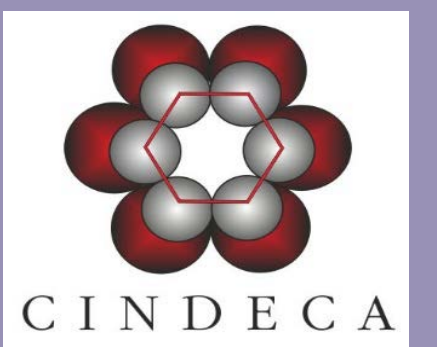


CARACTERIZACIÓN MACROSCÓPICA DEL FUNCIONAMIENTO DE UN TUBO

VORTEX PARA DISTINTOS FLUIDOS DE TRABAJO



Penillas Juan M.¹, Mariani Néstor J.^{2,3*}

(1) Depto. de Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata

(2) Depto. de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata

(3) Centro de Investigación y Desarrollo en Ciencias Aplicadas "Dr. J. J. Ronco" (CINDECA) CONICET- UNLP - CIC BA La Plata, Argentina

*e-mail: javier.mariani@ing.unlp.edu.ar

Tubo Vortex de Ranque-Hilsch

Dispositivo sin partes móviles que, sin aporte externo de energía, permite generar a partir de un fluido a presión que ingresa tangencialmente al tubo a través de toberas, dos corrientes a diferente nivel de temperatura.

- Enfriamiento en operaciones de maquinado CNC
- Enfriamiento de partes soldadas
- Enfriamiento de componentes electrónicos

Corriente fría

Aplicaciones con aire

Corriente caliente

- Soplado de plásticos
- Ablandamiento de adhesivos
- Sellado de embalajes

Fluidos de trabajo

En el ámbito académico-científico, el número de publicaciones sobre fluidos de trabajo diferentes al aire resulta significativamente menor a los de este y, simultáneamente, no se ha alcanzado un consenso en referencia al efecto de la variación del fluido en el comportamiento del TVRH.

Se propone estudiar el comportamiento macroscópico de un TVRH comercial (Exair® 708 slpm) para cinco gases diferentes: N₂, O₂, CO₂, H₂ y He, y compararlos con el correspondiente al aire (el modelo CFD a utilizar fue previamente validado para aire).

Análisis CFD

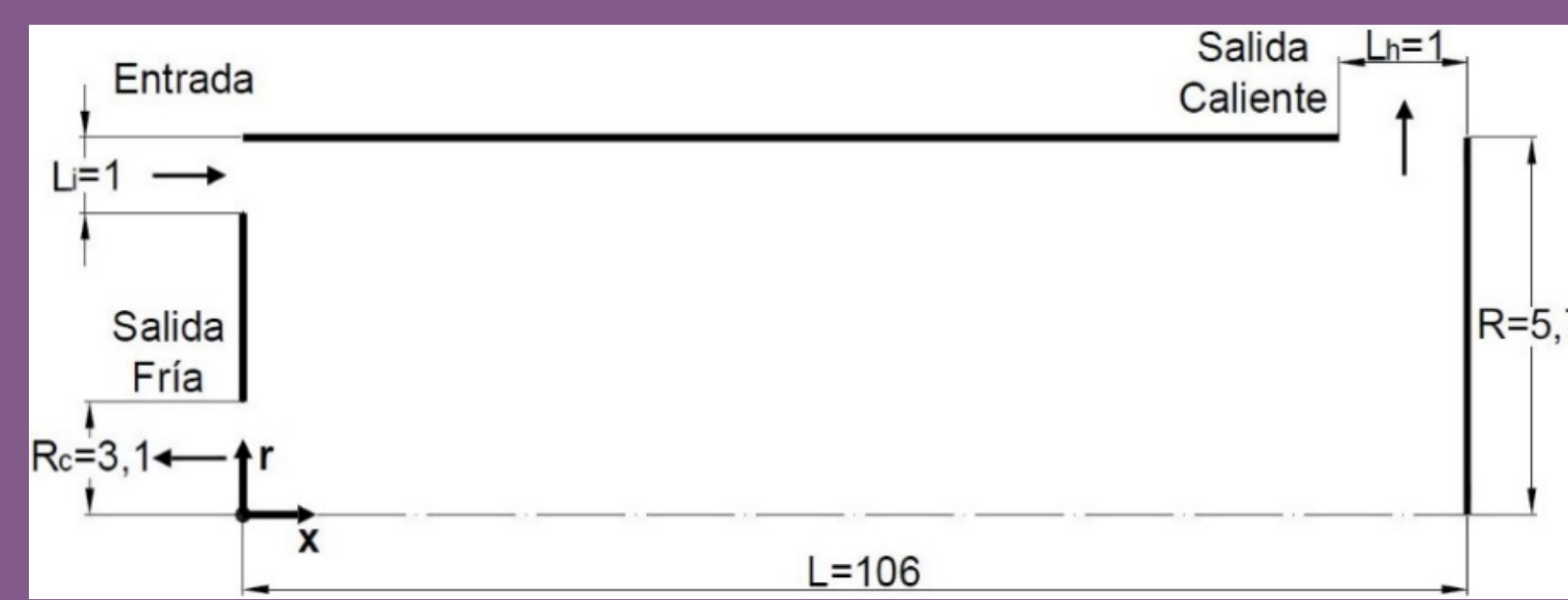
Análisis termodinámico macroscópico

Modelado matemático

Modelo geométrico / Volumen de control

Hipótesis de trabajo

- Modelo geométrico: bidimensional axis-simétrico (figura en mm)
- Fluidos: Gas ideal y propiedades termo-físicas constantes
- Entrada: T_{0,i}=294K, p_i=500kPa y un vector director con un ángulo α_i=15° (respecto a la dirección tangencial)
- Salidas: p_c=101,325kPa y p_h variable para regular caudales
- Paredes: Adiabáticas y sin deslizamiento



- Volumen de control, una entrada y dos salidas, adiabático
- SAP, con gas ideal y propiedades termo-físicas constantes
- No existen aportes externos de trabajo
- Presión en las salidas igual a la atmosférica
- Se trabaja con propiedades de estancamiento

Modelado numérico

Se llevó a cabo en la plataforma Ansys-Fluent™ empleando el modelo de turbulencia Standard κ-ε. Se implementó una malla estructurada con elementos de 0,125mm de lado y un criterio de convergencia de 1·10⁻⁶.

Temperaturas de salida*

Primera y Segunda Ley

Regulación de caudales

Los parámetros en estudio varían en función de la relación de caudales. Para referenciarlos se define la fracción fría.

$$\epsilon_c = \dot{m}_c / \dot{m}_i$$

$$0,25 \leq \epsilon_c \leq 0,8$$

$$\epsilon_c \min \rightarrow T_{0,c} \min \quad T_{0,h} \max \leftarrow \epsilon_c \max$$

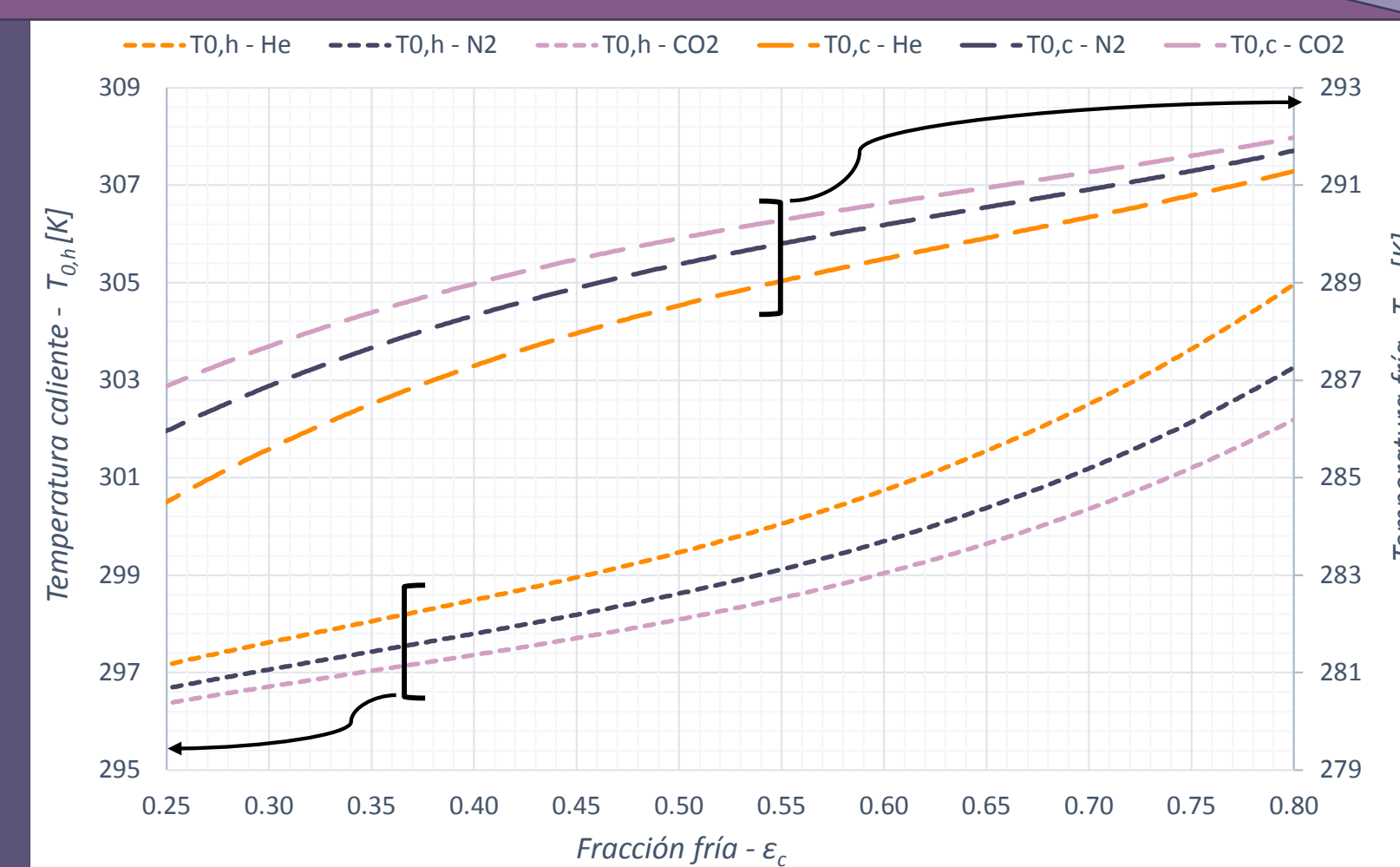
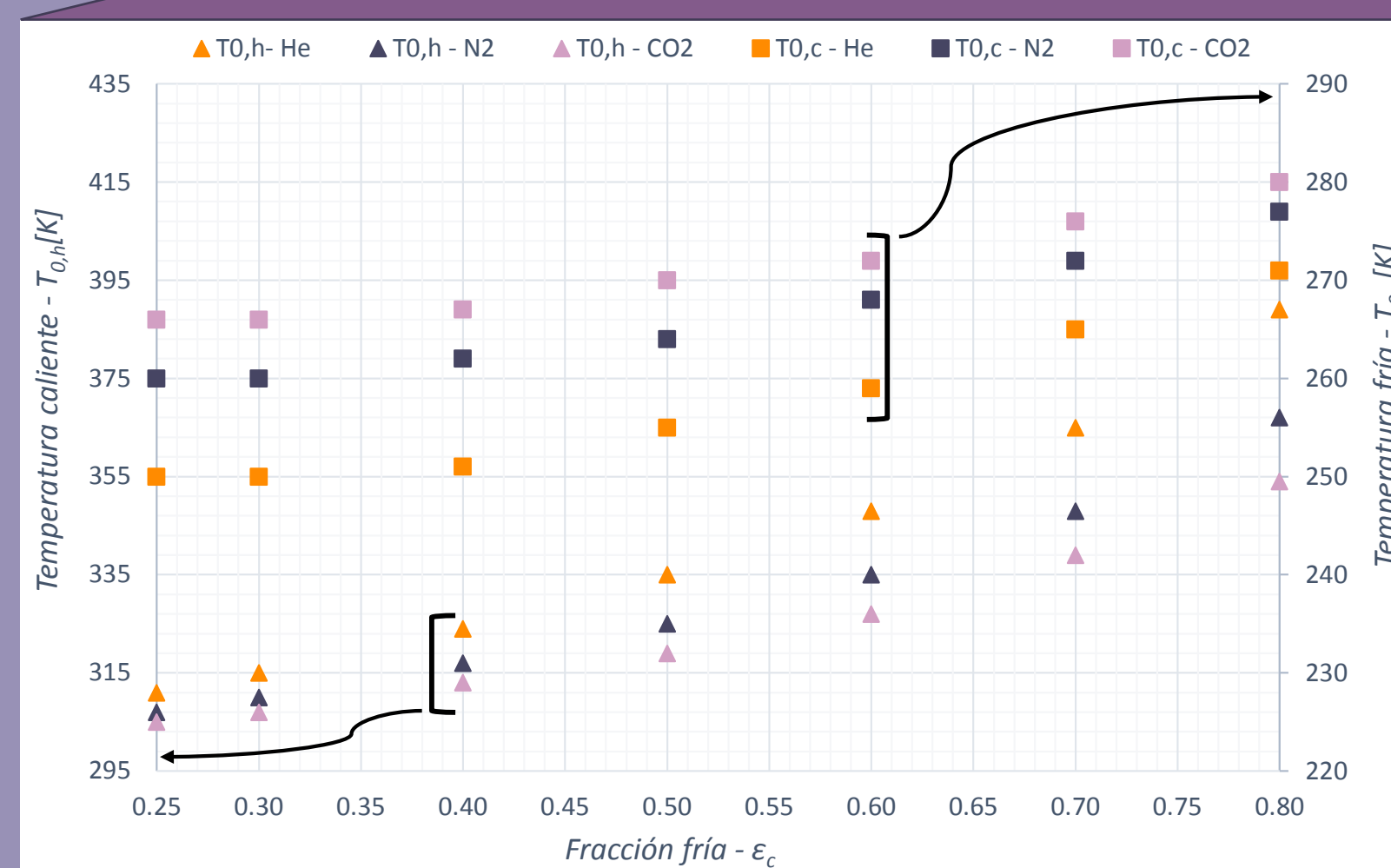
Eficiencia energética

Al utilizarse como dispositivo de enfriamiento o calentamiento, su eficiencia se evalúa a partir del COP.

$$\text{COP} = \frac{Q}{W}; Q_c = Q_h \rightarrow \text{COP}_c = \text{COP}_h$$

Aun cuando el dispositivo no consume ni produce ningún tipo de trabajo, es necesaria la compresión previa del fluido. Por lo que se especifica un proceso de compresión ideal (en este caso isentrópico) para definir el COP_{iso}.

$$\text{COP}_{\text{iso}} = \left[(1 - \epsilon_c) \left(\frac{T_{0,h}}{T_{0,i}} - 1 \right) \right] / \left[\left(\frac{p_i}{p_a} \right)^{\gamma} - 1 \right]$$



Combinándolas junto al balance de masa se obtienen las expresiones para las temperaturas de salida.

$$T_{0,i} e^{\gamma \theta} \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\gamma} = \left[\frac{T_{0,i} - (1 - \epsilon_c) T_{0,h}}{\epsilon_c} \right]^{\epsilon_c} T_{0,h}^{(1 - \epsilon_c)}$$

$$T_{0,i} e^{\gamma \theta} \left(\frac{p_a}{p_i} \right)^{\gamma} = \left[\frac{T_{0,i} - \epsilon_c T_{0,c}}{(1 - \epsilon_c)} \right]^{(1 - \epsilon_c)} T_{0,c}^{\epsilon_c}$$

Coef. de expansión isentrópico

$\gamma = R_g / C_p$, es el único parámetro que relaciona el tipo de fluido.

$$\gamma_{\text{He}} = 0,400; \gamma_{\text{H}_2} = 0,288; \gamma_{\text{N}_2} = 0,286;$$

$$\gamma_{\text{aire}} = 0,286; \gamma_{\text{O}_2} = 0,283; \gamma_{\text{CO}_2} = 0,224$$

Entropía generada adimensional

$$\Theta = \dot{\sigma} / (\dot{m}_i R_g) \quad [\Theta_{\min} = 0] \leq \Theta \leq [\Theta_{\max} = \ln(p_i/p_a)]$$

Se tomó el valor de Θ_{\max} habida cuenta de que el proceso llevado a cabo dentro del TVRH es altamente irreversible. De las condiciones establecidas se obtiene $\Theta_{\max} = 1,609$.

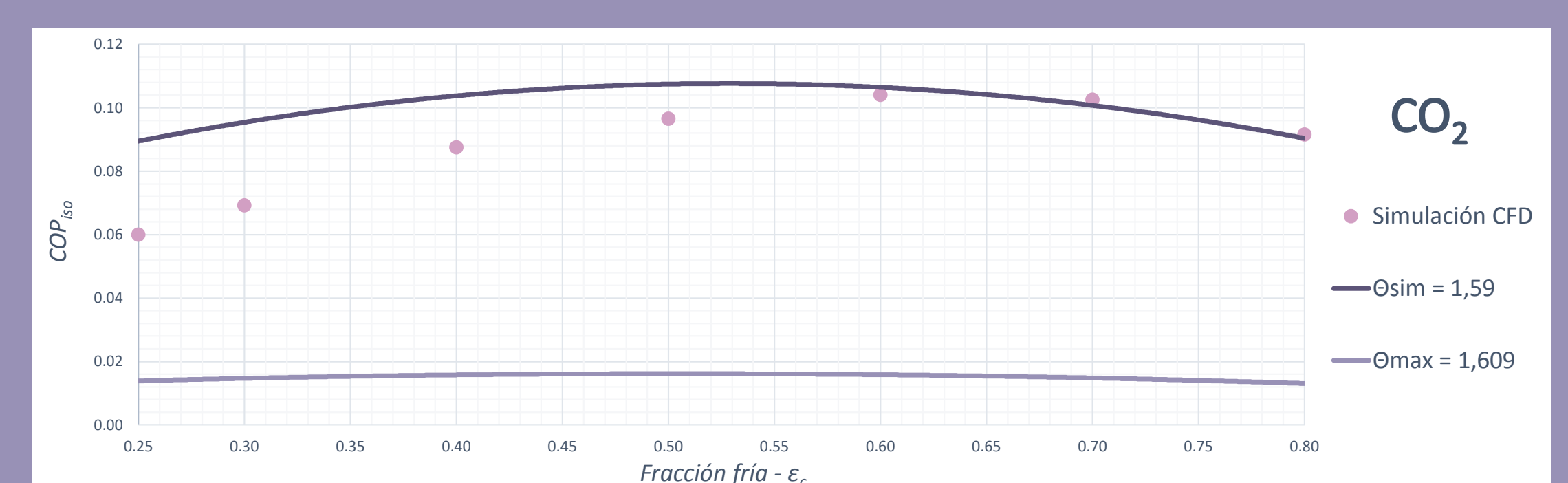
* Debido a que el comportamiento de N₂, O₂, H₂ y aire resulta similar, sólo se grafica al N₂.

Grado de generación de entropía

Cuantificar el grado de generación de entropía para cada fluido resulta de interés, para ello se compara en términos relativos del COP_{iso} simulado con los que surgen del análisis termodinámico.

Para cada una de los fluidos Θ_{sim} resulta: $\Theta_{\text{simHe}} = 1,582$; $\Theta_{\text{simH}_2} = 1,586$; $\Theta_{\text{simN}_2} = 1,586$; $\Theta_{\text{simO}_2} = 1,586$; $\Theta_{\text{simCO}_2} = 1,59$.

Puede observarse en la figura la generación de entropía es muy cercana a la máxima, lo cual confirma la alta irreversibilidad del proceso que ocurre dentro del TVRH.



Conclusiones

- Se logró simular el funcionamiento de un TVRH comercial para distintos fluidos a partir de un modelo simple previamente validado para aire.
- Las mayores diferencias de temperatura se alcanzan con He, mientras que el CO₂ conduce a las menores. El uso de N₂, O₂ y H₂, resulta en un comportamiento similar al del aire.
- El comportamiento térmico que surge de ambos análisis (CFD y termodinámico macroscópico) resulta similar, si se asume que la generación de entropía es máxima.
- Se determinó el grado de generación de entropía para cada fluido simulado, siendo el He el fluido para el cual menor irreversibilidad se produce durante el proceso, mientras que el CO₂ el de mayor.