

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE REFRIGERANTE SUSTITUTO AL R134a EN SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN AUTOMOTRIZ

M.A. Alvarado-González¹, D.M. Bedolla-Rodríguez¹, M.F. García-Pérez¹, E.A. Godoy-Sinecio¹, A. González-Javier¹, V. Pérez-García¹

¹División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca,
v.perez@ugto.mx¹

Resumen

Los sistemas de climatización automotriz continuamente están evolucionando. Actualmente la industria de la refrigeración está viviendo una transición hacia el uso de refrigerantes de bajo potencial de calentamiento atmosférico, siendo esta etapa la que utiliza refrigerantes llamados de cuarta generación. En el presente trabajo se evaluó experimentalmente un refrigerante sustituto al R134a en climatización automotriz con un potencial de calentamiento atmosférico bajo. El refrigerante evaluado es el R1234yf, que pertenece a los refrigerantes de cuarta generación. La evaluación se realizó en una instalación experimental ubicada en el Laboratorio de Termofluidos de la División de Ingenierías Campus Irapuato Salamanca. Las pruebas fueron realizadas considerando una temperatura de evaporación de 12°C y una temperatura de condensación de 30°C. Los resultados obtenidos fueron valores, del coeficiente de desempeño (COP) de 3.33 y una eficiencia por Segunda Ley de la Termodinámica de 21%. Además se encontró que el componente con mayor irreversibilidad en el ciclo de climatización fue la válvula de expansión.

Palabras clave: R1234yf, Climatización automotriz, COP, Irreversibilidad.

Introducción

En la actualidad el aire acondicionado en los automóviles se ha vuelto indispensable sobre todo en lugares en los que el clima es bastante caluroso, y es mediante el ciclo de refrigeración que se puede acceder a este beneficio ya que implementado en los vehículos es posible viajar cómodamente por un largo tiempo.

El ciclo de refrigeración tiene varias aplicaciones, siendo una de ellas la climatización automotriz la cual consiste en mantener un espacio determinado a una temperatura de confort térmico. En la actualidad, el refrigerante utilizado de forma más común para esta aplicación es el R134a en los vehículos de motor¹, sin embargo, este refrigerante posee un potencial de calentamiento global elevado. Los refrigerantes que son usados para climatización automotriz exhiben buenas propiedades termodinámicas y de transporte, así como un precio de fabricación aceptable (principalmente el R134a) pero, debido a fenómenos que están ocurriendo en el tiempo actual como el calentamiento global, desgaste de la capa de ozono, entre otras cosas es necesario replantear el uso de otro refrigerante que sustituya al actual R134a. Ante esto, algunas opciones se están manejando en el mercado mundial de empresas maquiladoras de coches, siendo una de ellas el R1234yf el cual fue aprobado para su implementación en automóviles a partir del 1 de enero del 2018².

Un factor importante y que no debe dejarse pasar es que los refrigerantes deben tener un bajo potencial de calentamiento global (GWP) además de un nulo potencial de destrucción del ozono, ambos parámetros son satisfechos por el refrigerante R1234yf.

La razón por la cual el GWP impacta directamente en el calentamiento global, es entre otras cosas, por el tiempo de vida en la atmósfera de cada refrigerante, siendo el R1234yf el que tiene un menor tiempo de vida (11 días) en comparación con el R134a (13.8 años³).

Desarrollo

En este trabajo, se realiza una comparación entre los refrigerantes R134a y R1234yf evaluados en ciclos termodinámicos simples para dos casos particulares: como primer caso se tiene el ciclo teórico y el ciclo de manera experimental como segundo caso. Se detalla a continuación cada uno de ellos.

Caso 1. Ciclo teórico.

Para el análisis del ciclo termodinámico teórico por Primera y Segunda Ley de la Termodinámica se hizo uso del programa EES® (Engineering Equation Solver), se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones.

- El ciclo teórico está basado en un ciclo ideal, es decir, trabaja en condiciones de saturación.
- Todos los procesos son de estado estacionario con efectos despreciables de energía potencial y cinética, sin reacciones químicas o nucleares⁴
- La transferencia de calor al sistema y la transferencia de trabajo desde el sistema son positivas.
- El compresor trabaja con una eficiencia isoentrópica del 75%.
- La válvula de expansión trabaja mediante un proceso isoentálpico.
- Las transferencias de calor y las caídas de presión del refrigerante en la tubería que conecta los componentes son despreciables debido a que sus longitudes son cortas.

Las ecuaciones utilizadas para el análisis del ciclo se muestran en la Tabla 1 relacionando el componente con la ecuación correspondiente.

Componente	Balance de energía	Cambio de entropía	Otras ecuaciones
Compresor	W_{comp} $= h_2 - h_1$	δs_{comp} $= s_2 - s_1$	η_{comp} $= \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1}$
Condensador	Q_{cond} $= h_2 - h_3$	δs_{cond} $= s_2 - s_3$	
Válvula de expansión	$h_3 = h_4$	δs_{val} $= s_3 - s_4$	
Evaporador	Q_{evap} $= h_1 - h_4$	δs_{evap} $= s_1 - s_4$	

El cálculo del COP y de la eficiencia por Segunda Ley de la Termodinámica se realizan a partir de las ecuaciones (1) a (3) para cada caso⁵.

$$COP = \frac{Q_{evap}}{W_{comp}} \quad (1)$$

$$\chi = \frac{COP}{COP_R} \quad (2)$$

$$COP_R = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad (3)$$

En donde T_L y T_H son, las temperaturas de los focos frío y caliente en el ciclo, respectivamente.

Caso 2. Ciclo experimental.

Para la evaluación de este caso, se llevan a cabo pruebas experimentales en una instalación por compresión de vapor usada para evaluar refrigerantes tipo HFC, HCFC, HFO y mezclas HFC/HFO y que se muestra en la Figura 1. A continuación se muestra el procedimiento realizado para las pruebas experimentales de ambos refrigerantes.

1. Primeramente, se realiza el vacío del sistema con ayuda de una bomba de succión, esto con la finalidad de retirar humedad dentro de la instrumentación,
2. Como segundo paso, se realiza un presurizado con nitrógeno para revisar hermeticidad en la instalación, y, por último,
3. Se carga el refrigerante.

Para la evaluación de los refrigerantes, se estableció una temperatura objetivo de 12°C para la temperatura de evaporación. La prueba emite valores de presión y temperatura del refrigerante en la entrada y salida de cada componente del ciclo de refrigeración. Esta información es adquirida mediante un sistema de adquisición de datos con el que cuenta la instalación, en donde los valores generados con mostrados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel®.

A partir de los valores de presión y temperatura, se calculan las variables termodinámicas como entalpía y entropía específicas por medio del software comercial REFPROP®.



Figura 1. Instalación por compresión de vapor usada para evaluar refrigerantes tipo HFC, HCFC y HFO.

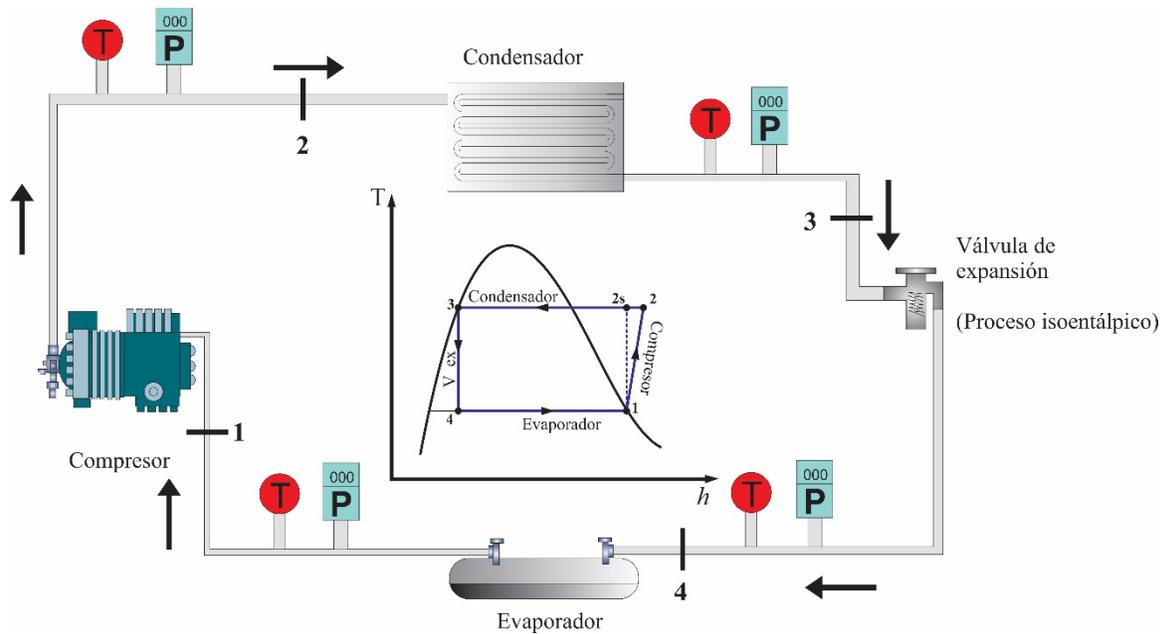


Figura 2. Diagrama del ciclo simple de refrigeración por compresión de vapor.

La Figura 2 muestra un esquema de la distribución de los componentes del ciclo y la ubicación de los sensores para la medición de las variables mencionadas. Además, se incorpora un diagrama T-h del ciclo de refrigeración por compresión de vapor en donde se identifican los estados termodinámicos por los que pasa el refrigerante.

Las lecturas de importancia son tres: Temperatura de descarga, temperatura a la salida del condensador y temperatura a la salida del evaporador. La primera de ellas indica la temperatura máxima de operación del refrigerante en el ciclo, lo cual es un parámetro empleado para determinar el límite de operación del refrigerante. La segunda indica la temperatura a la cual se puede disipar el calor en un ambiente natural, mientras que la tercera ofrece la temperatura del interior del vehículo sin considerar los efectos internos en la cabina.

Las Figura 3 ilustra la comparativa de la variación de la primera propiedad para el refrigerante base R134a y el refrigerante sustituto, el R1234yf a lo largo de la prueba.

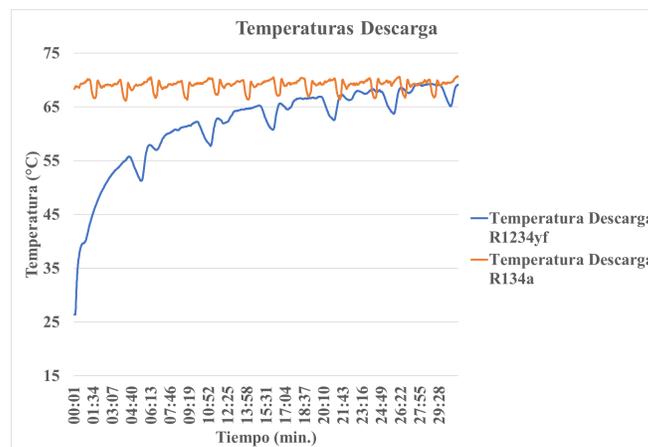


Figura 3. Lectura de la temperatura de descarga durante la prueba.

La Figura 4 muestra una comparativa entre el comportamiento de la temperatura de condensación para ambos refrigerantes (R134a y R1234yf). Cabe mencionar que la duración de la prueba fue para ambos casos de 31 minutos.

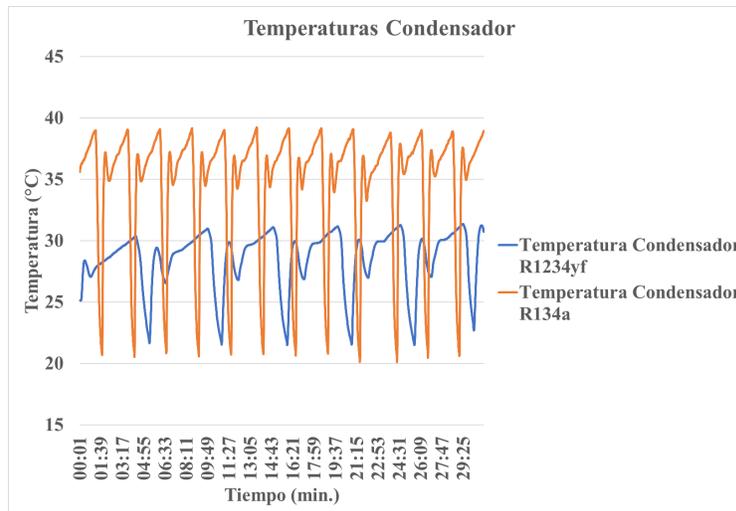


Figura 4. Lectura de la temperatura a la salida del condensador.

La Figura 5 muestra a su vez, el comportamiento de la temperatura de evaporación para ambos refrigerantes.

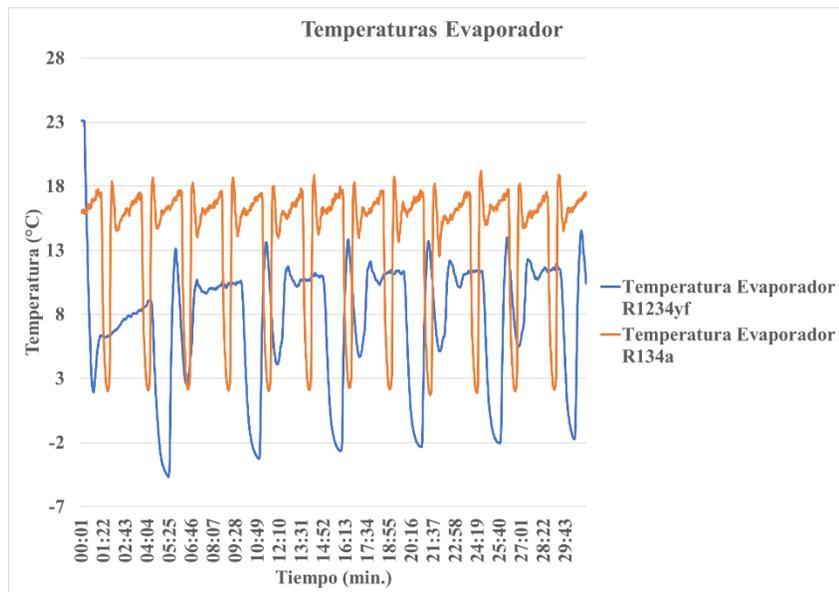


Figura 5. Lectura de la temperatura a la salida del evaporador.

Como puede observarse en las Figuras 4 y 5, los refrigerantes exhiben un comportamiento similar, generando ciclos repetitivos cada vez que el compresor se encendía y se apagaba. Para cuantificar el COP fue necesario obtener la media de los valores en los rangos de las gráficas en los que la función se estabilizaba, y así obtener un valor promedio para cada una de las temperaturas en los estados a la salida de cada componente. Este análisis de datos se realizó también para las lecturas de presión de los componentes. La estabilización se considera en donde no hay una variación considerable en la variable de lectura.

Resultados

Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 1 y 2 para ambos refrigerantes, considerando los valores teóricos y experimentales.

Tabla 1. Propiedades termodinámicas para el ciclo teórico y experimental de compresión de vapor para el refrigerante R1234yf.

Estado	T [°C]		P [bar]		h [KJ/Kg]		s [KJ/Kg K]	
	Teóric.	Exper.	Teóric.	Exper.	Teóric.	Exper.	Teóric.	Exper.
1	12	12	4.656	2.32	370.9	376.21	1.6	1.664
2s	-	-	7.835	-	380.2	-	1.6	-
2	31.46	63.29	7.835	8.44	383.3	416.81	1.61	1.708
3	30	30.46	7.835	7.5	239.4	383.05	1.137	1.611
4	12	12	4.656	3.73	239.4	373.16	1.141	1.622

Tabla 2. Propiedades termodinámicas para el ciclo teórico y experimental de compresión de vapor para el refrigerante R134a.

Estado	T [°C]		P [bar]		h [KJ/Kg]		s [KJ/Kg K]	
	Teóric.	Exper.	Teóric.	Exper.	Teóric.	Exper.	Teóric.	Exper.
1	16.34	16.34	5.101	2.53	259.6	414.01	0.9238	1.792
2s	-	-	9.263	-	272.0	-	0.9238	-
2	42.34	69.42	9.263	8.86	276.1	453.14	0.9369	1.823
3	36.55	36.55	9.263	7.79	103.1	421.48	0.3787	1.735
4	16.34	16.34	5.101	3.40	103.1	412.05	0.3832	1.763

Tabla 3. Comparativa entre los ciclos termodinámicos teórico y experimental por compresión de vapor para aire acondicionado con refrigerante R1234yf.

R1234yf	COP [%]	x [%]	δs_{Comp} [KJ/Kg K]	δs_{Cond} [KJ/Kg K]	δs_{Evap} [KJ/Kg K]	δs_{Val} [KJ/Kg K]
Teórico	10.57	65.6	0.01022	-0.005815	0.006387	0.003089
Experimental	3.33	21	0.04834	-1.140957	-0.40	0.459049

Tabla 4. Comparativa entre los ciclos termodinámicos teórico y experimental por compresión de vapor para aire acondicionado con refrigerante R134a.

R134a	COP [%]	x [%]	δs_{Comp} [KJ/Kg K]	δs_{Cond} [KJ/Kg K]	δs_{Evap} [KJ/Kg K]	δs_{Val} [KJ/Kg K]
Teórico	9.51	82.9	0.01311	-0.00864	-0.00003	0.00451
Experimental	4.99	43.4	0.03078	-0.18865	0.02	0.02829

Por otro lado, las Tablas 3 y 4 muestran los resultados del análisis por Segunda Ley de la Termodinámica y los cambios de entropía en cada componente. De aquí se observa que la válvula de expansión presenta el mayor cambio en entropía en todo el sistema; una posible causa es que, al tratarse de un proceso de estrangulamiento o expansión, la fricción que presenta el fluido de trabajo, es decir el refrigerante R1234yf con la superficie en contacto sea la problemática principal.

Conclusiones

En este trabajo se realizó un estudio experimental sobre la influencia de la variación de las condiciones de refrigeración un sistema de aire acondicionado en vehículos trabajando con R1234yf como reemplazo para el R134a, la principal conclusión fue que: El COP experimental resultó ser más bajo para el R1234yf en comparación con el R134a. Sin embargo, el R1234yf tiene un GWP muy bajo, lo que significa que se descompone con mucha más facilidad en la atmósfera, por lo que no destruye la capa de ozono.

Dado que el comportamiento de las temperaturas en las gráficas obtenidas es similar en los refrigerantes R1234yf y R134a, se puede concluir que el R1234yf es perfectamente sustituible en los sistemas de refrigeración automotrices; por otra parte, el uso del R1234yf beneficiaría al ambiente, al no contribuir como gas de efecto invernadero en la atmósfera.

A partir de los resultados obtenido, es posible concluir que el R1234yf puede ser considerado como sustituto al R134a, ya que el primer refrigerante no contribuye de manera importante al calentamiento global lo hace el segundo, pues el tiempo de vida en la atmósfera para el R134a es de 13.8 años, mientras que el R1234yf solo dura 11 días.

Durante la investigación de los dos refrigerantes que se analizaron cabe mencionar que cada uno de ellos tiene sus pros y sus contras, en el caso del R134a su costo de producción es más bajo, pero tiene un GWP muy alto, lo cual es una ventaja muy grande que se le otorga al R1234yf, el cual tiene un efecto que genera un desgaste nulo en la capa de ozono gracias y su potencial de calentamiento global muy bajo.

Referencias

- Autodata*. (05 de 05 de 2017). Obtenido de <https://www.autodata-group.com/es/noticias/industria/el-aire-acondicionado-en-los-nuevos-modelos-de-vehiculo-requieren-un-gas-mas-respetuoso-con-el-medio-ambiente/#:~:text=El%20R134a%20es%20el%20refrigerante,refrigerante%20que%20sustituyera%20al%20R134a>.
- Infotaller. "R1234yf, todo lo que necesitas saber sobre este refrigerante". infotaller. https://www.infotaller.tv/electromecanica/R1234yf-necesitas-saber-refrigerante_0_1218778135.html
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Obtenido de: <https://archive.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg1/137.htm#:~:text=HFC-134a%20is%20used%20primarily,0.032%20Tg/yr%20in%201996>.
- M. J. Moran, H. N. Shapiro, D. D. Boettner y M. B. Bailey, *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- Vicente Pérez-García, Juan M. Belman-Flores, José L. Rodríguez-Muñoz, Víctor H. Rangel-Hernández, Armando Gallegos-Muñoz, Second Law Analysis of a Mobile Air Conditioning System with Internal Heat Exchanger using low GWP refrigerants, *Entropy*, 19 (4), 175, 2017, <https://doi.org/10.3390/e19040175>