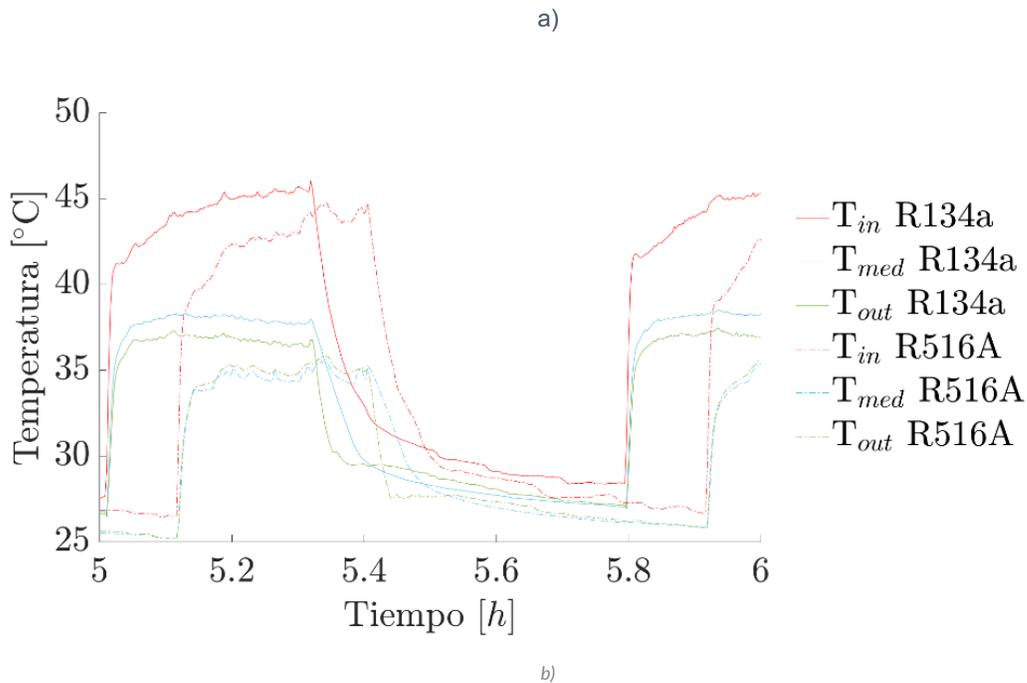


Figura 13. a) Temperatura en el evaporador b) Temperatura en el condensador.

Por último, en la Figura 14 se muestra la comparación del consumo energético por el refrigerador trabajando con los refrigerantes R134a y R516A, con sus respectivas cargas óptimas, en un período de prueba de seis horas. La medición del consumo de energía se consiguió midiendo la corriente eléctrica, el voltaje y el factor de potencia con la instrumentación descrita en la sección 3.1, además de utilizar el método unificado para la medición de la energía y el estándar IEC61000-4-7 [12]. El refrigerador operando con R516A presenta una reducción del 12.78% en el total de energía consumida comparado con el refrigerador con R134a. Por ello, considerando el comportamiento energético y el comportamiento térmico de los compartimentos del refrigerador (ver Figura 12), el refrigerante R516A se postula a ser una opción más que atractiva para reemplazar al refrigerante R134a sin un previo análisis TEWI.

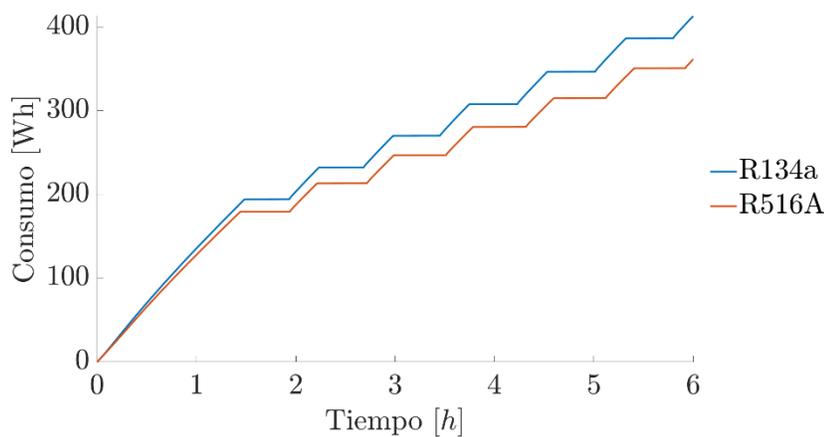


Figura 14. Consumo de energía usando R134a y R516A.

Análisis TEWI

El Impacto total de calentamiento equivalente (TEWI) es un método estandarizado para medir el impacto del calentamiento global de los sistemas nuevos de refrigeración y aire acondicionado estacionarios, en función

de las emisiones totales relacionadas de gases de efecto invernadero durante el funcionamiento del equipo y la eliminación de los fluidos operativos al final de su vida útil [13].

Este parámetro considera las emisiones directas asociadas a fugas de fluido refrigerante y emisiones indirectas debidas a la energía utilizada en el funcionamiento del sistema. Para el cálculo de este parámetro, las emisiones de CO₂ generadas durante la producción y el transporte de fluidos refrigerantes no se consideran, debido al hecho que este factor afecta en una mínima proporción al valor final del TEWI (aproximadamente un 5% para HFC, 0.03% para HFO y 0.01% para HC) [14].

Esta metodología para calcular el impacto de calentamiento total equivalente (TEWI) es para los sistemas estacionarios de refrigeración y aire acondicionado que operan con el principio de **compresión de vapor** y que funcionan con electricidad conectada a la red. Se calcula mediante la ecuación 1:

$$TEWI = GWP(\text{directa}; \text{fugas de refrigerante}) + GWP(\text{indirecto}; \text{operación})$$

$$TEWI = (GWP \cdot m \cdot L_{\text{anual}} + GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha_{\text{recuperación}})) + (E_{\text{anual}} \cdot \beta \cdot n) \quad (1)$$

donde GWP es el potencial de calentamiento global del refrigerante relativo al CO₂, m es la carga de refrigerante dentro del sistema en kg, L_{anual} representa la tasa de fugas en kg, n es la vida útil del sistema (años), $\alpha_{\text{recuperación}}$ es el factor de recuperación del gas refrigerante al final de la vida útil del equipo el cual varía de 0 a 1, E_{anual} se define como el consumo de energía por año en kW, y β es el factor de emisión indirecta de kg de CO₂ por kWh.

Los cálculos que se muestran en la Tabla 2 se basan en una vida útil de 15 años para el sistema de refrigeración considerando un valor típico de 2% en la tasa de fuga anual de refrigerante (L_{anual}) y una tasa de recuperación de refrigerante del 70% ($\alpha_{\text{recuperación}}$), con respecto a la carga inicial del refrigerador [15]. También fue considerado un factor de emisión indirecta (β) para el sistema eléctrico nacional en México de 0.423 kgCO_{2-eq} kWh⁻¹ [16].

Tabla 2. Análisis TEWI.

Parámetro	R134a	R516A
GWP	1300	131
L [kg por año]	0.0018	0.0016
n [años]	15	15
m [kg]	0.09	0.08
α [%]	70%	70%
E_{anual} [kWh año ⁻¹]	567.74	495.18
β [kgCO _{2-eq} kWh ⁻¹]	0.423	0.423
Emisiones directas [CO _{2-eq}]	38.259	3.39552
Emisiones indirectas [CO _{2-eq}]	3602.310	3141.917
TEWI [CO _{2-eq}]	3640.569	3145.312

La Tabla 2 muestra el TEWI del refrigerador evaluado en este estudio utilizando refrigerantes R134a y R516A. El ahorro energético que presenta el refrigerante R516A da como resultado una reducción de las emisiones indirectas, además, su bajo GWP y menor carga de refrigerante hacen posible la disminución del 91.1% de las emisiones directas del refrigerante R516A con respecto al R134a.

Los resultados muestran que el TEWI para R516A es 13.6% inferior al R134a. Por lo tanto, el refrigerante R516A se propone y se justifica como una interesante alternativa a corto plazo para sustituir el R134a en el sector de la refrigeración doméstica, inclusive para el caso de México.

Conclusiones

Las pruebas de carga fueron realizadas en un refrigerador doméstico tipo no-frost, el cual trabaja a condiciones de diseño de fábrica con refrigerante R134a (90 g). La investigación anterior se centró en análisis del R516A como remplazo directo del refrigerante R134a sin realizar ninguna modificación en el diseño del refrigerador.

Una vez recabado los resultados de las pruebas experimentales, se pueden resaltar las siguientes conclusiones:

- Al analizar la variación de carga de R516A en los parámetros de operación del refrigerador, como son las presiones y temperaturas de succión y descarga, el grado de sobrecalentamiento y subenfriamiento, y la capacidad de enfriamiento; nos indican que la falta de carga y una sobrecarga de refrigerante reducirá el rendimiento del sistema. Al presentarse una falta de carga hay una condensación incompleta, lo que provoca una menor transferencia de calor en el condensador. Por el contrario, una sobrecarga provoca un sobrecalentamiento y el rendimiento del compresor es afectado.
- La determinación de la carga óptima de R516A se sustentó en el consumo mínimo de energía. Se encontró que la carga óptima es de 80 g de refrigerante R516A. Este valor representa una reducción en el consumo de energía del 11.11% menos que la carga con R134a (90 g) propuesta de fábrica.
- En los compartimentos del dispositivo, FF y FZ, las temperaturas medidas con la carga óptima del R516A presentaron comportamientos térmicos muy similares al R134a. Presentando un tenue aumento de temperatura con el empleo del R516A comparando al R134a, se obtuvieron diferencias en el FF de 0.32 °C y en el FZ de 0.4 °C.
- Se estimó una variación máxima de 2.2 °C con respecto a las temperaturas obtenidas con el refrigerante R134a en cada posición del condensador. En el evaporador se obtuvo una mínima variación al comparar los dos refrigerantes bajo estudio.
- El análisis TEWI resultó en una reducción de 13.6% para el R516A con respecto al R134a. Esta reducción se obtuvo en el mismo refrigerador sin efectuar cambio alguno en sus componentes.

Concorde a los resultados obtenidos se puede concluir entonces que el R516A logra un menor consumo de energía y comportamientos térmicos similares que garantizan el buen funcionamiento del dispositivo al haber un reemplazo directo. Por ende, el R516A resulta un reemplazo directo bastante atractivo para el R134a, en donde la propuesta esencial es mitigar en la mayor proporción posible el impacto ambiental por el uso de refrigerante.

Agradecimientos

Los autores de este trabajo agradecen a la Universidad de Guanajuato por el apoyo de las becas para llevar a cabo el Verano de la Ciencia. También agradecemos a la empresa Arkema por la donación del refrigerante R516A. Finalmente, quisiéramos reconocer la gran aportación de los estudiantes del doctorado en ingeniería mecánica MI. David Valderrama, MI. Diana Pardo, y MI. Yonathan Heredia, que durante el desarrollo del proyecto nos orientaron para realizar correctamente el trabajo de investigación.

Bibliografía

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2018. Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI)
- Mohanraj, M, Jayaraj, S, Muraleedharan, C. Environment friendly alternatives to halogenated refrigerants—a review. *Int J Greenh Gas Control* 2009; 3: 108–119.
- Myhre, G., Shindell, D., Breón, F.M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., et al., 2013. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: *Climate change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom and New York.

- European Parliament and the Council. 2014. 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. Off. J. Eur. Union L.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2017. Protocolo de Kioto sobre cambio climático.
- Sanguinett, E. 2021. Normativas que aplican a los refrigerantes HCFC, HFC y naturales en Iberoamérica. consultado el 6 de julio de 2022, <https://www.caloryfrio.com/refrigeracion-frio/normativas-aplican-refrigerantes-hcfc-hfc-y-naturales-en-iberoamerica.html>
- Moonis R. Ally, Vishaldeep Sharma, Kashif Nawaz. 2019. Options for low–global-warming-potential and natural refrigerants Part I: constrains of the shape of the P-T and T-S saturation phase boundaries, 3-7.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). Primera edición 2014. Buenas Prácticas en el Uso de Sustancias Alternativas a los Hidroclorofluorocarbonos, 25-46.
- Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O. 2018. NIST Standard Reference Database 23, NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties, REFPROP, version 10.0 National Institute of Standards and Technology.
- VI Dmitriyev, V. E. Pisarenko. 1984. Determinación de la carga óptima de refrigerante para unidades frigoríficas domésticas. Consultado el 13 de julio de 2022, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0140700784900975>
- Diario Oficial de la Federación. Secretaría de Energía. Norma Oficial Mexicana NOM-015-ENER-2012, Eficiencia energética de refrigeradores y congeladores electrodomésticos. Límites, métodos de prueba y etiquetado. Criterios para brindar orientación. México: Secretaría de Salud; 2012.
- IEC 61000-4-7, Electromagnetic compatibility (EMC) –Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 2002
- Ramirez Hernandez, C. 2019. Diseño, Construcción y Puesta en Operación de un Calorímetro de Fluido Secundario, 71-76.
- Hwang, Y., Ferreira, C. I., & Piao, C. C. 2015. Guideline for life cycle climate performance. International Institute of Refrigeration, Paris.
- AIRAH, D. 2012. Methods of calculating Total Equivalent Warming Impact (TEWI) 2012. Australian Institute of Refrigeration, Air conditioning and Heating.
- Comisión Reguladora de Energía (CRE). 2022. Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional 2021. [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)