

## MEZCLAS CO<sub>2</sub>/R600a COMO REFRIGERANTE EN SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN CON COMPRESIÓN EN PARALELO: ANÁLISIS DEL FRACCIONAMIENTO

Manel Martínez Angeles<sup>1\*</sup>, Laura Nebot Andrés<sup>1</sup>, Daniel Calleja-Anta<sup>1</sup> y Rodrigo Llopis<sup>1</sup>

1: Grupo de Ingeniería Térmica, Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción, Escuela Superior de Ciencias y Tecnologías, Universitat Jaume I. Castelló de la Plana, 12006.  
e-mail: angeles@uji.es

**Resumen:** *Las instalaciones de refrigeración de tamaño medio a grande (sistemas centralizados) generalmente utilizan CO<sub>2</sub> como fluido de trabajo, ya que es respetuoso con el medio ambiente, de alta seguridad y con niveles elevados de eficiencia con ciclos complejos. La adición de una pequeña proporción de otro refrigerante al CO<sub>2</sub>, conocida como dopaje, ha despertado interés en la comunidad científica. Dichas mezclas basadas en CO<sub>2</sub> introducen algunos beneficios operativos, como reducciones de presión e incrementos de COP. Este trabajo estudia la mezcla CO<sub>2</sub>/R600a (fracción de masa del aditivo del 10%) en una de las arquitecturas más utilizadas para climas cálidos, el ciclo con compresión en paralelo. En esta configuración tiene lugar el fraccionamiento, un fenómeno que provoca la aparición de tres corrientes con diferentes composiciones circulando a través del ciclo. El trabajo aborda dicho fenómeno determinando de forma experimental las corrientes de circulación, así como los caudales máxicos de cada línea del ciclo. Tras el análisis del fraccionamiento se aporta una comparativa entre resultados reales y composiciones obtenidas con Refprop v.10.0.*

**Palabras clave:** Compresión en Paralelo, Dióxido de Carbono, Fraccionamiento, Mezclas, Refrigeración

## 1. INTRODUCCION

Durante los últimos años ha habido un creciente interés en el estudio de mezclas basadas en CO<sub>2</sub> como método de mejora de la eficiencia del ciclo. La introducción de un aditivo provoca reducciones de la presión de trabajo y aumentos de COP [1, 2].

Uno de los ciclos de CO<sub>2</sub> más empleados en climas cálidos es el ciclo con compresión en paralelo en el cual aparece el fraccionamiento cuando se trabaja con mezclas [3]. Cabe destacar que esta configuración con fraccionamiento introduce una serie de cuestiones a considerar. En primer lugar, existen estudios que indican la posibilidad de diferencias entre composición de carga y composición circulante en ciclos con mezclas como fluido de trabajo [4, 5]. Por otro lado, el cálculo de composiciones circulantes se basa en muchos casos en las reglas de fraccionamiento de REFPROP las cuales han sido desarrolladas y validadas para sistemas cerrados.

El presente trabajo consiste en un estudio experimental de un ciclo con compresión en paralelo trabajando con CO<sub>2</sub>/R600a [90/10%]. De desarrolla un método de cálculo de composiciones circulantes sin emplear reglas de fraccionamiento y posteriormente se lleva a cabo el análisis de las corrientes. De esta forma se deseada validar dichas reglas de fraccionamiento en un sistema abierto como es el depósito separador de fases de estudio además de analizar las posibles diferencias entre composición circulante y de carga.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se centra en el fenómeno del fraccionamiento en el depósito separador de fases, así como en el estudio de las composiciones circulantes del ciclo. El separador de fases responsable del fraccionamiento y su instrumentación se muestran en la Figura 1.

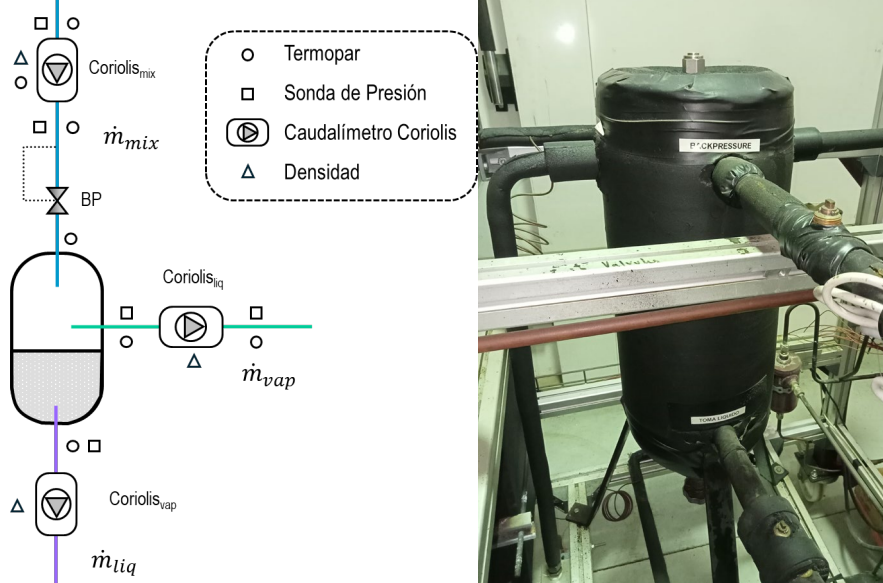


Figura 1. Depósito separador de fases instrumentado

La planta con compresión en paralelo trabaja con la mezcla CO<sub>2</sub>/R600a [90/10%]. Los componentes de la mezcla tienen puntos normales de ebullición (NBP) muy distantes para favorecer el efecto de fraccionamiento en el depósito: el CO<sub>2</sub> tiene un NBP de -78.46 °C y el R600a posee un NBP de -11.75 °C.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el fraccionamiento de la mezcla propuesta, por lo tanto, la campaña experimental se centra en la obtención de numerosas condiciones de fraccionamiento en el depósito obviando completamente parámetros energéticos. Las diferentes condiciones en el depósito se consiguen mediante:

- Condiciones externas de condensación y evaporación controladas mediante fluidos secundarios
- Grado de apertura de la válvula Back-Pressure
- Frecuencia del compresor auxiliar

Las condiciones de fraccionamiento se han evaluado en función de la entalpía de entrada a depósito y la presión de depósito. La campaña experimental de este trabajo la cual ha cubierto un rango de entalpías desde 255 kJ·kg<sup>-1</sup> hasta 305 kJ·kg<sup>-1</sup> y un rango de presiones de depósito desde 22 bar hasta 50 bar.

Como se ha comentado previamente, la composición circulante de la línea principal puede ser diferente a la composición de carga. Por otro lado, las corrientes resultantes del fraccionamiento se obtienen con las reglas de fraccionamiento de REFPROP. Dichas reglas no fueron desarrolladas ni validadas para sistemas abiertos como el sistema de estudio. Así pues, se deben determinar las 3 corrientes circulantes del sistema sin emplear la composición de carga ni las reglas de fraccionamiento de REFPROP v.10.

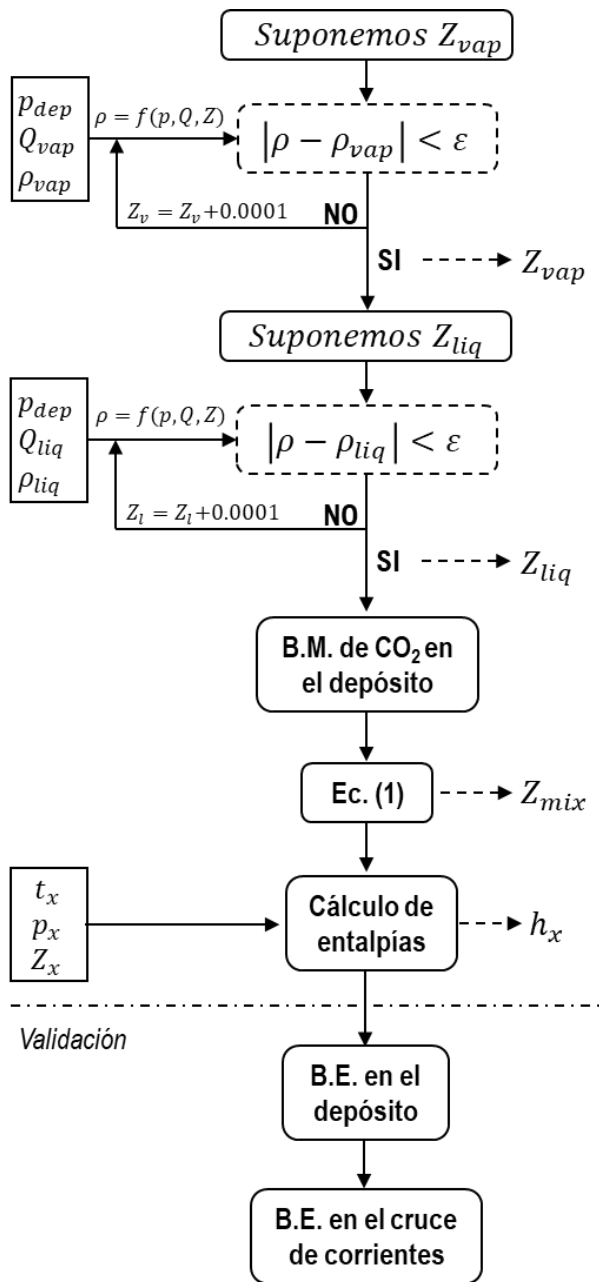


Figura 2. Modelo de cálculo. Diagrama de flujo.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo del método desarrollado para el cálculo de composiciones circulantes basado en medidas experimentales y sin depender de las reglas de fraccionamiento. Las corrientes de líquido y vapor se calculan con un bucle interno a partir de las medidas de densidad proporcionadas por los caudalímetros, el título de vapor y la presión de depósito.

A continuación, se calcula la proporción de CO<sub>2</sub> en la línea principal planteando un balance de masa de uno de los componentes, CO<sub>2</sub> en nuestro caso, en el depósito (ecuación (1)).

$$Z_{mix,CO_2} = \frac{\dot{m}_{liq} \cdot Z_{liq,CO_2} + \dot{m}_{vap} \cdot Z_{vap,CO_2}}{\dot{m}_{mix}} \quad (1)$$

Con las composiciones circulantes ya determinadas se procede a calcular todos los estados termodinámicos del ciclo y validar el modelo mediante dos balances de energía en el propio sistema.

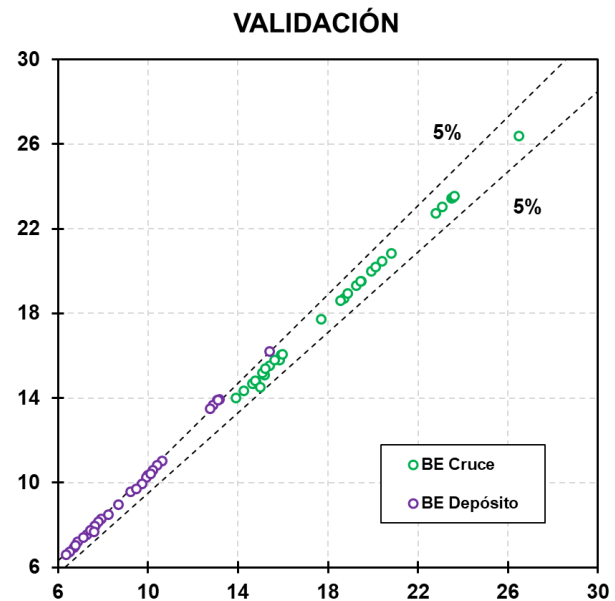


Figura 3. Validación del modelo de cálculo

La Figura 3 muestra la validación de resultados en los balances de energía planteados en el depósito y en el punto de convergencia de corrientes. Los resultados del balance en el depósito muestran desviaciones máximas de un 5.6% y la mayoría de balances poseen errores inferiores a un 5%. Respecto al balance en el cruce de corrientes, los resultados son mejores ya que se ha registrado una desviación máxima del 3%.

De esta forma el modelo propuesto para la determinación de composiciones circulantes sin emplear reglas de fraccionamiento queda validado.

### 3. RESULTADOS

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos con el método explicado en anteriores apartados. Además, se aporta una comparativa entre dichos resultados y los resultados obtenidos empleando reglas de fraccionamiento.

El fenómeno del fraccionamiento consiste en la separación de una corriente con cierta composición en dos corrientes con composiciones diferentes a la inicial. La corriente de vapor será más rica en el componente más volátil mientras que la corriente de líquido será más pobre en el componente más volátil. Así pues, la proporción del componente más volátil ( $\text{CO}_2$  en este caso) debe cumplir la siguiente relación:

$$Z_{liq,CO_2} < Z_{mix,CO_2} < Z_{vap,CO_2} \quad (2)$$

La Figura 4 representa las composiciones circulantes calculadas en función de la temperatura de salida del condensador/gas-cooler. Esta figura confirma el comportamiento deseado para cada ensayo, es decir, la planta se ha operado correctamente y el fraccionamiento ha sucedido de la forma esperada.

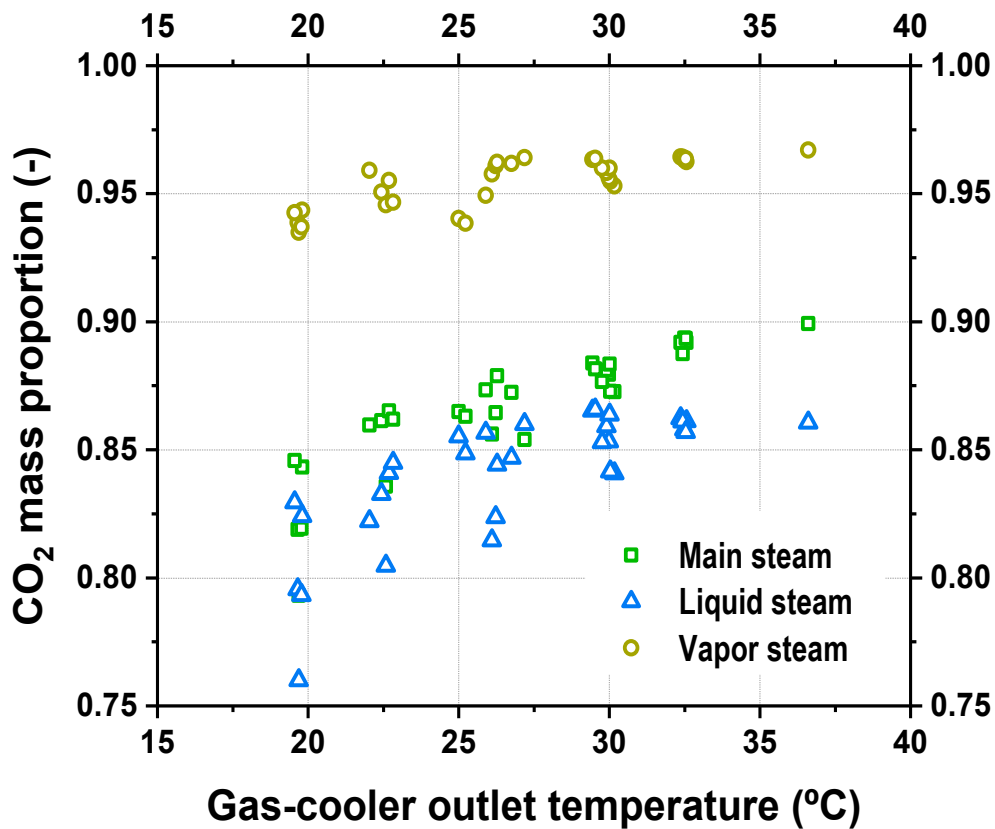


Figura 4. Composiciones circulantes en el ciclo a diferentes temperaturas de salida de gas-cooler

Otro resultado importante es la diferencia entre composición de carga y composición circulante. Como otros autores han planteado, existen diferencias importantes entre composición de carga y circulante en sistemas donde se produce fraccionamiento de una mezcla.

La mezcla de carga es  $\text{CO}_2/\text{R600a}$  [90/10%], sin embargo, en la línea principal la composición circulante no es la misma. Para el rango de condiciones ensayadas la proporción de  $\text{CO}_2$  circulante en la línea principal es menor que la proporción de  $\text{CO}_2$  de carga. Esta diferencia llega valores máximos de un 10%. Además, la composición circulante tiene variabilidad a lo largo de las diferentes condiciones testadas, no es constante. La composición se ve afectada por el nivel de cesión de calor o la cantidad de vapor extraído por el compresor auxiliar entre otros parámetros.

Una de las premisas y motivos de la realización del presente trabajo es la comprobación de la validez de las reglas de fraccionamiento de REFPROP v.10. Dichas reglas se basan en el método propuesto por Bell y Deiters [6] el cual ha sido creado y validado para sistemas cerrados. Numerosos estudios en los que interviene el

fraccionamiento emplean las reglas de fraccionamiento a pesar de que su depósito o separador de fases no constituye un sistema cerrado sino que se trata de un sistema abierto. Así pues, las reglas de REFPROP se están empleando para el cálculo de fraccionamiento en sistemas abiertos.

Este estudio ha determinado las composiciones circulantes de un sistema sin el uso de las reglas de REFPROP. A continuación, se lleva a cabo una comparación entre los resultados experimentales y los resultados utilizando las mencionadas reglas y así, poder determinar si estas últimas son válidas o no para el sistema abierto de estudio.

La composición calculada de la línea principal se asume como cierta. Esta composición junto a la presión de depósito y la entalpía de entrada a la Back-Pressure son los datos de entrada para el cálculo de las corrientes resultantes del fraccionamiento tal como se muestra en la ecuación (3).

$$[Z_{liq}; Z_{vap}] = f(h_{BP,in}, P_{vess}, Z_{mix}) \quad (3)$$

Por otro lado se calculan las incertidumbres asociadas al cálculo de composiciones circulantes de la línea de líquido y la de vapor. Las composiciones se han calculado a partir de la densidad a la salida de depósito, título de vapor y presión del depósito tal como indica la ecuación (4).

$$Z_{liq/vap} = f(p_{vess}, Q_{liq/vap}, \rho_{liq/vap}) \quad (4)$$

Las incertidumbres se calculan aplicando el método de propagación de errores propuesto por Moffat [7] y extendido por Aprea [8]. La incertidumbre asociada a la composición se calcula tal como se indica en la ecuación (5) donde la incertidumbre particular es la media aritmética de la desviación causada por el error del sensor de medición.

$$I_{Z_{liq/vap}} = \sqrt{I_{p_{vess}}^2 + I_{\rho_{liq/vap}}^2} \quad (5)$$

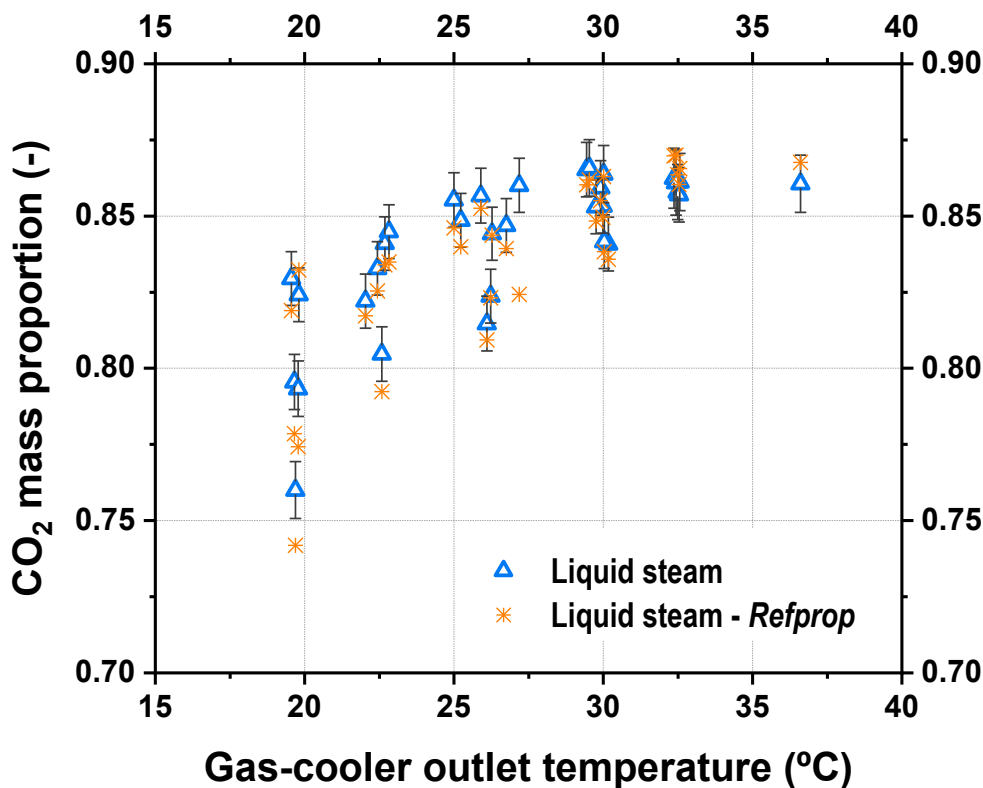


Figura 5. Validación de las reglas de fraccionamiento de REFPROP. Corriente de líquido

La Figura 5 representa las composiciones circulantes de la línea de líquido calculadas con el método desarrollado y las mismas composiciones calculadas con las reglas de fraccionamiento. Además, el gráfico

incorpora la incertidumbre de cada composición calculada. Para la gran mayoría de puntos las composiciones obtenidas con REFPROP se encuentran dentro de la incertidumbre de medida de la composición calculada. De la misma manera, se han calculado las composiciones de la línea de vapor donde todas las composiciones calculadas se encuentran dentro de la incertidumbre de medida.

Así pues, para el sistema abierto de estudio trabajando con mezclas CO<sub>2</sub>/R600a se han validado las reglas de fraccionamiento que emplea REFPROP v.10, cumpliendo así el objetivo principal del presente trabajo.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente consiste en un estudio experimental del fraccionamiento en un sistema de refrigeración transcritoico trabajando con la mezcla CO<sub>2</sub>/R600a. Para estudiar el mencionado fenómeno se ha llevado a cabo una campaña experimental para alcanzar numerosas condiciones diversas en la entra del depósito separador de fases.

Las composiciones circulantes se han determinado mediante el uso de un modelo basado en mediciones de densidad de dos de las corrientes y se han obtenido dos resultados relevantes. En primer lugar, se ha observado que la composición de carga y la composición circulante en la línea principal no son iguales. Además, esta última depende de las condiciones de trabajo del ciclo entre otros factores por lo que no es un parámetro constante.

El segundo resultado importante se centra en probar la validez de las reglas de fraccionamiento de REFPROP v.10 para un sistema abierto como el del estudio. Tras calcular las corrientes circulantes con el método desarrollado y las mismas corrientes con las reglas de REFPROP se concluye que para una gran mayoría de las composiciones estimadas por el software se encuentran dentro del rango de incertidumbre. Así pues, las reglas de fraccionamiento diseñadas y probadas para sistemas cerrados quedan validadas para un sistema abierto trabajando con mezclas de CO<sub>2</sub>/R600a.

#### REFERENCIAS

- [1] D. Sánchez, F. Vidan-Falomir, L. Nebot-Andrés, R. Llopis, R. Cabello, Alternative blends of CO<sub>2</sub> for transcritical refrigeration systems. Experimental approach and energy analysis, *Energy Conversion and Management*, 279 (2023).
- [2] P. Tobaly, M.F. Terrier, P. Bouteiller, CO<sub>2</sub> + propane mixture as working fluid for refrigeration in hot climates. Experimental results of energy efficiency tests, in: *Refrigeration Science and Technology*, Vol. 2018-June, 2018, pp. 790-797.
- [3] G. Vaccaro, A. Milazzo, L. Talluri, Thermodynamic assessment of trans-critical refrigeration systems utilizing CO<sub>2</sub>-based mixtures, *International Journal of Refrigeration*, 147 (2023) 61-70.
- [4] T. Bai, G. Yan, J. Yu, Experimental investigation on the concentration distribution behaviors of mixture in an ejector enhanced auto-cascade refrigeration system, *International Journal of Refrigeration*, 99 (2019) 145-152.
- [5] B. Sreenivas, H.G. Nayak, G. Venkatarathnam, Relationship between composition of mixture charged and that in circulation in an auto refrigerant cascade and a J-T refrigerator operating in liquid refrigerant supply mode, *Cryogenics*, 81 (2017) 42-46.
- [6] I.H. Bell, U.K. Deiters, On the construction of binary mixture p-x and T-x diagrams from isochoric thermodynamics, *AIChE Journal*, 64 (2018) 2745-2757.
- [7] R.J. Moffat, Using Uncertainty Analysis in the Planning of an Experiment, *Journal of Fluids Engineering*, 107 (1985) 173-178.
- [8] C. Aprea, F. de Rossi, R. Mastrullo, The uncertainties in measuring vapour compression plant performances, *Measurement*, 21 (1997) 65-70.