

# ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL USO DE REFRIGERANTES DE BAJO GWP EN UNA INSTALACIÓN FRIGORÍFICA DE COMPRESIÓN DE VAPOR

SANCHEZ GARCÍA-VACAS, Daniel <sup>(1)</sup>; CABELLO LÓPEZ, Ramón <sup>(1)</sup>

LLOPIS DOMÉNECH, Rodrigo <sup>(1)</sup>; ARAUZO PÉREZ, Iván <sup>(1)</sup>

TORRELLA ALCARAZ, Enrique <sup>(2)</sup>

[sanchezd@uji.es](mailto:sanchezd@uji.es)

<sup>(1)</sup> Universidad Jaume I de Castellón, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción

<sup>(2)</sup> Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Termodinámica Aplicada

## RESUMEN

Las restricciones impuestas por el Reglamento Europeo 517/2014 sobre el uso de refrigerantes de elevado PCA en la Comunidad Europea, ha supuesto una búsqueda de alternativas por parte de los fabricantes de refrigerantes artificiales, para poder alargar la vida útil de las instalaciones de compresión de vapor actuales. Entre las opciones que se plantean, destaca el uso de refrigerantes HFOs (Hidro-fluoro-olefinas) como es el caso del R1234yf o el R1234ze, así como de mezclas zeotrópicas derivadas de éstos. En ambos casos los valores de PCA se reducen de forma considerable, aumentando al mismo tiempo el índice de inflamabilidad y por tanto el nivel de seguridad a tener en cuenta en las instalaciones frigoríficas (fluidos ligeramente inflamables incluidos en la clasificación A2 se ASHRAE).

Debido a la relativa “novedad” que poseen dichas sustancias, es necesario aportar datos experimentales que permitan comparar el comportamiento de dichas sustancias con los refrigerantes HFCs actualmente utilizados. Dichos datos permitirán valorar, desde el punto de vista energético y funcional, las ventajas e inconvenientes de dichas sustancias frente a los refrigerantes HFCs empleados actualmente.

El presente trabajo aporta datos experimentales del comportamiento energético de una misma instalación frigorífica trabajando con las sustancias fluoradas **HFC-134a**, **HFC-152a**, **HFO-1234yf** y **HFO-1234ze(E)**. Todos los refrigerantes indicados han sido empleados como *drop-in* del refrigerante HFC-134a, por los que no se han contemplado modificaciones en la instalación en cuanto a aceite y regulación se refiere.

**Palabras clave:** R152a, R1234yf, R1234ze(E)

## 1. Introducción

El compromiso de la Unión Europea de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero precisa una serie de medidas que permitan de forma paulatina, disminuir el uso de sustancias de elevado Poder de Calentamiento Atmosférico (PCA). Parte de estas medidas se recogen actualmente en el Reglamento Europeo 517/2014 sobre gases fluorados (más conocido como *F-Gas*), cuya entrada en vigor en Enero de 2015, afecta principalmente a todas aquellas sustancias fluoradas con valores de PCA superiores a 150 dependiendo la aplicación a la que esté destinada.

Puesto que aproximadamente el 79% de los gases HFC consumidos a nivel mundial durante el año 2011 fueron destinados a sistemas de refrigeración, aire acondicionado y bomba de calor [1], es evidente que el sector de la producción artificial de frío será uno de los más afectados por esta reglamentación. Adicionalmente a esta normativa, y como “complementaria” a la misma, se aprueba la Ley 16/2013 Artículo 5: *Impuesto sobre gases fluorados de efecto invernadero*, que impone una tasa económica al precio de venta del gas fluorado a razón de 2 cts. € por kg de CO<sub>2</sub> equivalente, siempre y cuando ésta sea superior a 150.

Ante este panorama, es necesario encontrar alternativas fiables y económicas a corto/medio plazo que disminuyan el uso de refrigerantes de elevado PCA como es el caso de los HFCs empleados en alta/media temperatura de evaporación: R134a (1430), R407C (1744), R410A (2088), R427A (2138), R417A (2346) o R422D (3143) entre otros. El uso de refrigerantes de bajo PCA (entre los cuales se incluyen los refrigerantes naturales), parece ser una de las alternativas a corto plazo más sencilla, si bien se tienen que tener en cuenta una serie de aspectos relacionados con el Funcionamiento (capacidad y COP), el Medioambiente (PCA, ODP y TEWI), la Seguridad (toxicidad e inflamabilidad) y el Suministro del refrigerante (Coste y disponibilidad):

Tomando como base el refrigerante HFC R134a, en esta ponencia se presentan los resultados experimentales obtenidos de una misma instalación frigorífica trabajando con diferentes sustancias fluoradas de bajo GWP, alternativas al refrigerante R134a: HFC-R152a, HFO-1234yf y HFO-1234ze(E). La elección de los refrigerantes, se basa en estudios realizados por otros autores [2-5] en los que se ha probado experimentalmente la posibilidad de sustituir el refrigerante R134a por cualquiera de los anteriormente citados, como si de un *drop-in* se tratara. Sin embargo, dichos análisis se han llevado a cabo utilizando compresores abiertos, siendo Bolaji [2] el único que utiliza un compresor hermético para evaluar una misma instalación utilizando R152a, R32 y R134a.

## 2. Propiedades de los refrigerantes

Tabla 1 – Principales propiedades termofísicas, de seguridad y medioambientales

Fluido	Composición Química	P <sub>crit</sub> (bar)	T <sub>crit</sub> (°C)	Peso Molecular (g/mol)	NBP (°C)	v <sub>sat,v</sub> (0° C) (m <sup>3</sup> /kg)	λ (0° C) (kJ/kg)	q <sub>v</sub> (0° C) (kJ/m <sup>3</sup> )	Grupo Seguridad	HOC (MJ/kg)	PCA
HFC - 134 <sup>a</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	40.59	101.06	102.03	-26.07	0.0693	198.60	2865.43	A1	4.2	1430
HFC - 152 <sup>a</sup>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> F <sub>2</sub>	45.17	113.26	66.05	-24.02	0.1196	307.11	2567.16	A2	17.4	124
HFO - 1234yf	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	33.82	94.70	114.04	-29.45	0.0567	163.29	2881.52	A2L	10.7	4
HFO - 1234ze(E)	C <sub>3</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub>	36.35	109.36	114.04	-18.97	0.0854	184.18	2157.56	A2L	10.7	7

Tal y como se muestra en la Figura 1, todos los refrigerantes de bajo PCA contemplados tienen una capacidad volumétrica similar (q<sub>v</sub>) en las condiciones de punto normal de ebullición (NBP), es decir, que para una misma cilindrada de compresor, son capaces de producir la misma capacidad frigorífica. Sin embargo, y en especial en el caso del R152a, los valores de calor latente son muy diferentes, lo que afectará a la producción frigorífica específica. Por otro lado, cabe destacar que los refrigerantes con bajo GWP, presentan un cierto grado de inflamabilidad debido a la presencia de Hidrógeno en su composición, lo que les confiere clasificaciones del tipo A2 (en el caso del R152a) o A2L<sup>1</sup> para los casos de R1234yf y R1234ze(E).

<sup>1</sup>Grupo aún no aprobado por ASHRAE

### 3. Instalación Frigorífica y Metodología de Ensayos

La instalación frigorífica utilizada en el análisis, consta de un ciclo simple de compresión de vapor dotado con un compresor hermético EMBRACO NEK6210Z de 12.11 cm<sup>3</sup> de capacidad (1); dos intercambiadores de placas con disposición contracorriente, trabajando como condensador (0.576 m<sup>2</sup>) (2) y evaporador (0.216 m<sup>2</sup>) (3); una válvula de expansión electrónica funcionando como termostática (4), y un filtro coalescente colocado en la línea de descarga del compresor, para separar el aceite arrastrado por el refrigerante (5). El aceite lubricante utilizado en todos los ensayos es POE ISO22, compatible con R134a, R152a [6] y los HFOs R1234yf y R1234ze(E) [7].

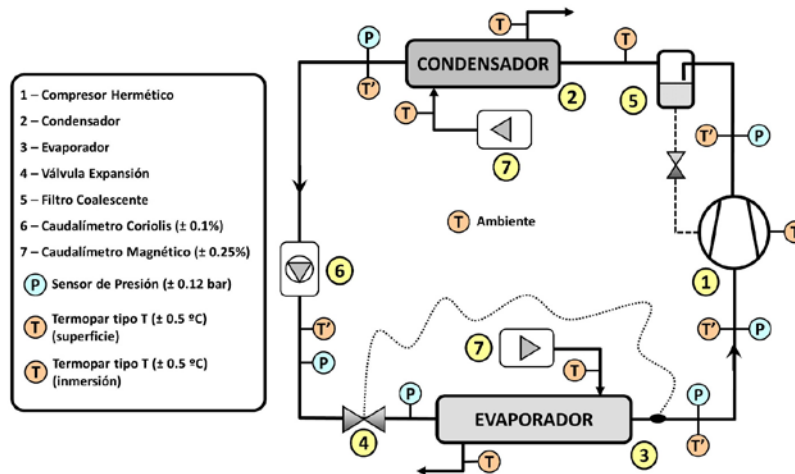


Figura 1 – Esquema de la instalación frigorífica

Para mantener las condiciones de ensayo, la instalación está conectada a dos circuitos secundarios en el condensador y en el evaporador, que utilizan agua y Luzar 50 %, como fluidos frigoríferos respectivamente. Los elementos de medida empleados en la instalación se muestran en la Figura 1. Adicionalmente se ha empleado un vatímetro digital con una incertidumbre de  $\pm 0.1\%$  sobre el valor medido.

### 4. Análisis experimental

La campaña experimental realizada consta de un total de 36 estacionarios (9 para cada uno de los refrigerantes), según tres niveles de evaporación diferentes (-10, 0 y 10 °C) y tres niveles de condensación para cada nivel (25, 35 y 45 °C). Los resultados obtenidos se presentan para un nivel de evaporación de 0 °C y para una temperatura de condensación de 45 °C.

Para todos los ensayos se ha considerado un grado de subenfriamiento en condensador entre 1.55 y 4.78 K, y un recalentamiento útil en evaporador entre 8.58 y 10.46 K.

#### 4.1. Temperatura de descarga

La temperatura de descarga es un parámetro que depende de la forma de las líneas isentrópicas de compresión, así como de las condiciones de entrada a éste. Puesto que el nivel de evaporación y el recalentamiento útil es similar en todos los refrigerantes, ésta dependerá fundamentalmente del refrigerante empleado. Los resultados obtenidos a partir de los datos experimentales, se muestran en las Figuras 2 y 3, para un nivel de evaporación constante de 0.28 °C (Figura 2) y un nivel constante de condensación de 45.11 °C (Figura 3). En ambas gráficas se observa como el R152a presenta niveles de descarga hasta 5.49 K superiores a los obtenidos con R134a, mientras que los valores registrados con el refrigerante HFO R1234ze(E), son hasta 11.98 K inferiores a los resultados que derivan del uso del refrigerante R134a.

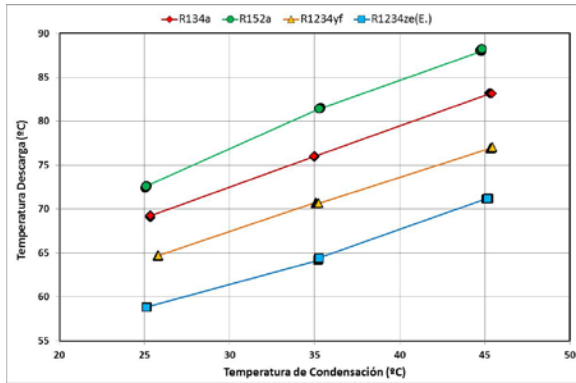


Figura 2 – Temperatura de descarga para  $T_{eva}$ : 0.28 °C y varias temperaturas de descarga

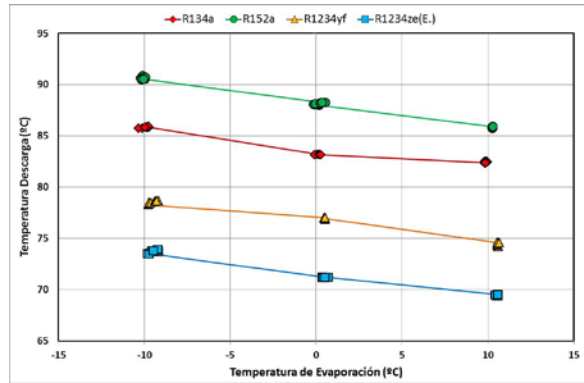


Figura 3 – Temperatura de descarga para  $T_{cond}$ : 45.11 °C y varias temperaturas de evaporación

### 4.2. Caudal másico de refrigerante

El caudal másico trasegado por el compresor ( $\dot{m}_{ref}$ ), es un parámetro que depende fundamentalmente del volumen específico de aspiración ( $v_{asp}$ ) del rendimiento volumétrico ( $\eta_V$ ) y del caudal volumétrico que desplaza el compresor acorde con su cilindrada ( $\dot{V}_G$ ) (Expresión 1).

$$\dot{m}_{ref} = \frac{\eta_V \cdot \dot{V}_G}{v_{asp}} \quad (1)$$

Teniendo en cuenta que el compresor empleado en la campaña experimental es el mismo y que la frecuencia eléctrica de alimentación de éste permanece constante, el valor de  $\dot{V}_G$  será muy similar en todos los ensayos, dependiendo el caudal másico del cociente entre el rendimiento volumétrico y el volumen específico de aspiración. La combinación de ambos ofrece los resultados que se muestran en las Figuras 4 y 5, donde se observa que existe concordancia con los valores de volumen específico mostrados en la Tabla 1 para la temperatura de evaporación de 0 °C (Figura 4). Esta concordancia indica que a pesar de las variaciones que pueda sufrir el rendimiento volumétrico del compresor con cada refrigerante, las diferencias causadas por el volumen específico serán siempre mayores, y por tanto será éste quien marque las diferencias de caudal másico entre refrigerantes.

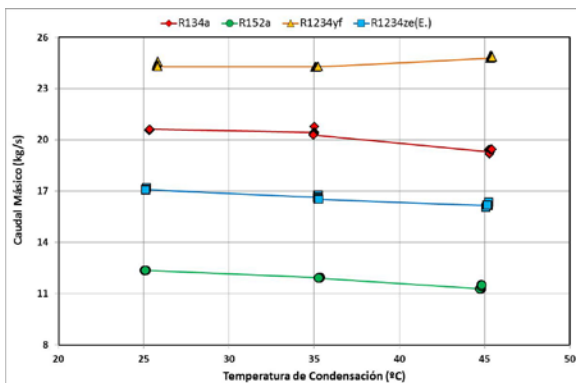


Figura 4 – Caudal másico para  $T_{eva}$ : 0.28 °C y varias temperaturas de descarga

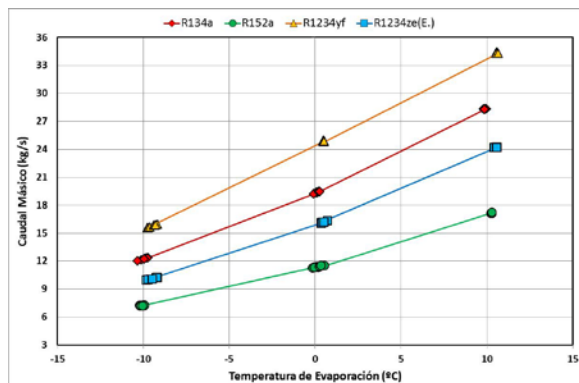


Figura 5 – Caudal másico para  $T_{cond}$ : 45.11 °C y varias temperaturas de evaporación

### 4.3. Potencia eléctrica consumida por el compresor

La potencia eléctrica consumida por el compresor, es un parámetro energético que depende del trabajo específico de compresión ( $w_s$ ) y del caudal másico trasegado por éste ( $\dot{m}_{ref}$ ) (Expresión 2):

$$P_c \approx \dot{m}_{ref} \cdot \frac{w_s}{\eta_G} \quad (2)$$

El rendimiento global de compresión ( $\eta_G$ ) recoge todas las pérdidas energéticas relacionadas con el proceso de compresión, incluyendo pérdidas mecánico-eléctricas debido al motor eléctrico y a la transmisión. Su valor depende fundamentalmente del tipo de compresor y del refrigerante empleado.

Los resultados mostrados en las Figura 6 y 7, indican que la potencia eléctrica presenta discrepancias con respecto al orden de los resultados mostrados en la Figura 4 y 5, especialmente en los refrigerantes R1234ze(E) y R152a. Estas discrepancias se deben al trabajo específico de compresión, cuyo valor en el caso del R152a es hasta un 62.69 % superior al del R1234ze(E), lo que significa que compensa el menor caudal másico movido por el compresor trabajando con R152a (Figura 4 y 5).

Para los refrigerantes R134a y R1234yf, ocurre algo similar, ya que el R134a tiene un trabajo específico de compresión hasta un 48.67 % superior al del R1234yf, lo que compensa el menor caudal másico trasegado por el compresor trabajando con R134a, haciendo que los valores de potencia eléctrica consumida en ambos casos sean muy parecidos.

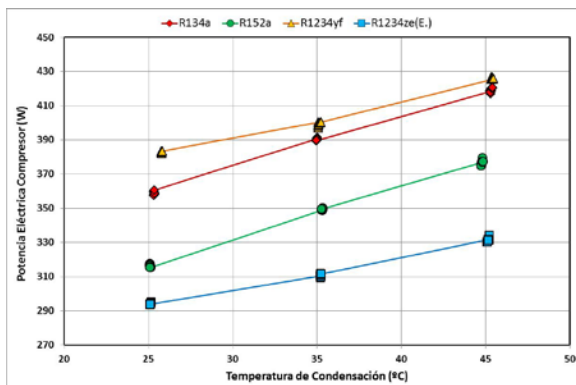


Figura 6 – Potencia eléctrica consumida por el compresor para  $T_{eva}$ : 0.28°C y varias temperaturas de descarga

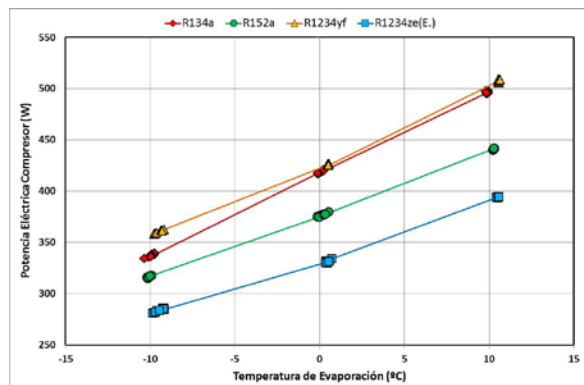


Figura 7 – Potencia eléctrica consumida por el compresor para  $T_{cond}$ : 45.11 °C y varias temperaturas de evaporación

#### 4.4. Potencia frigorífica

Para las condiciones de trabajo indicadas en el Apartado 4, los resultados obtenidos para la potencia frigorífica, se muestran en las Figuras 8 y 9. En ambas se observa como el R134a ofrece valores superiores al resto de refrigerantes propuestos de bajo GWP. En esta diferencia no solamente juega un papel importante el caudal másico trasegado por el compresor, sino también el salto entálpico en el evaporador, el cual depende básicamente de las condiciones a la entrada del sistema de expansión, y de la forma de la campana de saturación.

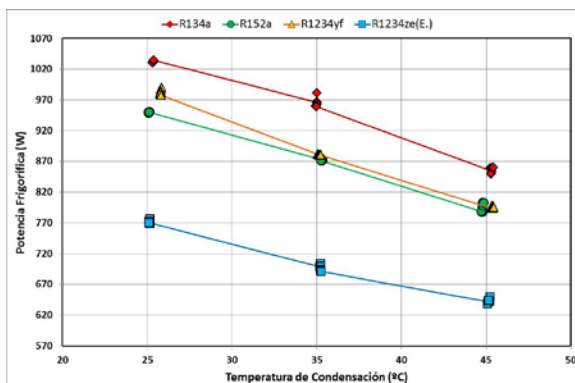


Figura 8 – Potencia frigorífica para  $T_{eva}$ : 0.28°C y varias temperaturas de descarga

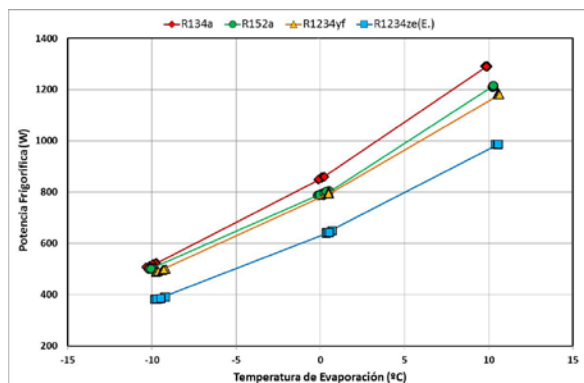


Figura 9 – Potencia frigorífica para  $T_{cond}$ : 45.11 °C y varias temperaturas de evaporación

### 4.5. COP

El cociente entre la potencia frigorífica generada por la instalación, y la potencia eléctrica consumida por el compresor, muestra una posición ventajosa para el R152a frente al resto, obteniéndose aumento de COP de hasta un 13,7% para todos los ensayos realizados. En el caso de los refrigerantes HFOs ensayados, ninguno llega a las prestaciones de COP ofrecidas por el R134a operando en las mismas condiciones de funcionamiento. Dicha diferencia implica que para poder obtener la misma potencia frigorífica es necesario un mayor consumo eléctrico, por lo que es necesario analizar la contribución indirecta que ofrecen los refrigerantes de bajo PCA además de su contribución directa al efecto invernadero.

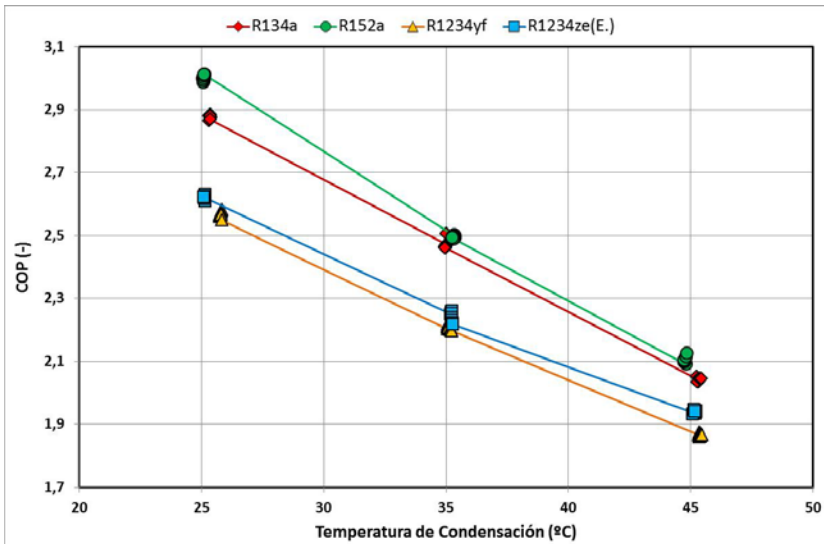


Figura 10 – COP para T<sub>eva</sub>: 0.28°C y varias temperaturas de descarga

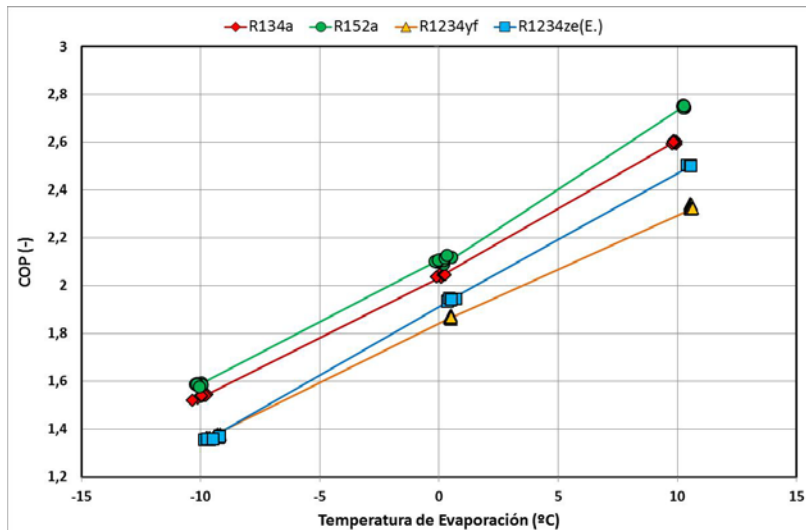


Figura 11 – COP para T<sub>cond</sub>: 45.11 °C y varias temperaturas de evaporación

## 5. Conclusiones y consideraciones finales

En este trabajo se evalúa experimentalmente el comportamiento energético de una misma instalación frigorífica empleando diferentes refrigerantes artificiales de bajo GWP alternativos al refrigerante R134a: R152a, R1234yf y R1234ze(E). El análisis se ha llevado a cabo desde un punto de vista energético empleando una misma instalación frigorífica diseñada para poder operar con R134a.

Considerando tres niveles de evaporación diferentes con tres temperaturas de condensación cada uno, se han podido extraer las siguientes conclusiones:

- a) Tomando como referencia el refrigerante R134a, se observa como el caudal másico trasegado por el compresor es hasta un 41.5% menor trabajando con R152a y hasta un 28,4% mayor trabajando con R1234yf. Para el caso del R1234ze(E) el caudal másico se reduce hasta un 19.5%.
- b) La reducción del caudal másico afecta directamente a la potencia eléctrica del compresor, la cual se reduce hasta un 20.9% en el caso del R1234ze(E), y hasta un 10.48% en el caso del R152a. Esta desviación se debe al mayor trabajo específico de compresión que precisa el compresor con R152a. El refrigerante R1234yf tiene un consumo superior al R134a de hasta un 6.7%.
- c) En términos de potencia frigorífica, todos los refrigerantes ofrecen una capacidad frigorífica menor que el R134a en las mismas condiciones de funcionamiento. La reducción es hasta un 8% en el caso del R152a, hasta un 8.6% en el caso del R1234yf, y hasta un 27.7% en el caso del refrigerante R1234ze(E).
- d) De acuerdo con los resultados obtenidos en potencia frigorífica y potencia eléctrica consumida, el COP de la instalación presenta un valor hasta un 13.7% superior cuando se utiliza R152a como refrigerante, obteniéndose reducciones de hasta un 11% en el caso del R1234yf y de hasta un 14.85% en el caso del R1234ze(E).
- e) Finalmente, comparando los valores de temperatura de descarga se observa como trabajando con R152a se tienen temperaturas de descarga hasta 5.5°C superiores, siendo los valores de R1234yf y R1234ze(E) interiores (hasta 8 y 13°C, respectivamente).

Teniendo en cuenta los aspectos anteriores se puede concluir que desde el punto de vista energético, el refrigerante R152a es un excelente sustituto del R134a frente a las sustancias HFO R1234yf y R1234ze(E), si bien es necesario un estudio detallado en el que se demuestre la durabilidad de los compresores, la perfecta compatibilidad de los aceites lubricantes, así como, las medidas de seguridad necesarias para poder emplear un refrigerante perteneciente al grupo A2.

## 6. Agradecimientos

El grupo de investigación GIT ([www.git.uji.es](http://www.git.uji.es)), agradece el apoyo económico prestado por la Universidad Jaume I en el desarrollo de éste estudio, a través del proyecto P1·B2013-10.

## 7. Referencias

- [1] EPA (U.S. Environmental Protection Agency). Transitioning to low-GWP Alternatives in Commercial Refrigeration. October 2010. En línea. Última consulta: 29/03/2015 ([http://www.epa.gov/ozone/downloads/EPA\\_HFC\\_ComRef.pdf](http://www.epa.gov/ozone/downloads/EPA_HFC_ComRef.pdf))
- [2] Bolaji B. O., Experimental study of R152a and R32 to replace R134a in a domestic refrigerator. Energy, 2010, vol. 35 (9), pp. 3793 – 3798.
- [3] Bryson M., Dixon C., StHill S., Testing of HFO-1234yf and R152a as mobile air conditioning refrigerant replacements. AIRAH May 2011, pp. 30 – 38. En línea. Última consulta: 30/03/2015 ([http://www.airah.org.au/imis15\\_prod/Content\\_Files/EcoLibrium/2011/May2011/2011\\_05\\_01.pdf](http://www.airah.org.au/imis15_prod/Content_Files/EcoLibrium/2011/May2011/2011_05_01.pdf))
- [4] Karber K. M., Abdelaziz O., Vineyard E. A., Experimental performance of R-1234yf as a drop in replacement for R-134a in domestic refrigerators. En International Refrigeration and Air Conditioning Conference 2012; Paper 1228. En línea. Última consulta: 29/03/2015 (<http://docs.lib.purdue.edu/iracc/1228>)

- [5] Jarall S., Study of refrigeration system with HFO-1234yf as a working fluid. *Int. Journal of Refrigeration*, 2012, vol. 35, pp. 1668 – 1677.
- [6] Uemura S., Inagaki S., Kobayashi N., Teraoka T., Noguchi M., Characteristics of HFC refrigerants. En *International Refrigeration and Air Conditioning Conference 1992*. Paper 177. En línea. Última consulta: 29/03/2015 (<http://docs.lib.purdue.edu/iracc/177>)
- [7] Leck T. J., Evaluation of HFO-1234yf as a potential replacement for R-134a in Refrigeration Applications. En *3rd IIR Conference on Thermophysical Properties and Transfer Processes of Refrigerants*, Boulder, 2009. En línea. Última consulta: 29/03/2015 ([http://www2.dupont.com/Refrigerants/en\\_US/assets/downloads/SmartAutoAC/HFO-1234yf\\_IIR\\_Leck.pdf](http://www2.dupont.com/Refrigerants/en_US/assets/downloads/SmartAutoAC/HFO-1234yf_IIR_Leck.pdf))