

EXPLORACIÓN DE LA MEZCLA RE170/R600: MEJORA DE LA EFICIENCIA COMO ALTERNATIVA AL R600a

**Daniel CALLEJA-ANTA^{1*}, Laura NEBOT-ANDRÉS¹, Manel MARTINEZ-ÁNGELES¹,
Daniel SÁNCHEZ¹, Rodrigo LLOPIS¹**

1: Thermal Engineering Group, Mechanical Engineering and Construction Department,
Jaume I University, Castellon de la Plana, E-12071, Spain, calleja@uji.es

Resumen: *La utilización de mezclas alternativas al R600a ha sido ampliamente explorada en diversas aplicaciones, mostrando su potencial para mejorar la eficiencia energética del isobutano en refrigeradores domésticos y aparatos comerciales autónomos, manteniendo al mismo tiempo características termodinámicas y parámetros de rendimiento operativo comparables. Entre estas mezclas, las compuestas por una proporción significativa de R600 (butano) y una pequeña porción de refrigerante secundario se han revelado como las más prometedoras. Sin embargo, muchos refrigerantes secundarios de estas mezclas son sintéticos. El RE170 (éter dimetílico o DME), un refrigerante no fluorado y natural, se ha revelado como un candidato especialmente prometedor para mezclarlo con el R600. Este trabajo presenta un análisis experimental de la mezcla de refrigerantes RE170/R600 como alternativa al R600a. Para ello, se utilizó un banco de pruebas sencillo de compresores altamente equipados, en el que se analizó la mezcla en un rango de composición que variaba de 2,5/97,5%_w a 27,5/72,5%_w en pasos de 2,5%. Los resultados muestran incrementos del COP de hasta el 17% respecto a R-600a y capacidades volumétricas de refrigeración (VCC) y potencias frigoríficas (\dot{Q}_o) que con bajas proporciones de DME coincide con el obtenido por R600a. Se ha demostrado que RE170/R600 es una mezcla de eficiencia superior a largo plazo.*

Palabras clave: Mezclas de refrigerantes, COP, DME, R600a, eficiencia energética.

1. INTRODUCCIÓN

El R-600a (isobutano) se ha convertido en el refrigerante de referencia en el sector de la refrigeración doméstica, empleándose desde principios de la década de 2010 en Europa e implantándose gradualmente en el resto del mundo. El R-600a fue seleccionado como el refrigerante preferente frente a otras alternativas debido a sus buenas propiedades termodinámicas y a su demostrada alta eficiencia energética. Sin embargo, estudios recientes han demostrado la existencia de mezclas de refrigerantes alternativos que pueden mejorar la eficiencia energética del R-600a manteniendo sus principales ventajas, como son las bajas presiones de funcionamiento, alto volumen específico y su buena idoneidad en general para aplicaciones que requieran bajas potencias frigoríficas [1-4]. Los resultados de estos estudios indican que las mezclas más prometedoras se obtienen al mezclar R-600 en una proporción elevada con otro fluido refrigerante. Hasta la fecha, en la bibliografía se han descrito mezclas compuestas por R-152a, R-290, R-1234ze(E) y R-1234yf. Estas mezclas han conseguido reducciones en el consumo de energía en plantas reales de hasta el 5,04% y aumentos del COP en bancos de ensayo de hasta el 11,7%.

Sin embargo, el refrigerante natural R-E170 (dimetil éter o DME) está atrayendo recientemente el interés científico. Se ha demostrado que es un refrigerante no fluorado y natural que puede mezclarse con otros refrigerantes para obtener mejoras energéticas [5, 6]. Sin embargo, nunca se ha mezclado con R-600 como alternativa al R-600a.

Este trabajo presenta un análisis de la mezcla de refrigerantes R-E170/R-600 como alternativa al R-600a. Para determinar su idoneidad como alternativa al R-600a, se ha realizado un análisis experimental en un banco de pruebas. Para ello, se analizó una amplia gama de composiciones desde el punto de vista energético. Los resultados demuestran una notable mejora del rendimiento de la nueva mezcla respecto al R-600a.

2. SISTEMA EXPERIMENTAL, METODOLOGÍA Y FLUIDOS

2.1 Propiedades termodinámicas de los fluidos considerados

La Tabla 1 resume las características de los tres refrigerantes considerados en esta investigación, mientras que en la Figura 1 se pueden observar sus diagramas presión-entalpía (Ph) junto con sus isotermas a 40°C y -10°C. Todos los refrigerantes considerados en este análisis son de origen natural, siendo dos hidrocarburos (HCs) y un éter, con valores insignificantes de GWP.

Comparando el isobutano y el butano, este último tiene una t_c , p_c y NBP (Normal Boiling Point o temperatura de cambio de estado a 1 bar) mayores, lo que implica que presiones de operación más bajas. Por ejemplo, a 40°C y -10°C, el R-600a se condensa a 5,31 bar y 1,08 bar, mientras que el R-600 lo hace a 3,78 bar y 0,7 bar, respectivamente. El butano tiene un v_{suc} mayor, resultando en un aumento del 57% en vapor saturado a -10°C. Además, su calor latente es un 10,8% mayor a 40°C y un 8,39% mayor a -10°C respecto al isobutano.

En contraste, el R-E170 tiene propiedades y un diagrama Ph distintos, con un p_c y NBP mayores a la de los otros dos fluidos, mientras que su t_c y v_{suc} son menores. A 40°C y -10°C, las presiones son 8,9 bar y 1,85 bar, superiores al isobutano. Aunque los HC presentan valores elevados, el R-E170 tiene un calor latente significativamente mayor, un 20,9% a 40°C y un 23,1% a -10°C.

Se espera que las mezclas de butano y DME estén dentro del rango de propiedades de los refrigerantes individuales, y ajustando la composición, podrían ofrecer un rendimiento superior al del R-600a.

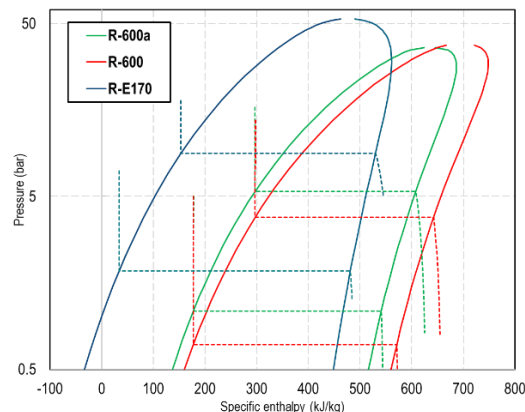


Figura 1. Diagrama Ph de los refrigerantes considerados

Tabla 1. Propiedades termofísicas de los fluidos considerados.

	R-600a	R-600	R-E170
NBP (°C)	-11,8	-0,5	-24,8
t_{crit} (°C)	134,7	152	127,2
p_{crit} (°C)	36,2	37,9	53,4
λ at $t = 40$ °C (kJ·kg ⁻¹)	311,5	345,4	376,8
λ at $t = -10$ °C (kJ·kg ⁻¹)	363,5	394,0	447,6
v_{suc} at $t = -10$ °C & $x_v = 1$ (m ³ ·kg ⁻¹)	0,332	0,524	0,243

2.2 Descripción del sistema experimental

El banco de pruebas, donde se realizan los ensayos experimentales, se ilustra mediante su diagrama de refrigeración en la Figura 2. Se trata de un ciclo de compresión de vapor de una sola etapa, que incorpora un compresor hermético alternativo de velocidad variable, un condensador, un recipiente de líquido de 1,2 L, una válvula de expansión (con un controlador configurable para funcionar en función de cada mezcla) y un evaporador. En la tabla 2 se detallan las características de los principales elementos.

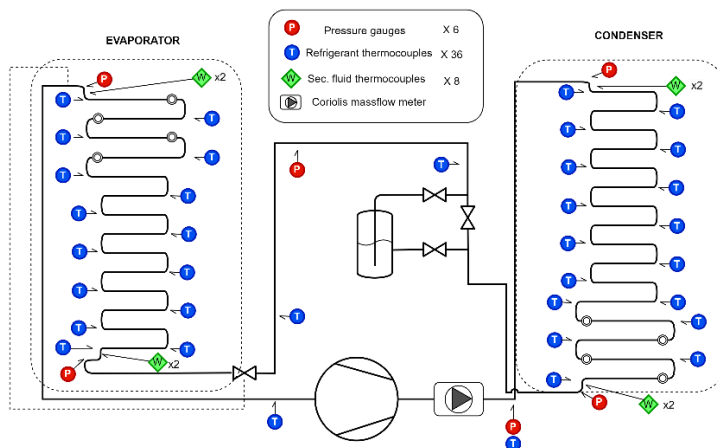


Figura 2. Diagrama frigorífico de la planta experimental con la posición de los sensores.

Tabla 2. Características de los principales elementos de la planta experimental.

Elemento	Características	Elemento	Características
Compresor	Compresor alternativo hermético de velocidad variable R600a Cilindrada: 11,14 cm ³ , 1/4 HP	Válvula electrónica	Utilizado como válvula de expansión termostática. Controlador configurable.
Condensador	Configuración tube-in-tube. Contracorriente. Tubo exterior para agua, Ø _i = 16 mm. Tubo exterior, refrigerante, Ø = 1/4" Área de intercambio: 750 cm ²	Evaporador	Configuración tube-in-tube. Contracorriente. Tubo exterior para glicol, Ø _i = 16 mm. Tubo exterior refrigerante, Ø = 3/8". Área de intercambio: 984.5 cm ²

Se equipó la planta con sensores, en los lugares mostrados en la Figura 2. 17 termopares de inmersión se colocaron en el condensador y 15 en el evaporador, además de 4 termopares de superficie en diferentes puntos del ciclo. La incertidumbre de los termopares es de $\pm 0,5$ K y de las sondas de presión es de $\pm 1\%$.

Se instalaron dos sistemas térmicos auxiliares para gestionar las potencias térmicas generadas en el condensador y el evaporador, consistentes en bucles con fluido secundario. Se utilizó agua destilada para el condensador y una mezcla de propilenglicol y agua al 50/50%_v para el evaporador. Se instaló un caudalímetro másico Coriolis con $\pm 0,15\%$ de precisión en la salida del compresor y un vatímetro digital con una incertidumbre de $\pm 0,5\%$ para medir la energía eléctrica. También se colocaron 8 termopares tipo T en los bucles de fluidos secundarios (2 en cada entrada y en cada salida) y caudalímetros en cada bucle con incertidumbres de $\pm 1,15\%$ y $\pm 0,3\%$ en evaporador y condensador respectivamente. La instalación se aisló térmicamente y se ubicó en una cámara climática para mantener condiciones ambientales constantes.

2.2 Descripción de la metodología experimental

Este estudio busca determinar los parámetros energéticos de la mezcla binaria R-E170/R-600 al variar su composición. El proceso de optimización consistió en probar diferentes composiciones, comenzando con un 97,5% de masa de R-600 y un 2,5% del DME, incrementando el segundo refrigerante en pasos del 2,5% hasta un 72,5% de butano. También se realizaron pruebas con R-600a como referencia y adicionalmente con un 100% de R-600. Entre cada composición, se realizó un vacío completo de la planta de refrigeración y, a continuación, se cargó con la composición deseada, ajustando los parámetros de la válvula de expansión a las propiedades de cada mezcla y fijando un recalentamiento útil de 8 K. Este proceso se repitió dos veces, y los parámetros medios se utilizaron para el análisis.

Las condiciones de entrada de los fluidos secundarios al condensador y el evaporador se mantuvieron constantes, siendo 30 °C y caudal másico de 60 kg·h⁻¹ y 0 °C y 50 kg·h⁻¹, respectivamente.

Las pruebas duraron 8 minutos bajo condiciones de estado estacionario, con la unidad experimental dentro de una cámara climática a 25 °C.

3. RESULTADOS

En un estudio previo [4] con la misma planta experimental, se resaltó la preferencia por utilizar datos del fluido secundario en lugar de parámetros termodinámicos obtenidos solo del refrigerante para cálculos energéticos. Los autores demostraron que los datos directamente medidos con los sensores son más confiables que los obtenidos indirectamente mediante REFPROP, ya que este último implica reglas de mezcla basadas en estimaciones. Por lo tanto, en este trabajo se sigue usando el mismo criterio.

3.1 Resultados energéticos

En este subapartado se analizan los parámetros energéticos de la mezcla R-E170/R-600 variando progresivamente su composición. Los parámetros energéticos a analizar son COP , VCC y \dot{Q}_o , todos ellos calculados a partir de medidas directas del fluido secundario.

La potencia frigorífica (\dot{Q}_o) se evalúa mediante la Eq.(1), teniendo en cuenta el caudal de fluido secundario ($\dot{m}_{secfluid}$), el calor específico a presión constante (c_p) y la diferencia de temperatura a través del intercambiador de calor (Δt). El COP se calcula a partir de la relación entre \dot{Q}_o y la potencia media registrada por el vatímetro durante la prueba (\dot{P}_c), como se muestra en la Eq.(2). La capacidad volumétrica de refrigeración (VCC) se determina mediante la Eq.(3), incorporando la potencia frigorífica específica y el volumen específico de aspiración (v_{asp}^*), que se calcula mediante REFPROP debido a la falta de mediciones directas.

$$\dot{Q}_o = \dot{Q}_{o,secfluid} = \dot{m}_{secfluid} \cdot c_p \cdot \Delta t \quad \text{Eq.(1)}$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{o,secfluid}}{\dot{P}_c} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$VCC = \frac{\dot{q}_{o,secfluid}}{v_{asp}^*} = \frac{\frac{\dot{Q}_{o,secfluid}}{\dot{m}_{ref}}}{v_{asp}^*} \quad \text{Eq.(3)}$$

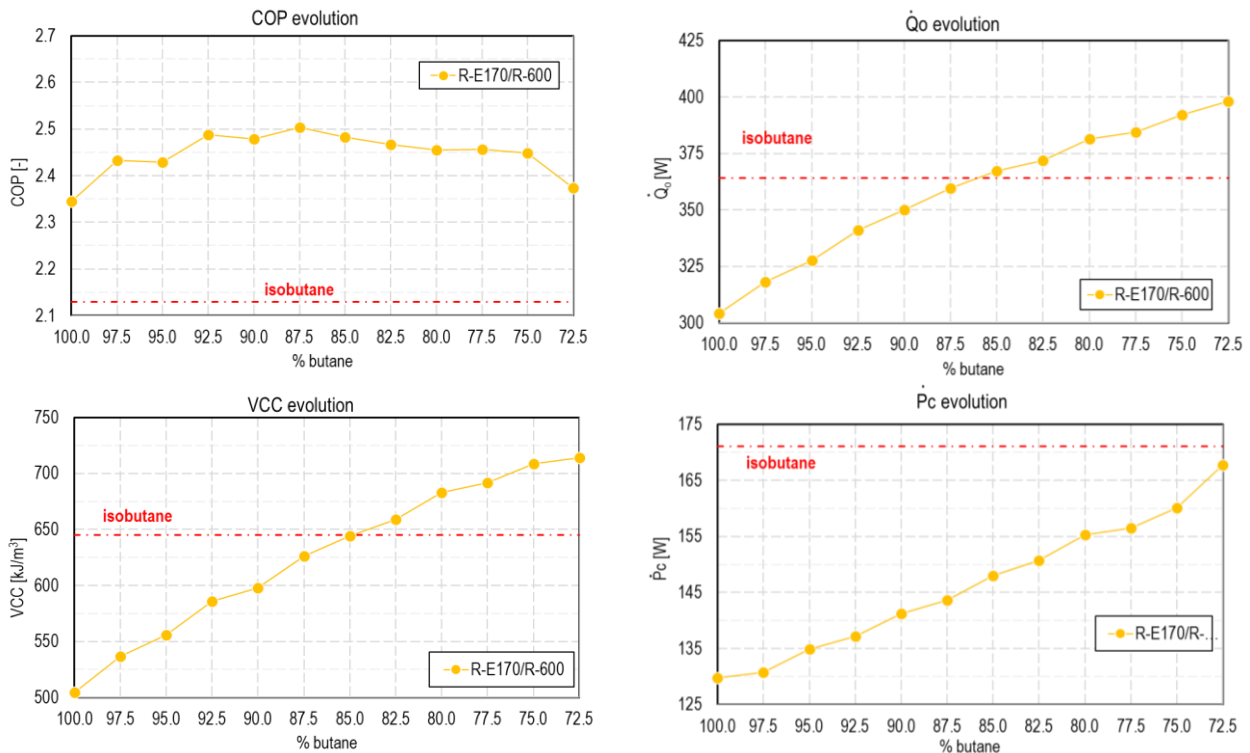


Figura 3. Evolución del COP, \dot{Q}_o , VCC y \dot{P}_c al variar la composición de la mezcla R-E170/R-600. Los valores de R-600a se representan con una línea roja.

La Figura 3 ilustra la evolución de estos parámetros junto con el \dot{P}_c . En una línea roja se representa el valor del isobutano (considerado la referencia). El isobutano presenta un COP de 2,13 un VCC de $643,8 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-3}$ y un \dot{Q}_o de 364,2 W.

El análisis de la evolución del COP revela un aumento significativo en todas las composiciones evaluadas.

Inicialmente, a 97,5% de composición, se obtiene un COP de 2,43 (+14,3% respecto a R-600a), alcanzando un máximo entre 92,5% y 85% de composición, donde los valores se sitúan en torno a 2,5 (+17%). Posteriormente, se observa un descenso progresivo pero constante en las composiciones ensayadas.

Las curvas VCC y \dot{Q}_o siguen tendencias similares, como era de esperar, al ser parámetros estrechamente relacionados. En composiciones altas de R-600, VCC y \dot{Q}_o son notablemente inferiores a R-600a, siendo de un -16,65% y -12,65% respectivamente con un 97,5% de butano. A medida que aumenta la concentración másica de R-E170, el VCC aumenta rápidamente, ya que \dot{q}_o tiende a aumentar con la aportación de DME debido a su elevado calor latente (vease Tabla 1), y el volumen específico disminuye con la adición de DME. En torno al 15% de R-E170, el VCC coincide con el del R-600a. Del mismo modo, los valores \dot{Q}_o se aproximan a los del isobutano en una proporción similar.

La tendencia en la evolución de \dot{P}_c refleja la observada en VCC y \dot{Q}_o . A medida que aumenta el caudal másico de refrigerante, \dot{P}_c también aumenta. Cabe destacar que, para todas las composiciones ensayadas, el consumo de energía es inferior al requerido por el R-600a.

En cuanto al análisis de incertidumbre, para el R-600a para los tres parámetros la incertidumbre es inferior al 3,5%, mientras que con la mezcla la incertidumbre oscila entre el 5,45% y el 4% dependiendo de la composición.

3.2 Análisis termodinámico

La Figura 4 representa la evolución de la temperatura del refrigerante tanto en el condensador como en el evaporador para el isobutano y la mezcla R-E170/R-600 con diferentes composiciones. Los termopares de inmersión colocados dentro de los intercambiadores permiten obtener 17 puntos de datos de temperatura para el condensador y 15 para el evaporador, lo que facilita un análisis exhaustivo basado en mediciones directas de sus respectivos perfiles térmicos.

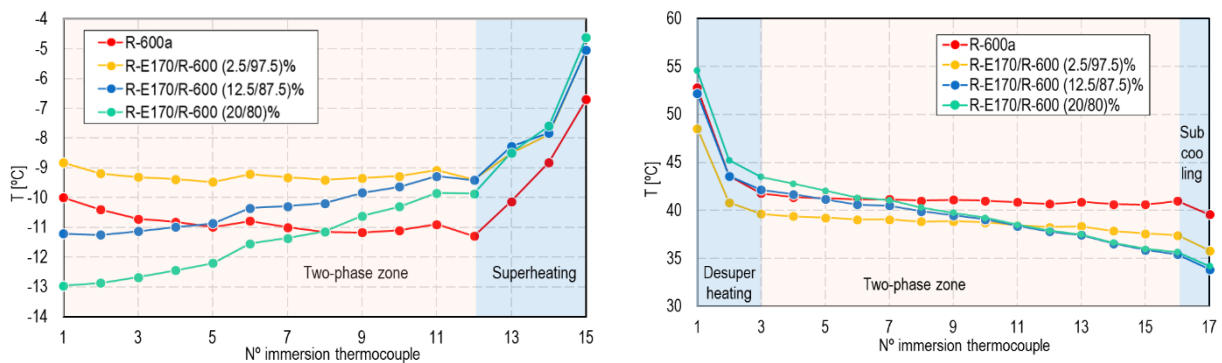


Figura 4. Evolución de la temperatura del refrigerante en el condensador (izquierda) y en el evaporador (derecha).

La Tabla 3 presenta algunos de los parámetros de funcionamiento del R-600a y de la mezcla en cinco proporciones diferentes. p_o y p_k son las presiones de cambio de estado, calculadas como la media entre las presiones de entrada y salida de cada intercambiador. Δp_o y Δp_k indican la caída de presión en cada intercambiador. \bar{t}_o y \bar{t}_k representan las temperaturas de cambio de estado, evaluadas como la media de todos los valores de los termopares en el cambio de estado. $Glide_o^*$ y gk^* son los valores de deslizamiento medidos experimentalmente, considerando también los efectos de Δp en cada intercambiador.

Los niveles de presión de la mezcla son comparables al R-600a en todas las proporciones, lo que elimina problemas de compatibilidad y mantiene una de las ventajas del R-600a. Las temperaturas de cambio de fase aumentan con la composición del DME, aunque siguen siendo comparables al isobutano y, especialmente en el condensador, son sistemáticamente inferiores. En el evaporador, el glide es moderado, con un máximo de 3,27 K en la composición 25/75%. En el condensador, el máximo se alcanza en la composición 20/80, pero comparado con R-600a (2,21 K), los valores son relativamente bajos y aceptables para una mezcla zeotrópica.

Tabla 3. Propiedades termodinámicas del R-600a y de 5 composiciones diferentes de la mezcla R-E170/R-600

	p_o [bar]	Δp_o [mbar]	\bar{t}_o [°C]	$Glide_o^*$ [K]	p_k [bar]	Δp_k [mbar]	\bar{t}_k [°C]	$Glide_k^*$ [K]
R-600a	1,07	90,28	-10,86	1,29	5,45	101,01	40,94	2,21
R-E170/R-600								
5/95	0,80	56,09	-9,22	-0,08	3,93	60,53	38,40	5,08
10/90	0,83	65,99	-10,07	-1,14	4,32	58,06	38,61	7,56
15/85	0,90	57,77	-10,62	-2,36	4,80	64,59	38,68	8,32
20/80	0,94	69,11	-11,49	-3,10	5,21	59,77	39,09	9,31
25/75	0,99	73,65	-11,76	-3,27	5,50	55,61	39,44	9,03

4. CONCLUSIONES

Este estudio evalúa el rendimiento de la mezcla R-E170/R-600 como alternativa al R-600a en un ciclo simple de compresión de vapor. Se probaron todas las combinaciones posibles de composición másica de la mezcla, con incrementos del 2,5% hasta un máximo del 27,5% de R-E170. Los resultados se compararon con los del R-600a en condiciones fijas. La mezcla mostró un COP máximo cerca en composiciones de R-E170 de entre 7,5% y 15%, con valores aproximados de 2,5 (+17%), igualando el VCC y el \dot{Q}_o del R-600a en la composición 15/85%. El deslizamiento en el evaporador y el condensador fue moderado en todas las composiciones probadas, con presiones de trabajo comparables al R-600a. En resumen, el R-E170/R-600 se presenta como una interesante alternativa al R-600a a largo plazo, con mejoras energéticas significativas, propiedades similares y componentes naturales.

AGRADECIMIENTOS

Ayuda TED2021-130162B-I00 financiada por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por «ERDF A way of making Europe» de la «Unión Europea». Proyecto PID2021-126926OB-C21, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

REFERENCIAS

- [1] D. Calleja-Anta, L. Nebot-Andres, J. Catalan-Gil, D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, Thermodynamic screening of alternative refrigerants for R290 and R600a, Results in Engineering, 5 (2020) DOI: 10.1016/j.rineng.2019.100081.
- [2] D. Calleja-Anta, L. Nebot-Andres, D. Sánchez, R. Cabello, R. Llopis, Drop-in substitutes for R-600a. Experimental evaluation and optimization of a commercial fridge, Applied Thermal Engineering, 211 (2022) DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2022.118490.
- [3] D. Calleja-Anta, D. Sánchez, L. Nebot-Andrés, R. Cabello, R. Llopis, Alternative mixtures to R-600a. Theoretical assessment and experimental energy evaluation of binary mixtures in a commercial cooler, International Journal of Refrigeration, 152 (2023) 83-92 DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2023.05.009.
- [4] D. Calleja-Anta, M. Martínez-Ángeles, L. Nebot-Andres, D. Sánchez, R. Llopis, Optimizing R152a/R600 and R290/R600 mixtures for superior energy performance in vapor compression systems: Promising alternatives to Isobutane (R600a), Applied Thermal Engineering, 247 (2024) DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.123070.
- [5] B.O. Bolaji, O.A. Oyelaran, I.O. Abiala, T.O. Ogundana, S.T. Amosun, Energy and Thermal Conductivity Assessment of Dimethyl-Ether and its Azeotropic Mixtures as Alternative Low Global Warming Potential Refrigerants in a Refrigeration System, Environmental and Climate Technologies, 25 (2021) 12-28 DOI: 10.2478/rtuect-2021-0002.
- [6] G. Vaccaro, A. Milazzo, L. Talluri, A proposal for a non-flammable, fluorine-free, CO2-based mixture as a low TEWI refrigerant, International Journal of Refrigeration, 158 (2024) 157-163 DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2023.11.022.