

Miniature Refrigeration System Using Low GWP Refrigerant

Sistema Miniatura de Refrigeración Usando Refrigerante de Bajo GWP

Juan Alejandro Vazquez Aguilar¹, Juan Carlos Silva Romero², Juan Manuel Belman Flores²

¹Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, CP. 36885, México.

²Grupo de Investigación IRSE. Departamento de Ingeniería Mecánica, División de Ingenierías, Campus Irapuato-Salamanca, Universidad de Guanajuato. Salamanca-Valle de Santiago km 3.5+1.8, CP. 36885, México.

ja.vazquez.aguilar@ugto.mx¹, juansilvar17@gmail.com², jfbelman@ugto.mx²

Resumen

En el presente trabajo se evaluó experimentalmente el refrigerante R516A como posible sustituto del R134a en un sistema de compresión de vapor miniatura, atendiendo a las normativas internacionales que plantean la eliminación de refrigerantes que poseen un alto potencial de calentamiento global. La evaluación experimental se realizó bajo condiciones controladas, para lo cual, se consideraron dos masas de refrigerante 90 y 110 g, tres velocidades del compresor 3000, 4500 y 6000 rpm, y tres niveles de velocidad del ventilador acoplado al condensador bajo, medio y alto. La comparativa entre ambos refrigerantes se basó en la capacidad de enfriamiento, la potencia consumida por el compresor y el coeficiente de desempeño (COP). Los resultados muestran que, con una masa de 90 g, el R516A supera al R134a en capacidad de enfriamiento para todas las velocidades del compresor y niveles de ventilación. Su mejor rendimiento térmico se alcanzó con una velocidad del ventilador alta. La condición más favorable para el R516A fue con 110 g, 4500 rpm y ventilación alta, validando bajo estas condiciones su viabilidad como sustituto.

Palabras clave: R516A; refrigeración miniatura; compresión de vapor; bajo GWP, capacidad de enfriamiento; COP.

1. Introducción

Los sistemas de refrigeración desempeñan un papel importante en una gran variedad de aplicaciones dentro de los sectores de calefacción, ventilación, aire acondicionado y refrigeración (HVAC&R) y en numerosas áreas que van desde la alimentación y el aire acondicionado, hasta la atención médica y la industria. La mayoría de estos sistemas operan mediante ciclos termodinámicos, siendo el ciclo por compresión de vapor uno de los más comunes debido a su alta eficiencia en el intercambio de calor y a la robustez en su tecnología. Sin embargo, frente al incremento en la demanda energética y a los desafíos ambientales actuales, se vuelve fundamental optimizar su funcionamiento y sustentabilidad.

La tecnología por compresión de vapor presenta un impacto en el cambio climático, ya sea por el tipo de energía de entrada para activar el sistema y por el tipo de refrigerantes que utilizan con un alto potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés). En los equipos de refrigeración basados en el ciclo de compresión de vapor, el refrigerante R134a es uno de los hidrofluorocarbonos (HFC) más utilizados con un alto potencial de calentamiento global (GWP=1300). No obstante, la Enmienda de Kigali al Protocolo de Montreal busca reducir la producción y el consumo de los HFC ya que contribuyen significativamente al efecto invernadero. De esta manera, existen refrigerantes alternos más inocuos al ambiente y que pueden reemplazar al R134a, entre ellos, el refrigerante R516A que es una mezcla azeotrópica y presenta un bajo GWP de aproximadamente 131.

En los últimos años, diversos estudios han evaluado el comportamiento del R516A. Por ejemplo, Al-Sayyab et al., (2022a) realizaron una evaluación de energía, exergía y ambiental (3E) con once refrigerantes de bajo potencial de calentamiento global GWP, incluyendo el R516A en un sistema de bomba de calor de eyector por calor residual. Mostraron que este refrigerante ofreció mejoras en el rendimiento general del sistema en comparación al R134a. Por otro lado, Méndez-Méndez et al., (2023) compararon el rendimiento energético del R516A y R513A con respecto al R134a en un banco experimental en modo de refrigeración y modo aire

acondicionado. A partir de tres temperaturas de condensación (308 K, 313 K y 318 K) y temperaturas de evaporación (261 hasta 285 K), concluyeron que el R516A mostró ser un refrigerante con un rendimiento energético muy similar al del R134a en todos los casos estudiados. De manera similar, en el trabajo experimental realizado por Al-Sayyab et al., (2022b) compararon el comportamiento de tres refrigerantes, entre ellos el R516A, en un banco de pruebas en condiciones de estado estacionario en modo de refrigeración y calefacción; los resultados mostraron que, en modo refrigeración se presentaron incrementos en el COP y capacidad térmica a una temperatura de evaporación más baja, con un aumento del COP entre el 2 al 15%, por lo que, se presentó como una alternativa viable para aplicaciones de refrigeración a baja temperatura. Sin embargo, el sistema requiere de ajustes para igualar el rendimiento térmico general del R134a. Finalmente, Belman-Flores et al., (2023) presentaron una evaluación experimental para evaluar el rendimiento térmico y energético de un refrigerador doméstico, además de un análisis del impacto total equivalente en el calentamiento (TEWI) con R1234ze(E), R513A y R516A, concluyendo que el R516A presentó la mayor reducción de carga en comparación con el R134a.

Acorde a lo anterior, se identifica que aún existen áreas de oportunidad para continuar con la investigación en sistemas de refrigeración basados en compresión de vapor, caso particular en los sistemas de refrigeración miniatura o a pequeña escala, ya que, en los últimos años han cobrado gran relevancia por su gran eficiencia. Este tipo de refrigeración busca proporcionar capacidades de enfriamiento con alta eficiencia, bajo peso y tamaño reducido, sus principales aplicaciones son el enfriamiento de componentes electrónicos y enfriamiento personal, con capacidades de refrigeración por debajo de los 1000 W. De acuerdo con Silva-Romero et al., (2024) estos sistemas compactos no solo se perfilan como soluciones prometedoras para la refrigeración electrónica y personal, sino que también representan una oportunidad para explorar el uso de refrigerantes alternativos de bajo impacto ambiental, así como nuevas configuraciones de diseño que permitan mejorar el desempeño térmico general.

A partir de lo revisado en la literatura, en este proyecto de Verano de la Ciencia tiene como objetivo evaluar el refrigerante R516A en un sistema de compresión de vapor a pequeña escala con el propósito de reemplazar el R134a, ya que tiene un alto GWP. Esta evaluación experimental es bajo condiciones controladas de operación, considerando el análisis de dos masas de carga de refrigerante 90 y 110 g, variando parámetros como las velocidades del compresor y ventilador acoplado al condensador. La comparativa entre ambos refrigerantes es basada en condiciones operativas y mediante parámetros como la capacidad de enfriamiento, la potencia consumida y el coeficiente de desempeño (COP), con el fin de establecer si el R516A puede mantener o mejorar el desempeño energético del sistema y al mismo tiempo proyectar perspectivas ambientales más favorables.

2. Metodología experimental

2.1 Banco experimental

El banco de pruebas consiste en un sistema de refrigeración por compresión de vapor en miniatura, esto debido a la compacidad de sus componentes en comparación con los sistemas tradicionales, como se muestra en la Figura 1. Además, este tipo de sistemas también se consideran de pequeña escala debido a su rango de capacidad de enfriamiento, que puede ser inferior a los 1000 W.

Esta instalación tiene desarrollado un sistema avanzado de control para regular variables clave como la velocidad de rotación del compresor y del ventilador acoplado al condensador. El sistema cuenta con un compresor miniatura rotativo de velocidad variable de la serie Q de *Aspen Compressor*, el cual opera en un rango de 2100 a 6500 rpm. Para el rechazo de calor, se incorpora un condensador de microcanal de flujo paralelo aletado, el cual está acoplado con un ventilador de flujo axial para mejorar la transferencia de calor. Como evaporador, se emplea un intercambiador de calor de placas soldadas con 10 placas, en el cual la transferencia de calor se produce en flujo contracorriente entre el gas refrigerante y un fluido secundario. Este componente se encuentra térmicamente aislado. La expansión del refrigerante se lleva a cabo mediante un tubo capilar de 1.25 m de longitud. Adicionalmente, el sistema de refrigeración cuenta con un visor de líquido ubicado en la salida del condensador, y un filtro secador, cuya función es eliminar la humedad del refrigerante. La interconexión entre los componentes se realiza mediante tubería de cobre flexible.

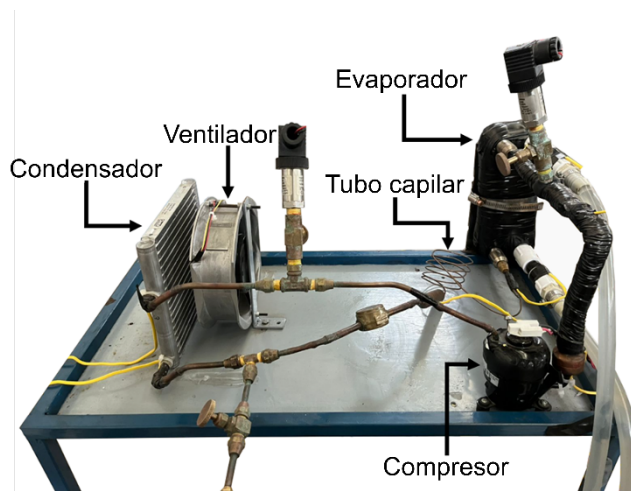


Figura 1. Sistema de refrigeración por compresión de vapor miniatura.

Finalmente, se integra un circuito secundario, como se muestra en la Figura 2, al banco de pruebas que simula la carga térmica al evaporador y permite simular diferentes condiciones de operación. Este circuito está compuesto principalmente por un tanque de almacenamiento que contiene una mezcla volumétrica de 70/30% de agua y glicol, respectivamente. Dentro del tanque se encuentra una resistencia eléctrica cuya función es elevar la temperatura a través de un controlador PID. La mezcla es impulsada desde el tanque hacia el evaporador mediante una bomba, la cual está acoplada a un variador de frecuencia que permite regular el caudal volumétrico. El circuito también incluye una válvula manual y un medidor de flujo electromagnético, lo que permite medir y controlar el flujo del fluido secundario.

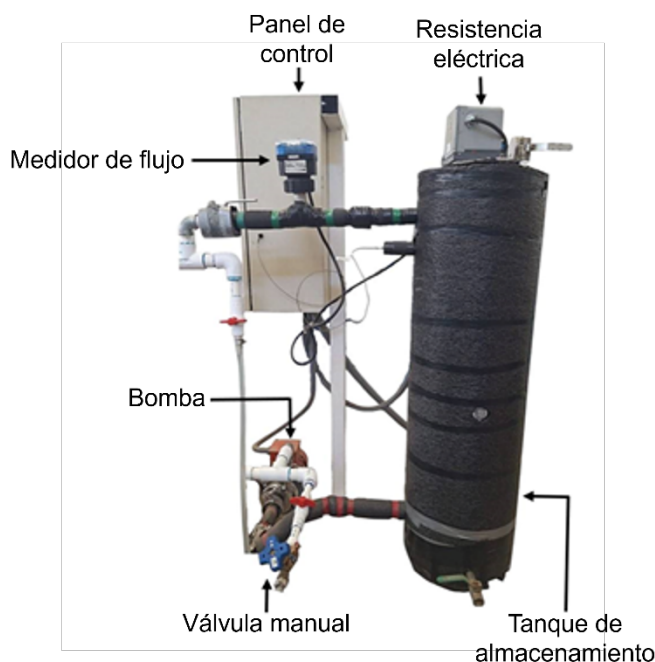


Figura 2. Circuito secundario para simular condiciones de carga térmica.

Por otro lado, el banco de pruebas está instrumentado completamente para medir las variables clave de interés, y cuenta con un sistema de adquisición y monitoreo de datos en tiempo real para facilitar el análisis y procesamiento de datos, el cual se estará hablando con mayor detalle en la sección siguiente.

2.2 Sistema de instrumentación y adquisición de datos

Para determinar las condiciones del refrigerante en distintos puntos del ciclo termodinámico, se emplea un sistema de adquisición de datos que permite obtener y registrar cada variable medida a lo largo del ciclo de compresión de vapor. Este sistema está compuesto por un chasis NI CompactDAQ-9174, al cual se conectan los siguientes módulos: un NI-9213 para medir la temperatura mediante termopares tipo K, un NI-9219 para la medición de presión a través de transductores Instrutek IT, y un NI-9207 para la medición de voltaje para determinar el consumo del compresor. Los sensores de temperatura están posicionados en la entrada y salida de cada componente, así como en puntos clave del circuito secundario. Por su parte, los sensores de presión están colocados en los puertos de succión y descarga del compresor, con el fin de monitorear las presiones bajas y altas del sistema. La visualización y almacenamiento de los datos se realiza mediante una interfaz desarrollada en LabVIEW 2024, configurada con un intervalo de muestreo cada 3 segundos. Finalmente, las propiedades termodinámicas del refrigerante en cada estado se determinan utilizando el software REFPROP.

2.3 Condiciones de operación

Las condiciones de operación del sistema fueron definidas en función de tres parámetros principales: la masa de refrigerante, la velocidad de giro del compresor y la velocidad del ventilador. Estos dos últimos parámetros sus condiciones fueron definidas a partir de sus límites de diseño de los componentes, con el objetivo de garantizar un funcionamiento seguro del banco de pruebas. Para el análisis, se evaluó cada masa de refrigerante con diferentes niveles de velocidad del compresor, y a su vez, cada una de estas combinaciones fue sometida a distintas velocidades del ventilador. Esta configuración permitió analizar de forma integral el comportamiento del sistema bajo diversas condiciones operativas. Las combinaciones evaluadas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1. Condiciones de operación experimentales.

Parámetros	Valor
Masa del refrigerante	90 y 110 g
Velocidad de giro del compresor	3000, 4500 y 6000 rpm
Velocidad del ventilador	baja, media y alta

3. Resultados

Esta sección muestra los principales resultados de las pruebas realizadas en el banco de pruebas experimental para los refrigerantes R134a, considerado como referencia, y el R516A bajo distintas condiciones operativas en un sistema de refrigeración miniatura. Los parámetros experimentales mostrados son la capacidad de enfriamiento (CC), potencia consumida por el compresor ($\dot{W}_{com}$) y el coeficiente de desempeño (COP). Los resultados experimentales se resumen en la Tabla 2.

Los parámetros experimentales se determinaron a partir de mediciones directas en el sistema. La capacidad de enfriamiento se obtuvo mediante el análisis térmico del fluido secundario (mezcla agua-glicol), calculando el producto entre el caudal volumétrico ($\dot{V}$), la densidad (ρ), el calor específico (C_p) y la diferencia de temperatura entre la entrada y salida del evaporador. La potencia consumida por el compresor se estimó a partir del voltaje de alimentación (V) y de la corriente eléctrica (I) registrada por la tarjeta de adquisición de datos. Finalmente, el coeficiente de desempeño (COP) se calculó como el cociente entre la capacidad de enfriamiento y la potencia eléctrica consumida por el compresor, como se muestra en la Ecuación 1.

$$COP = \frac{CC}{\dot{W}_{com}} = \frac{\rho \dot{V} C_p (T_{entrada} - T_{salida})}{VI} \quad (1)$$

Para una condición operativa de 90 g y 3000 rpm, el R516A entregó una capacidad de enfriamiento 7.7% mayor que el R134a en un nivel bajo de ventilación, aunque resultó un consumo mayor y un COP 7.3% menor.

Al subir la velocidad del ventilador a una condición media, el R516A mostró una mejora significativa de 30.4% en capacidad y reduciendo el consumo en un 15% en comparación al nivel anterior, obteniendo una eficiencia ligeramente menor al R134a. En un nivel alto, el R516A alcanzó su mejor rendimiento, entregando 16.3% y 2.1% mayor en capacidad y COP, respectivamente, frente al R134a.

Manteniendo la misma masa e incrementando la velocidad de giro del compresor a 4500 rpm, el R516A mostró una capacidad de enfriamiento mayor que el R134a en todos los niveles de velocidad del ventilador. En nivel bajo, el R516A obtuvo un mayor consumo energético, por lo que el COP del R134a fue 13.6% mayor que el R516A. Al aumentar el nivel de velocidad del ventilador, el R516A mejoró considerablemente en su consumo obteniendo una reducción del 29.4% que, en su nivel bajo, así mismo, su COP fue 16.3% mayor que el R134a. Al pasar a nivel alto, la mejora en eficiencia fue más marcada para el R516A, con un incremento del 26.8% en COP frente a su valor en nivel medio, mientras que el R134a incrementó solo 13.6%, además la capacidad del R516A fue 47.7% mayor que la del R134a.

Tabla 2. Resultados experimentales de capacidad de enfriamiento, consumo del compresor y COP para los refrigerantes R134a y R516A bajo distintas condiciones de operación.

Masa (g)	Velocidad de giro del compresor (rpm)	Nivel de velocidad del ventilador	CC (W)		$\dot{W}_{com}$ (W)		COP	
			R134a	R516A	R134a	R516A	R134a	R516A
90	3000	Bajo	121.73	131.11	44.73	52.02	2.72	2.52
		Medio	148.90	170.91	36.89	44.22	4.04	3.86
		Alto	165.29	192.22	34.56	39.37	4.78	4.88
	4500	Bajo	110.17	141.06	65.74	95.66	1.67	1.47
		Medio	119.54	173.84	54.12	67.56	2.21	2.57
		Alto	128.51	189.84	51.26	58.30	2.51	3.26
	6000	Bajo	187.41	188.16	110.58	171.45	1.69	1.20
		Medio	181.95	259.71	81.55	108.96	2.23	2.38
		Alto	176.46	309.36	76.41	94.92	2.31	3.26
110	3000	Bajo	176.37	119.30	52.92	49.27	3.33	2.42
		Medio	189.62	146.91	39.67	41.19	4.78	3.57
		Alto	203.26	154.77	34.86	36.80	5.83	4.20
	4500	Bajo	211.65	240.62	105.77	96.81	2.00	2.48
		Medio	239.04	266.83	75.68	77.81	3.16	3.43
		Alto	236.80	315.53	63.15	59.40	3.75	5.31
	6000	Bajo	280.95	-----	117.63	-----	2.39	-----
		Medio	386.93	282.34	119.12	115.83	3.25	2.44
		Alto	368.40	324.60	101.16	90.56	3.64	3.58

Ahora, utilizando la máxima velocidad de giro de operación (6000 rpm) para esta masa, nuevamente se muestra en el R516A una mayor capacidad de enfriamiento en los tres niveles del ventilador, así mismo un

mayor consumo energético que en el R134a. En nivel bajo, el R516A presenta un COP 29% menor que el R134a. En el nivel medio, el R516A mejora respecto a su nivel bajo, y obtiene un incremento de 42.7% en capacidad y 6.7% en COP frente al R134a. En el nivel alto, se obtiene el mejor rendimiento del R516A, siendo mayor 19.1% en capacidad y 37% en COP, que, en su nivel medio, además también se obtiene una disminución del 12.9% en consumo energético.

Por otro lado, para la condición de 110 g y 3000 rpm, el R516A mostró una capacidad de enfriamiento y un COP inferiores en comparación con el R134a a lo largo de los tres niveles de ventilación. Por tanto, en estas condiciones particulares, el uso del R516A no resulta ideal como sustituto directo del R134a.

Incrementando la velocidad de giro del compresor a 4500 rpm con la misma masa, el R516A mostró un comportamiento mejor que el R134a, ya que presenta una capacidad de enfriamiento y un desempeño superior en los tres niveles de velocidad del ventilador. En el nivel bajo, el R516A mostró un consumo 8.5% menor y un COP 24% mayor, que el R134a. Al aumentar al nivel medio, el R516A presentó un consumo ligeramente superior de tan solo 2.8% que el R134a, pero aún se obtuvo un COP 8.5% mayor. En el nivel alto, el R516A alcanzó su mejor rendimiento térmico, logrando incrementar 18.2% en capacidad y 54.8% en COP, respecto a al nivel medio, de igual manera obteniendo una reducción en el consumo energético de 23.7%.

Finalmente, para la condición de operación de 110 gr y 6000 rpm, no se obtuvieron resultados para el R516A en el nivel bajo de ventilación, debido a que la temperatura de descarga alcanzó valores cercanos al límite máximo permitido por la ficha técnica del compresor. Además, no se logró establecer un sobrecalentamiento adecuado, por lo que se decidió interrumpir la prueba a fin de proteger la integridad del sistema. En los niveles medio y alto de ventilación, el R516A mostró nuevamente una capacidad de enfriamiento y un COP inferiores en comparación con el R134a. Por tanto, esta condición operativa no resultó favorable para el uso del R516A como sustituto.

4. Conclusiones

Acorde a los resultados obtenidos en las pruebas, el R516A demostró potencial como sustituto del R134a en sistemas de refrigeración miniatura, ya que ofrece un rendimiento comparable e incluso superior al refrigerante de referencia bajo ciertas condiciones operativas. Cabe mencionar que la evaluación experimental se llevó a cabo sin realizar modificación alguna en el diseño del sistema, siendo los siguientes hallazgos los más significativos:

- Con una masa de 90 g, el R516A superó al R134a en capacidad de enfriamiento bajo las tres velocidades del compresor y en todos los niveles de ventilación. Sin embargo, el consumo de energía del compresor también fue mayor en todos los escenarios, provocando que el COP solo mejorara en casos particulares.
- Al trabajar con una masa de 110 g a 3000 y 6000 rpm, el R516A presentó limitaciones, como una menor capacidad de enfriamiento y menor COP. Además, para la velocidad de 6000 rpm del compresor y velocidad baja del ventilador se obtuvo una temperatura de descarga muy elevada y dificultades para mantener un sobrecalentamiento adecuado, lo cual comprometen la operación segura y estable del sistema.
- El mejor desempeño del R516A se observó al utilizar un nivel alto de ventilación, ya que este favorece la transferencia de calor en el condensador, lo que se traduce en una mejora del COP. Este efecto fue consistente tanto con 90 g en todas las velocidades del compresor, como con 110 g a 4500 rpm.
- Finalmente, la condición más favorable para el R516A en este sistema corresponde a una masa de 110 g, una velocidad de compresor de 4500 rpm y ventilación alta.

En conjunto, los resultados respaldan la viabilidad del R516A como alternativa de bajo GWP y sustituto del R134a en sistemas miniatura, sin embargo, su aplicación debe ser cuidadosamente evaluada según el diseño y operación del sistema para garantizar un desempeño óptimo.

5. Bibliografía

- Al-Sayyab, A. K. S., Navarro-Esbrí, J., & Mota-Babiloni, A. (2022a). Energy, exergy, and environmental (3E) analysis of a compound ejector-heat pump with low GWP refrigerants for simultaneous data center cooling and district heating. *International Journal of Refrigeration*, 133, 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2021.09.036>
- Al-Sayyab, A. K. S., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, A., Kim, S., & Mota-Babiloni, A. (2022b). Comprehensive experimental evaluation of R1234yf-based low GWP working fluids for refrigeration and heat pumps. *Energy Conversion and Management*, 258, 115378. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115378>
- Belman-Flores, J. M., Heredia-Aricapa, Y., García-Pabón, J. J., Pérez-García, V., & Pérez-Reguera, C. G. (2023). Drop-in replacement of R134a in a household refrigerator with low-GWP refrigerants R513A, R516A, and R1234ze(E). *Energies*, 16(8), 3422. <https://doi.org/10.3390/en16083422>
- Méndez-Méndez, D., Pérez-García, V., & Morales-Fuentes, A. (2023). Experimental energy evaluation of R516A and R513A as replacement of R134a in refrigeration and air conditioning modes. *International Journal of Refrigeration*, 154, 73-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2023.06.003>
- Silva-Romero, J. C., Belman-Flores, J. M., & Aceves, S. M. (2024). A Review of small-scale vapor compression refrigeration technologies. *Applied Sciences*, (Basel, Switzerland), 14(7), 3069. <https://doi.org/10.3390/app14073069>