



COMPARACIÓN TEÓRICA ENTRE LOS REFRIGERANTES R404A Y R455A EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN

JORGE HARO-ORTUÑO^{1,2}, ADRIÁN MOTA-BABILONI¹, JOAQUÍN NAVARRO-ESBRÍ¹, ÁNGEL BARRAGÁN-CERVERA¹

¹Universitat Politècnica de València (UPV)
Instituto de Seguridad Industrial, Radiofísica y Medioambiental (ISIRYM)
Camino de Vera, s/n, 46022 Valencia, España

²Universitat Jaume I
Grupo de Investigación ISTENER
Avenida de Vicent Sos Baynat, s/n, 12071 Castellón de la Plana, España

(Recibido 1 de enero de 2018, revisado 8 de marzo de 2018, para publicación 23 de marzo de 2018)

Resumen – Los hidrofluorocarbonos (HFC) son sustancias dañinas para el medio ambiente porque se consideran gases de efecto invernadero. Uno de los refrigerantes HFC comúnmente utilizado en los sistemas de refrigeración comercial es el R404A que tiene un potencial de calentamiento atmosférico relativamente alto (PCA), 3922. El Parlamento Europeo y el Consejo aprobaron el Reglamento n.º 517/2014 que estableció que en los próximos años, los refrigerantes con alto PCA como el R404A deben prohibirse en Europa en la mayoría de los sistemas de refrigeración. Este artículo presenta un análisis teórico del rendimiento de un sistema de compresión de vapor utilizando el nuevo refrigerante de bajo PCA (145), el R455A, que es una alternativa al R404A en sistemas de refrigeración comercial. El R455A presenta buenas características como refrigerante a pesar de su ligera inflamabilidad. El método utilizado para comparar el R404A y el R455A fue una simulación con el software REFPROP a varias temperaturas de condensación y evaporación que representan las diferentes condiciones de funcionamiento típicas de los sistemas de compresión de vapor. Los resultados muestran que la capacidad frigorífica del R455A es de alrededor a un 5% menor que la del R404A. Sin embargo, el coeficiente de rendimiento (COP) del R455A es más alto que el de R404A y puede conducir a una reducción del consumo de energía. De acuerdo con estos resultados, se puede concluir que el R455A es una buena alternativa de bajo PCA con respecto al R404A.

Palabras clave – Potencial de calentamiento atmosférico (PCA), hidrofluoroolefinas (HFO), sistemas de compresión de vapor; coeficiente de rendimiento, eficiencia energética.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global promedio durante las últimas décadas está relacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) con origen antropológico. Según las conclusiones de varios estudios, si las emisiones de estos gases no se detienen, la temperatura promedio de la tierra se incrementará en algunos grados. Este aumento produciría efectos irreversibles y negativos en el clima global y podría causar múltiples desastres naturales [1].

Los sistemas de compresión de vapor utilizados para la producción de frío contribuyen al cambio climático: las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero están relacionadas con las emisiones de CO₂ a la atmósfera, debido a la quema de combustibles fósiles utilizados para generar electricidad consumida por los compresores y ventiladores de los sistemas. Además, las emisiones directas de gases de efecto invernadero son causadas por la fuga accidental de refrigerantes a la atmósfera. La mayoría de los refrigerantes utilizados en la producción de frío tienen un alto potencial de calentamiento atmosférico (PCA) en comparación con el CO₂. Esto determina que los sistemas de refrigeración por compresión de vapor presentan altas emisiones de GEI lo que contribuye al avance del calentamiento global [2].

En 1997, se firmó el Protocolo de Kyoto y las partes acordaron reducir las emisiones de GEI. Aunque varios países no han ratificado o abandonaron este tratado, la Unión Europea recientemente ha tomado la

iniciativa para frenar el calentamiento global. En 2014, el Reglamento (UE) n° 517/2014 estableció controles y reglamentaciones para la gestión de los hidrofluorocarburos (HFC) [3].

La refrigeración comercial es uno de los sectores señalados en esta regulación debido a la alta relación de fugas accidentales, la gran cantidad de refrigerante requerido y el refrigerante comúnmente utilizado, el R404A [4]. Este fluido tiene buenas propiedades termofísicas y de transferencia de calor para ser considerado refrigerante, pero presenta un Potencial de Calentamiento Atmosférico (PCA) muy alto, 3922 (3922 veces el PCA de CO₂). Debido a las restricciones recientemente impuestas, las compañías químicas más relevantes están desarrollando alternativas para reemplazarlo [5].

Estas alternativas deben elegirse teniendo en cuenta varios factores como la baja degradación ambiental, la seguridad y la adaptación a las temperaturas de funcionamiento requeridas [6].

Mota-Babiloni *et al.* [7] propuso diferenciar tres grupos de alternativas de reemplazo para refrigerantes de alto PCA. El primero es el compuesto por los refrigerantes naturales, tales como hidrocarburos (R290 o R600a, entre otros), amoníaco (R717) o CO₂ (R744). Sin embargo, esta opción requiere de un mayor costo de inversión inicial porque es necesaria una nueva instalación. El segundo grupo de alternativas es el compuesto por mezclas sintéticas de refrigerantes con menor PCA que el R404A. Esta opción solo es aceptable a mediano plazo porque el valor de PCA no es lo suficientemente bajo como para detener el cambio climático. La tercera opción es el uso de mezclas de refrigerantes de PCA por debajo de 150, aunque ligeramente inflamable.

Wang y Amrane [8] han identificado varias alternativas con menor PCA para reemplazar los refrigerantes HFC comúnmente utilizados. Las mezclas de HFC e hidrofluoroolefinas (HFO) parecían ser una buena alternativa para los reemplazos sin realizar grandes modificaciones. Mota-Babiloni *et al.* propusieron seis mezclas de HFO y HFC en varias configuraciones del ciclo de compresión de vapor. Estas mezclas presentaron un mayor rendimiento que el R404A en términos de capacidad frigorífica y de eficiencia energética [9].

Una de las mezclas de HFO / HFC actualmente disponibles para reemplazar al R404A es el refrigerante diseñado como R455A, que tiene un valor de PCA de 145. En condiciones de evaporación a baja temperatura, el R455A presentó una capacidad frigorífica similar y un menor consumo de energía que el R404A en el estudio publicado por Yana-Motta *et al.* [10]. Estos resultados indican que el R455A podría ser una alternativa adecuada al R404A en sistemas de baja carga, donde se permiten fluidos ligeramente inflamables. En la tabla 1 se muestran las principales características del R404A y del R455A.

Este artículo presenta una comparación teórica entre los refrigerantes R404A y R455A. El software utilizado para realizar esta comparación es el REFPROP v9.1 [11] y el objetivo principal es estudiar la viabilidad del R455A como reemplazo del R404A en sistemas de refrigeración por compresión de vapor.

Tabla 1. Principales características del R404A y del R455A.

Fluido	R404A	R455A
Potencial de Agotamiento del Ozono (PAO)	0	0
PCA (AR5)	3972	145
Clasificación de seguridad (ASHRAE 34)	A1	A2L
Punto de ebullición normal (NBP)	226.87	229.21
Temperatura crítica (K)	345.19	360.68
Presión crítica (MPa)	3.73	4.82

2. METODOLOGÍA

La comparación teórica entre los refrigerantes R404A y R455A presentada en este artículo se lleva a cabo teniendo en cuenta el ciclo básico de un sistema de refrigeración por compresión de vapor. La representación esquemática de este sistema y los diagramas de presión-entalpía se muestran en la Fig. 1.

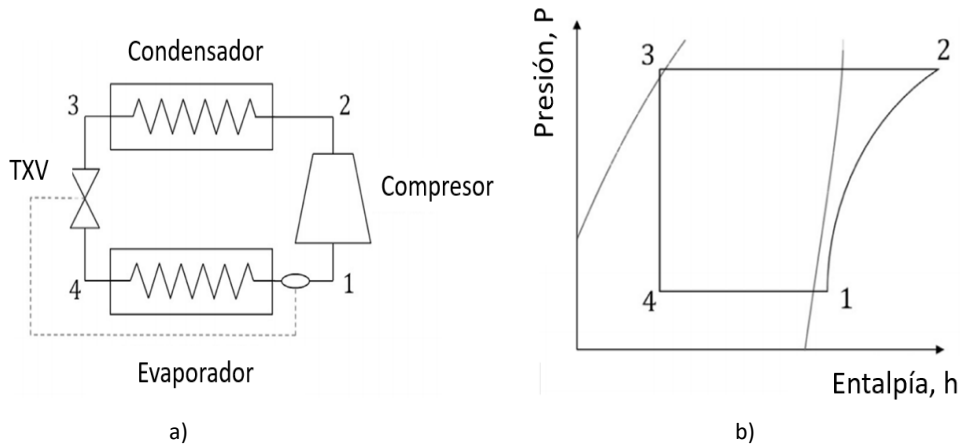


Fig. 1. Sistema de refrigeración por compresión de vapor: (a) esquema; (b) diagrama de presión-entalpía.

Para comparar la operación del sistema en los casos analizados, en primer lugar se obtuvieron las propiedades termodinámicas de los refrigerantes (entalpía, densidad, etc.) utilizando el software REFPROP v9.1 [11] y posteriormente con estos datos se calcularon los parámetros energéticos (\dot{Q}_o , $P_{compresor}$ y COP) por medio de las ecuaciones (4), (5) y (6). Las temperaturas de condensación seleccionadas fueron 305, 315 y 325 K, para simular temperaturas ambiente de verano e invierno. Además, las temperaturas de evaporación se seleccionaron en el rango de 240 K y 270 K, con el fin de simular diferentes condiciones de congelación y conservación de alimentos.

Para tener en cuenta el efecto deslizamiento (*glide*) a temperatura relativamente alta de las nuevas mezclas, las temperaturas de condensación T_{cond} y evaporación T_{evap} se obtienen aplicando las ecuaciones (1) y (2). En el caso de las temperaturas de evaporación, se considera que el título de vapor medio por de refrigerante (x) en la entrada del evaporador es de 0.33.

$$T_{cond} = \frac{1}{2}T_{x=0} + \frac{1}{2}T_{x=1} \quad (1)$$

$$T_{evap} = \frac{1}{3}T_{x=0} + \frac{2}{3}T_{x=1} \quad (2)$$

El grado de recalentamiento (GR) se calcula a través de la ecuación (3) teniendo también en cuenta el mayor efecto del deslizamiento de temperatura del evaporador (*glide*) del R455A.

$$GR_{R455A} = \left(GR - \frac{1}{3} \text{Deslizamiento} \right)_{R404A} \quad (3)$$

La capacidad frigorífica (\dot{Q}_o), el consumo de energía del compresor ($P_{compresor}$) y el coeficiente de rendimiento (COP) se calculan usando las ecuaciones (4) a (6).

$$\dot{Q}_o = \dot{m}_{ref}(h_{salida} - h_{entrada})_{evaporador} \quad (4)$$

$$P_{compresor} = \dot{m}_{ref}(h_{descarga} - h_{aspiración}) \quad (5)$$

$$COP = \dot{Q}_o / P_{compresor} \quad (6)$$

Finalmente, para calcular la tasa de caudal másico de refrigerante \dot{m}_{ref} se considera una tasa de caudal volumétrico \dot{V} de $0.0001145 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y eficiencias volumétricas dadas por la fórmula de compresión isentrópica, ecuación (7).

$$\dot{m}_{ref} = \eta_{vol} \dot{V} \rho_{aspiración} \quad (7)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los principales parámetros energéticos analizados en esta sección para evaluar la viabilidad del R445A como alternativa del R404A en sistemas de refrigeración de compresión de vapor, son la capacidad frigorífica y el coeficiente de rendimiento (COP). Los resultados para la temperatura de descarga también se muestran en la parte final de esta sección.

La Fig. 2 y Fig. 3 presentan la capacidad frigorífica simulada del R404A y R455A respectivamente. Ambos refrigerantes tienen una evolución similar de las temperaturas: la capacidad de refrigeración

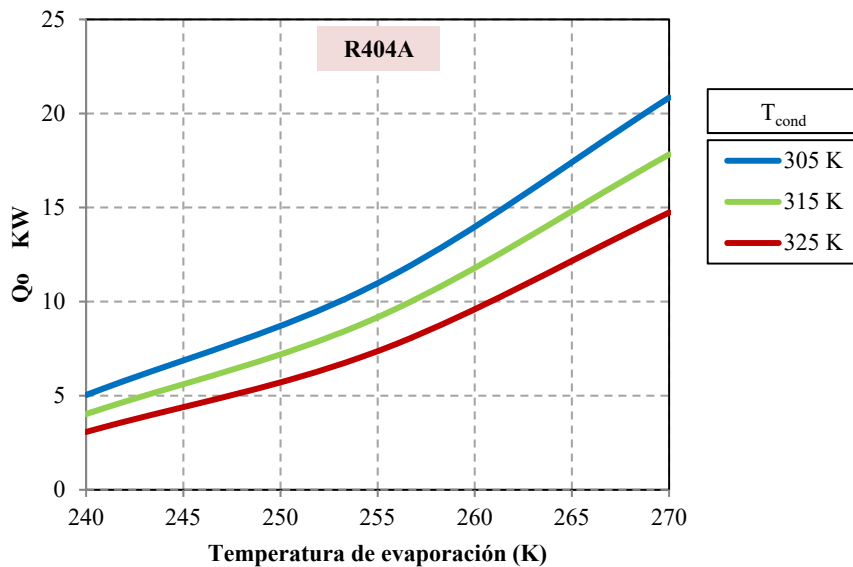


Fig. 2. Capacidad frigorífica teórica frente a la temperatura de evaporación a diferentes temperaturas de condensación del R404A.

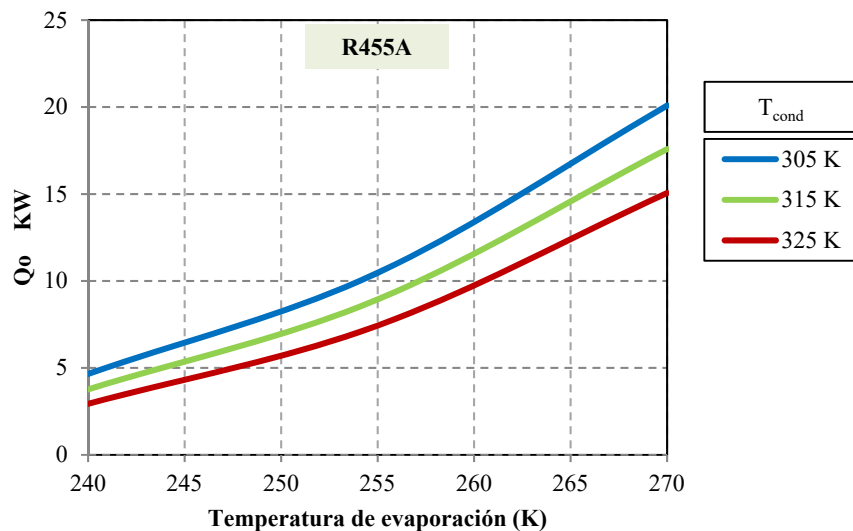


Fig. 3. Capacidad frigorífica teórica frente a la temperatura de evaporación a diferentes temperaturas de condensación del R455A.

aumenta a altas temperaturas de evaporación y bajas temperaturas de condensación debido a la influencia del caudal másico y el efecto de refrigeración (influencia de entalpía del evaporador).

El aumento de la tasa de caudal másico depende mucho del punto de succión y, por lo tanto, de la temperatura de evaporación y del grado de sobrecalentamiento. El efecto de refrigeración también es mayor a temperaturas de condensación más bajas y temperaturas de evaporación más altas, debido a la evolución del calor latente de vaporización (es la diferencia entre las curvas de vapor y de saturación de líquido).

Para las temperaturas de evaporación más altas (270 K) y las temperaturas de condensación más bajas (305 K) consideradas, la alternativa del R455A presenta una capacidad frigorífica 5.2% menor que la del R404A. Además, en la condición opuesta, la capacidad frigorífica del R455A es 4.9% menor que la del R404A. Por lo tanto, se puede concluir que la capacidad frigorífica del R455A es aproximadamente un 5% menor que la mostrada por el R404A en el rango propuesto. Aunque el R455A presenta un mayor efecto frigorífico, su densidad de succión es menor y afecta la tasa de caudal másico.

El COP es la relación entre la energía suministrada al compresor y la capacidad frigorífica en el evaporador. Por lo tanto, valores más altos de COP generan beneficios económicos y ambientales. La Fig. 4 y

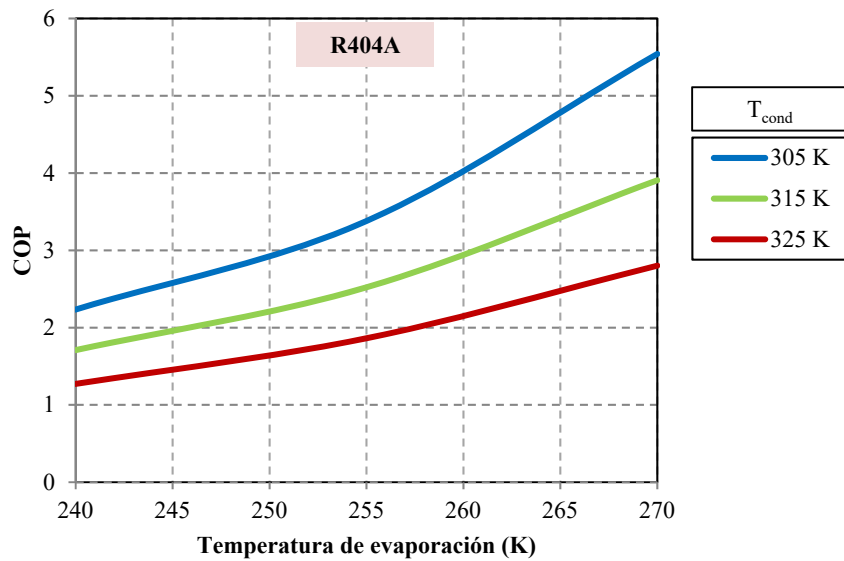


Fig. 4. COP teórico frente a la temperatura de evaporación a diferentes temperaturas de condensación del R404A.

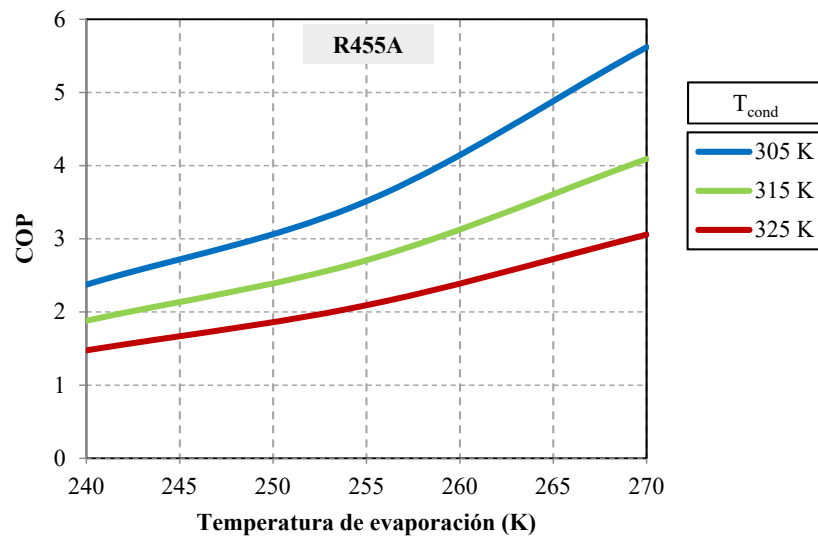


Fig. 5. COP teórico frente a la temperatura de evaporación a diferentes temperaturas de condensación del R455A.

Fig. 5 muestran los resultados teóricos de la simulación de COP para el R404A y R455A respectivamente. Como se observó anteriormente para el parámetro de la capacidad frigorífica, el COP sigue la misma tendencia, siendo también mayores los valores de COP a temperaturas de condensación más bajas y temperaturas de evaporación más altas. Además del análisis del efecto frigorífico, también se debe considerar que a mayor temperatura de condensación y menor temperatura de evaporación, mayor será el trabajo de compresión específico.

El COP más alto obtenido en las condiciones simuladas para R404A es 5.5 mientras que el COP más alto para R455A es 5.6. Por el contrario, el menor para el R404A es 1.3 mientras que el del R455A es 1.5, este refrigerante es beneficiado por bajas temperaturas de evaporación y altas temperaturas de condensación. Por lo tanto, en todas las condiciones analizadas, el sistema que opera con R455A sería más eficiente en términos de energía y su utilización puede producir beneficios ambientales en términos de menores emisiones de GEI. El R455A se beneficia del mayor aumento en el efecto frigorífico que el aumento en el trabajo de compresión específico en comparación con el R404A.

La temperatura de descarga es un parámetro muy importante en los sistemas de compresión de vapor de refrigeración, ya que una temperatura de descarga muy alta puede degradar el lubricante utilizado en el compresor y este componente se puede estropear. Se establece un límite práctico para la temperatura de descarga de los compresores utilizados en los sistemas de refrigeración por compresión de vapor en 393K.

Como se muestra en la Fig. 6 para ambos refrigerantes, las temperaturas de descarga más altas resultan en temperaturas de condensación más altas y temperaturas de evaporación más bajas. Con una eficiencia isentrópica similar, las temperaturas de descarga de R455A son siempre más altas que las del R404A debido a las propiedades termofísicas y al trabajo de compresión específico más alto. Sin embargo, para ninguna de las condiciones analizadas, las temperaturas de descarga son superiores a 393 K y, por lo tanto, el R455A puede usarse sin riesgo de degradación del aceite lubricante.

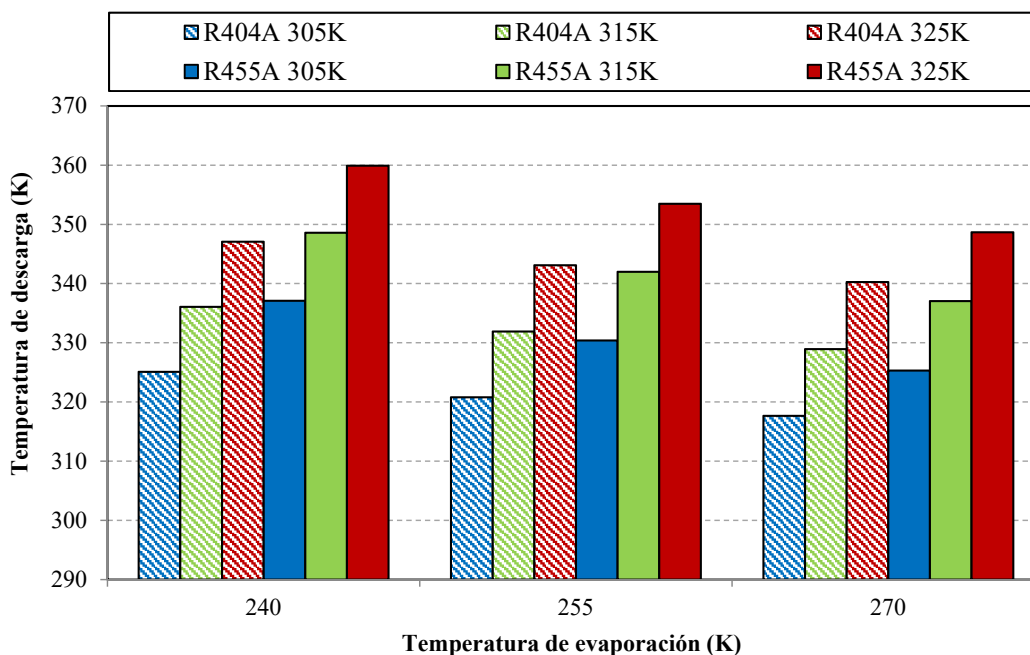


Fig. 6. Temperatura de descarga de R404A y R455A a tres temperaturas de evaporación y condensación diferentes.

4. CONCLUSIONES

Esta investigación propone al R455A como alternativa al R404A en sistemas de refrigeración por compresión de vapor, debido a su bajo valor de PCA y a las propiedades termofísicas y de transferencia de energía similares. Para mostrar la adaptación a esta aplicación, se realizó un análisis teórico.

Las principales conclusiones del trabajo son las siguientes:

La capacidad frigorífica de ambos refrigerantes es mayor a mayor evaporación y menores temperaturas de condensación. Como promedio, la capacidad de enfriamiento del R404A es un 5% más alta que la del R455A debido a una mayor tasa de caudal másico. Los teóricos del COP para el R404A se han obtenido entre 5.5 y 1.3 y para el R455A entre 5.6 y 1.5.

Ambos refrigerantes R404A y R455A tienen características similares, pero el menor PCA del R455A hace de este fluido una buena alternativa al R404A en sistemas de compresión de vapor, considerando el mayor rendimiento energético del nuevo fluido y que las temperaturas de descarga simuladas están por debajo del límite práctico de la degradación del lubricante.

AGRADECIMIENTOS

Jorge Haro-Ortuño desea agradecer a la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de Ecuador.

Adrián Mota-Babiloni agradece el apoyo económico proporcionado por la Agencia Estatal de Investigación a través de las "Ayudas para contratos Juan de la Cierva-formación 2016" (FJCI-2016-28324).

CONTRIBUCIONES DEL AUTOR

Jorge Haro-Ortuño y Adrián Mota-Babiloni escribieron el documento; y Joaquín Navarro-Esbrí y Ángel Barragán-Cervera analizaron los datos.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

NOMENCLATURA

COP	coeficiente de rendimiento, –
GR	grado de recalentamiento, K
h	entalpía, kJ kg ⁻¹
\dot{m}_{ref}	caudal másico, kg s ⁻¹
NBP	punto normal de ebullición, K
$P_{compresor}$	consumo de energía del compresor, kW
\dot{Q}_o	capacidad frigorífica, kW
T	temperatura, K
\dot{V}	caudal volumétrico, m ³ s ⁻¹
ρ	densidad, kg m ⁻³
η	rendimiento, –
Subíndices	
<i>aspiración</i>	aspiración del compresor
<i>cond</i>	condensación

<i>descarga</i>	descarga del compresor
<i>entrada</i>	entrada del componente
<i>evap</i>	evaporación
<i>salida</i>	salida del componente
<i>vol</i>	Volumétrico
<i>x</i>	título de vapor
Abreviaturas	
GEI	gas de efecto invernadero
HFC	hidrofluorocarbono
HFO	hidrofluoroolefina
PAO	potencial de agotamiento del ozono
PCA	potencial de calentamiento atmosférico
TXV	válvula de expansión termostática

REFERENCIAS

- [1] European Commission, “A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050”, Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Brussels (2011)
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, “Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System: Issues Related to Hydrofluorocarbons and Perfluorocarbons (SROC)”, (2005). [En línea]. Disponible en: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/sroc_full.pdf. [Accedido: 28-jun-2017]
- [3] The European Parliament and the Council of the European Union, “Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006”, Brussels (2014)
- [4] Sarbu, I., “A review on Substitution Strategy of Non-ecological Refrigerants from Vapour Compression-based Refrigeration, Air-conditioning and Heat Pump Systems”, *International Journal of Refrigeration*, 46, 123–141 (2014)
- [5] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, Á., Molés, F., Peris, B., Verdú, G., “Commercial refrigeration - An overview of current status”, *International Journal of Refrigeration*, 57, 186–196 (2015)
- [6] Benhadid-Dib, S., Benzaoui, A., “Refrigerants and their Environmental Impact Substitution of Hydro Chlorofluorocarbon HCFC and HFC Hydro Fluorocarbon. Search for an Adequate Refrigerant”, *Energy Procedia*, 18, 807–816 (2012)
- [7] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, Á., Molés, F., Peris, B., “Analysis based on EU Regulation No 517/2014 of New HFC/HFO Mixtures as Alternatives of High GWP Refrigerants in Refrigeration and HVAC Systems”, *International Journal of Refrigeration*, 52, 21–31 (2014)
- [8] Wang, X., Amrane, K., “AHRI Low Global Warming Potential Alternative Refrigerants Evaluation Program (Low-GWP AREP) – Summary of Phase I Testing Results”, 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, paper 2250, 14-17, Purdue, West Lafayette (IN), USA (2014)
- [9] Mota-Babiloni, A., Navarro-Esbrí, J., Barragán-Cervera, Á., Molés, F., Peris, B., “Theoretical comparison of low GWP alternatives for different refrigeration configurations taking R404A as baseline”, *International Journal of Refrigeration*, 44, 81–90 (2014)
- [10] Yana-Motta, S.F., Spatz, M., Pottker, G., Smith, G.L., “Refrigerants with Low Environmental Impact for Refrigeration Applications”, 15th International Refrigeration and Air Conditioning Conference, paper 2671. 14-17, Purdue, West Lafayette (IN), USA (2014)
- [11] Lemmon, E.W., Huber, M.L., McLinden, M.O., “NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 9.1.” National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, MD, USA (2013)

THEORETICAL COMPARISON BETWEEN R404A AND R455A IN REFRIGERATION SYSTEMS

Abstract – Hydrofluorocarbons (HFCs) are harmful to the environment because they are considered greenhouse gasses. One of the HFC refrigerants most commonly used in commercial refrigeration systems is R404A and has a relatively high global warming potential (GWP), 3922. The European Parliament and of the Council approved the Regulation No 517/2014 that established that in coming years, refrigerants with high GWP as R404A must be forbidden in Europe from most of the refrigeration appliances. This article presents a theoretical analysis of the performance a vapor compression systems using the new low GWP (145) refrigerant R455A, an alternative to R404A in commercial refrigeration systems. R455A presents good characteristics as a refrigerant despite the low flammability). The method used to compare R404A and R455A was a simulation with the REFPROP software at several condensation and evaporation temperatures that represent different typical operating conditions of vapor compression systems. The results show that the cooling capacity of R455A is around 5% lower than R404A. However, the coefficient of performance (COP) of R455A is higher than that of R404A and can lead to an energy consumption reduction. According to these results, it can be concluded that R455A is an adequate low GWP alternative to R404A.

Keywords – Global warming potential (GWP), Hydrofluoroolefins (HFO), Vapor compression systems, Coefficient of performance, Energy efficiency.