



**Universidad**  
Zaragoza

# Trabajo Fin de Máster

Análisis de fugas por microporos en tuberías de  
gas natural

Pinhole leaks analysis in natural gas pipelines

Autor

Chabier Andrés Buey

Directores

Jorge Barroso Estébanez

Javier Ballester Castañer

Escuela de Ingeniería y Arquitectura - EINA  
2019



## **RESUMEN**

Las emisiones no intencionadas de gas natural en los sistemas de distribución se cifran entre un 1% y un 4% del total que circula por los conductos, siendo la causa más importante las fugas por poros u orificios de pequeño diámetro. Por lo tanto, existe un alto interés en el tejido empresarial por conocer y evaluar este tipo de fugas.

Para una mejor caracterización teórica de estas fugas se desarrolla un modelo CFD y se analizan sus resultados junto las medidas experimentales tomadas de un banco de ensayos. Tras explorar las limitaciones de la teoría de flujo compresible 1-D y validar el modelo CFD, se elaboran nuevos modelos compresible-viscosos. Además, se propone un método de conversión de caudal de aire a metano para poder realizar pruebas con aire y evitar los riesgos asociados a la manipulación de metano al realizar pruebas de comprobación de fugas de gas en bancos de ensayo.

## **ABSTRACT**

Unintended emissions of natural gas in distribution systems are estimated between 1% and 4% of the total quantity of natural gas flowing through the pipelines, being the main cause pinholes or small diameter holes leaks. Therefore, there is a high interest in the industrial enterprise to know and evaluate this type of leakages.

For a better theoretical characterization of these leaks, a CFD model is developed and its results are analyzed together with the experimental measurements taken from a test bench. After exploring the limitations of the 1-D compressible flow theory and validating the CFD model, new compressible-viscous models are elaborated. In addition, a method of converting air flow to methane is proposed to perform tests with air in laboratories facilities, avoiding the risks related to the handling of methane.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS .....	1
1.1.1 <i>Motivación</i> .....	1
1.1.2 <i>Objetivos</i> .....	5
1.2 ESTADO DEL ARTE Y REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	5
1.3 ESTRUCTURA DEL TRABAJO .....	7
<b>2. MODELO COMPUTACIONAL .....</b>	<b>9</b>
2.1 EXPOSICIÓN DEL MODELO UTILIZADO EN LAS SIMULACIONES .....	9
2.1.1 <i>Geometría</i> .....	9
2.1.2 <i>Mallado de la geometría</i> .....	11
2.1.3 <i>Modelado de la física del problema</i> .....	12
2.1.4 <i>Características de los fluidos utilizados</i> .....	12
2.1.5 <i>Condiciones de contorno</i> .....	13
2.1.6 <i>Método de solución de las ecuaciones</i> .....	14
2.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	15
<b>3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS SIMULACIONES CFD .....</b>	<b>17</b>
3.1 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	17
3.1.1 <i>Aire</i> .....	17
3.1.2 <i>Metano</i> .....	20
3.1.3 <i>Comparación de resultados: aire y metano</i> .....	22
3.2 CONCLUSIONES PARCIALES .....	24
<b>4. BANCO DE ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>26</b>
4.1 DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE ENSAYOS .....	26
4.2 METODOLOGÍA DEL ENSAYO .....	28
4.3 INCERTIDUMBRE EN LAS MEDICIONES Y SU PROCESADO .....	30
4.4 PROCESADO DE LAS MEDICIONES .....	33
4.4.1 <i>Aplicación de medias móviles</i> .....	33
4.4.2 <i>Ajuste de modelos de regresión</i> .....	38
4.5 VALIDACIÓN DEL MODELO CFD .....	41
4.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	44
<b>5. TEORÍA DE FLUJO COMPRESIBLE 1-D .....</b>	<b>46</b>
5.1 FLUJO COMPRESIBLE .....	46
5.1.1 <i>Teoría de flujo compresible aplicada a fugas por pequeños orificios</i> .....	46
5.2 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS .....	47
5.3 COMPARACIÓN DE RESULTADOS TEÓRICOS - CFD .....	50
5.3.1 <i>Las limitaciones de la teoría de flujo compresible</i> .....	53
5.4 OBTENCIÓN DE MODELOS COMPRESIBLE-VISCOSOS .....	53
5.4.1 <i>Desarrollo teórico</i> .....	54
5.4.2 <i>Resultados</i> .....	56
5.5 OBTENCIÓN FLUJO DE METANO A PARTIR DEL AIRE .....	60
5.5.1 <i>Conversión de flujo de aire a metano</i> .....	60
5.5.2 <i>Resultados</i> .....	61
5.6 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO .....	64
<b>6. CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO .....</b>	<b>66</b>
6.1 CONCLUSIONES GENERALES .....	66
6.2 TRABAJO FUTURO .....	68
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>70</b>

<b>ANEXO A: ECUACIONES DEL MODELO COMPUTACIONAL K-ÉPSILON.....</b>	<b>I</b>
<b>ANEXO B: PRUEBAS PARA LA JUSTIFICACIÓN DEL MODELO CFD.....</b>	<b>V</b>
B.1 ANÁLISIS DE LOS RESIDUOS Y EL NÚMERO DE ITERACIONES .....	VI
B.2. ANÁLISIS DE LA GEOMETRÍA .....	VII
<i>B.2.1 Análisis de la geometría de la cámara externa .....</i>	<i>vii</i>
<i>B.2.2 Análisis de la longitud del orificio .....</i>	<i>xi</i>
B.3 TAMAÑO DE LAS CELDAS EN LA MALLA .....	XI
B.4 TIPO DE MODELO DE FLUJO VISCOSO .....	XIII
B.5 COMPRESIBILIDAD DEL FLUJO .....	XV
B.6 INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN LAS PROPIEDADES.....	XVI
B.7 INFLUENCIA DEL PROCESO DE MEZCLADO EXTERIOR .....	XVII
<b>ANEXO C: RESULTADOS CFD Y GRÁFICOS .....</b>	<b>XXIII</b>
C.1 AIRE .....	XXIII
C.2 METANO .....	XXXI
<b>ANEXO D: MODELOS DE REGRESIÓN, RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS .....</b>	<b>XXXVII</b>
D.1 GRÁFICAS: MODELOS DE REGRESIÓN .....	XXXVII
<i>D.1.1 Aire .....</i>	<i>xxxvii</i>
<i>D.1.2 Metano.....</i>	<i>xlvi</i>
D.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS.....	XLV
<i>D.2.1 Aire .....</i>	<i>xlvi</i>
<i>D.2.2 Metano.....</i>	<i>xlvi</i>
<b>ANEXO E: TABLAS Y GRÁFICAS COMPARATIVAS: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CFD.....</b>	<b>LI</b>
E.1 AIRE .....	LI
E.2 METANO .....	LVI
<b>ANEXO F: DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DE LOS ORIFICIOS .....</b>	<b>LXI</b>
F.1 ORIFICIO DE DIÁMETRO 0,16 MM .....	LXII
F.2 ORIFICIO DE DIÁMETRO 0,24 MM .....	LXIII
F.3 ORIFICIO DE DIÁMETRO 0,525 MM .....	LXV
<b>ANEXO G: RESULTADOS DE LA TEORÍA COMPRESIBLE 1-D.....</b>	<b>LXVII</b>
G.1 AIRE .....	LXVII
G.2 METANO .....	LXX
<b>ANEXO H: TABLAS Y GRÁFICAS COMPARATIVAS: TEORÍA COMPRESIBLE 1-D Y CFD.....</b>	<b>LXXIII</b>
H.1 AIRE .....	LXXIII
H.2 METANO .....	LXXVIII
<b>ANEXO I: RESULTADOS TEORÍA COMPRESIBLE 1-D VISCOSA. TABLAS Y GRÁFICAS COMPARATIVAS CON TEORÍA COMPRESIBLE 1-D Y CFD .....</b>	<b>LXXXIII</b>
I.1 AIRE .....	LXXXIII
<i>I.1.1 Diámetro 0,16 mm.....</i>	<i>lxxxiii</i>
<i>I.1.2 Diámetro 0,24 mm.....</i>	<i>lxxxv</i>
<i>I.1.3 Diámetro 0,525 mm.....</i>	<i>lxxxvii</i>
I.2 METANO .....	LXXXIX
<i>I.2.1 Diámetro 0,16 mm.....</i>	<i>lxxxix</i>
<i>I.2.2 Diámetro 0,24 mm.....</i>	<i>xc</i>
<i>I.2.3 Diámetro 0,525 mm.....</i>	<i>xcii</i>
<b>ANEXO J: RESULTADOS MÉTODO DE CONVERSIÓN AIRE – METANO .....</b>	<b>XCVI</b>
J.1 DIÁMETRO 0,16 MM .....	XCVII
J.2 DIÁMETRO 0,24 MM .....	XCIX

J.3 DIÁMETRO 0,525 MM ..... CI





**INTRODUCCIÓN**

Este capítulo introductorio supone una primera aproximación a la temática tratada a lo largo del presente trabajo: el estudio y la cuantificación de fugas de gas a través de pequeños orificios. En el apartado 1.1 se exponen los motivos que han llevado a la realización de este TFM y los objetivos que se establecieron. En el apartado 1.2 se realiza una revisión del estado del arte a partir de un estudio bibliográfico de diferentes artículos que tratan el tema y, por último, en el apartado 1.3 se describe la estructura que se sigue en el trabajo.

**1.1 Motivación y objetivos**

---

**1.1.1 Motivación**

Este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación realizado por el Laboratorio de Investigación en Fluidodinámica y Tecnologías de la Combustión (LIFTEC) para Sedigas, con el principal objetivo de cuantificar las fugas en redes de distribución de gas natural. No obstante, este trabajo fin de máster se centra en el análisis de fugas por pequeños orificios o poros.

El sector del gas natural tiene una gran implantación en el país. La demanda total de gas natural en España en el año 2018 se situó alrededor de los 350.000 GWh

(SEDIGAS, 2018), superando año a año desde 2005 los 300.000 GWh. En ese sentido, la red de gasoductos del sistema gasista alcanzó los 11.369 km de gasoductos de transporte primario y 13.361 km de transporte secundario a finales del año 2018. En la Figura 1.1 se puede ver la evolución de la longitud de las redes de transporte y distribución de gas natural desde el año 1995.

Longitud de las redes de transporte y distribución de gas natural (km)

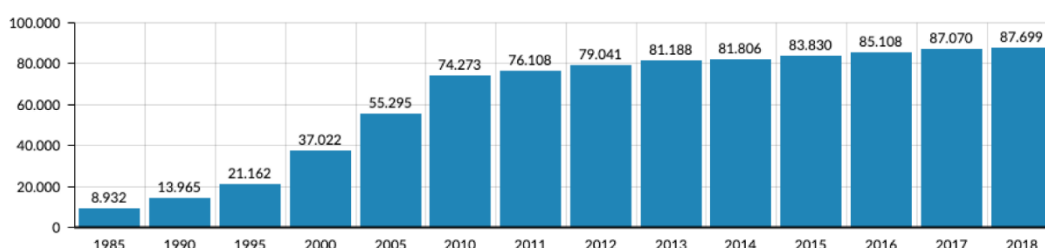


Figura 1.1. Evolución de la longitud de las redes de transporte y distribución de gas natural [*Informe anual Sedigas 2018*]

Pese a que desde la Unión Europea se están implementando políticas para la descarbonización de la economía (Comisión Europea, s.f.), el sector del gas natural se reclama a sí mismo (SEDIGAS, 2018) como un soporte para la progresiva penetración de las energías renovables en los sectores industrial y energético. Por otra parte, se está asentando el uso de gas natural como una fuente de energía alternativa a otros combustibles con mayores emisiones asociadas por unidad de energía consumida, por ejemplo, para la sustitución de los combustibles convencionales en el sector del transporte. Al inicio del año 2018 ya se contaba con 144 estaciones de recarga de gas natural para vehículos, abriéndose en dicho año 19 estaciones más. En la Figura 1.2 se puede ver la evolución de vehículos de gas natural en España.

**Evolución nº de vehículos de gas natural  
en España (en unidades)**

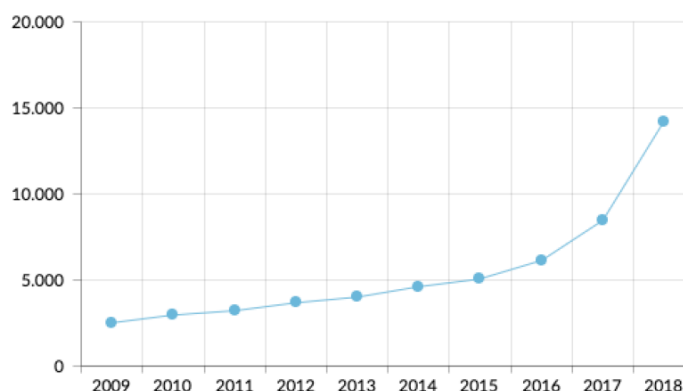


Figura 1.2. Evolución del número de vehículos de gas natural en España (SEDIGAS, 2018)

Además, el sector gasista está en proceso de adaptación estudiando la utilización de los gasoductos para la circulación otros gases como el hidrógeno por lo que la problemática de las fugas en redes de distribución va a seguir estando presente en los próximos años.

Existen distintos estudios (Ehhalt & Schmidt, 1978) (J.C.Sheppard, Westberg, Hopper, & Ganesan., 1982) (Blake, 1984) (Seiler, 1984) (Darmstadter, y otros, 1984) (Bolle, Seiler, & Bolin, 1986) (Crutzen, 1987), que realizan una aproximación a esta problemática, cuantificando las fugas de gas natural del sistema industrial de los Estados Unidos en diferentes años de las décadas de los 80 y 90. En sus análisis realizan una estimación de las fugas de gas natural del sistema, calculadas como la diferencia entre la cantidad de gas que entra en el sistema y la que llega al cliente final, de entre el 1 y el 4% del total de gas circulado por el mismo.

Otro estudio (A.Kirchgessner, A.Lott, Cowgill, R.Harrison, & M.Shires, 1997) realizó una investigación en detalle de las emisiones no intencionadas, cifrando las fugas de gas natural en las instalaciones (plantas de gas, estaciones de compresión, tuberías, etc.) en un 62,1% del total, de entre las cuales las fugas en tuberías enterradas alcanzan un 24,8% con una emisión de  $1.370,7 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> de gas natural en 1992. Ese mismo año se consumieron  $553.434 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> de gas natural en el país americano (Energy Information Administration, 1997). Si se extrapolan esos datos

al consumo español del año 2018, la estimación para España sería de  $75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de gas fugado en la red de gasoductos, siendo ésta una cifra de consideración.

Este problema no se limita únicamente al continente americano: aproximadamente un 80% de las emisiones de metano a la atmósfera en la Unión Europea se deben a fugas en los sistemas de distribución de gas (Barroso, Solis, Ballester, & Pina, 2009). En ese sentido, en diferentes partes del territorio Europeo se han hecho estudios para mejorar los modelos de estimación de la magnitud de gas natural que fuga anualmente por sus sistemas de distribución (Wikkerink, 2006) (Barroso, Solis, Ballester, & Pina, 2009). En Países Bajos se lograron estimar estas pérdidas en función del material de la tubería, cifrando en  $210 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{año}$  para el polietileno,  $50 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{año}$  para el acero o  $320 \text{ m}^3/\text{km} \cdot \text{año}$  para el cemento, situándose las pérdidas en el conjunto del país alrededor de los  $18,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  de metano.

Así, existe un claro interés del sector industrial por reducir y comprender mejor este tipo de fugas, por varios motivos:

- La búsqueda de transmisión de confianza de los sistemas de gas natural como infraestructuras seguras (Sivathanu) y la detección precoz de fugas para evitar accidentes por escapes de gas (Gil & Berton).
- El metano es el segundo gas con mayor contribución al calentamiento global y al cambio climático, por detrás del dióxido de carbono (Wikkerink, 2006). Por lo tanto, la reducción de las emisiones de metano contribuye a la mitigación del cambio climático.
- Las empresas distribuidoras de gas natural son penalizadas por la existencia de mermas en sus redes. Estas penalizaciones alcanzaron valores de 3,5 millones de euros para el ejercicio de 2015 (EuropaPress, 2017).

Todo lo anteriormente expuesto da sentido a la realización de este TFM y lo que explica su conveniencia en el contexto, presente y futuro, del sistema gasista.

### **1.1.2 Objetivos**

El principal objetivo del trabajo es la determinación cuantitativa de fugas por orificios de diámetro reducido o poros en instalaciones de distribución de gas natural. Para ello, el trabajo consta de diferentes fases y metas:

- La obtención de modelos de simulación CFD para la cuantificación de las fugas por pequeños orificios de distinto diámetro y el estudio en detalle de estas fugas, buscando similitudes en el comportamiento de distintos gases (aire y metano) a lo largo de la pared del orificio y en su salida.
- La valoración y estudio del método de toma de datos experimentales a través de un banco de medidas y el posterior procesamiento de los datos para la obtención de modelos experimentales.
- La revisión de la teoría de flujo compresible y su aplicación a las fugas por orificios.
- La comparación de los resultados CFD, experimentales y teóricos para la complementación de la teoría de flujo compresible 1-D, con el objetivo de que se aproxime mejor la cuantificación de fugas por pequeños orificios y que sea posible también realizar estimaciones de fugas de metano utilizando los resultados de pruebas con aire.

## **1.2 Estado del arte y revisión bibliográfica**

---

Existen diversos estudios que han tratado el tema de la cuantificación de la fuga de gas natural en instalaciones. En este apartado, se realiza una revisión bibliográfica que permitirá tener una buena base y dar un punto de partida al trabajo. Además, permitirá conocer si existen coincidencias entre estas investigaciones previas y los resultados de este estudio.

En primer lugar, se han estudiado dos referencias (Ebrahimi-Moghadam, Farzaneh-Gord, Arabkoohsar, & Moghadam, 2018) (Ben-Mansour, Habib, Khalifa, Youcef-Toumi, & Chatzigeorgiou, 2012) como una buena introducción al campo de las simulaciones CFD de fugas de gas natural por orificios en tuberías. En el primero se realizaron una serie de simulaciones de fugas de gas natural en tuberías

enterradas y al aire libre caracterizando al flujo como compresible y turbulento. Las conclusiones a las que llegan los dos artículos son:

- Las diferencias entre los resultados de las fugas por orificios en la pared de tuberías obtenidos mediante simulaciones 2D y 3D eran insignificantes. Por lo tanto, si se realizan simulaciones 2D con mallas de gran calidad, se obtienen resultados análogos a los que se obtendrían con simulaciones 3D, pero ahorrando una gran cantidad de tiempo de computación. Así, en este trabajo se trabajará con simulaciones CFD en 2D.
- La variación del caudal de fuga se ve mucho más afectada por la variación del diámetro del orificio en tuberías enterradas que en tuberías al aire libre debido a la mayor resistencia del suelo. Esta resistencia, además, hace que mientras que, en el rango de los 3 a 5 bares, el flujo alcanza velocidades sónicas en las tuberías al aire libre, en las tuberías enterradas el flujo es subsónico. Este resultado no ha sido corroborado en las pruebas a escala de laboratorio realizadas en el LIFTEC.
- El caudal de las fugas por orificios tiene una dependencia lineal con la presión en el interior de la tubería, cuadrática con el diámetro del orificio (o una relación proporcional al área) y dependen del factor  $(d_{\text{orificio}}/D_{\text{tubería}})$  elevado a la cuarta.

No obstante, existen diferencias entre este estudio y el presente trabajo. Este estudio trataba acerca de orificios con diámetros de varias decenas de milímetros mientras que en el presente trabajo los diámetros que se estudian son menores a la unidad. Por otra parte, el estudio se limita al estudio en el rango de los 3 a los 5 bares absolutos en el interior de la tubería, al contrario de este trabajo que centra su interés especialmente en los casos con bajas presiones.

Por otra parte, se ha realizado una revisión bibliográfica de diferentes artículos en que tratan la determinación cuantitativa de fugas de manera empírica y obteniendo ecuaciones específicas para fugas por orificios, en el caso de flujo compresible. Uno de ellos (Gil & Berton) es una de las principales referencias para el banco de ensayos utilizado en este trabajo. En él se realiza una descripción de un método experimental basado en la observación de la evolución temporal de la presión en

un recinto cerrado con una fuga de gas, realizando un registro continuo de la presión en el interior de una cámara, además de otras variables como la temperatura, mediante una serie de sensores conectados a sistemas automáticos de toma de datos en un ordenador.

Además, se han estudiado otros artículos (Hord, 1967) (Bomelburg, 1977)\_(Aritomi, Asano, Li, & Asano, 1994) que permiten llegar a las siguientes conclusiones:

- En los casos de fuga por orificios, si el número de Reynolds es lo suficientemente grande, para un mismo orificio se puede suponer un coeficiente de descarga prácticamente constante cuando fugan distintos fluidos bajo diferentes condiciones interiores como la temperatura.
- La geometría que describe el flujo de fuga no cambia con la temperatura. La asunción de factores de fricción constantes requiere números de Reynolds relativamente grandes.
- Existe una presión crítica por debajo de la cual es necesario introducir un coeficiente en las ecuaciones de flujo compresible para ajustarse a la realidad de las fugas, especialmente en las zonas con baja diferencia de presiones.

Este trabajo se basa especialmente uno de ellos (Bomelburg, 1977), un estudio bibliográfico amplio que tiene el objetivo de realizar una compilación de ecuaciones que estiman las fugas de gas a través de pequeños orificios. Son las expresiones que aparecen en dicho artículo las que se utilizan en el capítulo 5 y que, además, se encuentran en la norma UNE 202007:2006 IN.

---

### **1.3 Estructura del trabajo**

---

Tras haber realizado una pequeña aproximación a las fugas de gas natural por pequeños orificios y haber expuesto los objetivos de este trabajo, se realiza una descripción de la estructura del trabajo.

En el capítulo 2 se describen las diferentes pruebas realizadas hasta llegar a la configuración empleada para las simulaciones CFD: se evalúa la geometría, la malla, el modelo turbulento utilizado, los residuos y número de iteraciones, etc.

A continuación, en el capítulo 3 se exponen los resultados de las simulaciones CFD y se realiza un análisis de los mismos a partir de distintos perfiles de presión, temperatura o densidad, además de la evaluación numérica de los caudales de fuga por los orificios.

En el capítulo 4 se realiza una descripción del banco de ensayos y se analizan los resultados empíricos obtenidos a partir de este banco, empleándolos para dar validez al modelo CFD. Seguidamente, en el capítulo 5 se realiza una exposición de la teoría de flujo compresible 1-D y la elaboración de nuevos modelos viscosos compresibles debidos a la limitación teórica actual para caracterizar las fugas por orificios de pequeño diámetro. Además, se propone un método de conversión de flujo de aire a metano.

Para finalizar, se exponen las conclusiones del trabajo en el capítulo 6.



**MODELO COMPUTACIONAL**

Como se ha comentado, para realizar las simulaciones se utilizará el programa de simulación CFD, ANSYS Fluent (ANSYS ®). Así, este segundo capítulo está dedicado a la exposición del modelo utilizado para las simulaciones. En primer lugar, se realiza una descripción del modelo base (geometría, condiciones de contorno, etc.) tras realizar un análisis de la influencia en los resultados de determinados parámetros asociados al cálculo computacional, análisis disponible en el Anexo B. El capítulo finaliza con la presentación de una síntesis de las características más relevantes para el modelo.

**2.1 Exposición del modelo utilizado en las simulaciones**

---

La fuga tiene lugar en tuberías a través de algún orificio de reducidas dimensiones o poro en la pared. El diámetro de la tubería puede variar entre 20 y 300 mm. El espesor de la pared del tubo oscila entre 1 y 5 mm. El diámetro de los orificios que se pretende estudiar es inferior a 1 mm. La presión manométrica en la tubería puede ir desde 25 mbar a 6 bar.

**2.1.1 Geometría**

Para el estudio se ha decidido utilizar una geometría 2D axisimétrica (ver Figura 2.1) dividida en tres partes: la parte 1 se corresponde con la zona de descarga de

la fuga, la 2 representa el interior de la tubería, mientras que la zona número 3, inapreciable por sus dimensiones en la vista general de la geometría, es el orificio en la pared de la tubería. En la Figura 2.2 se muestra una vista ampliada de la zona del orificio, correspondiente al círculo señalado en la Figura 2.1.

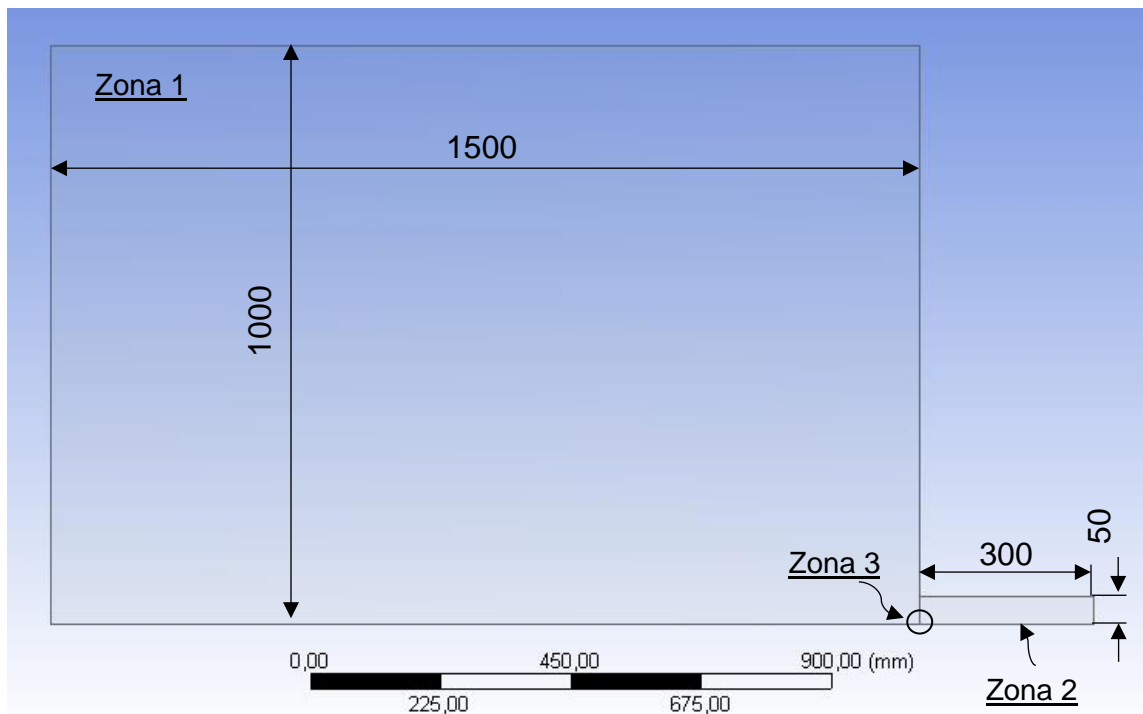


Figura 2.1. Geometría utilizada en las simulaciones

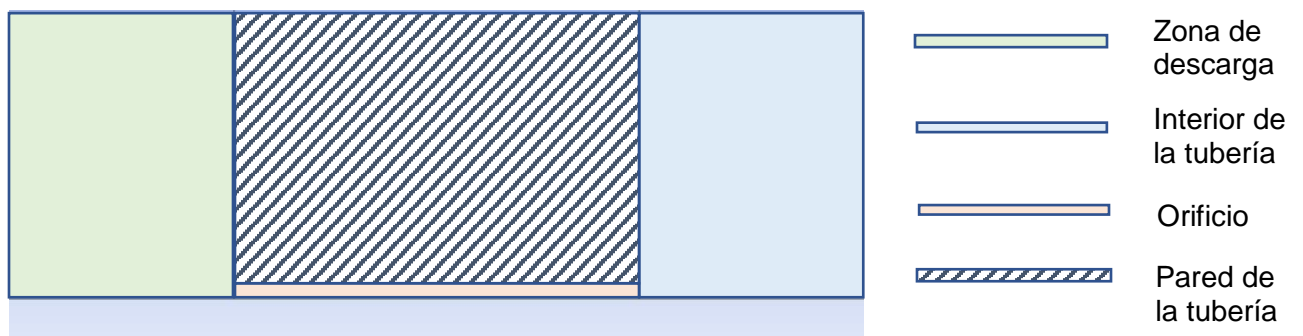


Figura 2.2. Ampliación de la zona del orificio

La zona 1 tiene unas dimensiones de 1500x1000 mm, suficientemente grandes para poder situar las condiciones de contorno en una zona alejada del orificio. En el siguiente apartado se realiza un análisis de estas dimensiones, ya que la

distancia entre el orificio y los límites de la zona 1 pueden influir en el flujo de gas a través del orificio, determinado mediante las simulaciones.

La zona 2 cuenta con unas dimensiones fijas de 300x50 mm. También se analizó la influencia de estas dimensiones sobre la fuga, comprobándose que no tienen ningún efecto cuando la distancia desde el orificio al contorno de entrada de flujo es mayor de 100 mm.

Por último, la zona 3 tiene la dimensión del radio del orificio a estudiar en la dirección del eje y, y 2 mm de longitud en la dirección del eje x, que representa el espesor del tubo. Como se ha comentado, el espesor del tubo puede variar, y esta dimensión afecta el nivel de la fuga, pero se ha decidido fijar este valor en 2 mm, que es el espesor de los orificios calibrados que se utilizarán en las pruebas experimentales.

### 2.1.2 Mallado de la geometría

Se ha realizado un mallado de tipo rectangular con mayor densidad de elementos en la zona del orificio. El mallado tiene elementos con longitud característica de 10  $\mu\text{m}$  en el orificio y de 1 mm en el dominio de la tubería y la cámara de aire. Los mallados realizados poseen más de 1,5 millones de celdas. La cantidad total de elementos varía ligeramente al modificar el diámetro del orificio. En la Figura 2.3 se muestra una ampliación de la malla en la zona del orificio, para el caso de un orificio con radio de 0,263 mm y una longitud de 2 mm.

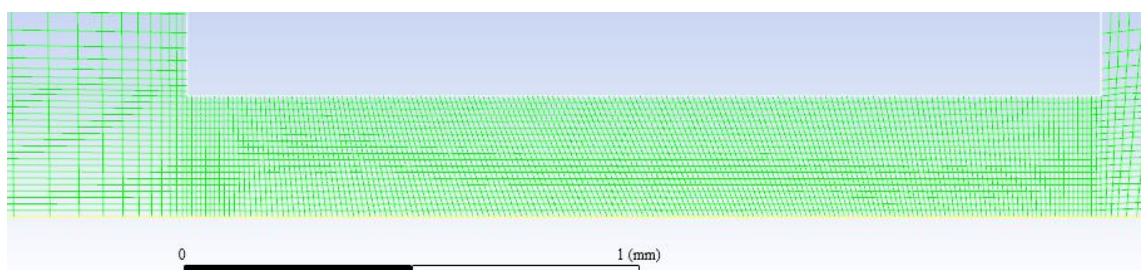


Figura 2.3. Mallado la zona del orificio

### 2.1.3 Modelado de la física del problema

Para realizar las simulaciones se considera flujo estacionario, axisimétrico con formulación basada en la presión absoluta.

Se utiliza la ecuación de la energía, ya que se esperan cambios de temperatura relevantes por la compresibilidad del fluido.

Se considera que el flujo por el orificio es turbulento, utilizando el modelo k- $\epsilon$  para describir la turbulencia, cuyas ecuaciones se detallan en el Anexo A (Zhang, Jin, Wang, Deng, & Ren, 2011). En la Figura 2.4 se muestran las características del modelo de turbulencia.

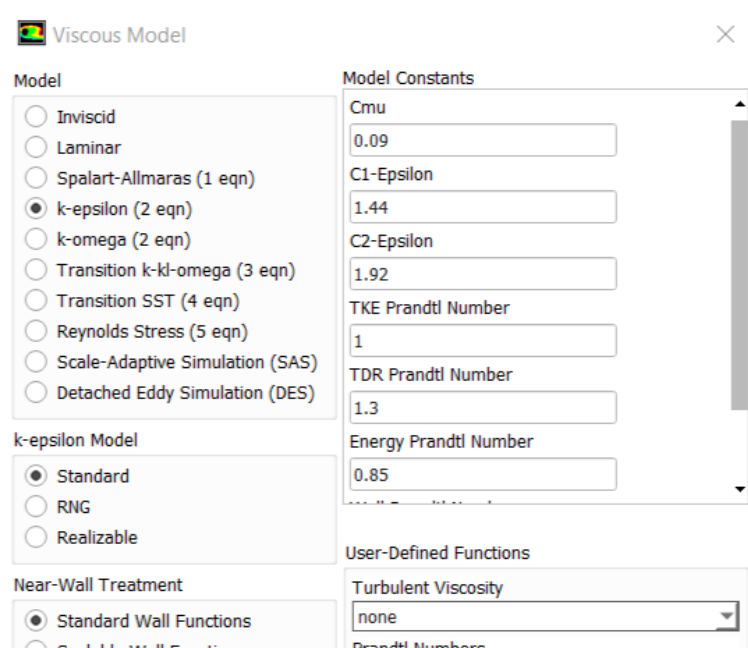


Figura 2.4. Características del modelo de turbulencia utilizado

### 2.1.4 Características de los fluidos utilizados

Los fluidos utilizados en las simulaciones son aire y metano, ambos con un modelo de densidad de gas ideal. El resto de propiedades se considera constante. En la Figura 2.5 se muestran las propiedades de ambos fluidos.

The figure displays two side-by-side screenshots of a software interface titled 'Create/Edit Materials'. Each interface has a top section for material identification and a bottom 'Properties' section.

**Left Interface (Air):**

- Name:** air
- Material Type:** fluid
- Chemical Formula:** (empty)
- Fluent Fluid Materials:** air
- Mixture:** none
- Properties:**
  - Density (kg/m3):** ideal-gas
  - Cp (Specific Heat) (j/kg-k):** constant, 1006.43
  - Thermal Conductivity (w/m-k):** constant, 0.0242
  - Viscosity (kg/m-s):** constant, 1.7894e-05
  - Molecular Weight (kg/kmol):** constant, 28.966

**Right Interface (Methane):**

- Name:** methane
- Material Type:** fluid
- Chemical Formula:** ch4
- Fluent Fluid Materials:** methane (ch4)
- Mixture:** none
- Properties:**
  - Density (kg/m3):** ideal-gas
  - Cp (Specific Heat) (j/kg-k):** constant, 2222
  - Thermal Conductivity (w/m-k):** constant, 0.0332
  - Viscosity (kg/m-s):** constant, 1.087e-05
  - Molecular Weight (kg/kmol):** constant, 16.04303

Figura 2.5. Propiedades del aire y del metano

La fuga podría estar afectada por los cambios de temperatura del gas en el orificio, que pueden hacer variar el calor específico y la viscosidad. Esta posible influencia de la temperatura en las propiedades también ha sido analizada, comprobándose que su incidencia sobre el flujo de gas por el orificio es despreciable (ver análisis realizados en el apartado 2.2.6).

### 2.1.5 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno establecidas son las siguientes:

- Presión absoluta a la entrada. Este parámetro es variable para poder analizar su influencia en la fuga
- Presión absoluta a la salida. En este contorno se sitúa la presión atmosférica
- Eje de simetría
- Pared lisa adiabática

En la Figura 2.6 se muestran los contornos establecidos.

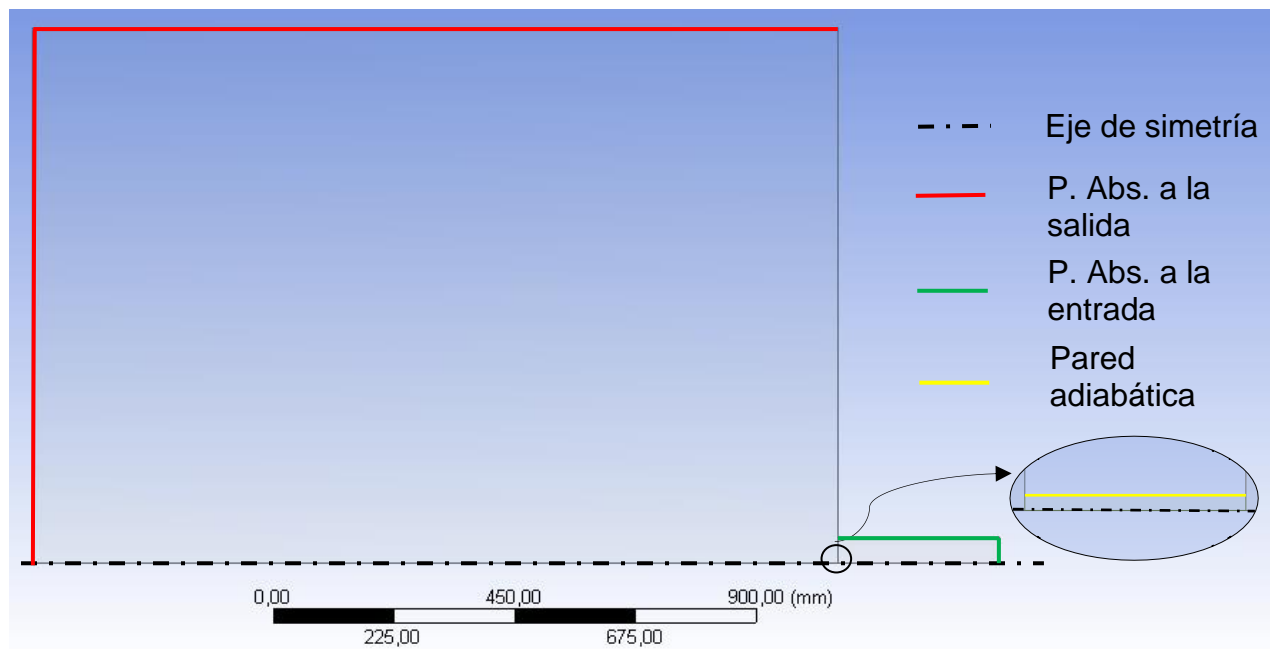


Figura 2.6. Contornos del problema

Si bien la pared del orificio posiblemente no es perfectamente lisa, se considera que esta simplificación es adecuada, siempre y cuando se cumpla que el espesor de la capa límite (o, en flujo turbulento, de la subcapa límite laminar) es superior a la rugosidad de la pared. Por lo tanto, se trata de comprobar si realmente la subcapa límite laminar se desarrolla con espesores mayores a la rugosidad propia de los materiales que componen las tuberías. En este trabajo se analiza una tubería con paredes de acero inoxidable, cuya rugosidad se sitúa en valores cercanos a los 0,002 mm (White, 2008).

### 2.1.6 Método de solución de las ecuaciones

Se ha utilizado un método de solución de las ecuaciones con acoplamiento de la velocidad y la presión mediante un esquema simple combinado, con discretización espacial del gradiente por mínimos cuadrados en las celdas y solución de segundo orden aguas arriba para todas las ecuaciones. En la Figura 2.7 se muestra el método empleado.

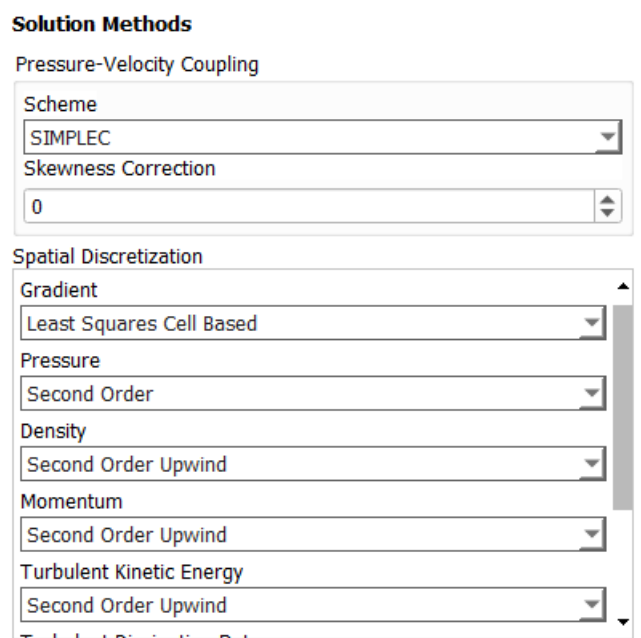


Figura 2.7. Opciones seleccionadas en Fluent para la solución de las ecuaciones

## 2.2 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presenta el modelo mediante el cual se realizarán las simulaciones CFD de fugas por orificios obtenido a partir de un análisis justificativo de sus características.

De manera resumida, se puede concluir que:

- a) Se ha realizado un estudio de la evolución de los residuos y se han fijado unos criterios de convergencia por encima de  $10^{-7}$  para todas las variables. Asimismo, se ha establecido un número máximo de 8000 iteraciones para la detención del cálculo.
- b) La cámara externa de aire será de 1500x1000 mm para que sus condiciones de contorno no afecten el flujo de fuga por el orificio, minimizando los errores de cálculo.

- c) La longitud característica de los elementos de la malla en el orificio será de 10  $\mu\text{m}$  y la de los elementos de la cámara y la tubería de 1 mm, resultando una malla con alrededor de 1536770 elementos.
- d) No es admisible la suposición de flujo laminar ni tampoco son admisibles los resultados obtenidos con modelos de turbulencia más complejos, por lo que se utilizan las ecuaciones k-epsilon para el cálculo del flujo turbulento.
- e) Tampoco es admisible la suposición de flujo incompresible, por lo que se considera el aire (o metano) como un gas ideal.
- f) La influencia de la temperatura en el calor específico y en la viscosidad pueden descartarse, ya que no afectan al flujo de gas por el orificio.
- g) El proceso de mezclado exterior no influye en el flujo que pasa por el orificio.



## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES CFD

Una vez justificadas la geometría y el mallado del modelo, así como la configuración de la física del problema y la metodología CFD utilizada para la obtención de resultados a partir de simulaciones, en este capítulo se realiza un análisis de los resultados obtenidos. Se disponen de tablas y gráficos en el Anexo C.

### 3.1 Análisis de los resultados

---

#### 3.1.1 Aire

Los resultados muestran grandes diferencias entre los casos sónicos y subsónicos. En la Figura 3.1 se representa el flujo másico que circula por el orificio para todos los casos estudiados para el aire, unidos por una curva continua. Existe una diferencia palpable entre la zona con flujo subsónico y flujo sónico. En la zona sónica existe una dependencia de tipo lineal del flujo por el orificio con respecto a la presión de operación de la tubería. Sin embargo, esta dependencia no se mantiene en la zona subsónica. Tal y como se analizará en capítulos posteriores, esta diferencia se explica por la influencia de los efectos viscosos, que no pueden ser despreciados en la zona subsónica esencialmente por la gran diferencia en cuanto al número de Mach, como se puede apreciar en la Figura C.2.

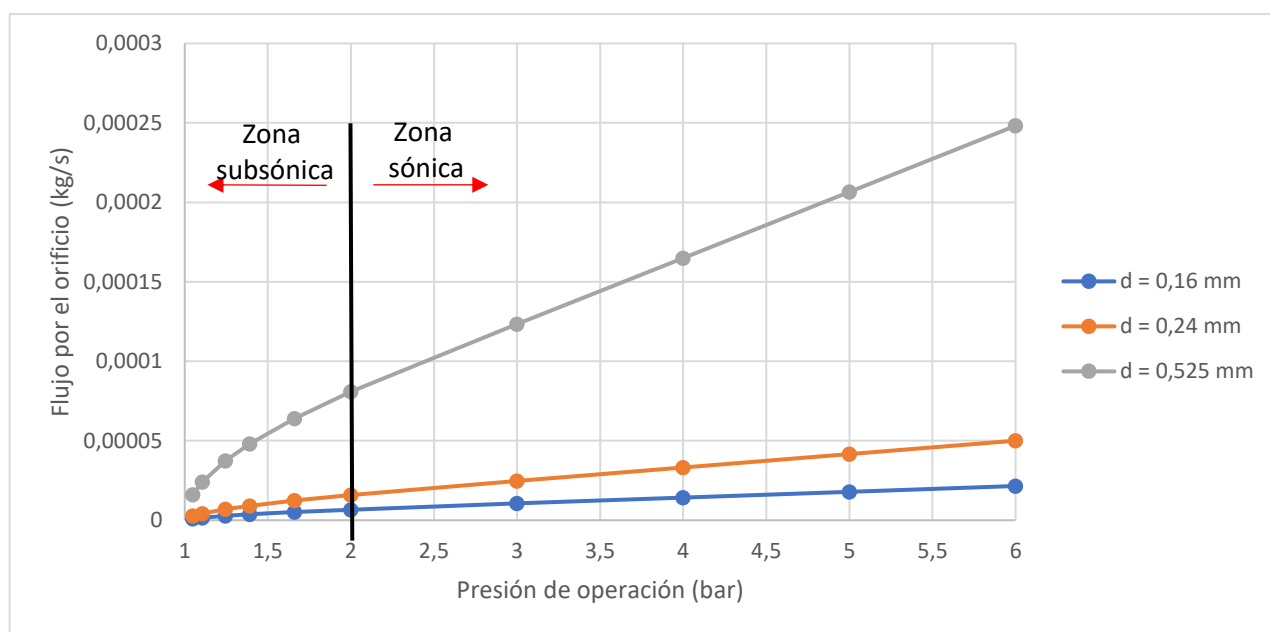


Figura 3.1. Evolución del flujo por el orificio según la presión de operación. Aire.

En el sentido de lo mencionado anteriormente, al comparar los resultados obtenidos para la misma presión de operación y distintos diámetros del orificio, se observa que en la zona sónica se puede establecer una relación entre el área de los orificios (dependiente del diámetro) y la cantidad de aire que se fuga, especialmente cuanto mayor es la diferencia entre la presión de operación y la de descarga, como se ilustra en las tablas 3.1 y 3.2. Es decir, para los casos sónicos, partiendo de una medida concreta para un determinado tamaño de orificio, se podría realizar una estimación de la fuga por un orificio de distinto tamaño, ya que existe cierta proporción entre la razón de áreas y la de fuga, que se mantiene aproximadamente constante para distintas presiones de trabajo en el rango estudiado.

Tabla 3.1 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación: 3,040 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
3,040	0,16	0,0201	1	$1,0579 \cdot 10^{-5}$	1
3,040	0,24	0,0452	2,25	$2,4711 \cdot 10^{-5}$	2,336
3,040	0,525	0,2165	10,77	$1,2343 \cdot 10^{-4}$	11,667

Tabla 3.2 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación 5,067 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
5,067	0,16	0,0201	1	$1,7867 \cdot 10^{-5}$	1
5,067	0,24	0,0452	2,25	$4,1577 \cdot 10^{-5}$	2,327
5,067	0,525	0,2165	10,77	$2,0656 \cdot 10^{-4}$	11,56

Por otra parte, cuanto menor es la diferencia entre la presión de operación y la de descarga, mayor es la dificultad para atisbar una relación, independiente de la presión, entre el flujo y el área del orificio, siendo imposible obtenerla para los casos subsónicos. Las tablas 3.3 y 3.4 pretenden ser una ilustración de estos hechos, conteniendo resultados para presiones de operación cercanas a la presión de descarga.

Tabla 3.3 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación: 1,049 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
1,049	0,16	0,0201	1	$9,78 \cdot 10^{-7}$	1
1,049	0,24	0,0452	2,25	$2,7072 \cdot 10^{-6}$	2,769
1,049	0,525	0,2165	10,77	$1,6043 \cdot 10^{-5}$	16,407

Tabla 3.4 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación 1,2626 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
1,262	0,16	0,0201	1	$2,74 \cdot 10^{-6}$	1
1,262	0,24	0,0452	2,25	$6,9152 \cdot 10^{-6}$	2,528
1,262	0,525	0,2165	10,77	$3,7447 \cdot 10^{-5}$	13,688

La Figura 3.2 refleja lo comentado en este apartado. Como se puede observar, conforme aumenta la presión en la tubería, menor es la diferencia entre la relación  $\dot{m}/\dot{m}_{base}$  frente a  $A/A_{base}$  para los distintos casos, siendo inexistente para los casos sónicos con presión mayor o igual a 3 bar. Para todos ellos,  $\dot{m}_{base}$  y  $A_{base}$  se corresponden con el flujo másico y área del orificio con diámetro 0,16 mm. La Figura

3.3 muestra lo mismo que la 3.2 pero mostrando únicamente los casos con presiones entre 3,040 y 6,079 bar entre los que las diferencias son mínimas.

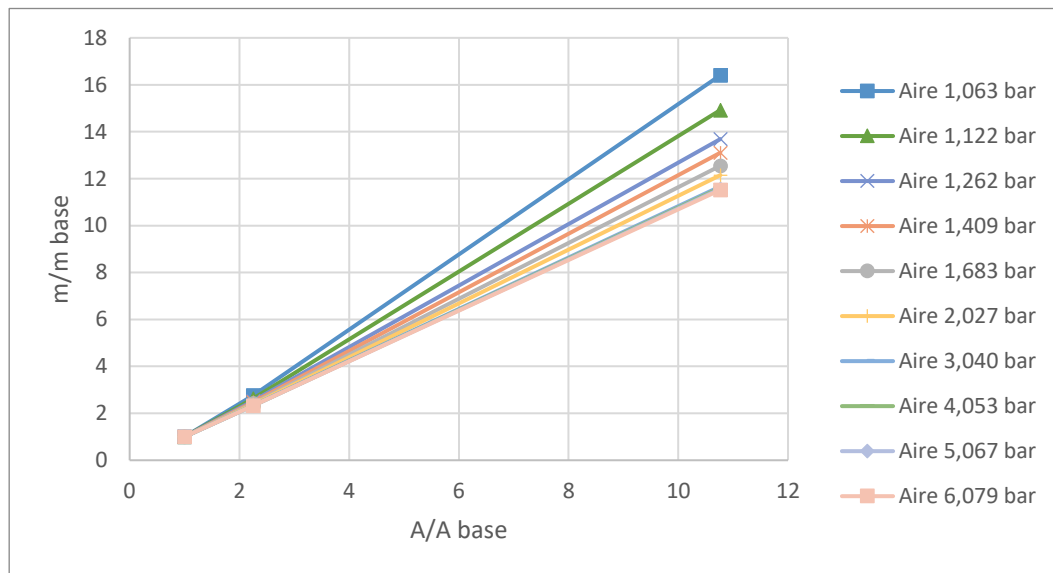


Figura 3.2. Relaciones de flujo y áreas todos los casos. Aire.

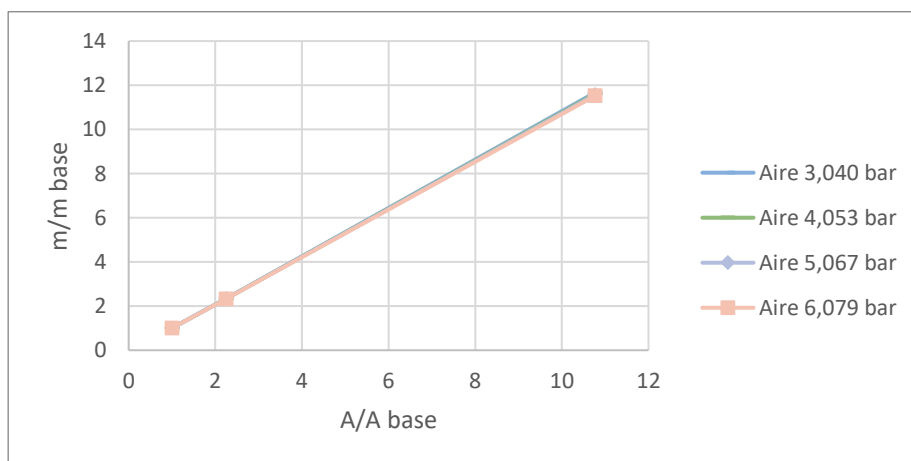


Figura 3.3. Relaciones de flujo y áreas casos con alta presión. Aire.

### 3.1.2 Metano

Al igual que en el caso del aire, se realiza un pequeño análisis de los resultados obtenidos para el metano. La Figura 3.4, análoga a la 3.1, refleja las diferencias señaladas entre la zona sónica y subsónica, siendo en esta última donde se desdibuja la relación de tipo lineal del flujo por el orificio con la presión.

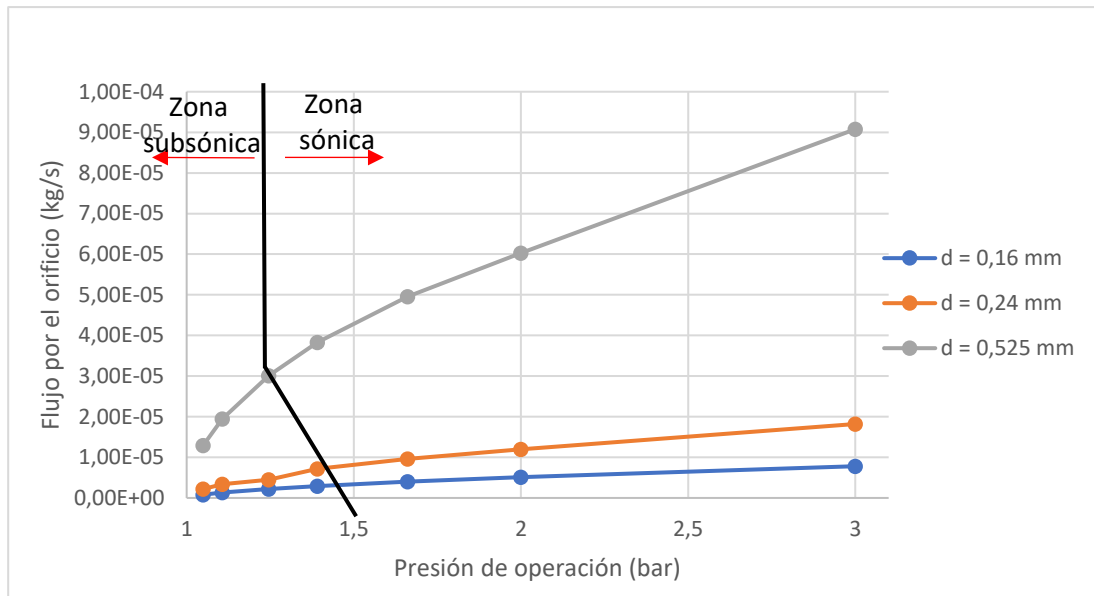


Figura 3.4. Evolución del flujo por el orificio según la presión de operación. Metano.

Se confirma que no se trata de una tendencia solamente para el aire, sino que es un comportamiento extensible al conjunto de los gases. Por otra parte, se presentan también las Figuras 3.5 y 3.6, análogas a la 3.2 y 3.3, observándose las diferencias entre la relación  $\dot{m}/\dot{m}_{base}$  frente a  $A/A_{base}$ , siendo inexistente la linealidad en esta relación para los casos subsónicos y no observándose diferencias para los casos con presión mayor o igual a 2,027 bar.

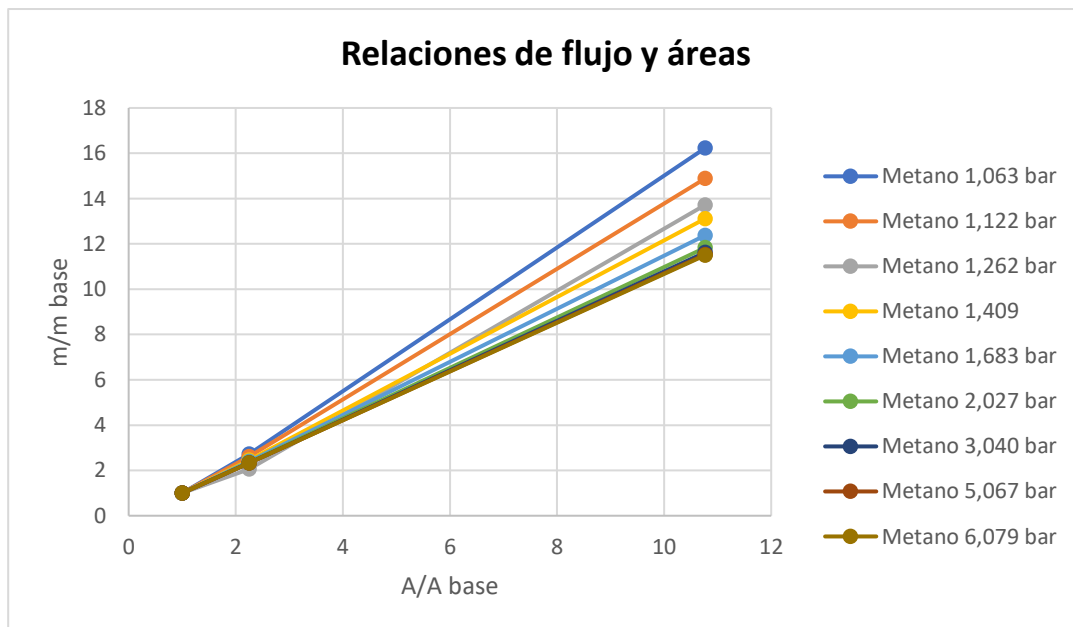


Figura 3.5. Relaciones de flujo y áreas todos los casos. Metano.

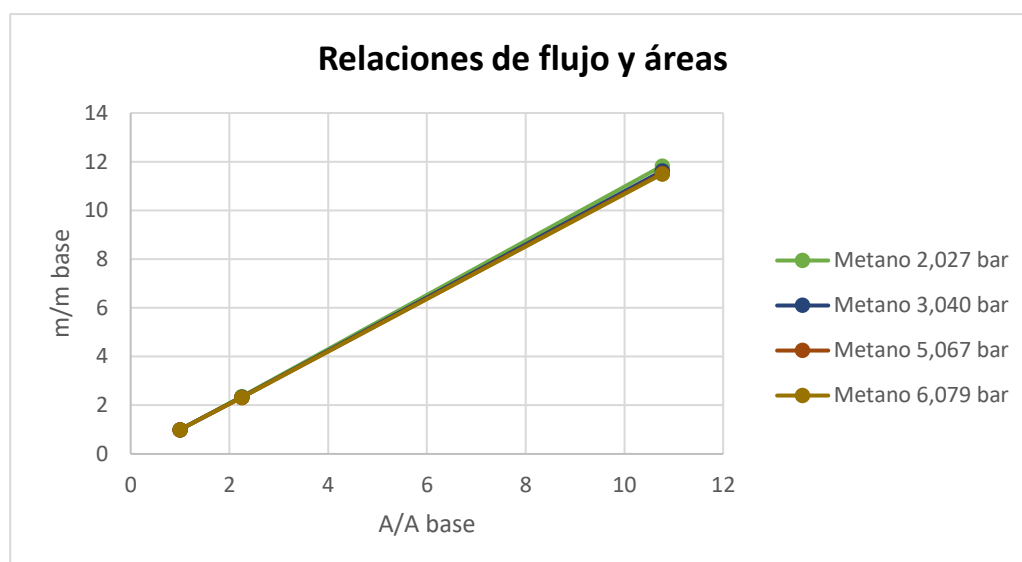


Figura 3.6. Evolución del flujo por el orificio según la presión de operación. Metano.

### 3.1.3 Comparación de resultados: aire y metano

En este apartado se realiza una pequeña comparación de los resultados obtenidos para el aire y el metano, prestando especial atención a los contornos de presión, velocidad, temperatura y densidad, pues como ya se ha comentado, ambos gases se ven afectados por los efectos de la viscosidad, cumpliendo la dependencia lineal con la presión y el área únicamente en los casos con régimen sónico.

Antes de señalar las diferencias entre los resultados de ambos gases, se presenta la Tabla 3.5 que contiene algunas propiedades que caracterizan cada uno de estos gases.

Tabla 3.5: comparación de propiedades. Aire y metano.

Propiedad (20°C y 1 bar)	Aire	Metano
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	1,024	0,659
Viscosidad [N·s/m <sup>2</sup> ]	1,81	2,0
Coefficiente de dilatación adiabática	1,4	1,31
Constante particular [J/kg·K]	287	518,35

Como se puede ver, el metano es un gas bastante más ligero que el aire y, por otra parte, cuenta con una constante particular que es 1,8 veces la del aire, por lo que, a volumen constante, una misma variación en términos de presión afecta en mayor medida al cambio de temperatura. En ese sentido, se puede ver como para la misma diferencia de presiones, el contorno de temperatura de un caso sónico ( $P =$

4,053 bar) es completamente distinto comparando el aire con el metano, no en cuanto a su perfil sino en cuanto al orden de la magnitud. Mientras que en el caso del aire se producen enfriamientos bruscos del orden de 60-70 K en la zona de salida del orificio, en el caso del metano, este enfriamiento llega a los 200 K.

En la Figura 3.7 se muestra la comparación de los contornos de T para los dos casos analizados.

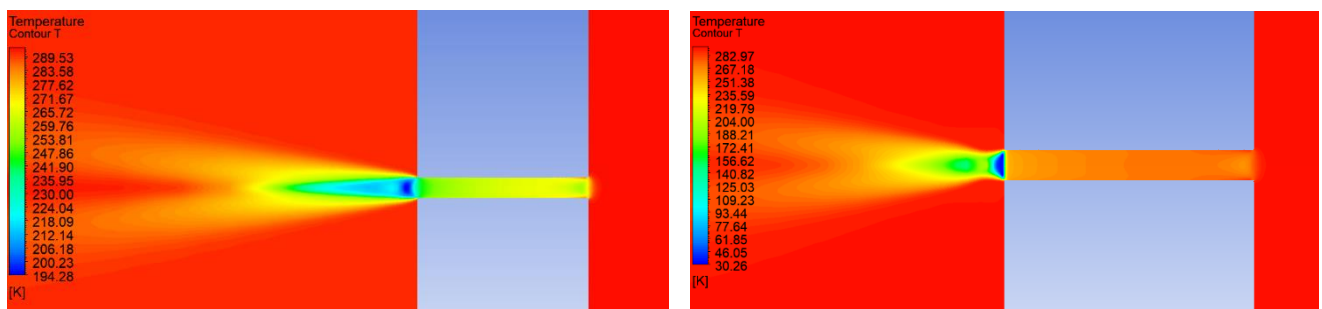


Figura 3.7. Contorno de temperatura. P = 4 bar. Aire (izquierda) y metano (derecha).

Las diferencias en los perfiles de temperatura influye notablemente en la variabilidad de la densidad que experimenta el metano en comparación con la del aire a la salida del orificio, como se puede apreciar en la Figura 3.8.

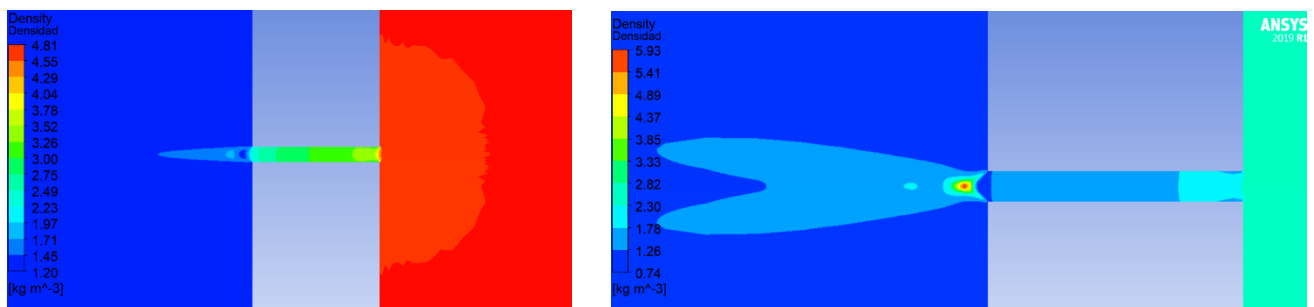


Figura 3.8. Contorno de densidad. P = 4 bar. Aire (izquierda) y metano (derecha).

Por otra parte, prestando atención a la Figura 3.4, se puede ver como la mayor viscosidad del metano hace que incluso en el rango de bajas presiones de la zona sónica no exista la dependencia lineal del flujo con la presión en la tubería, cosa que no sucede en la Figura 3.1. Se puede afirmar que, cuanto mayor sea la viscosidad del gas, mayor es el error cometido al despreciar los efectos viscosos, incluso para casos sónicos con números de Mach no muy alejados de la unidad.

### **3.2 Conclusiones parciales**

---

En este capítulo, además de analizar los resultados obtenidos mediante las simulaciones CFD, se ha realizado una introducción a la temática que se estudiará con mayor profundidad en el capítulo 5, que consiste en identificar las diferencias que existen entre los regímenes sónicos y subsónicos, así como, las limitaciones de la consideración de flujo compresible adiabático sin fricción, especialmente en la zona subsónica, objeto de estudio en este trabajo.

Las principales conclusiones obtenidas de este capítulo son las siguientes:

- El error en el cálculo del flujo por el orificio que arrojan las simulaciones CFD es más que aceptable, situándose no más allá del 0,18% en los casos más desfavorables
- Existen grandes diferencias en el comportamiento general de los gases entre los casos sónicos y subsónicos. Como se aprecia en las figuras que ilustran los contornos de presión, velocidad, número de Mach, temperatura y densidad, existen diferencias tanto a lo largo del orificio como en su descarga a la cámara externa.
- Para la misma diferencia de presión entre la tubería y el exterior se ha comprobado que parámetros como la temperatura cuentan con una mayor variabilidad en el metano que en el aire, a consecuencia de la diferencia de propiedades entre los dos gases
- Los efectos viscosos son de mayor magnitud en el metano (con mayor viscosidad), así que, tener en consideración la fricción parece ser más importante al evaluar fugas de este gas, logrando resultados más ajustados a la realidad
- Si bien hay que tener en cuenta las particularidades de gas se han constatado dos tendencias. En los casos con flujo sónico, existe una dependencia lineal del flujo por el orificio con la presión de operación. Asimismo, conociendo una medida puntual de la fuga de un determinado gas con una presión de operación y diámetro del orificio determinados, se podría



realizar una estimación de la fuga de ese mismo gas por un orificio con un diámetro diferente e incluso trabajando a otra presión de operación, siempre que se mantenga dentro del régimen sónico.

- La evolución del comportamiento de los gases en regímenes subsónicos es mucho más complicada de describir que en los regímenes sónicos. Además, este comportamiento es similar para el aire y el metano, por lo que resulta interesante establecer algún tipo de análisis dimensional para explicar el comportamiento del conjunto de los gases, particularizando posteriormente para cada uno de ellos en función de sus propiedades. En estas cuestiones se profundizará en próximos capítulos.

## **BANCO DE ENSAYOS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES**

En este capítulo se realiza una descripción tanto del banco de ensayos experimentales como de la metodología para la realización de las mediciones. También se incluye el análisis de las incertidumbres, el método de tratamiento estadístico de los datos experimentales, y un análisis al respecto.

### **4.1 Descripción del banco de ensayos**

---

El banco de ensayos consiste en un contenedor de tipo prismático donde se colocan las probetas a evaluar (tramos de tubería con fuga real o con orificio calibrado). Este contenedor está preparado para analizar las probetas cubiertas de arena, simulando así las condiciones de operación reales. La otra parte del banco son las probetas debidamente preparadas, es decir, cerradas por ambos extremos, y con las conexiones necesarias para poder medir los cambios de presión y temperatura durante el tiempo del ensayo. Para este estudio se han utilizado diferentes probetas de calibración, que son recipientes cilíndricos, cada uno de los cuales posee un orificio calibrado en uno de sus extremos. Los diámetros de orificio ensayados, como se ha mencionado en capítulos anteriores son 0,16; 0,24 y 0,525 mm. Por otra parte, el banco está equipado con la instrumentación necesaria para realizar las mediciones: transductores de presión manométricos, transductores de



superficial. En la Figura 4.2 se muestran diferentes imágenes de una de las probetas con orificio calibrado.



Figura 4.2. Detalles de una de las probetas con orificio calibrado

En la Figura 4.1 se muestra que la instalación dispone de varios medidores de presión (cada uno preparado para realizar mediciones en distintos rangos) y termopares situados en diferentes partes del contenedor (para comprobar temperaturas en el exterior, el relleno y los diferentes volúmenes), pero para el presente estudio únicamente se han utilizado los siguientes instrumentos:

- Un transductor de presión manométrica, PX419-100 GI, que mide en un rango desde los 0 hasta los 6,9 bar manométricos con una exactitud del 0,08% y está situado en el “volumen de referencia” como se muestra en la Figura 4.1.
- Una sonda de temperatura PT100 clase A, con una exactitud de  $\pm 0,15$  K, colocada en el interior de la probeta.

Además, se dispone de un ordenador en el que se registran las medidas segundo a segundo.

## 4.2 Metodología del ensayo

---

El ensayo consiste en la medición continua de la presión y la temperatura en el interior de la probeta mediante el transductor de presión manométrica y la sonda de temperatura descritos en el apartado anterior, para el posterior cálculo del flujo másico por el orificio. En todos los ensayos realizados se dispone de medidas discretas tomadas cada segundo.

El procedimiento comienza con el llenado y aumento de la presión en la probeta. Tras cerrar todas las válvulas, el único lugar por donde puede fugar el gas es por el orificio calibrado de la probeta. Así, la presión en el interior de la probeta irá disminuyendo progresivamente. Las mediciones válidas se contabilizan a partir del momento en que desaparecen las fluctuaciones de temperatura debidas al proceso de presurización de la instalación, así que, la probeta se debe presurizar hasta un nivel de presión ligeramente superior al valor a partir del cual se desea realizar el ensayo. Las medidas finalizan cuando el diferencial de presión entre la probeta y el aire exterior tiende a cero (presión manométrica nula).

El flujo másico de gas que fuga por un orificio se determina a través de la evolución temporal de la presión dentro del recipiente de volumen constante y conocido que contiene el gas. La fuga se produce por la diferencia de presión que existe entre el gas en la probeta y el aire en el exterior (a presión atmosférica en todos los ensayos). Así, la expresión con la que se obtiene el flujo másico que fuga por el orificio es:

$$\dot{m}_g = \frac{\alpha'}{T} \frac{\Delta P}{\Delta t} \quad (4.1)$$

donde  $\alpha' = \frac{M_{mol} \cdot V}{R}$  se obtiene a partir de la ecuación de los gases ideales

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T = \frac{m_g}{M_{mol}} R \cdot T \quad (4.2)$$

$$m_g = \frac{M_{mol} \cdot V}{R \cdot T} P = \frac{\alpha'}{T} P \quad (4.3)$$

donde  $V$ , se corresponde con el volumen del recipiente,  $R$  es la constante universal de los gases ( $8314 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ),  $M_{mol}$  es el peso molecular del gas,  $T$  es la temperatura del gas en la probeta y,  $P$ , es la presión absoluta a la que se encuentra.

Asumiendo que la variación instantánea de la temperatura es despreciable, las variaciones temporales de la masa de gas se pueden explicar mediante la evolución temporal de la presión:

$$\dot{m}_g = \frac{dm_g}{dt} = \frac{M_{mol} \cdot V}{R \cdot T} \frac{dP}{dt} = \frac{\alpha'}{T} \frac{dP}{dt} \quad (4.4)$$

Así, la expresión final que se utiliza para calcular el flujo de fuga en la medida,  $n$ , es la siguiente:

$$\dot{m}_{g,n} = \frac{M_{mol} \cdot V}{R \cdot T_n} \frac{[P_n - P_{n-1}]}{\Delta t} \quad (4.5)$$

Como se ha comentado la variación instantánea de la temperatura se considera despreciable, pero, en realidad, a lo largo del ensayo se producen ligeras variaciones de la temperatura, ya que los ensayos tienen una duración aproximada de una hora. Aunque, entre el inicio y el final del ensayo no suele existir una variación de la temperatura superior a unas décimas de grado, se ha considerado en los cálculos la variación de la temperatura para incrementar la exactitud de los resultados. Por otra parte, para todos los ensayos se ha considerado que el volumen de gas en el interior de la instalación es de 7,07 l, obtenido como la suma de los volúmenes de la probeta (2 l), de un recipiente extra de 5 l, utilizado para aumentar el tiempo de ensayo, y del interior de los conductos de conexión (0,07 l).

### 4.3 Incertidumbre en las mediciones y su procesado

---

Este apartado se dedica a la evaluación de la incertidumbre del flujo másico por el orificio, calculada a partir de las medidas experimentales. El valor del flujo, en conjunto con su incertidumbre, se utiliza en la comparación de los resultados experimentales con los resultados de las simulaciones CFD y con los calculados realizados utilizando la teoría de flujo compresible sin fricción.

Para el cálculo de la incertidumbre del flujo se utiliza, en primer lugar, el método de propagación de errores, que permite estimar el error asociado a magnitudes calculadas a partir de otras, es decir, de mediciones indirectas.

El método de propagación de errores se basa en el cálculo de la incertidumbre de la magnitud calculada a partir de las incertidumbres de cada una de las medidas, suponiendo que éstas no están correlacionadas entre sí.

$$U_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial y}{\partial x_i} U_{x_i} \right)^2} \quad (4.6)$$

donde  $U_y$ , se corresponde con la incertidumbre de la magnitud  $y$ , mientras que la incertidumbre asociada a cada uno de los parámetros medidos  $x_i$  es  $U_{x_i}$ .

Para desarrollar la ecuación (4.6) se parte de la expresión utilizada para obtener el flujo que fuga por el orificio a partir de las medidas experimentales (ec. 4.5). Según el método de propagación de errores, despreciando las incertidumbres en la medida del volumen y en la determinación de la constante particular del gas, la incertidumbre del flujo de gas es la siguiente:

$$U_{\dot{m}_{g,n}} = \sqrt{\left( \frac{\partial \dot{m}_g}{\partial P_n} U_{P_n} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}_g}{\partial P_{n-1}} U_{P_{n-1}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}_g}{\partial T_n} U_{T_n} \right)^2 + \left( \frac{\partial \dot{m}_g}{\partial \Delta t} U_{\Delta t} \right)^2} \quad (4.7)$$

Resolviendo las derivadas parciales, la incertidumbre relativa del flujo calculado para cada uno de los puntos de medición, asociada a las características de los instrumentos de medida descritos en el apartado 4.1 y tras despreciar la incertidumbre de la medición de tiempo, es la siguiente:

$$\frac{U_{\dot{m}_{g,n}}}{\dot{m}_{g,n}} (\%) = \sqrt{\frac{P_n^2 + P_{n-1}^2}{(P_n - P_{n-1})^2} \left( \frac{U_{P_n}}{P_n} \right)^2 + \left( \frac{U_{T_n}}{T_n} 100 \right)^2} \quad (4.8)$$

donde  $\frac{U_{P_n}}{P_n} = \frac{U_{P_{n-1}}}{P_{n-1}} = 0.08\%$  y  $U_{T_n}$  es 0,15 K.

En segundo lugar, para cuantificar los errores de tipo aleatorio se hace uso de la distribución t-Student (Área de Mecánica de Fluidos, Universidad de Zaragoza, 2018), quedando el cálculo total de la incertidumbre como:

$$U = \sqrt{U_{\dot{m}_{g,n}}^2 + (t_{v,p} S_x)^2} \quad (4.9)$$

donde:

- $t_{v,p}$  es el valor de la distribución t-Student para  $v = N - 1$  grados de libertad y que abarca la fracción  $p$  de la distribución. En este caso  $v = 10$  y  $p = 95\%$ .
- $S_x$  es la desviación típica de la muestra.

Pese a que la instrumentación utilizada en el banco de ensayos es de alta precisión, la magnitud de las fugas de gas es tan baja que el valor de la incertidumbre es mayor que la propia medición de fuga en algún caso. En las Tablas 4.1 y 4.2, para aire y metano, respectivamente, se muestran algunas de las medidas acompañadas de la incertidumbre, para presiones análogas a las utilizadas en las simulaciones CFD.

Tabla 4.1: Datos experimentales e incertidumbres asociadas. Fluido: aire. Diámetro: 0,24 mm

$P_n$ [bar]	$P_{n-1}$ [bar]	$T_n$ [K]	Fuga [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,06300</b>	1,06314	293,52	$1,1768 \cdot 10^{-6}$	267
<b>1,12168</b>	1,12236	293,51	$2,2528 \cdot 10^{-6}$	51,77
<b>1,26187</b>	1,26254	293,51	$5,6321 \cdot 10^{-6}$	83,10
<b>1,40791</b>	1,40902	293,53	$9,3301 \cdot 10^{-6}$	66,90
<b>1,68145</b>	1,68320	293,55	$1,4708 \cdot 10^{-5}$	65,46
<b>2,02564</b>	2,02756	293,59	$1,6135 \cdot 10^{-5}$	84,76
<b>3,03996</b>	3,00705	293,62	$2,9242 \cdot 10^{-5}$	95,68
<b>4,05120</b>	4,05468	293,64	$2,9240 \cdot 10^{-5}$	141,53

Tabla 4.2: Datos experimentales e incertidumbres asociadas. Fluido: metano. Diámetro: 0,24 mm

$P_n$ [bar]	$P_{n-1}$ [bar]	$T_n$ [K]	Fuga [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,06252</b>	1,06346	290,08	$4,4111 \cdot 10^{-6}$	56,83
<b>1,12159</b>	1,12207	290,04	$2,2528 \cdot 10^{-6}$	83,89
<b>1,26183</b>	1,26290	290,01	$5,0224 \cdot 10^{-6}$	56,85
<b>1,40843</b>	1,40963	290,00	$5,6328 \cdot 10^{-6}$	61,34
<b>1,68086</b>	1,68216	290,00	$6,1022 \cdot 10^{-6}$	91,19
<b>2,02563</b>	2,02770	289,98	$9,7172 \cdot 10^{-6}$	81,26
<b>3,00353</b>	3,00705	289,95	$1,6526 \cdot 10^{-5}$	93,30
<b>4,05159</b>	4,05615	290,01	$2,1404 \cdot 10^{-5}$	107,21



Es evidente que para obtener resultados experimentales más precisos es necesario explorar otros métodos que reduzcan la incertidumbre del flujo de fuga calculado. En el siguiente apartado se analizan dos estrategias diferentes para el tratamiento de las mediciones: la aplicación de un suavizado en el cálculo, basado en la utilización de medias móviles, y el ajuste de los datos mediante modelos de regresión.

## 4.4 Procesado de las mediciones

En este apartado se presentan los dos métodos de procesado de las mediciones, que se emplean para reducir la incertidumbre del flujo de fuga calculado para cada presión. En primer lugar, se expone un método de suavizado de la medida experimental mediante la aplicación de medias móviles y, por otra parte, un método estadístico basado en la obtención de modelos de regresión. En ambos casos, se partirá del supuesto de que las medidas del flujo son indirectas y cuentan con errores de tipo aleatorio.

### 4.4.1 Aplicación de medias móviles

En este primer caso se vuelve a hacer uso de la estadística *t* de Student (Área de Mecánica de Fluidos, Universidad de Zaragoza, 2018) suponiendo que cada medida,  $X_k$ , sigue una distribución de tipo gaussiano con un valor medio,  $\mu$  y una desviación típica,  $\sigma$ , por lo que el error aleatorio de cada medida,  $\varepsilon_k$ , se correspondería con  $|X_k - \mu|$ . Además, se cuantifica la incertidumbre de medida mediante la ecuación 4.8, presentada en el apartado anterior.

El resultado de un promedio de una serie de medidas,  $Y$ , se encontrará con una

probabilidad,  $p$ , entre  $\left[ \bar{X} - \sqrt{U_{\dot{m}_{g,n}}^2 + \left( t_{\nu,p} \frac{S_x}{\sqrt{N}} \right)^2} \right]$  y  $\left[ \bar{X} + \sqrt{U_{\dot{m}_{g,n}}^2 + \left( t_{\nu,p} \frac{S_x}{\sqrt{N}} \right)^2} \right]$ , donde:

- $\bar{X}$  es la media de  $N$  mediciones.
- $t_{\nu,p}$  es el valor de la distribución *t*-Student para  $\nu = N - 1$  grados de libertad y que abarca la fracción  $p$  de la distribución
- $S_x$  es la desviación típica de la muestra.
- $U_{\dot{m}_{g,n}}$  es la incertidumbre de medición del flujo debida a la instrumentación.

Se optó por aplicar medias móviles que abarcaran las 2, 5 y 10 medidas anteriores y posteriores a cada una de las mediciones, incluyendo la propia medida a la que se aplica la media móvil por lo que  $N$  toma los valores de 5, 11 y 21, y  $t_{v,p}$  los valores de 2,57; 2,23 y 2,09 para cada valor de  $N$ .

A continuación, se presentan los resultados de la aplicación de estas medias móviles para el aire y el metano en el caso de que  $N = 11$ .

#### 4.4.1.1 Aplicación media móvil: aire

La Figura 4.3 muestra el conjunto de medidas experimentales para el caso de la probeta con orificio de 0,24 mm. A continuación, la Figura 4.4 muestra las mismas medidas a las que se le ha aplicado la media móvil de 11 medidas.

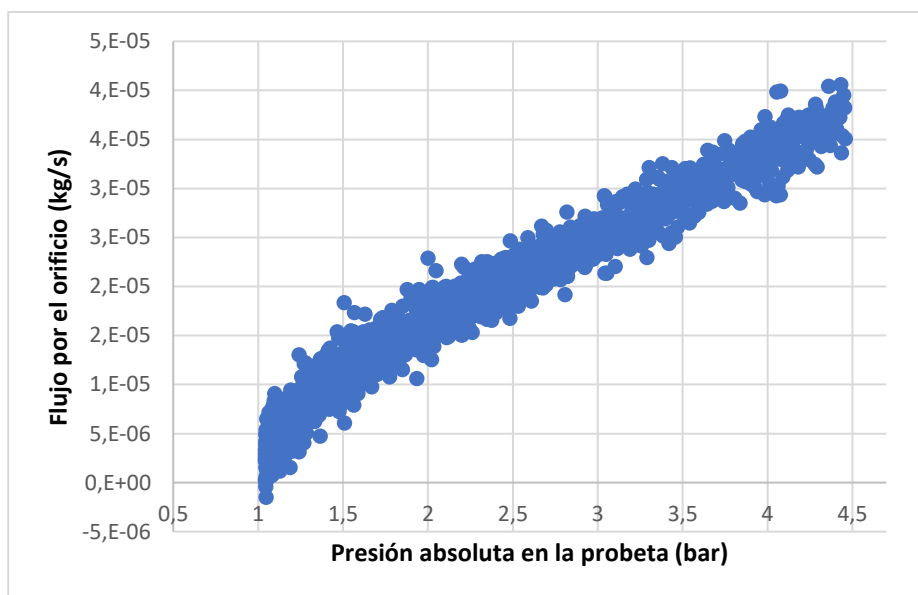


Figura 4.3. Medidas experimentales para el aire.  $d = 0,24$  mm

Comparando las dos figuras se puede apreciar cómo la gran dispersión de los datos experimentales se amortigua al aplicar el procesamiento de media móvil. Por otra parte, en ambas figuras se puede detectar la diferencia que existe entre las zonas con alto y bajo diferencial de presión entre la probeta y el ambiente, que ya se han comentado en el Capítulo 3. Se puede diferenciar claramente la zona en la que el caudal de fuga es proporcional a la presión absoluta de la probeta (para presiones

superiores a 1,5 bar) y la zona en la que los efectos viscosos tienen una gran influencia (presiones inferiores a 1,5 bar).

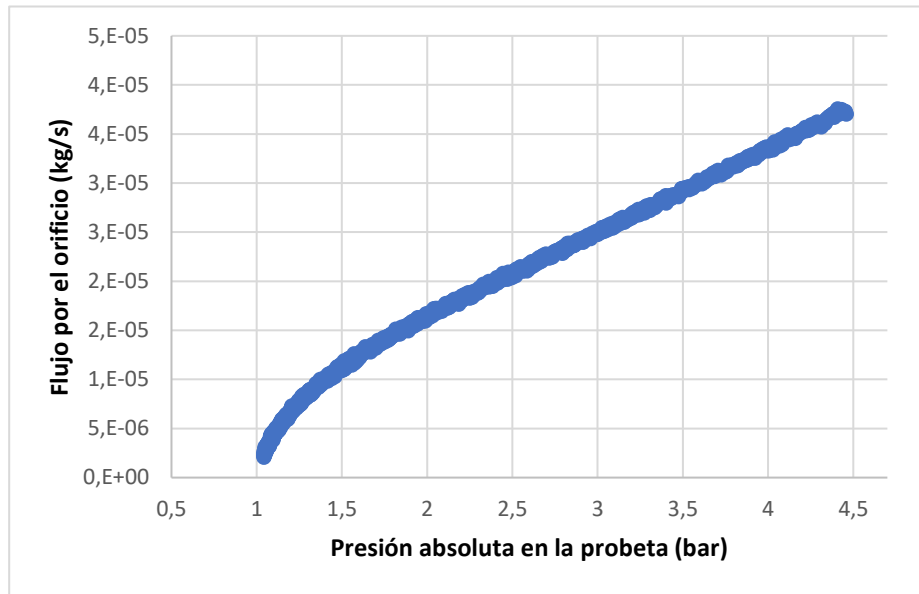


Figura 4.4. Medidas experimentales para el aire tras media móvil.  $d = 0,24$  mm

En la Tabla 4.3 se muestran los resultados obtenidos correspondientes a la Figura 4.4. La tabla contiene la medida más probable,  $Y$ , que se encuentra entre los límites inferior  $\left[ \bar{X} - \sqrt{U_{\hat{m}_{g,n}}^2 + \left( t_{v,p} \frac{s_x}{\sqrt{N}} \right)^2} \right]$  y superior  $\left[ \bar{X} + \sqrt{U_{\hat{m}_{g,n}}^2 + \left( t_{v,p} \frac{s_x}{\sqrt{N}} \right)^2} \right]$ , con una probabilidad de confianza del 95%. Además, se ha adicionado una columna en la que se muestra la diferencia relativa entre los límites del intervalo y el valor más probable, de cara a evaluar la amplitud del intervalo de confianza.

Tabla 4.3: Datos experimentales y límites tras media móvil. Fluido: aire. Diámetro: 0,24 mm

$P$ [bar]	$Y$ [kg/s]	Límite inferior [kg/s]	Límite superior [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,06300</b>	$3,3470 \cdot 10^{-6}$	$1,1012 \cdot 10^{-6}$	$5,5928 \cdot 10^{-6}$	67,1
<b>1,12168</b>	$5,0359 \cdot 10^{-6}$	$3,4982 \cdot 10^{-6}$	$6,5736 \cdot 10^{-6}$	30,53
<b>1,26187</b>	$7,5577 \cdot 10^{-6}$	$2,8955 \cdot 10^{-6}$	$1,2220 \cdot 10^{-5}$	61,69
<b>1,40791</b>	$1,0224 \cdot 10^{-5}$	$4,2667 \cdot 10^{-6}$	$1,6181 \cdot 10^{-5}$	58,27
<b>1,68145</b>	$1,3447 \cdot 10^{-5}$	$5,1164 \cdot 10^{-6}$	$2,1779 \cdot 10^{-5}$	61,95
<b>2,02564</b>	$1,6647 \cdot 10^{-5}$	$2,4419 \cdot 10^{-6}$	$3,0852 \cdot 10^{-5}$	85,33
<b>3,03996</b>	$2,5101 \cdot 10^{-5}$	$1,5782 \cdot 10^{-5}$	$4,8624 \cdot 10^{-5}$	93,71
<b>4,05120</b>	$3,4190 \cdot 10^{-5}$	$-1,3687 \cdot 10^{-5}$	$8,0267 \cdot 10^{-5}$	140,03

Como se puede ver, la aplicación de la media móvil ha servido para reducir la dispersión de las medidas experimentales. Sin embargo, el intervalo de incertidumbre sigue siendo excesivamente amplio tanto para los casos con baja presión como con alta. Como se puede apreciar, con una probabilidad del 95%, la mayor parte de las medidas poseen incertidumbres tales que la amplitud del intervalo en el que se pueden encontrar los resultados es mayor que la magnitud del valor más probable. Incluso en el caso con mayor presión la incertidumbre hace que valores negativos entren dentro del intervalo.

#### 4.4.1.2 Aplicación media móvil: metano.

Al igual que en el caso del aire, se presenta en primer lugar la Figura 4.5 con las medidas experimentales para la probeta de 0,24 mm y los resultados de la aplicación de la media móvil en la Figura 4.6.

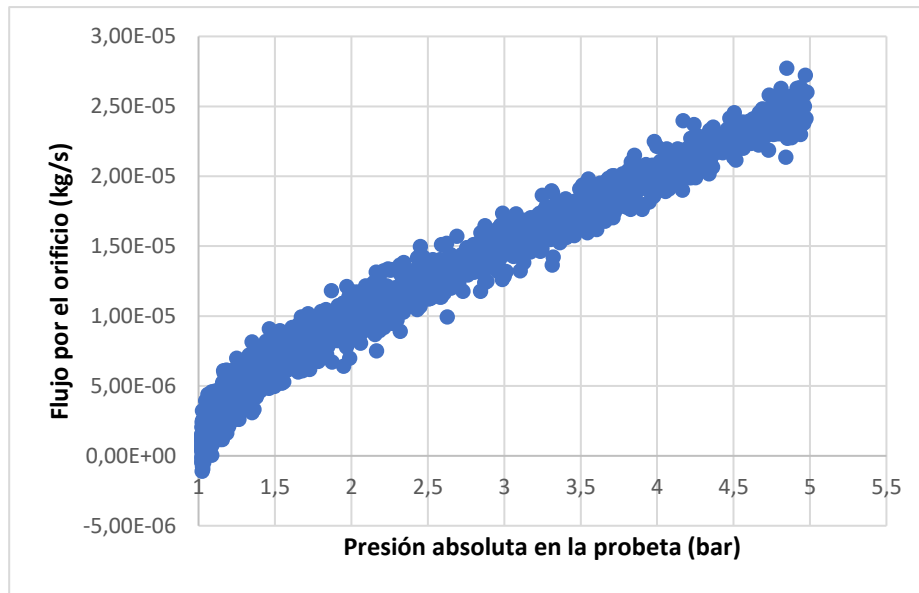


Figura 4.5. Medidas experimentales para el metano.  $d = 0,24$  mm

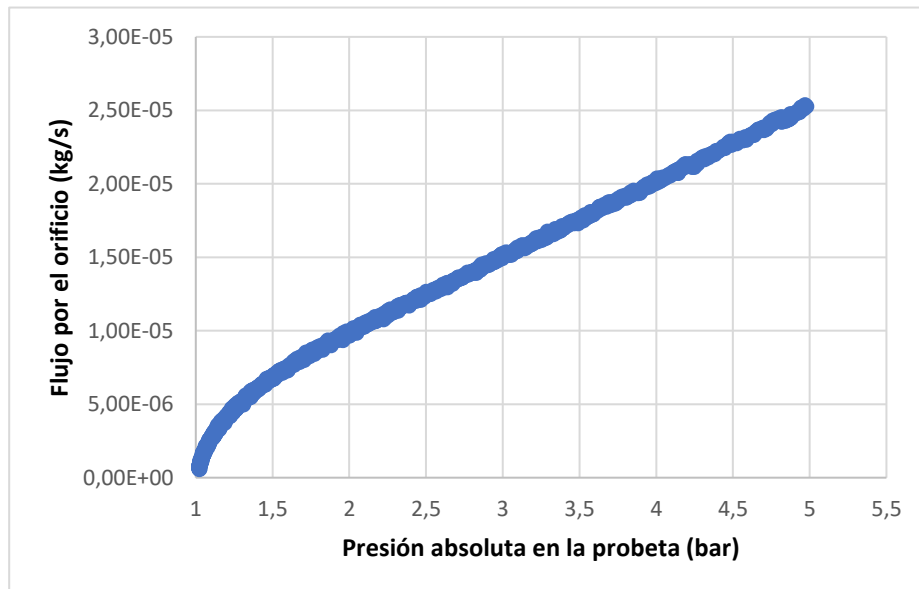


Figura 4.6. Medidas experimentales para el metano tras media móvil.  $d = 0,24$  mm

Al igual que sucede con el aire, la media móvil amortigua la dispersión y pueden diferenciarse las dos zonas ya descritas, con efectos viscosos relevantes y despreciables. La Tabla 4.4 muestra los resultados experimentales para el caso del metano.

Tabla 4.4: Datos experimentales y límites tras media móvil. Fluido: metano. Diámetro: 0,24 mm

$P$ [bar]	$Y$ [kg/s]	Límite inferior [kg/s]	Límite superior [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,06252</b>	$1,9326 \cdot 10^{-6}$	$1,1561 \cdot 10^{-6}$	$2,7091 \cdot 10^{-6}$	40,18
<b>1,12159</b>	$3,0293 \cdot 10^{-6}$	$1,7848 \cdot 10^{-6}$	$4,2739 \cdot 10^{-6}$	41,08
<b>1,26183</b>	$4,8304 \cdot 10^{-6}$	$2,8915 \cdot 10^{-6}$	$6,7694 \cdot 10^{-6}$	40,14
<b>1,40843</b>	$6,1920 \cdot 10^{-6}$	$2,8525 \cdot 10^{-6}$	$9,5316 \cdot 10^{-6}$	53,93
<b>1,68086</b>	$8,0314 \cdot 10^{-6}$	$1,3508 \cdot 10^{-6}$	$1,4712 \cdot 10^{-5}$	83,18
<b>2,02563</b>	$1,0187 \cdot 10^{-5}$	$2,1549 \cdot 10^{-6}$	$1,8219 \cdot 10^{-5}$	78,85
<b>3,00353</b>	$1,5040 \cdot 10^{-5}$	$1,3520 \cdot 10^{-6}$	$2,8728 \cdot 10^{-5}$	91,01
<b>4,05159</b>	$2,0372 \cdot 10^{-5}$	$-1,3973 \cdot 10^{-6}$	$2,2142 \cdot 10^{-5}$	106,86

Como en el caso anterior, el intervalo de incertidumbre es demasiado amplio para todos los casos.

#### 4.4.2 Ajuste de modelos de regresión

Como se ha comentado en los apartados anteriores, las incertidumbres de los resultados experimentales asociados a la instrumentación y los errores de tipo aleatorio son demasiado elevados y no se ha podido corregir mediante el empleo de medias móviles. En este apartado se evalúa un tercer método, que consiste en la obtención de modelos de regresión.

Retomando lo que ya se ha mencionado anteriormente, al analizar los resultados experimentales se observa una zona en la que la fuga de gas por el orificio posee un comportamiento lineal con la presión, mientras que en la zona de bajas presiones el comportamiento es diferente. Por lo tanto, en el ajuste de los modelos de regresión, se trata de forma separada los datos de estas dos zonas, obteniendo modelos de tendencia que expliquen el comportamiento característico de cada una de ellas. En la Figura 4.7 se presentan los datos y el ajuste cuadrático obtenido para la zona de bajas presiones, mientras que en la Figura 4.8 se analizan los datos y el ajuste lineal para la zona de alta presión.

El coeficiente de determinación,  $R^2$ , es un parámetro estadístico que informa acerca de la calidad del ajuste del modelo. Se considera que el ajuste del modelo es satisfactorio cuando el coeficiente de determinación se acerca a la unidad. Así, para

diferenciar las dos zonas, se ha seguido el criterio de maximizar este parámetro para cada uno de los dos ajustes. Para la primera zona, con el ajuste cuadrático ( $1,023 \text{ bar} \leq P \leq 1,659 \text{ bar}$ ), el valor de  $R^2$  es de 0,5552, mientras que, para la segunda con comportamiento lineal ( $1,660 \leq P \leq 4,908 \text{ bar}$ ) el coeficiente es de 0,8676. Este caso es el que menor coeficiente de correlación  $R^2$  posee, situándose el del resto de los casos por encima de 0,7, en su mayoría por encima de 0,9. En el Anexo D se dispone de todas las gráficas con las medidas y las ecuaciones de regresión, indicando el límite de presión para cada uno de los modelos, así como la calidad del ajuste estadístico,

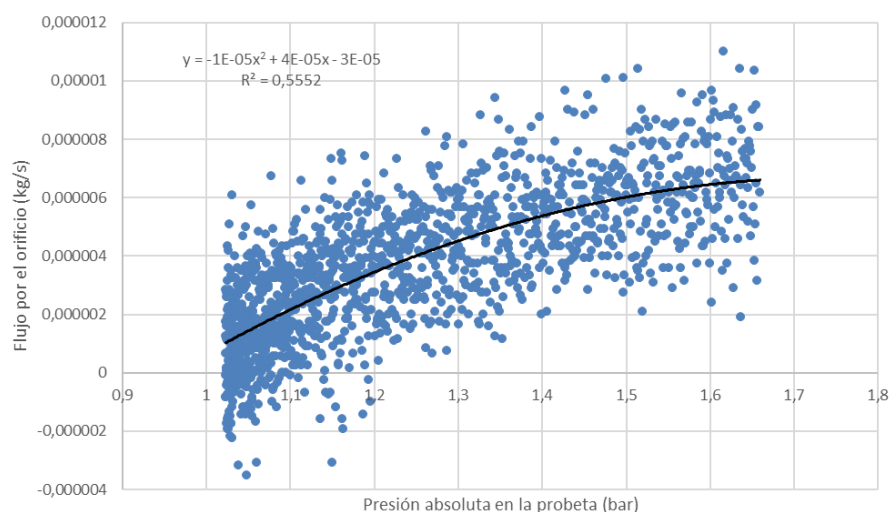


Figura 4.7. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Aire,  $d=0,16 \text{ mm}$

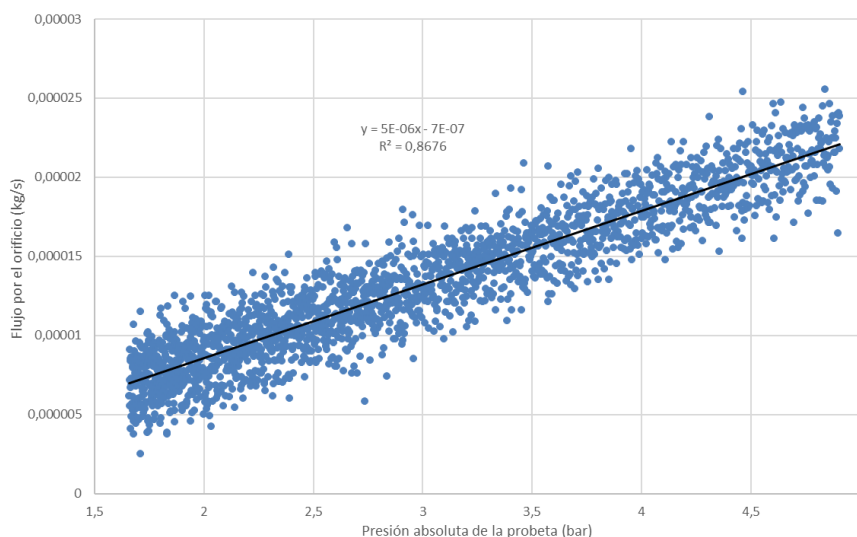


Figura 4.8. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Aire,  $d=0,16 \text{ mm}$

Una vez obtenidos los distintos ajustes para las diferentes probetas ensayadas, simplemente se introduce el valor de la presión en el modelo para obtener el valor más probable de fuga de gas asociada a esa presión.

Al tratarse de un método experimental, no puede ignorarse la incertidumbre asociada al mismo. Partiendo del hecho de que cada una de las mediciones tiene una incertidumbre asociada a las tolerancias e imprecisiones de los instrumentos de medida y que el valor registrado solamente se trata del valor más probable, es necesario ofrecer el intervalo de confianza del método.

Las medidas y resultados experimentales son procesados mediante la interfaz R Commander (Fox, 2019), basada en el paquete estadístico R (Statistics Department of the University of Auckland, 2019) de tal manera que cada resultado experimental consistirá en un determinado intervalo calculado mediante la estadística t-Student y un valor más probable,  $\bar{Y}$ . La Figura 4.9 muestra las mismas líneas de tendencia que las Figura 4.7 y 4.8 pero indicando con la zona sombreada el rango de validez del resultado con un nivel de confianza del 95%, prácticamente inapreciable para el modelo lineal al tratarse de incertidumbres muy reducidas. Por otra parte, en la Tabla 4.5 se muestran los resultados experimentales con el procesamiento basado en este método para el caso de fuga de aire por un orificio de diámetro 0,16 mm.

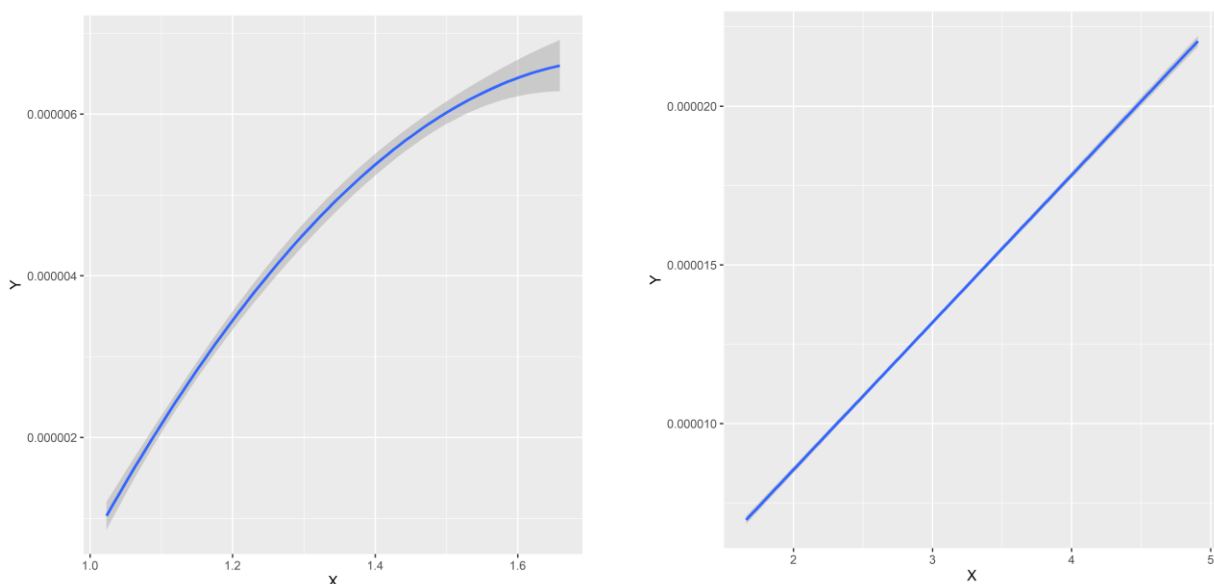


Figura 4.9. Resultados experimentales. Aire,  $d=0,16$  mm



Tabla 4.5: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: aire. Diámetro: 0,16 mm

$P$ [bar]	$Y$ [kg/s]	Límite inferior [kg/s]	Límite superior [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,063</b>	$1,6296 \cdot 10^{-6}$	$1,4999 \cdot 10^{-6}$	$1,7593 \cdot 10^{-6}$	7,96%
<b>1,122</b>	$2,4605 \cdot 10^{-6}$	$2,2585 \cdot 10^{-6}$	$2,5624 \cdot 10^{-6}$	8,21%
<b>1,262</b>	$4,1353 \cdot 10^{-6}$	$4,0051 \cdot 10^{-6}$	$4,2700 \cdot 10^{-6}$	3,15%
<b>1,409</b>	$5,4410 \cdot 10^{-6}$	$5,3087 \cdot 10^{-6}$	$5,5732 \cdot 10^{-6}$	2,43%
<b>1,683</b>	$7,0714 \cdot 10^{-6}$	$6,9466 \cdot 10^{-6}$	$7,1962 \cdot 10^{-6}$	1,76%
<b>2,027</b>	$8,6683 \cdot 10^{-6}$	$8,5643 \cdot 10^{-6}$	$8,7724 \cdot 10^{-6}$	1,20%
<b>3,040</b>	$1,3374 \cdot 10^{-5}$	$1,3301 \cdot 10^{-5}$	$1,3447 \cdot 10^{-5}$	0,54%
<b>4,053</b>	$1,8079 \cdot 10^{-5}$	$1,7968 \cdot 10^{-5}$	$1,819 \cdot 10^{-5}$	0,61%

Como se puede ver, la incertidumbre asociada a las medidas es mucho menor que en el caso de la aplicación de medias móviles. Por lo tanto, éste es el método escogido para el tratamiento de los datos experimentales y el utilizado para la obtención de los resultados disponibles en el anexo D.

## 4.5 Validación del modelo CFD

En el capítulo 2 se llevaron a cabo pruebas para realizar el diseño del modelo computacional CFD, exponiendo sus resultados en el capítulo 3. No obstante, para comprobar su validez es necesario contrastar los resultados con los obtenidos experimentalmente. Para ello, en este apartado se comparan los resultados CFD con los resultados experimentales obtenidos de aplicar las medias móviles y modelos de regresión.

La Figura 4.10 muestra una comparación entre los resultados CFD y los resultados obtenidos a través de las cuatro estrategias implementadas en este capítulo: las tres medias móviles y el modelo de regresión para el caso de un orificio de 0,24 mm por el que fuga aire. Además de los resultados experimentales más probables

se presentan los límites inferiores y superiores del intervalo de confianza calculados en cada caso.

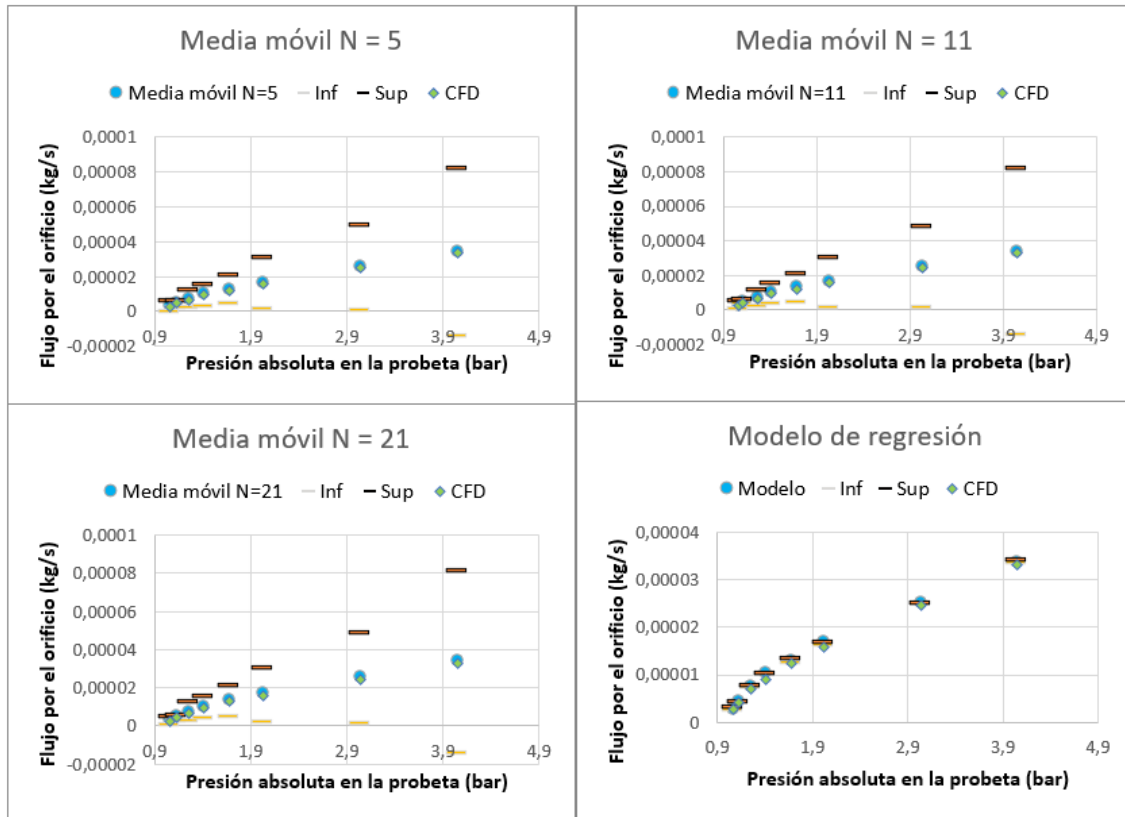


Figura 4.10. Comparación resultados experimentales CFD. Aire,  $d=0,24$  mm

Se puede apreciar como los resultados experimentales y CFD son coincidentes, además de que en los casos de medias móviles los resultados CFD se encuentran en el interior del intervalo de confianza debido a su elevada amplitud.

La Figura 4.11 es similar a la 4.10 pero muestra la comparación entre resultados experimentales y CFD para el caso de una fuga de metano por un orificio de 0,525 mm de diámetro.

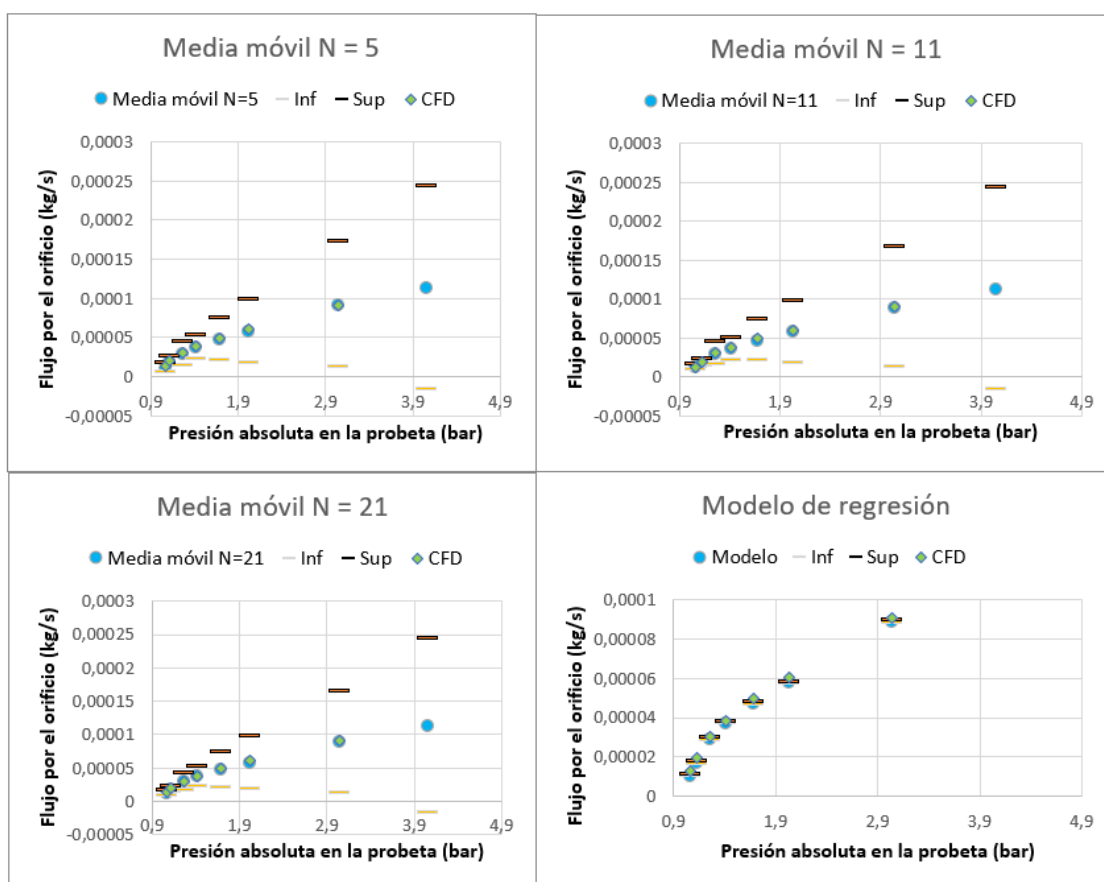


Figura 4.11. Comparación resultados experimentales CFD. Metano,  $d=0,525$  mm

Pese a lo que muestran estas dos figuras, no todos los casos experimentales reflejan la misma coincidencia con los CFD (se dispone de todos ellos en el Anexo E). Hay casos como el del orificio de 0,16 mm para el aire, o el de 0,24 mm para el metano con notables diferencias. En el caso del metano, la explicación de las diferencias puede encontrarse en que el experimento se realizó en un menor tiempo para reducir problemas de contaminación que se presentaron en el laboratorio (nave cerrada para evitar fluctuaciones de presión y temperatura durante las pruebas, y fuga de gas en recinto cerrado). No se dispone de una explicación para lo ocurrido con el orificio de 0,24 mm trabajando con aire.

Analizando exclusivamente las tablas comparativas del Anexo E puede pensarse que las diferencias son mínimas, pero al ser los órdenes de magnitud tan pequeños resultan determinantes para la realización de estimaciones de emisiones de gas natural en los sistemas de distribución. La elección del método

es esencial pues la variación de cifras es más que considerable teniendo en cuenta los órdenes de magnitud que se manejan en estudios como los de la bibliografía (Wikkerink, 2006) (Barroso, Solis, Ballester, & Pina, 2009).

Los resultados obtenidos con el modelo CFD coinciden con tres de los seis casos estudiados. Las diferencias y errores detectados en los casos comentados anteriormente deben deberse a otras causas. Estos errores no pueden deberse al funcionamiento del modelo CFD pues no puede arrojar resultados coincidentes para unos casos y erróneos para otros, ya que el modelo es el mismo. Es por ello que se verifica la validez del modelo CFD y para la elaboración de nuevos modelos compresible-viscosos en capítulos posteriores se hará uso de los resultados CFD, prescindiendo de los resultados experimentales.

## **4.6 Conclusiones del capítulo**

---

Tras realizar una descripción del banco de ensayos, en este capítulo se ha comprobado que la incertidumbre del flujo de fugas, pese a que la instrumentación es muy precisa, es muy elevada en las mediciones con pequeña magnitud de fuga.

Después de estudiar diferentes estrategias de tratamiento de los datos experimentales, se ha optado por el método de obtención de modelos de regresión para determinar la fuga experimental a diferentes presiones. Pese a que se descarta la aplicación de medias móviles por el alto grado de incertidumbre relativa que las caracterizan, éstas amortiguan lo suficiente la dispersión de las medidas y permiten diferenciar claramente dos zonas de comportamiento: una lineal, para altos diferenciales de presión, y otra cuadrática, para pequeñas diferencias entre la presión en el interior de la probeta y la atmosférica.

Se han obtenido dos modelos de regresión para cada serie de medidas ajustando los límites según el parámetro estadístico  $R^2$ . De este modo, se ha reducido la incertidumbre relativa para todos los casos, en mayor medida en los que tienen bajos diferenciales de presión, situándose todos estos últimos por debajo del 8%.

Una vez calculados los resultados experimentales a partir de estos modelos, se ha realizado un pequeño análisis y se han observado las diferencias con respecto a los resultados de las simulaciones CFD, evidenciándose que, para una misma presión, no existe relación entre la razón de flujo y la razón de áreas tanto para el caso del aire como para el metano.

Por último, se demuestra la validez del modelo CFD y se descarta el empleo de los datos experimentales para la elaboración de nuevos modelos compresible-viscosos debido a problemas en el laboratorio.

## TEORÍA DE FLUJO COMPRESIBLE 1-D

Este capítulo está dedicado a la teoría 1-D de flujo compresible en conductos y los resultados obtenidos a partir de la misma para el caso de fugas de gas por pequeños orificios. Posteriormente se realiza una comparación con los resultados CFD y se elaboran nuevos modelos compresible-viscosos. Se finaliza con una propuesta de metodología para extrapolar el flujo de aire a través de orificios, determinado experimentalmente, a flujo de metano.

### 5.1 Flujo compresible

#### 5.1.1 Teoría de flujo compresible aplicada a fugas por pequeños orificios

La teoría de flujo compresible describe el comportamiento de los gases considerando que su densidad varía con la presión.

Diversos estudios (Lee, Smith, & Karagozian, 2003) (Bomelburg, 1977) muestran cómo estimar la fuga de gas por orificios de diámetro reducido, asumiendo que el flujo es isentrópico y considerando los efectos disipativos a la entrada del orificio a través de un coeficiente de descarga. La expresión que permite estimar la fuga es:

$$\dot{m}_g = \varphi C_D A \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^\beta \frac{p}{\sqrt{R_g T}}} \quad (5.1)$$

donde  $C_D$  es el coeficiente de descarga,  $A$  el área del orificio,  $k$  es el coeficiente de dilatación adiabática del gas,  $p$  la presión absoluta a la que se encuentra el gas en el interior de la tubería,  $R_g$  la constante particular del gas, y  $T$  la temperatura a la que se encuentra el gas en el interior de la tubería.

El coeficiente  $\beta$  se determina por,

$$\beta = \frac{k+1}{k-1} \quad (5.2)$$

y la relación crítica  $\varphi$  toma diferentes valores en función de si el flujo es sónico o subsónico:

- Si  $\frac{p_a}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$  el flujo es sónico y  $\varphi = 1$
- Si  $\frac{p_a}{p} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$  el flujo es subsónico y

$$\varphi = \left(\frac{p_a}{p}\right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{p_a}{p}\right)^{(k-1)/k}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{k+1}{2}\right)^\beta} \quad (5.3)$$

Estas expresiones se han programado en una hoja Excel para obtener los resultados que se presentan en el próximo apartado. En el Anexo F se dispone de una explicación para conocer cómo se han hallado los coeficientes de descarga de los orificios

## 5.2 Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos se muestran en el Anexo G y en este apartado se realiza un breve análisis de los mismos.

En la bibliografía (Lee, Smith, & Karagozian, 2003) (Buckingham & Edwards) (Yuhua, Huilin, Jing'en, & Yaorong, 2002) se emplean gráficos basados en ratios adimensionales para la comparación de resultados. Por lo general, se muestra el comportamiento de la ratio entre el flujo y el flujo máximo  $\dot{m}_g/\dot{m}_{g,max}$  con respecto a la razón de presiones  $p_a/p$ .

El  $\dot{m}_{g,max}$  se corresponde con el máximo caudal de fuga a través de un orificio, sin considerar el factor de relación crítica,  $\varphi$ , ni el coeficiente de descarga,  $C_D$ ,

$$\dot{m}_{g,max} = A \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^\beta} \frac{p}{\sqrt{R_g T}} \quad (5.4)$$

La ventaja de estos gráficos reside en que al emplear ratios adimensionales se pueden generalizar los análisis, comparando resultados para diferentes gases. A lo largo de este capítulo se hará uso de estos gráficos.

La Figura 5.5 presenta estas relaciones adimensionales para el caso del aire, y la Figura 5.6 para el metano.

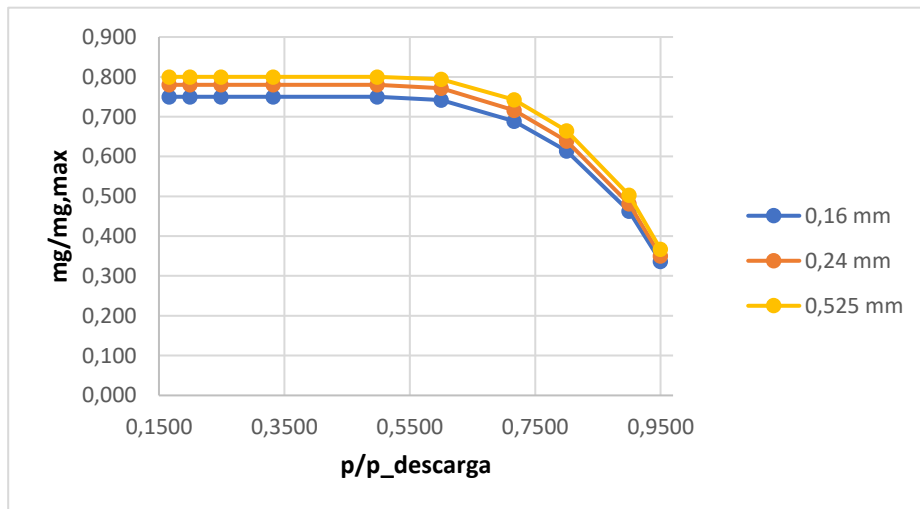


Figura 5.5. Ratio de flujo frente a ratio de presiones. Resultados teóricos. Aire

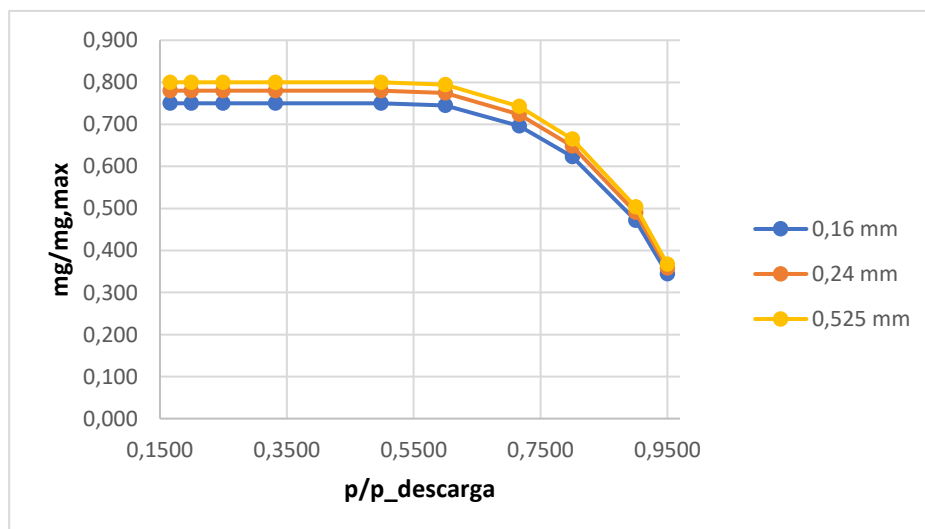


Figura 5.6. Ratio de flujo frente a ratio de presiones. Resultados teóricos. Metano



Como se puede ver en las Figuras 5.5 y 5.6, existen dos partes bien diferenciadas en la gráfica. En la parte izquierda se puede ver una línea recta para cada uno de los casos, correspondiéndose el ratio  $\dot{m}_g/\dot{m}_{g,max}$  con el coeficiente de descarga,  $C_D$ . Así, en la parte izquierda, la diferencia entre los distintos diámetros se explica porque el coeficiente de descarga, que expresa los efectos disipativos debidos a la geometría del orificio, disminuye para los casos con menores diámetros, por lo que el flujo teórico es menor con respecto al valor máximo. En la parte derecha se observa la influencia de la relación crítica,  $\varphi$ , calculada principalmente a partir del coeficiente de dilatación adiabática del gas. En las Figuras 5.7 a, b y c se comparan los resultados obtenidos para el aire y el metano, con los diferentes diámetros de orificio ensayados. En las tres figuras se observa lo mismo. La diferencia entre la parte izquierda y derecha es debida por el cambio de régimen sónico a subsónico y la influencia de la relación crítica, diferente para cada uno de los gases. Así, según la teoría de flujo compresible, el comportamiento de los dos gases es idéntico en la zona sónica, pero en la zona subsónica se observa una pequeña diferencia al cambiar el gas.

Por otra parte, el valor del ratio  $\dot{m}_g/\dot{m}_{g,max}$  en la parte izquierda de las figuras se corresponde con el coeficiente de descarga, dependiente exclusivamente de la geometría del orificio.

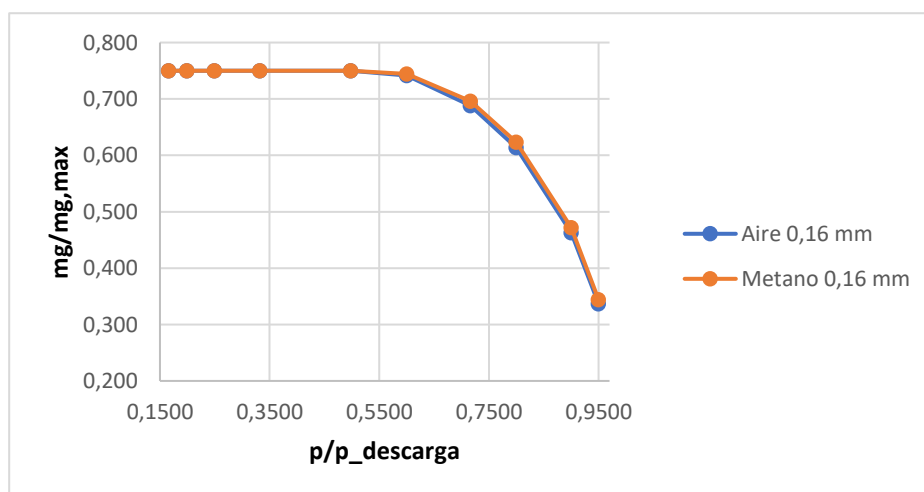


Figura 5.7. a). Ratio de flujo frente a ratio de presiones. Resultados teóricos.  $d = 0,16$  mm

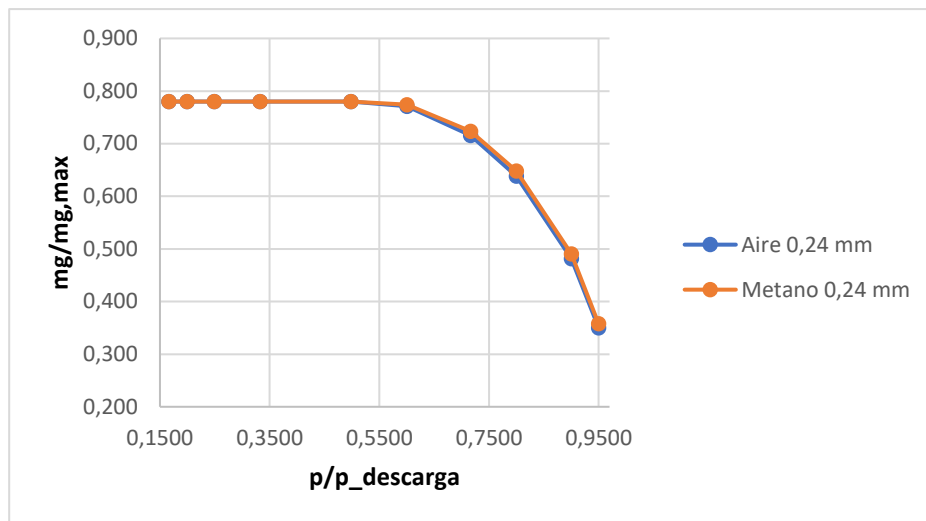


Figura 5.7 b). Ratio de flujo frente a ratio de presiones. Resultados teóricos.  $d = 0,24$  mm

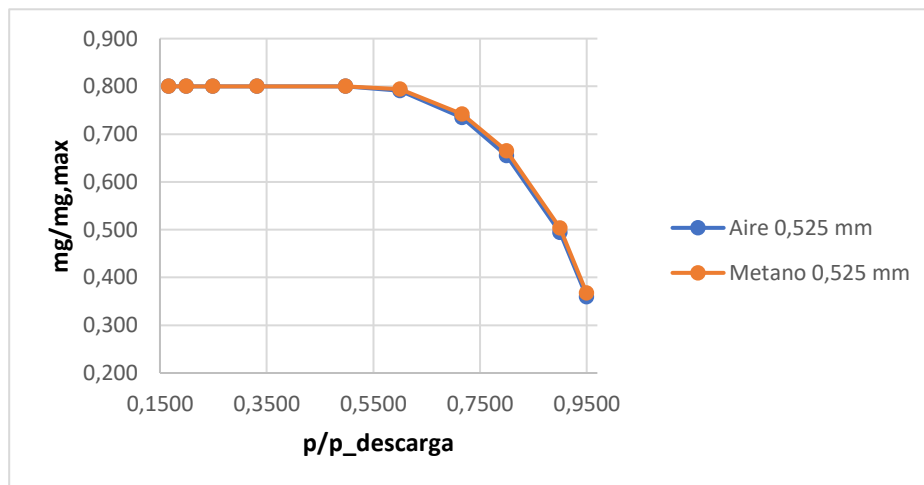


Figura 5.7 c). Ratio de flujo frente a ratio de presiones. Resultados teóricos.  $d = 0,525$  mm

### 5.3 Comparación de resultados teóricos - CFD

Tras realizar una validación del modelo CFD con una parte de los resultados experimentales, en este apartado se realiza una comparación de los resultados obtenidos a través de la teoría de flujo compresible y el modelo CFD, explorando las limitaciones teóricas para explicar los fenómenos de fuga por pequeños orificios.

Una primera comparación de resultados confirma la existencia de una tendencia para todos los casos estudiados, los resultados teóricos y CFD coinciden en las

zonas sónicas y se separan en las zonas subsónicas, fenómeno apreciable en la Figura 5.8.

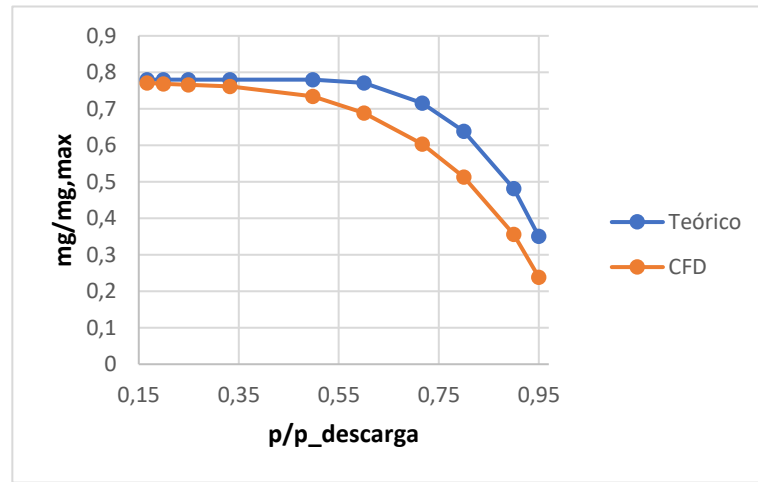


Figura 5.8. Comparación de resultados. Ratios de caudal y presión. Aire,  $d=0,24$  mm

Además, en las Figuras 5.7 a, b y c se pudo ver cómo los resultados adimensionalizados con los ratios de caudal y presión coincidían en los casos de mismo diámetro y distinto gas. Esto no sucede para los casos CFD. En primer lugar, las Figuras 5.9 y 5.10 muestran ligeras diferencias entre los casos teóricos con distintos diámetros, tanto para aire como para metano, siendo prácticamente coincidentes incluso en la zona más subsónica. Ligeras diferencias que no cumplen los casos CFD, distanciándose claramente de los teóricos en la zona subsónica.

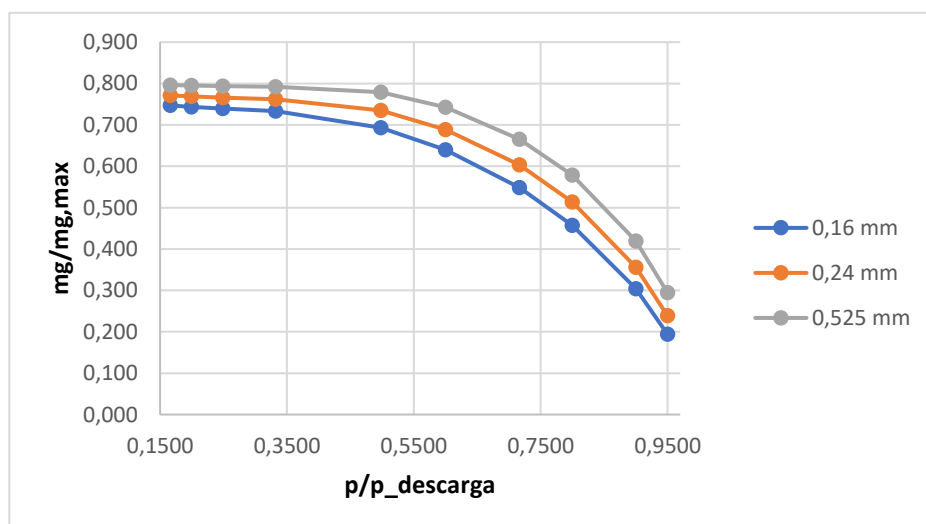


Figura 5.9. Resultados CFD. Ratios de caudal y presión. Aire

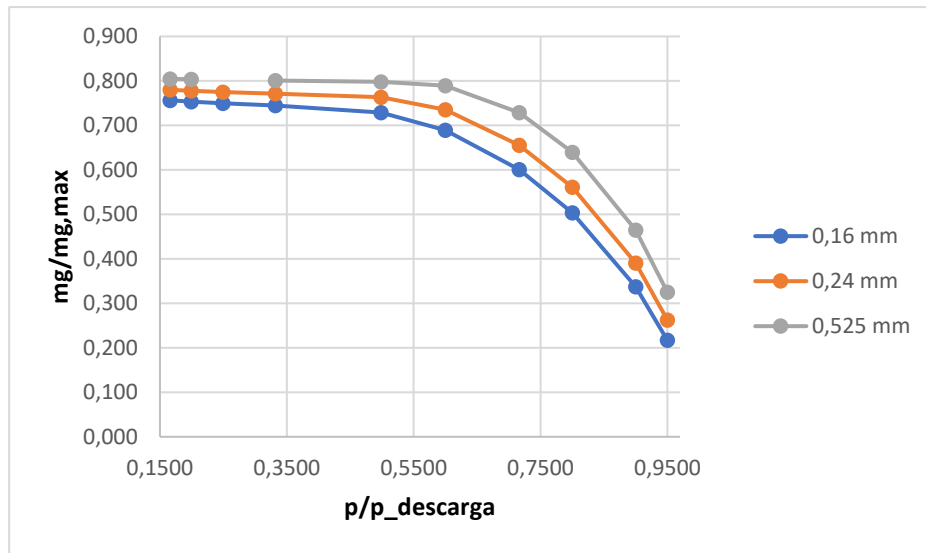


Figura 5.10. Resultados CFD. Ratios de caudal y presión. Metano

La Figura 5.11 contiene una comparación entre todos los resultados CFD. Como se puede ver, los casos con mismo diámetro de orificio solo coinciden en la zona sónica (el coeficiente de descarga toma especial relevancia), estableciéndose diferencias notables en la zona subsónica. Esto se debe a la influencia de los efectos viscosos que son mayores para el aire. Pese a que la viscosidad dinámica del metano es mayor que la del aire ( $2 \cdot 10^{-5}$  Pa·s frente a  $1,88 \cdot 10^{-5}$  Pa·s), la mayor densidad del aire (prácticamente el doble que la del metano) hace que las pérdidas por fricción viscosa tengan una mayor magnitud.

En el Anexo H se dispone de todas las comparaciones con ratios adimensionales entre resultados CFD y teóricos, apreciándose grandes diferencias en las zonas subsónicas debidas a efectos que dependen de la densidad y viscosidad del gas y que la actual teoría 1-D no contempla.

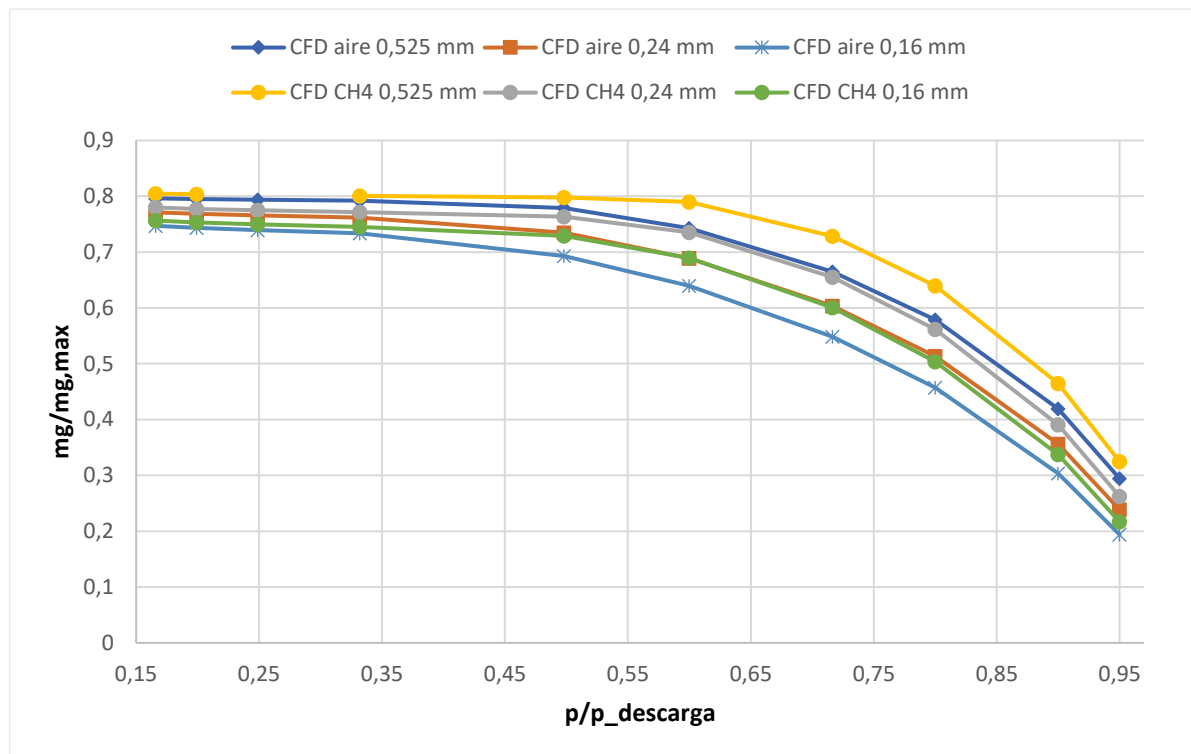


Figura 5.11. Comparación de resultados CFD. Ratios de caudal y presión.

### 5.3.1 Las limitaciones de la teoría de flujo compresible

En el apartado precedente y el Anexo H se pueden ver las limitaciones de la teoría de flujo compresible 1-D para la obtención de fugas de gases en orificios de pequeño diámetro. Como ya se ha mencionado con anterioridad, esto se debe a que esta teoría desprecia los efectos derivados de la viscosidad.

Cuando el número de Mach supera el valor de la unidad (ratio  $p/p_a$  bajo), la velocidad del flujo es lo suficientemente alta como para asumir que se puede despreciar la influencia de la viscosidad. No obstante, esto no es asumible conforme disminuye el número de Mach, tal y como se aprecia en las Figuras del Anexo H, donde las líneas que unen los casos teóricos y CFD se separan en los casos subsónicos. La explicación reside en que para fugas por orificios de pequeño diámetro con reducido diferencial de presión los efectos de la viscosidad son de un orden similar a los de la presión o la temperatura, por lo que no se pueden despreciar.

## 5.4 Obtención de modelos compresible-viscosos

### 5.4.1 Desarrollo teórico

A lo largo de todo el trabajo se ha podido comprobar como los efectos viscosos no pueden despreciarse en los casos subsónicos, efectos que la teoría 1-D convencional de flujo compresible no tiene en cuenta. Para subsanarlo se desarrolla un nuevo modelo teórico que sí los contempla gracias al empleo de un coeficiente de contracción brusca,  $K_{CB}$  (White, 2008), y un coeficiente de fricción,  $f$ , para cuantificar las pérdidas.

El coeficiente de contracción brusca,  $K_{CB}$ , cuantifica los efectos que produce la formación de una vena contracta tras una reducción brusca del diámetro por el que circula un fluido. Su obtención se realiza mediante una fórmula empírica (White, 2008):

$$K_{CB} = 0,42 \left[ 1 - \left( \frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (5.5)$$

donde:

- $d$  es el diámetro del orificio (0,16, 0,24 y 0,525 mm).
- $D$  es el diámetro de la tubería (100 mm).

Se toma el valor de  $K_{CB}$  como 0,42 debido a que el cociente  $\frac{d}{D}$  es despreciable para los tres casos. Para el cálculo del coeficiente de fricción,  $f$ , se emplean diferentes expresiones (White, 2008) en función del régimen del flujo bajo la suposición de flujo por pared lisa:

- Si  $Re < 2000$  el flujo es laminar

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5.6)$$

- Si  $2000 \leq Re < 3000$  el flujo se encuentra en un régimen de transición

$$f = \frac{64}{Re} + \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (5.7)$$

- Si  $Re \geq 3000$  el flujo es turbulento

$$f = \frac{0,316}{\sqrt[4]{Re}} \quad (5.8)$$

El nuevo modelo de flujo compresible-viscoso resulta:

- Si  $\frac{p_a}{p} \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$  el flujo es sónico y  $\varphi = 1$

$$\dot{m}_g = \varphi C_D A \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^\beta} \frac{p}{\sqrt{R_g T}} \quad (5.1)$$

- Si  $\frac{p_a}{p} > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{k/(k-1)}$  el flujo es subsónico y

$$\varphi = \left(\frac{p_a}{p}\right)^{1/k} \sqrt{1 - \left(\frac{p_a}{p}\right)^{(k-1)/k}} \sqrt{\frac{2}{k-1} \left(\frac{k+1}{2}\right)^\beta} \quad (5.3)$$

$$\dot{m}_g = \varphi C_D A \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^\beta} \frac{p'}{\sqrt{R_g T}} \quad (5.9)$$

donde:

$$p' = p - (K_{CB} + f \frac{L}{d}) \rho v_{sal}^2 \quad (5.10)$$

- $L$  es la longitud del orificio.
- $\rho$  es la densidad del fluido a la salida del orificio.
- $v_{sal}$  es la velocidad del fluido a la salida del orificio.

La obtención de  $\rho$  y  $v_{sal}$  se realiza mediante cálculo iterativo en una hoja Excel. Esto hace que el método de cálculo no sea la simple aplicación de una fórmula

como las del apartado 5.1.1. Sin embargo, los nuevos resultados se asemejan en gran medida a los CFD y el tiempo de cálculo es mucho menor.

## 5.4.2 Resultados

### Aire

En primer lugar, se presentan los resultados para el diámetro de 0,16 mm para el caso del aire. El resto de los casos se encuentran en el Anexo I.

*Tabla 5.1: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Aire. Diámetro: 0,16 mm*

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
<b>1,063</b>	$9,7783 \cdot 10^{-7}$	$1,6986 \cdot 10^{-6}$	$1,0459 \cdot 10^{-6}$
<b>1,122</b>	$1,6159 \cdot 10^{-6}$	$2,4629 \cdot 10^{-6}$	$1,6922 \cdot 10^{-6}$
<b>1,262</b>	$2,7358 \cdot 10^{-6}$	$3,6761 \cdot 10^{-6}$	$2,7704 \cdot 10^{-6}$
<b>1,409</b>	$3,6659 \cdot 10^{-6}$	$4,6013 \cdot 10^{-6}$	$3,5426 \cdot 10^{-6}$
<b>1,683</b>	$5,1056 \cdot 10^{-6}$	$5,9178 \cdot 10^{-6}$	$4,7748 \cdot 10^{-6}$
<b>2,027</b>	$6,6597 \cdot 10^{-6}$	$7,2098 \cdot 10^{-6}$	$7,2098 \cdot 10^{-6}$
<b>3,040</b>	$1,0579 \cdot 10^{-5}$	$1,0815 \cdot 10^{-5}$	$1,0815 \cdot 10^{-5}$
<b>4,053</b>	$1,4125 \cdot 10^{-5}$	$1,4420 \cdot 10^{-5}$	$1,4420 \cdot 10^{-5}$
<b>5,066</b>	$1,7867 \cdot 10^{-5}$	$1,8025 \cdot 10^{-5}$	$1,8025 \cdot 10^{-5}$
<b>6,079</b>	$2,1543 \cdot 10^{-5}$	$2,1628 \cdot 10^{-5}$	$2,1628 \cdot 10^{-5}$

Como se puede observar, la inclusión del coeficiente de contracción brusca,  $K_{CB}$ , y de las pérdidas debidas a la fricción hacen que la teoría 1-D corregida se aproxime mucho más a los resultados CFD. La Figura 5.12 muestra los resultados obtenidos en la Tabla 5.1. La Figura 5.13 es una ampliación para poder apreciar mejor los resultados con menores presiones. Por otra parte, la Figura 5.14 muestra los resultados adimensionalizados con los ratios empleados en apartados anteriores.



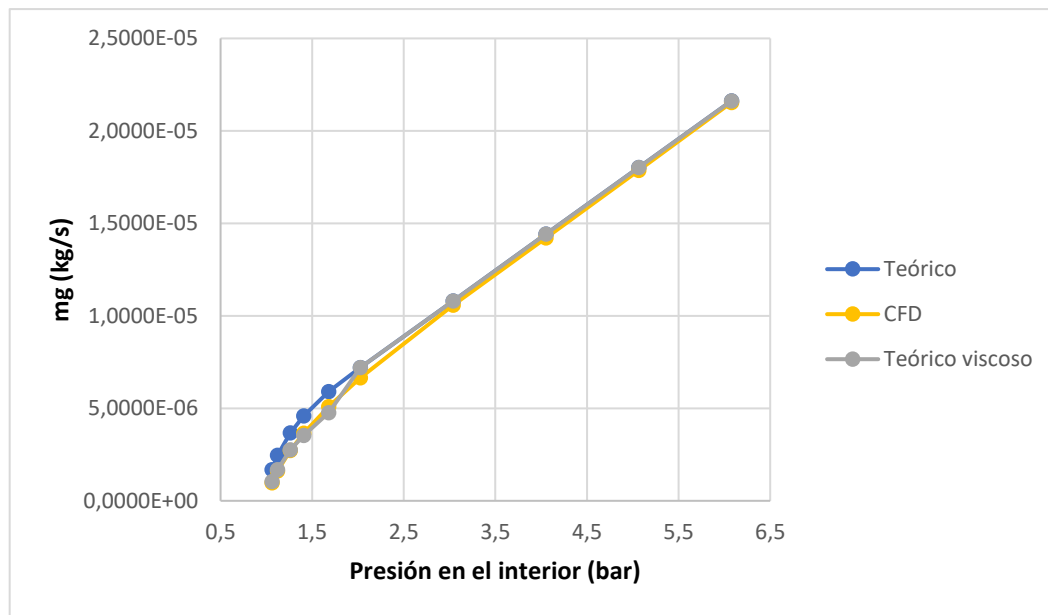


Figura 5.12. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire,  $d = 0,16$  mm

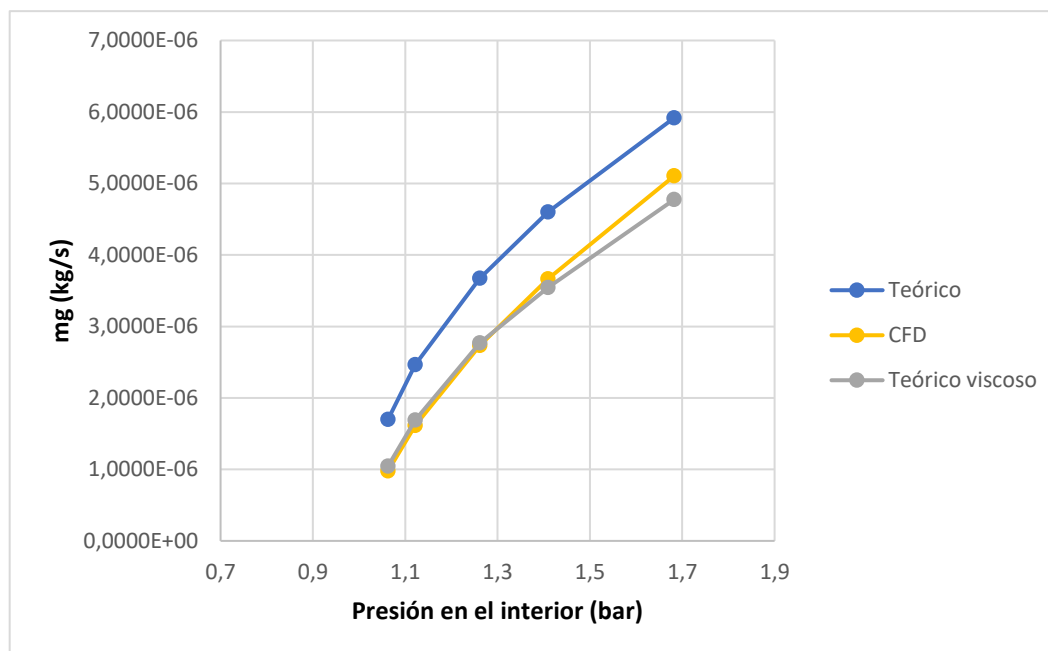


Figura 5.13. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Aire,  $d = 0,16$  mm

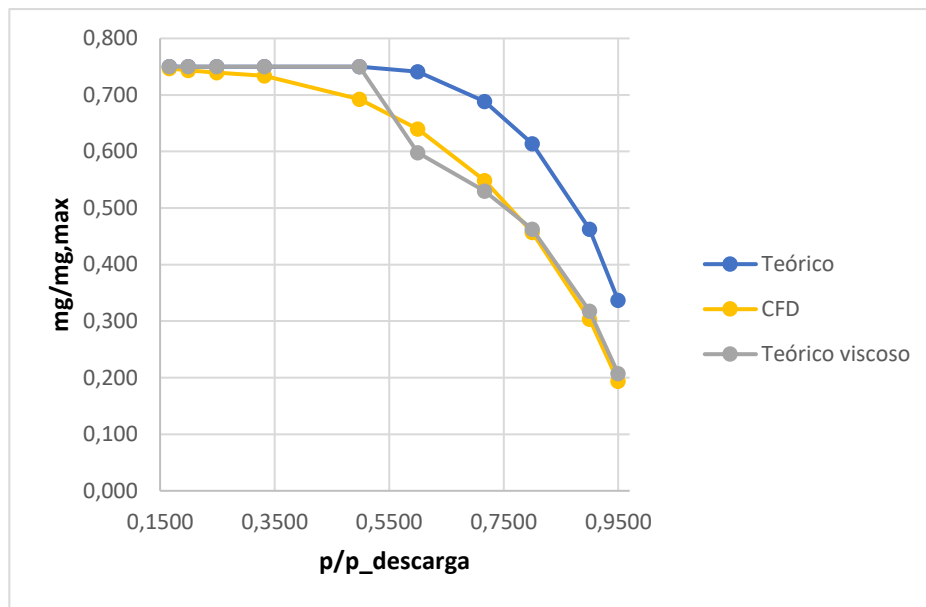


Figura 5.14. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire,  $d = 0,16 \text{ mm}$

### Metano

De manera análoga al aire, se presentan los resultados para el diámetro de 0,16 mm para el metano. El resto de los casos se encuentran en el Anexo I.

Tabla 5.2: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Metano: 0,16 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
1,063	$7,935 \cdot 10^{-7}$	$1,2617 \cdot 10^{-6}$	$8,2261 \cdot 10^{-7}$
1,122	$1,3049 \cdot 10^{-6}$	$1,8257 \cdot 10^{-6}$	$1,3053 \cdot 10^{-6}$
1,262	$2,1934 \cdot 10^{-6}$	$2,7132 \cdot 10^{-6}$	$2,0498 \cdot 10^{-6}$
1,409	$2,9182 \cdot 10^{-6}$	$3,3821 \cdot 10^{-6}$	$2,6489 \cdot 10^{-6}$
1,683	$4,0014 \cdot 10^{-6}$	$4,3212 \cdot 10^{-6}$	$3,4481 \cdot 10^{-6}$
2,027	$5,0956 \cdot 10^{-6}$	$5,2425 \cdot 10^{-6}$	$5,2425 \cdot 10^{-6}$
3,040	$7,8100 \cdot 10^{-6}$	$7,8639 \cdot 10^{-6}$	$7,8639 \cdot 10^{-5}$
4,053	$1,0483 \cdot 10^{-5}$	$1,0485 \cdot 10^{-5}$	$1,0485 \cdot 10^{-5}$
5,066	$1,3166 \cdot 10^{-4}$	$1,3106 \cdot 10^{-5}$	$1,3106 \cdot 10^{-5}$
6,079	$1,5861 \cdot 10^{-4}$	$1,5726 \cdot 10^{-5}$	$1,5726 \cdot 10^{-5}$

Al igual que con el aire, se ha logrado una mejora de resultados especialmente en los casos más subsónicos. La Figura 5.15 muestra los resultados obtenidos en la Tabla 5.2. La Figura 5.16 es una ampliación para poder apreciar mejor los resultados con menores presiones. Por otra parte, la Figura 5.17 muestra los resultados adimensionalizados.

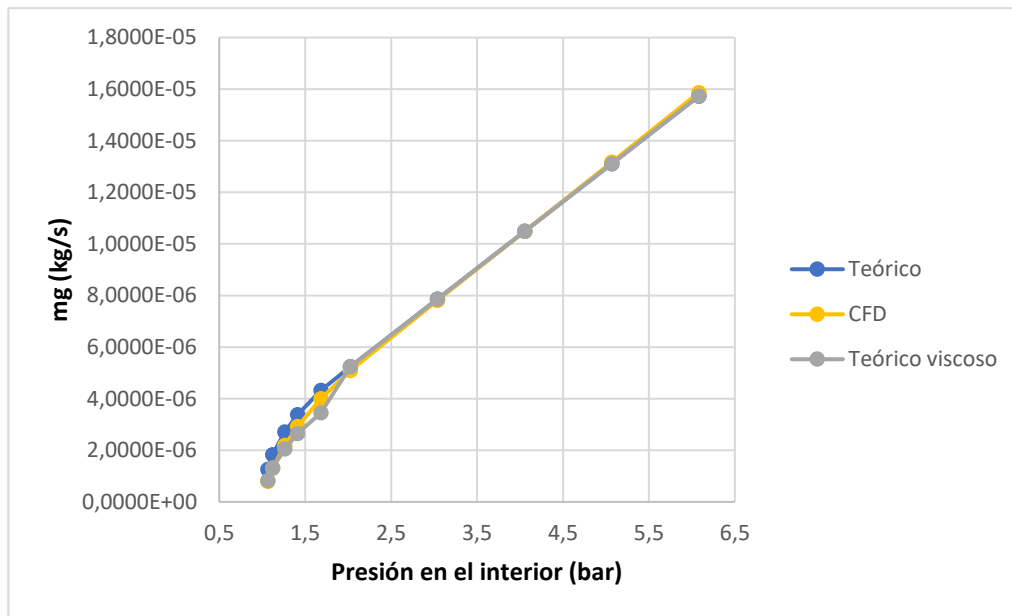


Figura 5.15. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano,  $d = 0,16$  mm

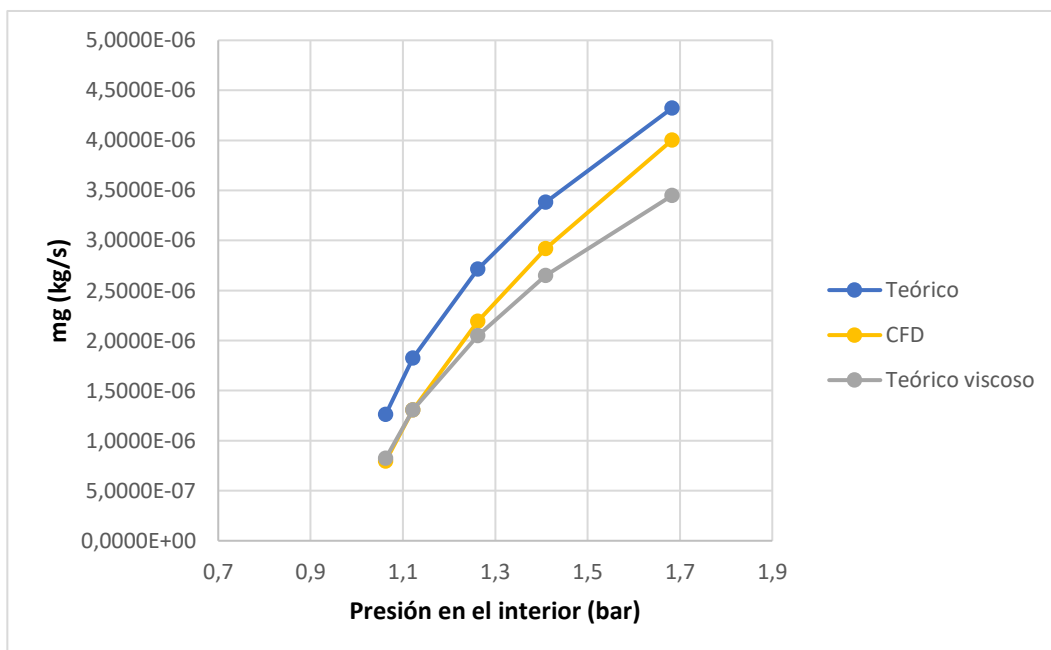


Figura 5.16. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Metano,  $d = 0,16$  mm

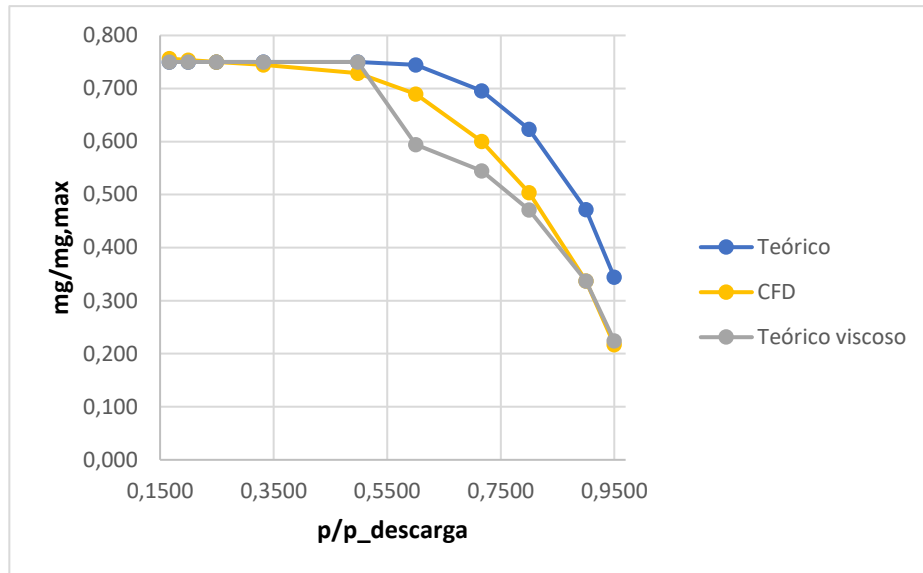


Figura 5.17. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión.  
Metano,  $d = 0,16$  mm

## 5.5 Obtención flujo de metano a partir del aire

### 5.5.1 Conversión de flujo de aire a metano.

La obtención de medidas experimentales o la medición de fugas cuando el fluido es metano conlleva riesgos debidos a la inflamabilidad y toxicidad de este gas. Es mucho más seguro y menos costoso realizar las pruebas de fugas a escala de laboratorio con aire y, a posteriori, convertir los flujos de aire a flujo de metano. En este apartado se propone una metodología de conversión del flujo de fugas, tomando como base la teoría de flujo compresible, para poder obtener el flujo de metano a través de mediciones de flujo de aire.

Para los cálculos se parte de las expresiones del apartado 5.4 teniendo en cuenta que tanto el coeficiente de descarga como el área del orificio tienen el mismo valor para el aire y el metano y que se van a realizar conversiones en las mismas condiciones de presión y temperatura. Por lo tanto, se dan tres casos debido a que el ratio  $\frac{p_a}{p}$  condiciona la relación crítica tanto como para el metano como para el aire:

1.  $\frac{p_a}{p} \leq 0,5283$ , donde serían sónicas ambas fugas bajo las mismas condiciones de presión y temperatura, así que

$$\dot{m}_{g,CH_4} = \dot{m}_{g,Aire} \frac{\sqrt{k_{CH_4} \left( \frac{2}{k_{CH_4} + 1} \right)^{\beta_{CH_4}}}}{\sqrt{k_{Aire} \left( \frac{2}{k_{Aire} + 1} \right)^{\beta_{Aire}}}} \sqrt{\frac{R_{Aire}}{R_{CH_4}}} \quad (5.11)$$

2.  $0,5283 < \frac{p_a}{p} \leq 0,5439$ , donde sería subsónico el flujo de aire y sónico el de metano,

$$\dot{m}_{g,CH_4} = \dot{m}_{g,Aire} \varphi_{Aire} \frac{\sqrt{k_{CH_4} \left( \frac{2}{k_{CH_4} + 1} \right)^{\beta_{CH_4}}}}{\sqrt{k_{Aire} \left( \frac{2}{k_{Aire} + 1} \right)^{\beta_{Aire}}}} \frac{p \sqrt{R_{Aire}}}{p'_{Aire} \sqrt{R_{CH_4}}} \quad (5.12)$$

3.  $0,5439 < \frac{p_a}{p}$ , donde serían subsónicos ambos flujos.

$$\dot{m}_{g,CH_4} = \dot{m}_{g,Aire} \frac{\varphi_{Aire}}{\varphi_{CH_4}} \frac{\sqrt{k_{CH_4} \left( \frac{2}{k_{CH_4} + 1} \right)^{\beta_{CH_4}}}}{\sqrt{k_{Aire} \left( \frac{2}{k_{Aire} + 1} \right)^{\beta_{Aire}}}} \frac{p'_{CH_4} \sqrt{R_{Aire}}}{p'_{Aire} \sqrt{R_{CH_4}}} \quad (5.13)$$

### 5.5.2 Resultados

Como se ha argumentado anteriormente los modelos CFD han sido probados, así que se utilizarán los resultados de fugas obtenidos por simulaciones CFD, con los resultados del método de conversión propuesto. En este apartado se hace un pequeño análisis a partir de los resultados de conversión para el caso del orificio de 0,24 mm. Todos los resultados se encuentran en el Anexo J.

En primer lugar se presenta la Tabla 5.3 en la que se pueden ver los resultados CFD para el metano seguidos de una columna de caudales obtenidos a partir de los resultados CFD para el aire y una columna que muestra el error relativo de la conversión.

*Tabla 5.3: Comparación resultados CFD metano método de conversión.  $d = 0,24 \text{ mm}$*

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio método de conversión (kg/s)	Error relativo (%)
<b>1,063</b>	$2,1644 \cdot 10^{-6}$	$1,923810^{-6}$	11,12
<b>1,122</b>	$3,4018 \cdot 10^{-6}$	$3,171010^{-6}$	6,78
<b>1,262</b>	$5,4979 \cdot 10^{-6}$	$5,4039 \cdot 10^{-6}$	1,71
<b>1,409</b>	$7,1650 \cdot 10^{-6}$	$7,2561 \cdot 10^{-6}$	1,27
<b>1,683</b>	$9,6018 \cdot 10^{-6}$	$1,0271 \cdot 10^{-5}$	6,96
<b>2,027</b>	$1,2006 \cdot 10^{-5}$	$1,1553 \cdot 10^{-5}$	3,78
<b>3,040</b>	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	$1,7968 \cdot 10^{-5}$	1,25
<b>4,053</b>	$2,4376 \cdot 10^{-5}$	$2,4093 \cdot 10^{-5}$	1,16
<b>5,066</b>	$3,0569 \cdot 10^{-5}$	$3,0232 \cdot 10^{-5}$	1,10
<b>6,079</b>	$3,6794 \cdot 10^{-5}$	$3,6285 \cdot 10^{-5}$	1,11

Como se puede ver, el método cuenta con buenos resultados. Únicamente el caso más subsónico tiene un error superior al 7% e incluso hay varios casos con errores en torno al 1%. La Figura 5.18 muestra los resultados obtenidos en la Tabla 5.3. La Figura 5.19 es una ampliación de la 5.18 para poder apreciar mejor los resultados con menores presiones. Por otra parte, la Figura 5.20 muestra los resultados adimensionalizados.

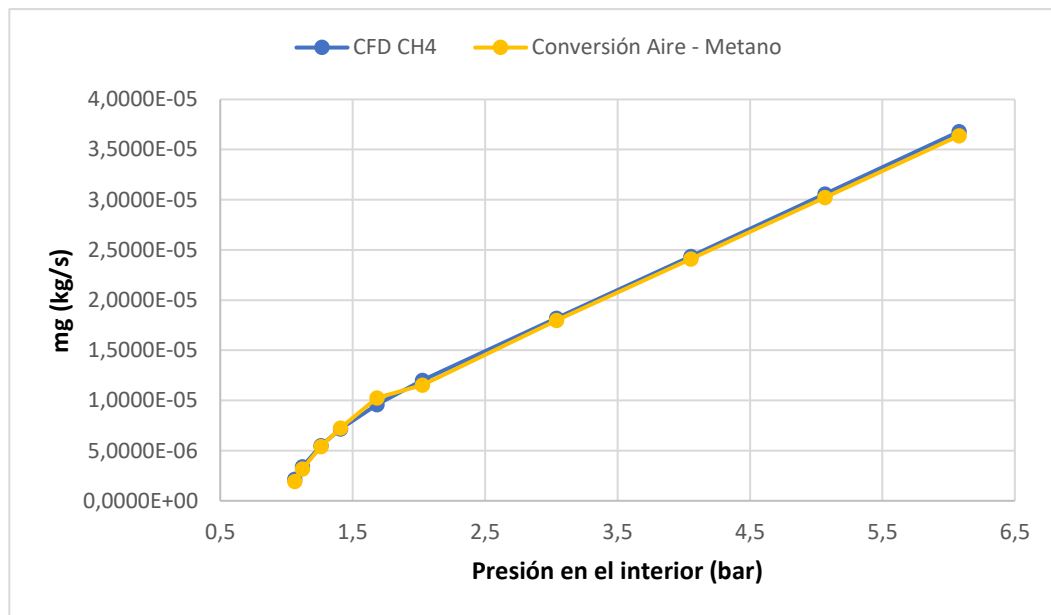


Figura 5.18. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales.  $d = 0,24 \text{ mm}$

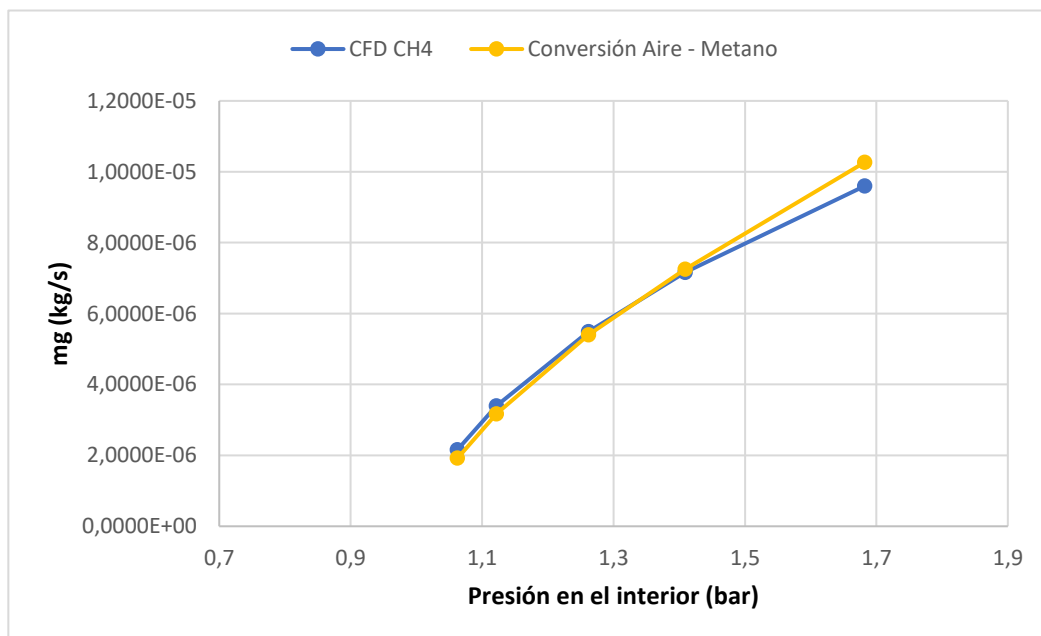


Figura 5.19. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales, ampliación.  $d = 0,24 \text{ mm}$

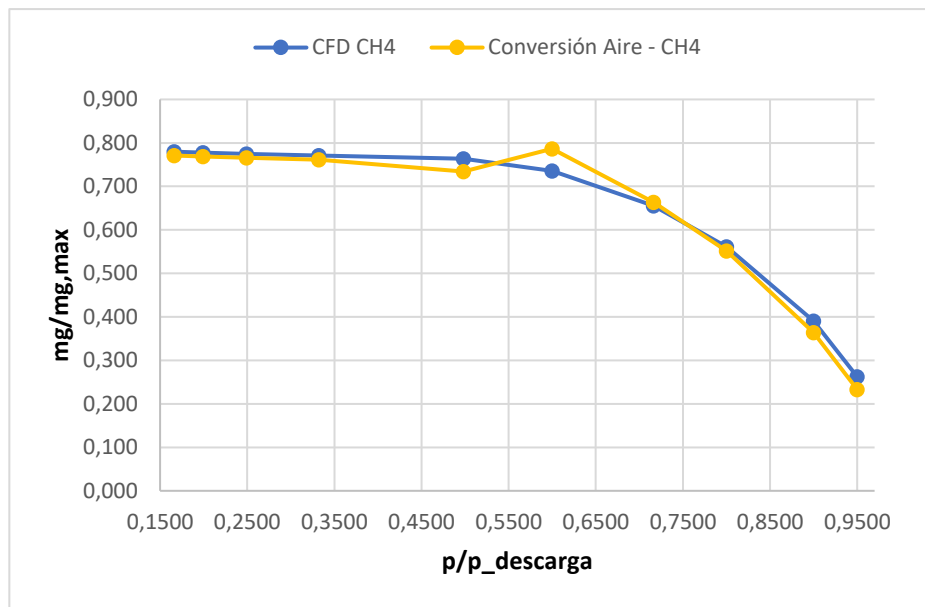


Figura 5.20. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Ratios de caudal y presión.  $d = 0,24$  mm

Como se puede apreciar en las gráficas, los errores en la determinación del flujo de metano a partir del flujo de aire son mínimos. Sin embargo, en la Figura 5.20 se puede observar que donde se agravan los errores es en la zona en la que el ratio  $\frac{p_a}{p}$  se aproxima a 0,55. En el Anexo J se puede comprobar como pasa para todos los casos estudiados. Estos errores pueden ser explicados por las diferencias existentes entre la teoría compresible 1-D y el modelo CFD en la consideración del régimen del flujo en los casos cercanos a 0,55 como se puede comprobar en las tablas del Anexo H. La principal diferencia entre considerar flujo sónico y subsónico reside en el empleo o no de la relación crítica,  $\varphi$ . Por lo tanto, el ajuste fino de la transición entre flujo sónico y subsónico queda como un reto para trabajos futuros.

## 5.6 Conclusiones del capítulo

La teoría compresible 1-D convencional cuenta con grandes limitaciones para cuantificar el flujo de fugas de gas por orificios de pequeño diámetro en los casos subsónicos. Cuando el número de Mach supera el valor de la unidad (ratio  $p/p_a$  bajo), la velocidad del flujo es lo suficientemente alta como para asumir que se puede despreciar la influencia de la viscosidad. No obstante, esto no es asumible



para números de Mach pequeños. En los orificios de pequeño diámetro los efectos de la viscosidad sobre el flujo de fuga son de un orden similar a los de la presión o la temperatura.

Un nuevo modelo compresible-viscoso se ha desarrollado, considerando los efectos viscosos a través de un coeficiente de contracción brusca,  $K_{CB}$ , y un factor de fricción (con la suposición de pared lisa).

El modelo desarrollado mejora mucho los resultados obtenidos a través de la teoría compresible 1-D convencional en la zona subsónica. No obstante, se observan errores considerables en las zonas de transición entre régimen sónico y subsónico debido a las discrepancias en la consideración del régimen del flujo entre modelo CFD y teoría. Por otra parte, el nuevo modelo presenta peores resultados que la teoría compresible 1-D únicamente en el caso de fuga de metano por un orificio de 0,525 mm, el caso con mayor diámetro de orificio y gas con mayor influencia de los efectos viscosos.

A partir de las expresiones de este nuevo modelo, se desarrolla un método de conversión de flujo de aire a metano, empleando los resultados CFD para su comprobación. El uso de este nuevo modelo permite convertir el flujo de fuga de aire a través de un orificio de área desconocida, determinado experimentalmente, a flujo de metano, evitando así los riesgos asociados a la manipulación y trabajo con metano en el laboratorio. Este modelo permite la estimación del flujo de metano con errores en general muy por debajo del 10%, lo que, atendiendo a las incertidumbres experimentales, lo sitúa como un método adecuado para la obtención de caudales de fugas de metano sin riesgos.

## CONCLUSIONES GENERALES Y TRABAJO FUTURO

### 6.1 Conclusiones generales

---

Se ha realizado un estudio de las fugas por orificios de diámetro reducido en las redes de distribución de gas natural.

Para la evaluación de las fugas se implementado un modelo CFD, desarrollado a partir de diferentes pruebas que sirvieron para ajustar los parámetros asociados al cálculo: número de iteraciones, longitudes, tipo de flujo, mezclado, etc.

El modelo CFD definitivo tiene las siguientes características. Se ha optado por una geometría 2-D, que incluye una tubería a presión con una longitud x diámetro de 300x50 mm, un orificio por donde se produce la fuga con longitud de 2 mm y con tres diámetros diferentes (0,16, 0,24 y 0,525 mm), y una cámara externa hacia donde se produce la fuga con dimensiones de 1500x1000 mm para garantizar que sus condiciones de contorno no afecten el flujo de fuga por el orificio. La longitud característica de los elementos de la malla en el orificio es de 10  $\mu\text{m}$  y la de los elementos de la cámara externa y la tubería de 1 mm, resultando una malla con alrededor de 1536770 elementos. Se considera flujo estacionario y compresible como gas ideal, sin considerar la influencia de los cambios de temperatura en la viscosidad y el calor específico, utilizando el modelo k-epsilon para flujo turbulento. Los residuos de las iteraciones se han fijado en valores muy reducidos,

estableciendo un número máximo de 8000 iteraciones para la detención del cálculo. No se ha considerado el mezclado exterior, ya que no influye en el flujo por el orificio.

Los resultados CFD cuentan con una gran precisión, situándose los errores de cálculo no más allá del 0,18% en los casos más desfavorables. Además, se observan grandes diferencias en el comportamiento general de los gases entre los casos sónicos y subsónicos. Mientras que en los casos con flujo sónico existe una dependencia lineal del flujo por el orificio con la presión de operación en los casos con flujo subsónico su comportamiento es más complicado de explicar siendo similar para el aire y el metano. Por otra parte, se comprueba que parámetros como la temperatura cuentan con una mayor variabilidad en el metano que en el aire y que los efectos viscosos son de mayor magnitud en el metano, a consecuencia de la diferencia de propiedades entre los dos gases.

Para complementar los resultados CFD se tomaron medidas experimentales en un banco de ensayos. Pese a que la instrumentación era muy precisa, la incertidumbre del flujo asociada a medidas puntuales es muy elevada por lo que se analizan diferentes estrategias de tratamiento de los datos experimentales. Se descartó el empleo de medias móviles debido a que, a pesar de amortiguar mucho las fluctuaciones de las medidas puntuales, siguen aportando incertidumbres elevadas. Este tratamiento de medias móviles permite diferenciar claramente las dos zonas de comportamiento: la lineal, para altos diferenciales de presión, y la cuadrática, para pequeñas diferencias entre la presión en el interior de la probeta y la atmosférica. Por último, se trabajó en la obtención de dos modelos de regresión diferenciados para cada rango de medidas, zona sónica y zona subsónica. Todos los modelos de regresión obtenidos poseen un adecuado ajuste del parámetro estadístico  $R^2$ . Así, se logró reducir la incertidumbre relativa para todos los casos, en mayor medida en los que tienen bajos diferenciales de presión, situándose todos estos puntos por debajo del 8%.

Tras la comparación de los resultados CFD y los experimentales, queda verificada la validez del modelo CFD, por lo que los resultados obtenidos con las simulaciones se utilizan para la elaboración de nuevos modelos compresible-viscosos.

También se realiza un análisis de la teoría compresible 1-D, implementando un nuevo modelo compresible-viscoso y elaborando un método de conversión de flujo de fuga medido con aire a flujo de metano, con lo que se evitan los riesgos de manipulación de metano en los laboratorios. El análisis de la teoría compresible 1-D convencional reveló grandes limitaciones para cuantificar el flujo de fugas de gas por orificios de pequeño diámetro en los casos subsónicos debido a que desprecia la influencia de la viscosidad, que es de orden similar a los efectos de la presión y temperatura. Así, para los casos subsónicos se desarrolla un nuevo modelo compresible-viscoso mediante el empleo de un coeficiente de contracción brusca,  $K_{CB}$ , y un factor de fricción (suponiendo pared lisa). Este modelo mejora mucho los resultados obtenidos a través de la teoría compresible 1-D convencional detectándose únicamente errores no despreciables en las zonas de transición entre régimen sónico y subsónico. El método de conversión de flujo de aire a metano permite la estimación del flujo de metano con bastante precisión, contando con errores que en su mayoría se quedan por debajo del 10%, situándose como un buen método de obtención de caudales de fugas de metano a partir de fugas evaluadas con aire.

## 6.2 Trabajo futuro

---

Pese a la amplitud de los análisis realizados en este trabajo, se puede seguir profundizando en el estudio de las fugas por orificios de diámetro reducido en las redes de distribución de gas natural. En ese sentido, algunas de las líneas de trabajo futuro podrían ser:

- Realizar un análisis de la zona de transición entre flujo sónico y subsónico con el objetivo de reducir los errores detectados en esa zona.
- Ampliar el abanico de gases estudiados incluyendo otros como el hidrógeno, uno de los gases llamados a circular por los sistemas de distribución en los próximos meses.

- Ampliar el abanico de materiales de tubos estudiados analizando en cuáles de ellos se verifican las hipótesis de pared lisa y en cuáles es necesario desarrollar otro tipo de modelos.
- Estudiar la influencia del terreno en las fugas de gas para el caso de tuberías enterradas.

## Bibliografía

- A.Kirchgessner, D., A.Lott, R., Cowgill, R., R.Harrison, M., & M.Shires, T. (Septiembre de 1997). Estimate of methane emissions from the US natural gas industry. *Chemosphere*, 35(6), 1365-1390.
- ANSYS ®. (s.f.). ANSYS Student 2019 (Versión R1).
- Área de Mecánica de Fluidos, Universidad de Zaragoza. (Septiembre de 2018). Módulo 1 - Instrumentación. Zaragoza.
- Aritomi, M., Asano, R., Li, N., & Asano, H. (1994). Evaluation Method of Gas Leakage Rate from Transportation Casks of Radioactive Materials (II). *Journal of Nuclear Science and Technology*, 264-273.
- Barroso, J., Solis, J. M., Ballester, J., & Pina, A. (2009). Evaluation of methane emissions from polyethylene gas distribution systems at. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 144-153.
- Ben-Mansour, R., Habib, M., Khalifa, A., Youcef-Toumi, K., & Chatzigeorgiou, D. (2012). Computational fluid dynamic simulation of small leaks in water pipelines for direct leak pressure transduction. *Computers & Fluids*, 110-123.
- Blake, D. R. (1984). *Increasing concentrations of atmospheric methane*. Irvine: University of California.
- Bolle, H., Seiler, W., & Bolin, B. (1986). Other greenhouse gases and aerosols. En B. Bolin (Ed.), *The Greenhouse Effect, Climate Change and Ecosystems* (págs. 157-203). New York: John Wiley and Sons.
- Bomelburg, H. J. (1977). *Estimation of gas leak rates through very small orifices and channels*.
- Buckingham, E., & Edwards, J. D. (s.f.). *Efflux of gases through small orifices*.
- Comisión Europea. (s.f.). *Estrategias y objetivos climáticos*. Recuperado el 09 de 09 de 2019, de [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies\\_es](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_es)
- Crutzen, P. (1987). Role of the tropics in atmospheric chemistry. En R. Dickinson (Ed.), *Geophysiology of Amazonia* (págs. 107-129). New York: John Wiley and Sons.
- Darmstadter, J., Ayres, L., Ayres, R., Clark, W., Crosson, P., Crutzen, P., . . . J.A. Tarr. (1984). *Impacts of world development on selected characteristics of*

- the atmosphere: and integrative approach*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge.
- Ebrahimi-Moghadam, A., Farzaneh-Gord, M., Arabkoohsar, A., & Moghadam, A. J. (2018). CFD analysis of natural gas emission from damaged pipelines: Correlation development for leakage estimation. *Journal of Cleaner Production*, 257-271.
- Ehhalt, D., & Schmidt, U. (1978). Sources and sinks of atmospheric methane. *Pageoph* 116, 452-463.
- Energy Information Administration. (1997). *Natural Gas Annual 1996*. Washington DC.
- Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla. (s.f.). Fluidodinámica computacional (CFD). Sevilla: Universidad de Sevilla.
- EuropaPress. (30 de 03 de 2017). *La CNMC cifra las penalizaciones por mermas en el transporte de gas en apenas 3,5 millones*. Recuperado el 09 de 09 de 2019, de <https://www.europapress.es/economia/energia-00341/noticia-cnmc-cifra-penalizaciones-mermas-transporte-gas-apenas-35-millones-20161020141437.html>
- Fox, J. (2 de Septiembre de 2019). R Commander (Versión 2.6.0). Obtenido de <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Misc/Rcmdr/>
- Gil, S., & Berton, E. (s.f.). *Determinación cuantitativa de fugas en instalaciones internas de gas natural*.
- Hord, J. (1967). *Correlations for predicting leakage through close valves*. Boulder.
- J.C.Sheppard, Westberg, H., Hopper, J., & Ganesan., K. (1982). Inventory of global methane sources and their production rates. *Journal of Geophysical Research*, 1305-1312.
- Laboratorio de Combustión Industrial LIFTEC. (2019). *Estudio de emisiones de gas en las redes de gas natural*. Zaragoza.
- Lee, I. D., Smith, O. I., & Karagozian, A. R. (3 de marzo de 2003). Hydrogen and Helium Leak Rates from Micromachined Orifices. *AIAA JOURNAL*, págs. 457-464.
- SEDIGAS. (2018). *Informe anual 2018*. Barcelona.
- Seiler, W. (1984). Contribution of biological processes to the global budget of CH<sub>4</sub> in the atmosphere. En M. K. Reddy (Ed.), *Current Perspectives in Microbial*

- Ecology* (págs. 468-477). Washington DC: American Society for Microbiology.
- Sivathanu, Y. (s.f.). *Technology Status Report: Natural Gas Leak Detection in Pipes*.
- Statistics Department of the University of Auckland. (5 de Julio de 2019). R (versión 3.6.1).
- White, F. (2008). *Mecánica de fluidos*. Mc Graw Hill.
- Wikkerink, J. (2006). Improvement in determination of methane emissions from gas distribution in Netherlands. *23rd World Gas Conference*. Amsterdam.
- Yuhua, D., Huilin, G., Jing'en, Z., & Yaorong, F. (2002). Evaluation of gas release rate through holes in pipelines. *Loss Prevention in the process industries*, 423-428.
- Yunus, A. C. (2010). *Fluid Mechanics: Fundamentals And Applications (SI Units)*. Tata McGraw Hill Education Private Limited.
- Zhang, X.-W., Jin, X.-L., Wang, Y., Deng, K., & Ren, Z.-M. (2011). Comparison of Standard k- $\epsilon$  Model and RSM on Three Dimensional Turbulent Flow in the SEN of Slab Continuous Caster Controlled by Slide Gate. *ISIJ International*, 51(4), 581-587.





# ANEXOS

ANEXO



## ECUACIONES DEL MODELO COMPUTACIONAL K-ÉPSILON

En el capítulo 2, se realizan pruebas para la elección del modelo viscoso para las simulaciones CFD comparando resultados obtenidos por el modelo k-épsilon y el de los esfuerzos de Reynolds. En este anexo se presentan las ecuaciones que rigen ambos modelos.

### Ecuaciones del modelo k-épsilon

- Ecuación de la energía cinética turbulenta,  $k$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial t}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{A.1})$$

- Ecuación de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta,  $\varepsilon$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + C_{3\varepsilon} P_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{A.2})$$

donde:

- $\mu_t$  es la viscosidad turbulenta

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (\text{A.3})$$

- $P_k$  es la “producción de energía cinética”

$$P_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (\text{A.4})$$

$$P_k = \mu_t S^2 \quad (\text{A.5})$$

- $S$  es el módulo del tensor medio de la tasa de deformación

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (\text{A.6})$$

- $P_b$  representa el efecto del empuje

$$P_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (\text{A.7})$$

- $\beta$  es el coeficiente de expansión térmica

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (\text{A.8})$$

- $C_{3\varepsilon}$  se relaciona con las condiciones locales del fluido

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left(\frac{\nu}{u}\right) \quad (\text{A.9})$$

$$\circ \quad C_{1\varepsilon} = 1,44; C_{2\varepsilon} = 1,92; C_{\mu} = 0,09; \sigma_k = 1,0; \sigma_{\varepsilon} = 1,3; Pr_t = 0,85$$

### Ecuaciones del modelo de los esfuerzos de Reynolds

- Ecuaciones de Navier-Stokes

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{A.10})$$

$$\bar{u}_j \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (\text{A.11})$$

- Ecuación de transporte para el tensor de esfuerzos

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho \overline{u'_i u'_j}) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_k \overline{u'_i u'_j}) &= \frac{\partial}{\partial x_k} [\rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p(\delta_{kj} u'_i + \delta_{ik} u'_j)}] + \\ &+ \frac{\partial}{\partial x_k} \left[ \mu \frac{\partial}{\partial x_k} (\overline{u'_i u'_j}) \right] - \rho \left( \overline{u'_i u'_k} \frac{\partial u_j}{\partial x_k} + \overline{u'_j u'_k} \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) + p \left( \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) - \\ &- \rho \beta (g_i \overline{u'_j \theta} + g_j \overline{u'_i \theta}) - 2\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_k} \frac{\partial \overline{u'_j}}{\partial x_k} - 2\rho \Omega_k (\overline{u'_j u'_m} e_{ikm} + \overline{u'_i u'_m} e_{jkm}) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

- Ecuación de la energía cinética turbulenta,  $k$

$$\rho \frac{\partial(u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \frac{1}{2} (P_{ii} + G_{ii}) - \rho \varepsilon \quad (\text{A.13})$$

- Ecuación de la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta,  $\varepsilon$

$$\rho \frac{\partial(u_i \varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{1}{2} (P_{ii} + C_{3\varepsilon} G_{ii}) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (\text{A.14})$$

donde:

- $C_{3\varepsilon}$  se relaciona con las condiciones locales del fluido

$$C_{3\varepsilon} = \tanh\left(\frac{v}{u}\right) \quad (\text{A.15})$$

- $C_{1\varepsilon} = 1,44$ ;  $C_{2\varepsilon} = 1,92$ ;  $C_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$ ;  $\sigma_\varepsilon = 1,3$ ;  $Pr_t = 0,85$

## PRUEBAS PARA LA JUSTIFICACIÓN DEL MODELO CFD

Para evaluar la validez del modelo CFD desarrollado, se han realizado una serie de pruebas, agrupadas en este Anexo, que permiten valorar la influencia de algunos parámetros en el flujo de fuga determinado con las simulaciones. Dichas pruebas permiten asegurar que el modelo base, previamente explicado, es suficientemente exacto para describir la fuga por orificios de diámetro reducido.

En las pruebas realizadas se han comprobado los siguientes factores:

- a) Evolución de los residuos de las ecuaciones resueltas por el programa de simulación CFD y aproximación del número de iteraciones necesarias para el cálculo
- b) Geometría de la cámara externa para garantizar que las condiciones de contorno no afecten de manera relevante a la fuga por el orificio
- c) Longitud del orificio
- d) Tamaño de celdas en la malla
- e) Régimen del flujo: laminar o turbulento

- f) Tipo de flujo: compresible o incompresible
- g) Relevancia de la influencia de la temperatura en la viscosidad y el calor específico
- h) Importancia del proceso de mezclado del gas fugado con el aire exterior.

## B.1 Análisis de los residuos y el número de iteraciones

Por cuestiones de eficiencia en procesos de cálculo iterativo, es necesario llegar a un compromiso entre los residuos fijados y el tiempo de computación. Si se fija como criterio de convergencia unos residuos demasiado bajos puede dispararse el número de iteraciones necesarias, aumentando drásticamente el tiempo de cálculo.

Para determinar el número de iteraciones necesarias para lograr un límite de residuos prefijado con el mallado del modelo base, se registra la evolución de los residuos de las diferentes ecuaciones que utiliza ANSYS Fluent para el problema en estudio. En la Figura B.1 se analiza la evolución de los residuos para las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento en los ejes X/Y, la ecuación de la energía y las magnitudes asociadas al modelo de turbulencia, k-épsilon para un diámetro de orificio de 0,24 mm.

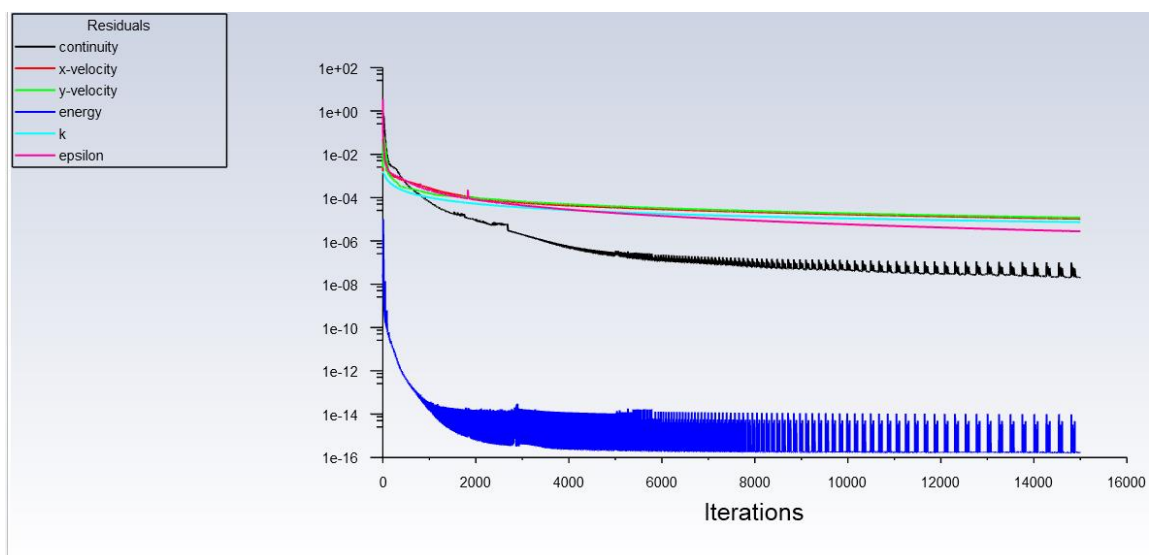


Figura B.1. Comportamiento de los residuos con el número de iteraciones

La imagen muestra cómo los residuos asociados a todas las ecuaciones presentan un comportamiento asintótico a partir de un número determinado de iteraciones, con las condiciones de la malla y la física del modelo base. Realizando un análisis de los residuos de cada una de las ecuaciones, en la siguiente tabla se propone un criterio de parada o convergencia razonable para cada uno de los residuos y el número de iteraciones aproximado en el que lo alcanza.

*Tabla B.1. Residuos de convergencia alcanzados para cada variable*

Ecuación	Criterio de convergencia	Nº de iteraciones aproximado
<b>Continuidad</b>	$10^{-7}$	6000
<b>Velocidad x</b>	$10^{-4}$	5000
<b>Velocidad y</b>	$10^{-4}$	5000
<b>Energía</b>	$10^{-15}$	3000
<b>k</b>	$10^{-4}$	6000
<b>épsilon</b>	$10^{-5}$	6000

Como se puede apreciar, el número de iteraciones aproximado que asegura el cumplimiento de todos los criterios de convergencia es 6000. No obstante, en el caso de que no se cumpliera cualquiera de los criterios, el programa no detendría los cálculos. Así, es necesario fijar otro criterio extra para asegurar la finalización del cálculo cuando se dé este tipo de circunstancias. Para ello, en la configuración de parada de los cálculos se fija un número máximo de 8000 iteraciones.

## **B.2. Análisis de la geometría**

### **B.2.1 Análisis de la geometría de la cámara externa**

En primer lugar, se analiza la geometría de la cámara de aire exterior hacia donde se produce la fuga, en la que existe presión atmosférica. No se desea simular el proceso de mezclado y dispersión de la fuga en la atmósfera externa, pero no



resultaría adecuado fijar un contorno de presión atmosférica en la misma salida del orificio. Para reducir los efectos de este contorno sobre la fuga se decide implementar un dominio de flujo externo, denominado cámara externa, con fronteras suficientemente alejadas del orificio.

El tamaño de la cámara externa de aire hacia la que se produce la fuga puede influir en los resultados y determinar su validez. Esta prueba tiene como objetivo fijar un tamaño adecuado para la cámara de manera que sus condiciones de contorno influyan lo menos posible en el flujo por el orificio, minimizando así el error de cálculo del flujo de fuga.

Se analizaron diferentes casos en los que solo se ha modificado el tamaño de la cámara de aire hacia la que fuga la tubería. Se simularon los siguientes tamaños (longitud x radio en mm): 60x40, 300x200, 600x400, 1050x700, 1500x1000 y 2025x1350 para un diámetro de orificio de 0,24 mm. Los resultados obtenidos para una presión absoluta en la tubería de 1,4 bar se presentan en la Tabla B.2.

*Tabla B.2. Residuos de convergencia alcanzados para cada variable. Caso subsónico*

<b>Tamaño (mm)</b>	<b>Flujo de entrada (kg/s)</b>	<b>Flujo de salida (kg/s)</b>	<b>Error (kg/s)</b>	<b>% Área flujo inverso</b>
<b>60x40</b>	$9,153 \cdot 10^{-6}$	$-9,153 \cdot 10^{-6}$	$-5,9326 \cdot 10^{-11}$	95,7
<b>300x200</b>	$9,0756 \cdot 10^{-6}$	$-9,094 \cdot 10^{-6}$	$-1,8346 \cdot 10^{-8}$	70,5
<b>600x400</b>	$9,0704 \cdot 10^{-6}$	$-9,1129 \cdot 10^{-6}$	$-4,2499 \cdot 10^{-8}$	84,7
<b>1050x700</b>	$9,0687 \cdot 10^{-6}$	$-9,0523 \cdot 10^{-6}$	$1,6359 \cdot 10^{-8}$	79
<b>1500x1000</b>	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	$-9,075 \cdot 10^{-6}$	$-3,0124 \cdot 10^{-10}$	21,6
<b>2025x1350</b>	$9,0801 \cdot 10^{-6}$	$-9,0807 \cdot 10^{-6}$	$-5,723 \cdot 10^{-10}$	54,9

En primer lugar, se aprecia que el modelo con menor tamaño de la cámara de aire es el que menor error en el cierre de flujo presenta. Sin embargo, el caudal de fuga

estimado en las simulaciones es mucho mayor que en el resto de los casos estudiados (también con respecto a los experimentos realizados). Por otra parte, el porcentaje de área con flujo inverso es muy elevado. En ANSYS Fluent, la cantidad de área con flujo inverso es un indicador de que existen zonas con recirculación o vórtices en las fronteras de entrada y salida que pueden complicar la estabilidad de la solución. Estos fenómenos deben evitarse siempre que sea posible para mejorar el cierre de las ecuaciones. Se ha comprobado que el porcentaje de área con flujo inverso en esta geometría se puede reducir alejando el contorno de salida del orificio. Considerando que una elevada cantidad de área con flujo inverso puede afectar a la solución del problema, limitando la convergencia de los métodos iterativos, se ha decidido aumentar las dimensiones de la cámara externa.

Colocar las condiciones de contorno a una distancia suficiente es necesario, teniendo en cuenta que las simulaciones revelan que los números de Mach son elevados como se puede ver en el capítulo 3. Por lo tanto, se descartan las geometrías con menores tamaños, hasta llegar a la de 1500x1000 mm, que es la que menor error y menor cantidad de área con flujo inverso presenta. Se realizó otra prueba con una cámara de tamaño 2025x1350 pero el tiempo de computación fue muy elevado y no se obtuvo una cantidad de área con flujo inverso inferior a la del caso de los 1500x1000 mm por lo que estas últimas se escogieron como las dimensiones para el modelo base.

No obstante, para corroborar estas conclusiones, se amplió el abanico de casos de estudio, realizando pruebas cambiando la presión en el interior de la tubería hasta los 16 bar para lograr condiciones supersónicas en la descarga del orificio, en contraposición a los casos anteriormente estudiados donde el flujo era subsónico.

En la Figura B.2 se muestra la comparativa de un caso con flujo subsónico y otro con flujo supersónico en la descarga.

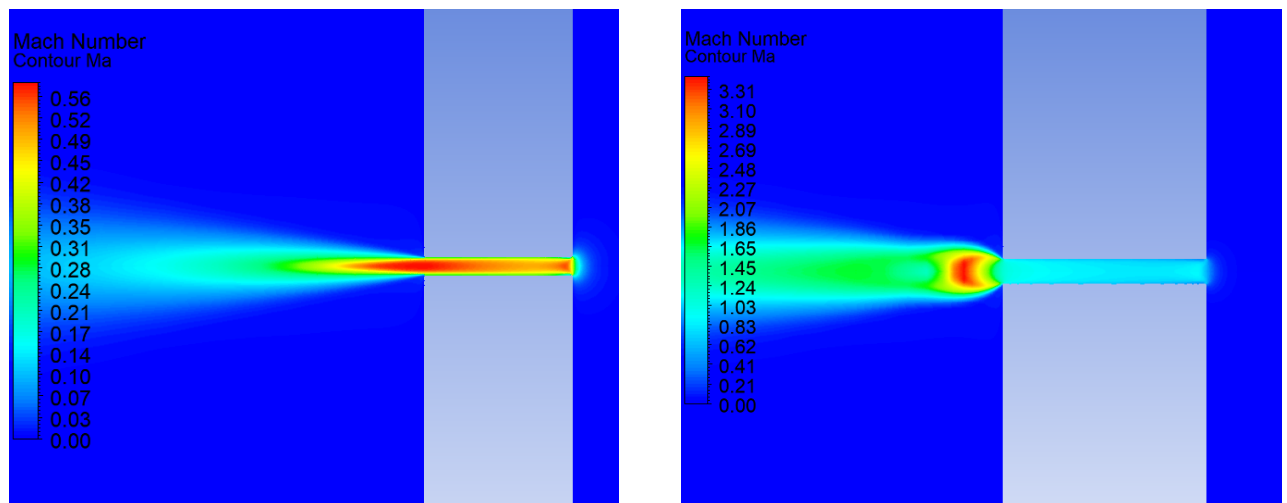


Figura B.2. Comparación de un flujo subsónico con otro supersónico en la descarga

Los resultados de los casos supersónicos se presentan en la Tabla B.3.

Tabla B.3. Residuos de convergencia alcanzados para cada variable. Caso supersónico

Tamaño (mm)	Flujo de entrada (kg/s)	Flujo de salida (kg/s)	Error (kg/s)	% Área flujo inverso
<b>60x40</b>	$1,3504 \cdot 10^{-4}$	$-1,3504 \cdot 10^{-4}$	$1,0852 \cdot 10^{-10}$	96,1
<b>300x200</b>	$1,3517 \cdot 10^{-4}$	$-1,3516 \cdot 10^{-4}$	$1,448 \cdot 10^{-8}$	92,7
<b>600x400</b>	$1,3504 \cdot 10^{-4}$	$-1,3498 \cdot 10^{-4}$	$5,6869 \cdot 10^{-8}$	76,1
<b>1050x700</b>	$1,3499 \cdot 10^{-4}$	$-1,35 \cdot 10^{-4}$	$-1,3425 \cdot 10^{-8}$	34,8
<b>1500x1000</b>	$1,3513 \cdot 10^{-4}$	$-1,3512 \cdot 10^{-4}$	$-3,6682 \cdot 10^{-9}$	27,2

Las conclusiones que se pueden sacar de estos resultados son similares a las obtenidas para los casos subsónicos. Pese a que en este caso el error para el flujo es un orden de magnitud mayor que en el caso anterior, la disminución del porcentaje de área por la que circula flujo inverso es determinante. Por lo tanto,

teniendo en cuenta los resultados para los casos subsónicos y supersónicos, se decide que la cámara externa tenga dimensiones de 1500x1000 mm.

### B.2.2 Análisis de la longitud del orificio

Para un diámetro del orificio de 0,525 mm se realizaron simulaciones con diferentes longitudes del orificio (espesor de pared del tubo) y diferentes presiones en la tubería. En la Tabla B.4 se muestran los resultados obtenidos.

*Tabla B.4. Flujo de fuga para diferentes longitudes y presiones absolutas*

Longitud mm	Presión de entrada (Pa)	Flujo de entrada (kg/s)	Flujo de salida (kg/s)	Iteraciones
1	501325	-0,757557828	0,75786552	3875
2	501325	-0,739501596	0,739580112	8646
5	501325	-0,707195772	0,708068196	9160
2	201325	-0,286113582	0,2861375616	10000
5	201325	-0,2726985384	0,2729557692	4500

Como se puede apreciar en la tabla, al aumentar la longitud del orificio disminuye el flujo de gas para un mismo diferencial de presión.

En este trabajo no se estudiará este factor, sino que se trabaja con una longitud del orificio fija de 2 mm, que es el espesor de pared de los orificios calibrados que se evaluarán experimentalmente.

### B.3 Tamaño de las celdas en la malla

Otro de los factores determinantes en los resultados de las simulaciones es el tamaño de los elementos de la malla. Una malla gruesa puede suponer un mayor error en el cierre de los balances. Por otra parte, una malla demasiado fina puede disparar el tiempo de computación sin apenas mejorar los resultados. El tamaño

adecuado de la malla debería seleccionarse como una solución de compromiso entre acotar el error y mantener un cierto criterio de eficiencia.

En los casos anteriores, el mallado contenía elementos con forma de rectángulos cuya longitud característica era de 10  $\mu\text{m}$  en el caso de los elementos del orificio y de 1 mm en el caso de la tubería y la cámara de aire por lo que la malla para el caso de la cámara de aire de tamaño 1500x1000 mm cuenta con 1536770 elementos. Se realizaron otros cálculos variando el tamaño de los elementos de tal manera que el mallado tuviera un total de 700598 elementos en un caso y de 2434222 en el otro. A continuación, en la Tabla B.5 se presentan los resultados obtenidos para un diámetro de orificio de 0,24 mm.

*Tabla B.5. Influencia del tamaño de las celdas en los resultados*

Elementos	Flujo de entrada (kg/s)	Flujo de salida (kg/s)	Error (kg/s)
<b>700598</b>	$9,5251 \cdot 10^{-6}$	$-9,5304 \cdot 10^{-6}$	$-5,3129 \cdot 10^{-9}$
<b>1536770</b>	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	$-9,075 \cdot 10^{-6}$	$-3,0124 \cdot 10^{-10}$
<b>2434222</b>	$8,9051 \cdot 10^{-6}$	$-8,9067 \cdot 10^{-6}$	$-1,6722 \cdot 10^{-9}$

Como se puede apreciar, hay una gran diferencia entre los flujos obtenidos en el caso de los 700598 elementos y los dos restantes. Además, el error es un orden de magnitud superior al caso de los 1536770 elementos.

Por otra parte, comparando el caso de 1536770 con el de 2434222 elementos, se puede ver cómo el error del primero es un orden de magnitud inferior al del segundo pese a que la diferencia entre el tiempo de cálculo de ambos casos es de varias horas. Podría pensarse que una mayor finura de malla arrojaría mejores resultados, pero en este caso no es así.

En consecuencia, se descartan tanto el caso de la malla más gruesa como el de la más fina (con 2434222 elementos); y se mantienen las longitudes características

de los elementos tanto en el orificio como en la tubería y la cámara del modelo base (1536770 elementos).

#### B.4 Tipo de modelo de flujo viscoso

En este apartado se pretende analizar si la consideración de flujo laminar, con el consiguiente ahorro de tiempo de cálculo, permite obtener resultados satisfactorios.

Las pruebas realizadas hasta este punto se llevaron a cabo suponiendo flujo turbulento, ya que el orden del Reynolds se consideraba a priori superior a 2300 (Yunus, 2010). Para los cálculos se seleccionan las ecuaciones del modelo k-epsilon, uno de los modelos de turbulencia más utilizado a nivel industrial (Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla). Este modelo tiene en cuenta la energía cinética turbulenta,  $k$ , y la disipación de energía cinética turbulenta,  $\epsilon$ .

Atendiendo a la posibilidad de que para diferencias de presión reducidas se pudieran establecer números de Reynolds menores, se realizó también una prueba configurando ANSYS para que tuviera en cuenta únicamente las ecuaciones para flujo laminar. En la Tabla B.6 se muestra la comparativa de los resultados.

*Tabla B.6. Influencia del modelo viscoso en los resultados*

Modelo	Flujo de entrada (kg/s)	Flujo de salida (kg/s)	Error (kg/s)
<b>Turbulento: k-epsilon</b>	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	$-9,075 \cdot 10^{-6}$	$-3,0124 \cdot 10^{-10}$
<b>Laminar</b>	$9,9389 \cdot 10^{-6}$	$-6,0587 \cdot 10^{-5}$	$-5,0648 \cdot 10^{-5}$

Como se puede apreciar en la tabla, es inviable la simplificación del problema al ser el error similar al valor del flujo de salida para el caso laminar. En la Figura B.3 se presenta la evolución del número de Mach en la cámara externa en la zona cercana al orificio. Como se verá en el apartado B.7, para la resolución del problema se han despreciado los efectos de mezclado exterior. Por lo tanto, la propia

configuración del flujo laminar (el fluido avanza ordenado en diferentes estratos paralelos a la pared del tubo) hace que parezca mucho más realista la configuración externa del chorro para el modelo de flujo turbulento.

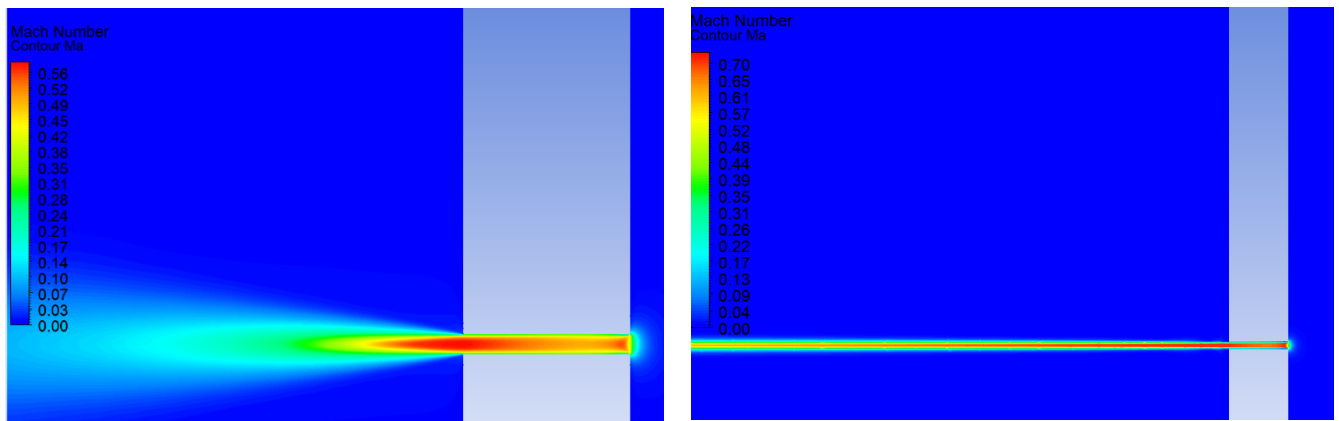


Figura B.3. Comparación del Ma con flujo turbulento y con flujo laminar

Por otra parte, se realizó una prueba adicional para comprobar el funcionamiento de un modelo de turbulencia diferente al k-epsilon. Se trata del modelo de “Esfuerzos de Reynolds” que consiste en la resolución de cinco ecuaciones (tres más que en el modelo k-epsilon) disponibles en el Anexo A (Zhang, Jin, Wang, Deng, & Ren, 2011). El objetivo de esta prueba era comprobar si un modelo más complejo de turbulencia permite obtener resultados más precisos en este estudio.

Una vez resuelto el problema, se comprobó que el error en el flujo era de  $-8,5772 \times 10^{-5}$  kg/s, varios órdenes de magnitud por encima del modelo k-epsilon. Además, se comprobó que existe flujo inverso en el 86,7% del área de salida, por lo que se descartó el uso de este modelo de turbulencia.

Estos malos resultados pueden explicarse por la evolución de los residuos mostrada en la Figura B.4. Como se puede apreciar, el cálculo se detuvo al alcanzar el máximo número de iteraciones, sin lograr la convergencia de varios parámetros, los cuales convergen sin problemas para el modelo k-epsilon.

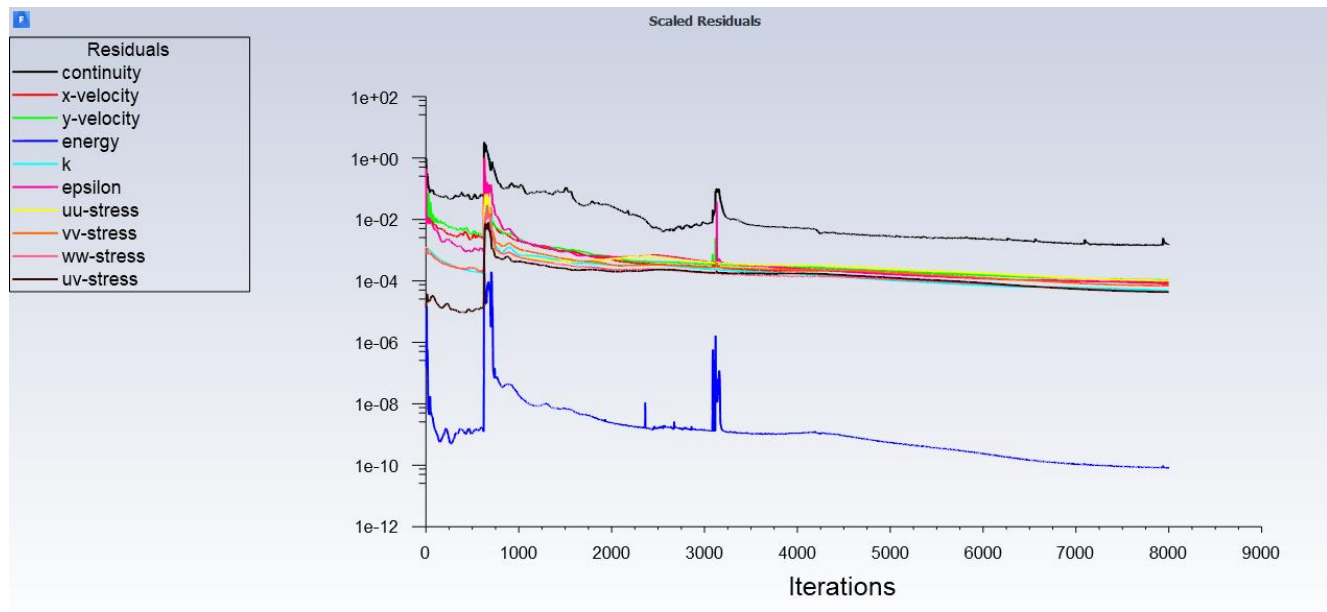


Figura B.4. Comparación de los residuos en el modelo de turbulencia “Esfuerzos de Reynolds”

## B.5 Compresibilidad del flujo

También se realizaron pruebas para evaluar la posibilidad de tratar el flujo de gas como incompresible ( $\rho = \text{cte}$ , despreciando sus cambios con presión y temperatura), lo cual supone una simplificación del problema ya que solo se puede considerar un fluido como incompresible cuando el número de Mach sea menor a 0,3 (Yunus, 2010). En estas condiciones, se producen cambios en la densidad menores al 5%, lo cual no afecta demasiado los resultados obtenidos.

En las ilustraciones de los apartados anteriores se puede comprobar que en los estudios del caso base para la selección del modelo de simulación se obtienen números de Mach cercanos a 0,6, por lo que a priori se puede pensar que el modelo de flujo incompresible no es el correcto. No obstante, se analizó el efecto de dicha simplificación y los resultados obtenidos se muestran a continuación.



Tabla B.7. Influencia de la compresibilidad

Comportamiento fluido	Flujo de entrada (kg/s)	Flujo de salida (kg/s)	Error (kg/s)
Gas ideal compresible	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	$-9,075 \cdot 10^{-6}$	$-3,0124 \cdot 10^{-10}$
Incompresible	$8,9927 \cdot 10^{-6}$	$-4,387 \cdot 10^{-3}$	$-4,378 \cdot 10^{-3}$

A la vista de los resultados se comprueba que, efectivamente, la suposición de flujo incompresible no describe correctamente lo que ocurre en este tipo de fugas.

## B.6 Influencia de la temperatura en las propiedades

En este apartado se analiza si la variación de la viscosidad y el calor específico con la temperatura podrían afectar al flujo de gas que pasa por el orificio.

Se realizaron las pruebas con aire para diferentes presiones en la tubería y con un diámetro de orificio de 0,525 mm.

Se utilizó el siguiente modelo polinómico para el calor específico ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) en función de la temperatura (K),

$$\begin{aligned}
 C_p = & 1161,482 - 2,368819T + 0,01485511T^2 - 5,034909 \times 10^{-5}T^3 + \\
 & + 9,92857 \times 10^{-8}T^4 - 1,111097 \times 10^{-10}T^5 + 6,540196 \times 10^{-14}T^6 - \\
 & - 1,573588 \times 10^{-17}T^6
 \end{aligned} \quad (\text{B.1})$$

Para la viscosidad ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ ) se utilizó la ley de Sutherland de tres coeficientes,

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{3/2} \frac{T_0 + S}{T + S} \quad (\text{B.2})$$

donde  $\mu_0 = 1,716 \times 10^{-5}$ ,  $T_0 = 273,11$  y  $S = 110,56$

En la Tabla B.8 se muestran los resultados obtenidos.

*Tabla B.8. Influencia de la temperatura*

Presión manométrica (bar)	Flujo sin T (kg/h)	Flujo con T (kg/h)	Régimen
4	0,738	0,738	Sónico
3	0,589	0,590	Sónico
2	0,441	0,441	Sónico
1	0,289	0,290	Sónico
0,4	0,174	0,174	Subsónico

Como se puede apreciar en la tabla, la influencia de la temperatura en las propiedades no es relevante. Dado que el uso de estas ecuaciones aumenta considerablemente el tiempo de cálculo, se ha optado por no tener en cuenta el efecto de la temperatura sobre la viscosidad y el calor específico.

## **B.7 Influencia del proceso de mezclado exterior**

En este apartado se analiza la influencia que podría tener la interacción entre el chorro y el aire exterior sobre el flujo de gas metano fugado por el orificio.

En el modelo base se considera que la cámara externa es un dominio de aire, lo que es exacto para el caso en que se analizan fugas de aire por el orificio.

Cuando se realizan las simulaciones de fugas de metano, se considera que la cámara externa está llena de metano, lo que coincidiría con aquellas fugas en un recinto cerrado después del tiempo necesario para que el gas desaloje el aire del recinto. Pero si la tubería está ubicada en el exterior, el gas fugado se diluye en el aire ambiente, y posiblemente, la cámara externa debería considerarse llena de un gas mezclado más parecido al aire que al metano. En este caso debe existir un

proceso de mezclado que, de alguna manera puede influir en los contornos de presión, velocidad y densidad en la descarga del orificio, lo que, a su vez, podría afectar el flujo de fuga.

Para valorar este aspecto se realizan una serie de pruebas, donde se comparan los resultados obtenidos para fuga de metano cuando se considera la cámara externa llena de metano y de aire.

En la Tabla B.9 se muestran los resultados obtenidos.

*Tabla B.9. Influencia del proceso de mezclado exterior para  $d=0,24\text{mm}$*

<b>Presión manométrica (bar)</b>	<b>Flujo CH<sub>4</sub> con CH<sub>4</sub> exterior (kg/s)</b>	<b>Flujo CH<sub>4</sub> con aire exterior (kg/s)</b>	<b>Régimen</b>
<b>4</b>	$3,027 \times 10^{-5}$	$3,025 \times 10^{-5}$	sónico
<b>1</b>	$1,192 \times 10^{-5}$	$1,175 \times 10^{-5}$	sónico
<b>0,4</b>	$7,196 \times 10^{-6}$	$6,893 \times 10^{-6}$	subsónico

Como se puede apreciar, el flujo de fuga prácticamente no se ve afectado por el proceso de mezclado exterior, a pesar de que existen cambios relevantes de las propiedades del flujo en la zona exterior cercana al orificio, como se puede apreciar en las Figuras B.5 a B.8, confeccionadas para una presión manométrica de 4 bar en la tubería y un orificio con diámetro de 0,24 mm.

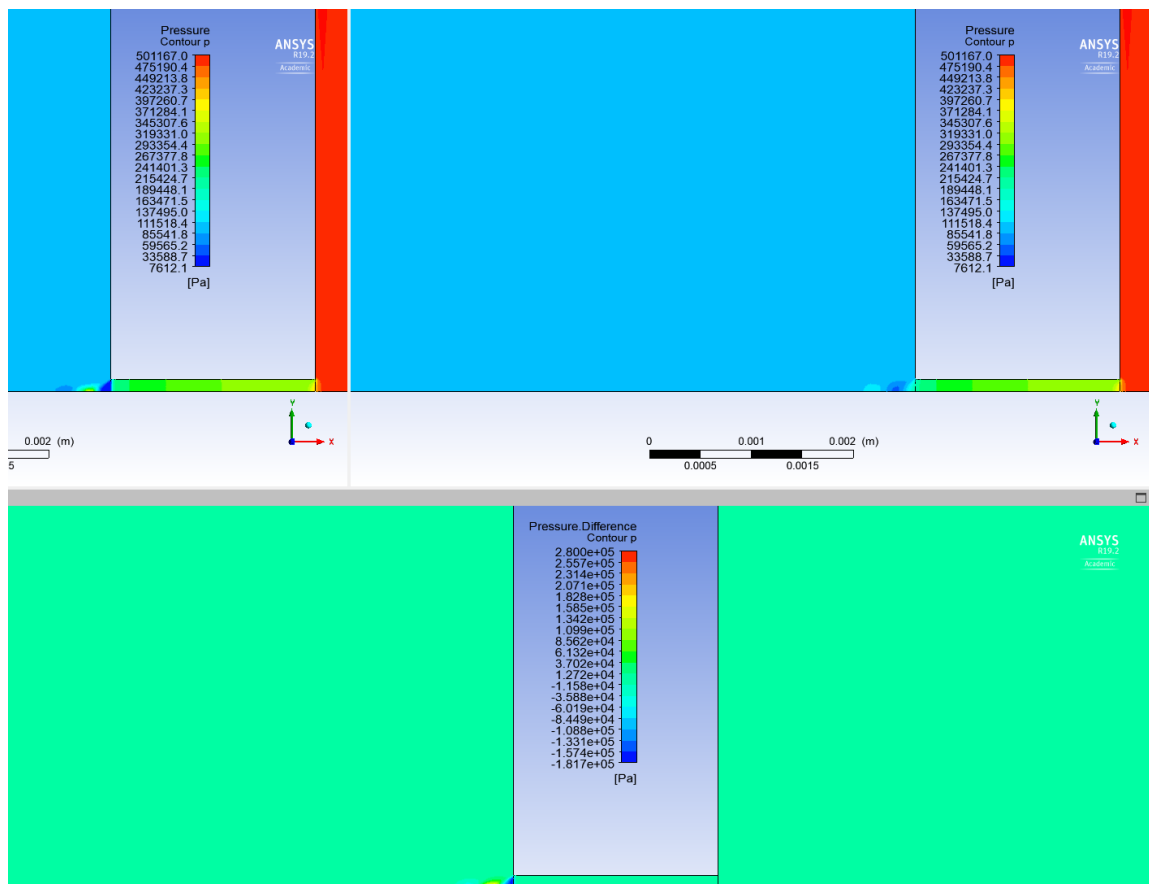


Figura B.5. Contornos de presión considerando la cámara externa llena de aire en la izquierda y de metano en la derecha. En la imagen inferior se muestran las diferencias (contorno resultado de restar celda a celda ambas distribuciones de presión). Presión manométrica 4 bar y diámetro del orificio de 0,24 mm

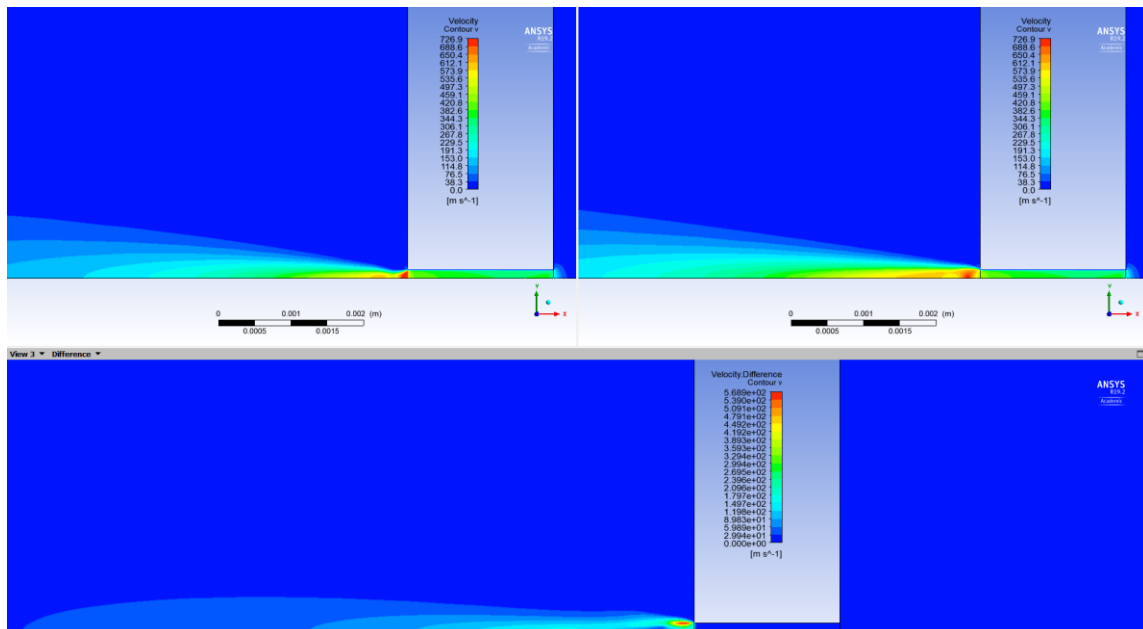


Figura B.6. Contornos de velocidad considerando la cámara externa llena de aire en la izquierda y de metano en la derecha. En la imagen inferior se muestran las diferencias (contorno resultado de restar celda a celda el contorno de metano al del aire). Presión manométrica 4 bar y diámetro del orificio de 0,24 mm

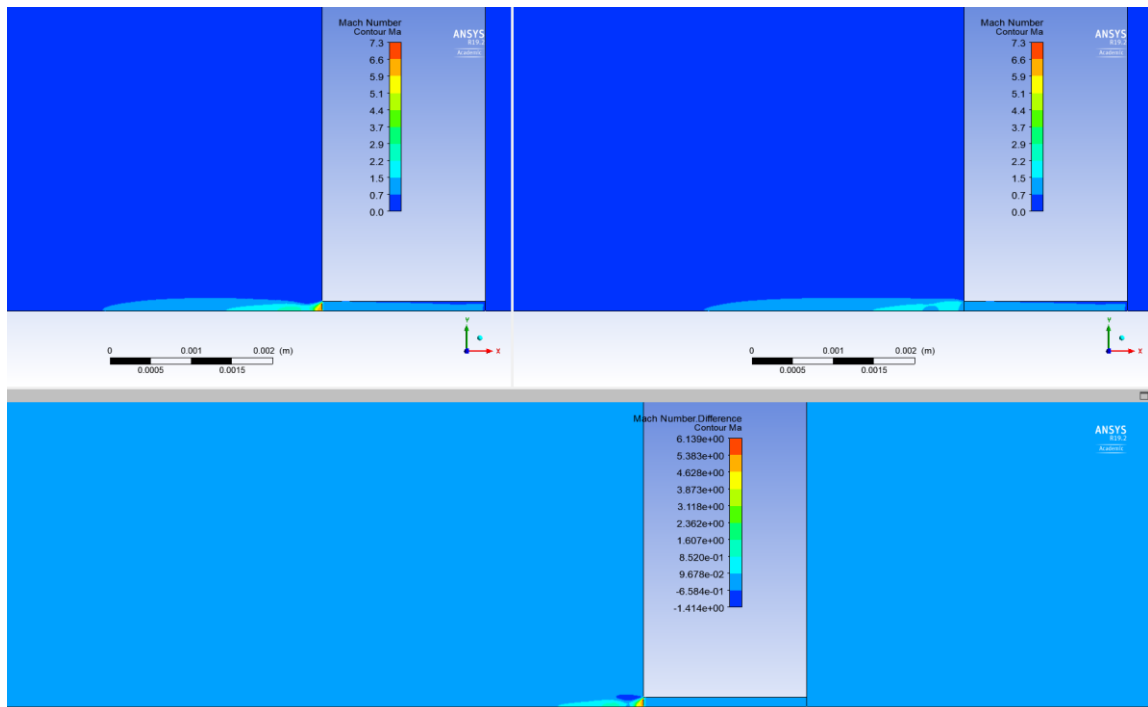


Figura B.7. Contornos de Ma considerando la cámara externa llena de aire en la izquierda y de metano en la derecha. En la imagen inferior se muestran las diferencias (contorno resultado de restar celda a celda el contorno de metano al del aire). Presión manométrica 4 bar y diámetro del orificio de 0,24 mm

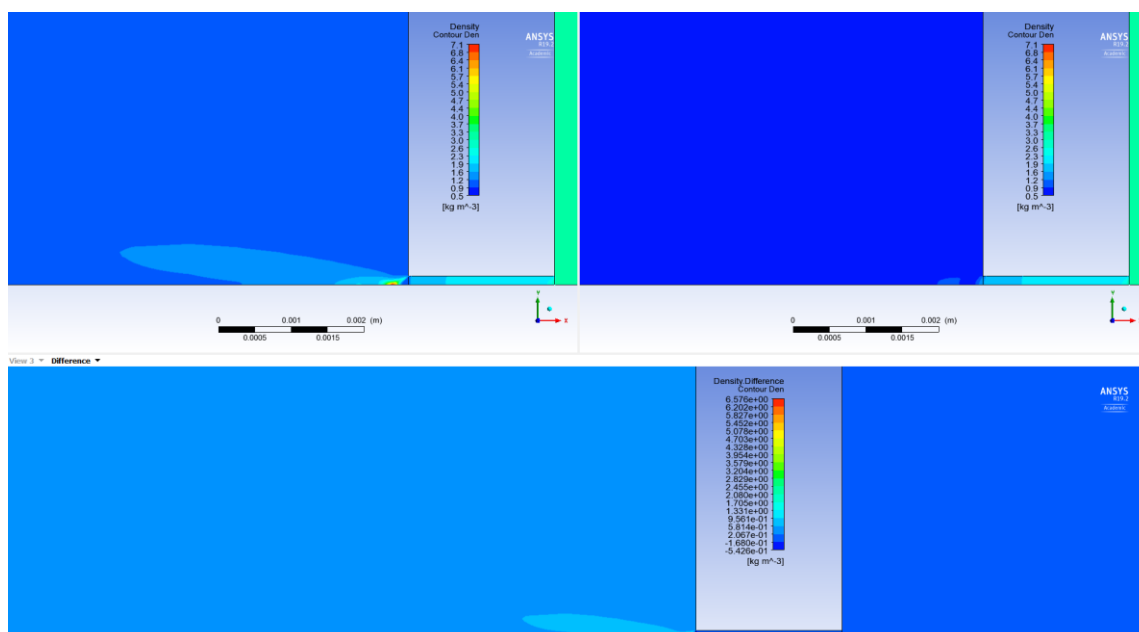
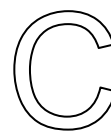


Figura B.8. Contornos de densidad considerando la cámara externa llena de aire en la izquierda y de metano en la derecha. En la imagen inferior se muestran las diferencias (contorno resultado de restar celda a celda el contorno de metano al del aire). Presión manométrica 4 bar y diámetro del orificio de 0.24 mm.

En toda esta serie de figuras se puede ver cómo en la zona cercana a los orificios existen diferencias considerables entre los casos que suponen que la cámara está llena de aire y de metano. Esto es lógico, dado que el desarrollo del chorro y, en particular, las distribuciones de presiones dependen de las propiedades (densidad, viscosidad) del fluido ambiente. Sin embargo, las diferencias son muy pequeñas en el interior del orificio, por lo que estos efectos no tienen una influencia apreciable sobre el caudal de fuga, que es el principal objetivo de este trabajo. Por este motivo, para el cálculo se despreciará la influencia del proceso de mezclado.



## RESULTADOS CFD Y GRÁFICOS

En este Anexo se disponen de los resultados de las simulaciones CFD, analizados en el capítulo tres. Estos resultados se han organizado en diferentes tablas en función del diámetro del orificio. En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos cuando el fluido que fuga es aire. A continuación, los resultados relativos a fugas de metano finalizando con una comparación de los mismos.

### C.1 Aire

---

Las siguientes tablas se corresponden con los resultados de simulaciones CFD para el aire. En el rango de presión absoluta de operación desde 1,063 a 2,027 bar se han realizado hasta 6 puntos intermedios de simulación, mientras que para presiones mayores (rango de 2,027 a 6,079 bares) únicamente se dispone de un resultado por cada bar de incremento de presión.



Como se verá más adelante, los resultados obtenidos con las ecuaciones de flujo compresible que no consideran los efectos viscosos, se asemejan a los resultados obtenidos mediante simulaciones CFD con consideración de fricción únicamente en los casos con flujo cercano al sónico. Sin embargo, en la zona con flujo subsónico a través del orificio existen claras discrepancias entre las simulaciones y la teoría compresible no viscosa. En este trabajo se ha analizado la influencia de los efectos viscosos cuando el flujo es subsónico, por lo que resulta de especial interés disponer de mayor cantidad de puntos de simulación en el rango de baja presión.

Antes de comenzar la exposición, debe señalarse que todas las presiones mencionadas tanto en las tablas que recogen los resultados como en los posteriores análisis son presiones absolutas. Por otra parte, para las simulaciones CFD se ha considerado una presión atmosférica de 100954 Pa y una temperatura ambiente de 291 K, condiciones similares a las del laboratorio en el que se llevaron a cabo las medidas experimentales. El gas de la cámara interior se encuentra a 293,5 K y su presión varía para cada caso de estudio.

Las tablas se componen de una columna que informa de la presión absoluta en la cámara interior, el flujo másico a través del orificio, el error porcentual de ajuste en el cálculo del flujo, determinado como el error relativo entre el flujo que entra desde la tubería y el que sale por la frontera de la cámara exterior y, por último, la caracterización del flujo, diferenciando entre casos sónicos y subsónicos.

*Tabla C.1 – Resultados de las simulaciones CFD. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,16 mm*

<b>Presión en la tubería (bar)</b>	<b>Flujo por el orificio (kg/s)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Rango</b>
<b>1,063</b>	$9,7783 \cdot 10^{-7}$	0,144	Subsónico
<b>1,122</b>	$1,6159 \cdot 10^{-6}$	0,247	Subsónico
<b>1,262</b>	$2,7358 \cdot 10^{-6}$	0,051	Subsónico
<b>1,409</b>	$3,6659 \cdot 10^{-6}$	0,040	Subsónico
<b>1,683</b>	$5,1056 \cdot 10^{-6}$	0,101	Subsónico
<b>2,027</b>	$6,6597 \cdot 10^{-6}$	0,045	Subsónico
<b>3,040</b>	$1,0579 \cdot 10^{-5}$	0,061	Sónico
<b>4,053</b>	$1,4215 \cdot 10^{-5}$	0,040	Sónico
<b>5,067</b>	$1,7867 \cdot 10^{-5}$	0,049	Sónico
<b>6,079</b>	$2,1543 \cdot 10^{-5}$	0,032	Sónico

Tabla C.2 – Resultados de las simulaciones CFD. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,24 mm

Presión en la tubería (bar)	Flujo por el orificio (kg/s)	Error (%)	Rango
1,063	$2,7072 \cdot 10^{-6}$	0,036	Subsónico
1,122	$4,2635 \cdot 10^{-6}$	0,484	Subsónico
1,262	$6,9152 \cdot 10^{-6}$	0,011	Subsónico
1,409	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	0,003	Subsónico
1,683	$1,237 \cdot 10^{-5}$	0,015	Subsónico
2,027	$1,5888 \cdot 10^{-5}$	0,015	Subsónico
3,040	$2,4711 \cdot 10^{-5}$	0,000	Sónico
4,053	$3,3134 \cdot 10^{-5}$	0,002	Sónico
5,067	$4,1577 \cdot 10^{-5}$	0,002	Sónico
6,079	$5,0038 \cdot 10^{-5}$	0,003	Sónico

Tabla C.3 – Resultados de las simulaciones CFD. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión en la tubería (bar)	Flujo por el orificio (kg/s)	Error (%)	Rango
1,063	$1,6043 \cdot 10^{-5}$	0,016	Subsónico
1,122	$2,4115 \cdot 10^{-5}$	0,012	Subsónico
1,262	$3,7447 \cdot 10^{-5}$	0,007	Subsónico
1,409	$4,8045 \cdot 10^{-5}$	0,004	Subsónico
1,683	$6,4068 \cdot 10^{-5}$	0,004	Subsónico
2,027	$8,0904 \cdot 10^{-5}$	0,002	Subsónico
3,040	$1,2343 \cdot 10^{-4}$	0,001	Sónico
4,053	$1,6498 \cdot 10^{-4}$	0,002	Sónico
5,067	$2,0656 \cdot 10^{-4}$	0,002	Sónico
6,079	$2,4817 \cdot 10^{-4}$	0,003	Sónico

Una vez realizada la exposición de los datos relativos a las fugas de aire, se va a realizar un análisis comparativo entre un caso subsónico ( $P=1,409$  bar) y otro sónico ( $P=4,053$  bar), con diámetro del orificio de 0,24 mm, contando con imágenes extraídas del programa de visualización de los resultados de ANSYS. La zona de estudio es la del orificio y la del penacho del gas que fuga. Estas imágenes recogen los contornos de presión, temperatura, densidad y velocidad. Asimismo, se dispone de imágenes de vectores velocidad en los que se puede ver la ingesta de aire exterior en el chorro que sale por el orificio.

### Contorno de presión

En la Figura C.1 se muestra el contorno de presión para dos casos extremo.

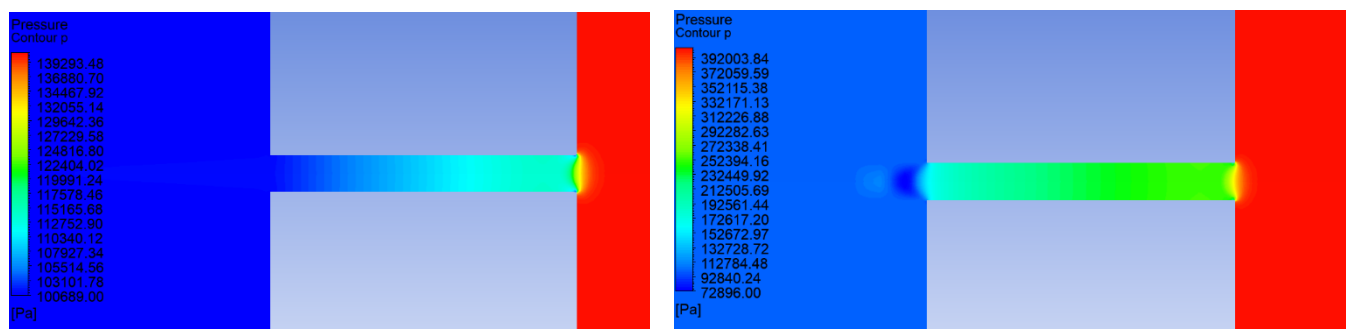


Figura C.1. Contorno de presión.  $P = 1,409$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha).  
Aire.

En la figura se puede apreciar como la presión en la zona del orificio se reduce gradualmente desde la presión en la tubería (1,409 y 4,053 bar respectivamente), hasta la presión de descarga de 100954 Pa (1,00954 bar), tras una primera reducción brusca en la entrada del orificio. No obstante, en el caso sónico se observa que en la salida del orificio existe una pequeña zona en la que la presión desciende por debajo de la presión de descarga.

### Contorno de velocidad

En la Figura C.2 se presenta la evolución del perfil de velocidad a lo largo del orificio y en la zona de descarga. En la parte superior de la figura se analiza el número de Mach y, en la parte inferior, la magnitud de la velocidad en m/s.

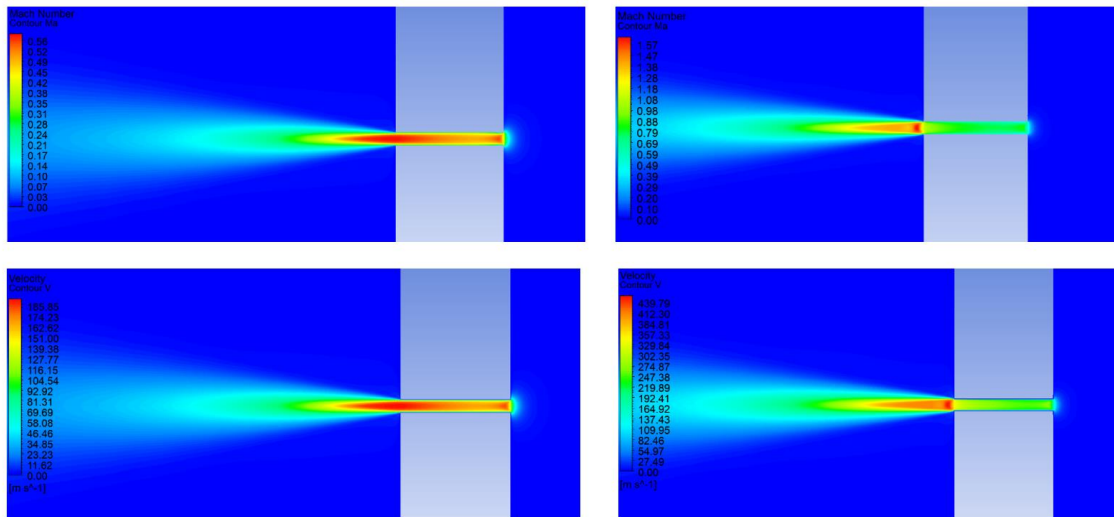


Figura C.2. Contorno de velocidad.  $P = 1,409$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha).  
Aire.

En primer lugar, se debe destacar que el aire adquiere el perfil de velocidad típico de una tubería, siendo la velocidad nula en las paredes y máxima en el eje del orificio.

Por otra parte, aunque el comportamiento en la zona de descarga del orificio es similar para ambos casos (tras alcanzar la máxima velocidad el flujo de gas se abre y se ralentiza poco a poco), se observan grandes diferencias en la zona interior del orificio. En el caso subsónico (izquierda) se observa cómo el fluido se acelera a lo largo de toda la longitud del orificio hasta alcanzar velocidades cercanas a la máxima. En el caso sónico (derecha) también se observa cómo el fluido se acelera a lo largo del orificio hasta alcanzar una velocidad aproximada a 1,16 Ma (352 m/s) a la salida, donde se acelera bruscamente hasta 1,63 Ma (455 m/s) debido al efecto de tobera convergente-divergente, amortiguándose muy rápido por el proceso de mezclado con el aire de la cámara externa. Ambos datos son tomados en la zona cercana al eje del orificio.

### Contorno de temperatura

La evolución de la temperatura presentada en la Figura C.3 revela también diferencias entre el caso subsónico y el sónico.

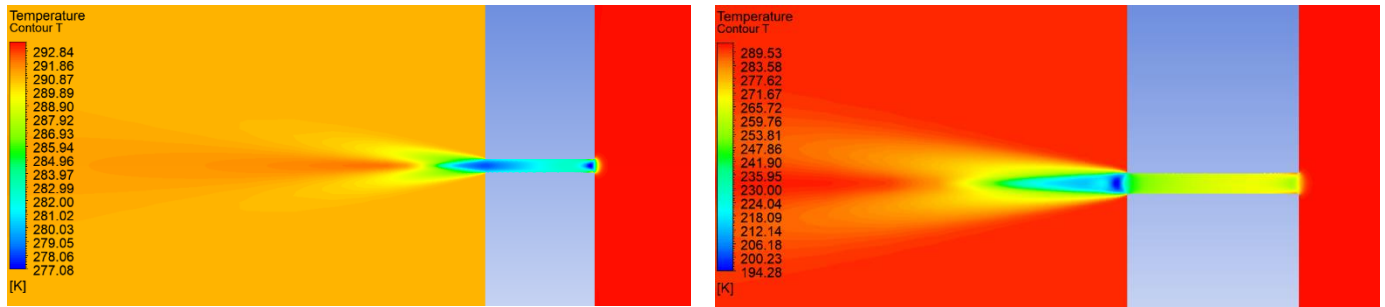


Figura C.3. Contorno de temperatura.  $P = 1,409$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha). Aire.

En ambos casos se observa un enfriamiento del gas a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente, tanto en el orificio como en la zona de descarga a la cámara exterior. No obstante, se mantiene la tendencia que mostraba el contorno de velocidad y es que mientras que el enfriamiento en el caso subsónico se realiza de una manera más homogénea, en el caso sónico éste es progresivo a lo largo de la longitud del orificio hasta que alcanza la salida del orificio, en donde se produce un enfriamiento brusco de hasta 60-70 K.

### Contorno de densidad

Por último, se presenta el contorno densidad en la Figura C.4.

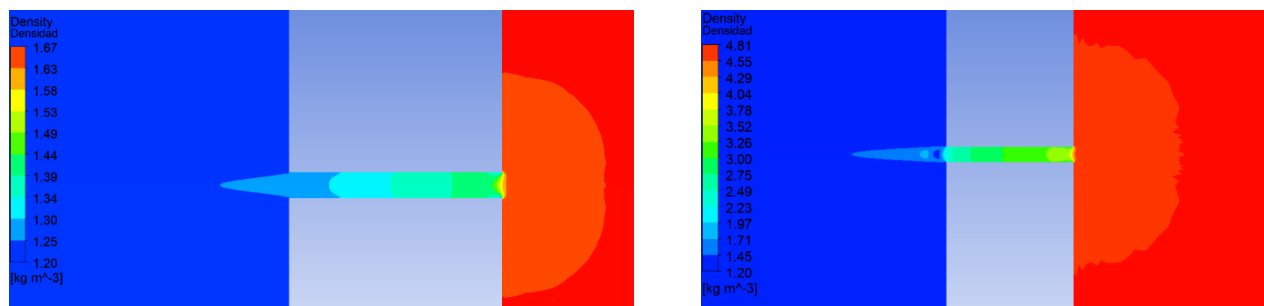


Figura C.4. Contorno de densidad.  $P = 1,409$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha).

Aire.

Las diferencias comentadas anteriormente para los contornos de presión y temperatura en ambos casos analizados, condiciona las diferencias entre el contorno de densidad para el caso sónico y subsónico. A pesar de que el patrón de colores de los dos contornos (izquierda y derecha) confunde, los valores de densidad son mucho menores para el caso subsónico.

Por otra parte, en la zona de descarga del orificio existe una marcada diferenciación entre ambos casos, ya que para el caso sónico se produce un brusco descenso de la densidad, no detectada en el caso subsónico.

Otro aspecto interesante es lo que ocurre a lo largo del propio orificio, mientras que en el caso subsónico (izquierda) se aprecia un descenso de la densidad de forma aproximadamente uniforme, en el caso sónico, la densidad se mantiene prácticamente constante en toda la longitud del orificio (con valores alrededor de  $2,2 \text{ kg/m}^3$ ). Este mismo comportamiento se observa para la velocidad, el número de Ma, la presión y la temperatura (ver Figuras C.1 a C.3). Los efectos viscosos y la fricción afectan en mucha menor medida al orificio sónico que al subsónico, donde los cambios de parámetros con la longitud son mayores.

Tanto en el caso sónico como subsónico existe una gran variabilidad del valor de la densidad (especialmente en el caso con registros sónicos) por lo que sería totalmente erróneo el considerar el flujo como incompresible.

#### Vectores velocidad en la salida del orificio

La ingestión de aire por parte del chorro se puede apreciar al analizar el comportamiento de los vectores velocidad y el perfil de velocidad en la cámara externa cerca de la descarga. En la Figura C.5 y C.6, respectivamente, se muestran los vectores velocidad, y el perfil de velocidad para el caso de  $P = 4,053 \text{ bar}$ .

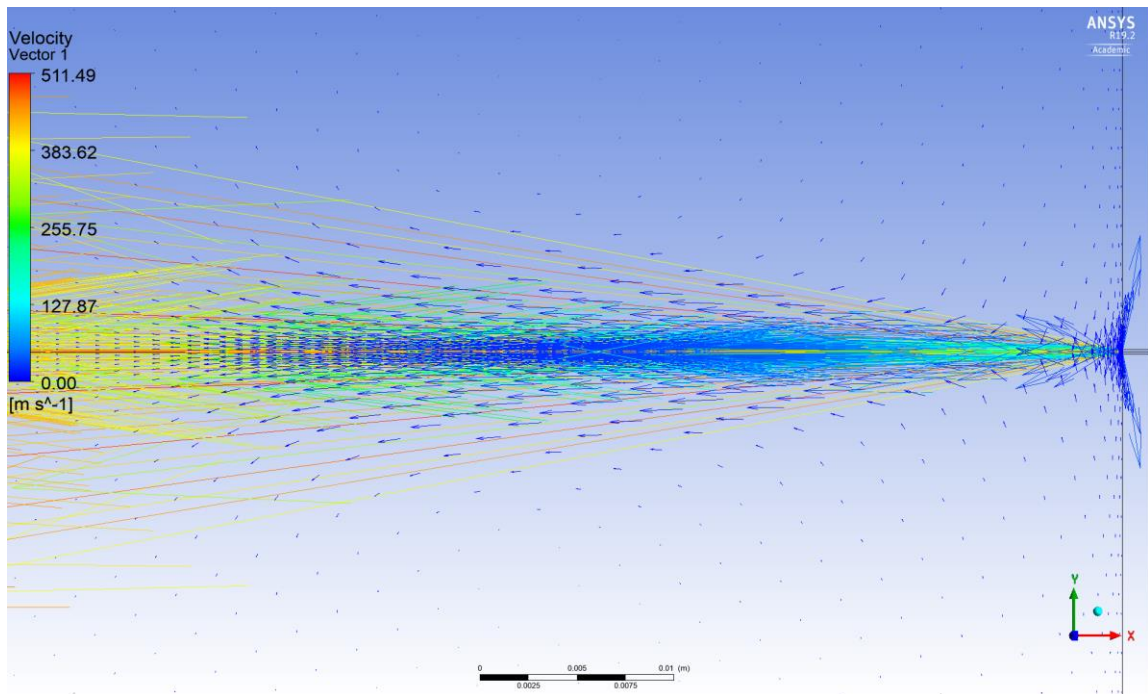


Figura C.5. Vectores velocidad para el caso de  $P = 4,053$  bar. Aire.

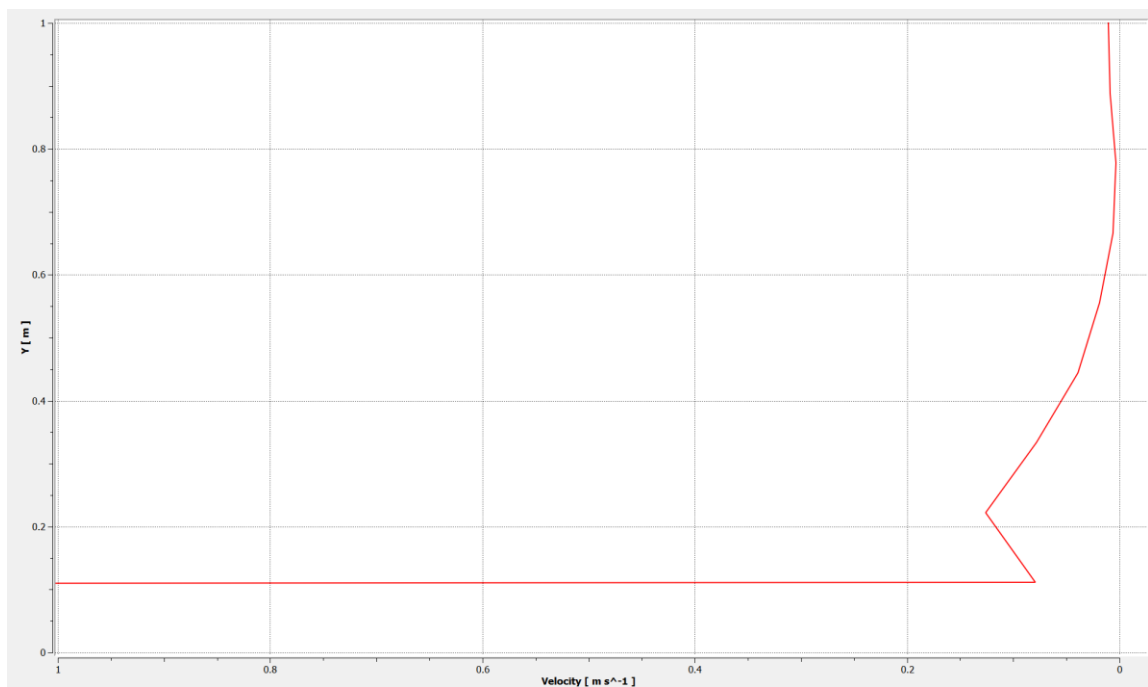


Figura C.6. Perfil de velocidad en la cámara externa a 10 mm de la descarga para el caso de  $P = 4,053$  bar. Aire.

En ambas figuras se puede apreciar como la ingestión de aire exterior hace que los parámetros del chorro se amortigüen en la medida que éste se desarrolla en la

cámara externa. Todo este proceso de mezclado ocurre en la zona cercana a la descarga del orificio.

## C.2 Metano

Las siguientes tablas se corresponden con los resultados de simulaciones CFD para el metano. Por las razones comentadas en el epígrafe anterior, se ha realizado una cantidad mayor de simulaciones en el rango de presión de operación de 1,063 a 2,027 bar y, para el resto, se dispone de una simulación por cada bar de incremento de presión.

*Tabla C.4 – Resultados de las simulaciones CFD. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,16 mm*

<b>Presión en la tubería (bar)</b>	<b>Flujo por el orificio (kg/s)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Rango</b>
<b>1,063</b>	$7,9535 \cdot 10^{-7}$	0,175	Subsónico
<b>1,122</b>	$1,3049 \cdot 10^{-6}$	0,178	Subsónico
<b>1,262</b>	$2,1934 \cdot 10^{-6}$	0,037	Subsónico
<b>1,409</b>	$2,9182 \cdot 10^{-6}$	0,096	Subsónico
<b>1,683</b>	$4,0014 \cdot 10^{-6}$	0,041	Sónico
<b>2,027</b>	$5,0956 \cdot 10^{-6}$	0,447	Sónico
<b>3,040</b>	$7,8100 \cdot 10^{-6}$	0,277	Sónico
<b>4,053</b>	$1,0483 \cdot 10^{-5}$	0,078	Sónico
<b>5,067</b>	$1,3166 \cdot 10^{-4}$	0,108	Sónico
<b>6,079</b>	$1,5861 \cdot 10^{-4}$	0,119	Sónico

*Tabla C.5 – Resultados de las simulaciones CFD. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,24 mm*

<b>Presión en la tubería (bar)</b>	<b>Flujo por el orificio (kg/s)</b>	<b>Error (%)</b>	<b>Rango</b>
<b>1,063</b>	$2,1644 \cdot 10^{-6}$	0,172	Subsónico
<b>1,122</b>	$3,4018 \cdot 10^{-6}$	0,135	Subsónico
<b>1,262</b>	$5,4979 \cdot 10^{-6}$	0,173	Subsónico
<b>1,409</b>	$7,1650 \cdot 10^{-6}$	0,037	Subsónico
<b>1,683</b>	$9,6018 \cdot 10^{-6}$	0,022	Sónico
<b>2,027</b>	$1,2006 \cdot 10^{-5}$	0,053	Sónico
<b>3,040</b>	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	0,170	Sónico
<b>4,053</b>	$2,4376 \cdot 10^{-5}$	0,028	Sónico
<b>5,067</b>	$3,0569 \cdot 10^{-5}$	0,076	Sónico
<b>6,079</b>	$3,6794 \cdot 10^{-5}$	0,032	Sónico



Tabla C.6 – Resultados de las simulaciones CFD. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión en la tubería (bar)	Flujo por el orificio (kg/s)	Error (%)	Rango
1,063	$1,2877 \cdot 10^{-5}$	0,023	Subsónico
1,122	$1,9424 \cdot 10^{-5}$	0,008	Subsónico
1,262	$3,009 \cdot 10^{-5}$	0,008	Subsónico
1,409	$3,8269 \cdot 10^{-5}$	0,018	Sónico
1,683	$4,9527 \cdot 10^{-5}$	0,004	Sónico
2,027	$6,0280 \cdot 10^{-5}$	0,002	Sónico
3,040	$9,0766 \cdot 10^{-5}$	0,000	Sónico
4,053	-	-	-
5,067	$1,5179 \cdot 10^{-5}$	0,008	Sónico
6,079	$1,8236 \cdot 10^{-5}$	0,001	Sónico

Al igual que en el caso del aire, se va a realizar un análisis comparativo, ahora con el metano, entre un caso subsónico ( $P=1,063$  bar) y otro sónico ( $P=4,053$  bar), con diámetro del orificio de 0,24 mm. Asimismo, se van a exponer imágenes extraídas del programa de visualización de los resultados de ANSYS.

### Contorno de presión

En la Figura C.7 se muestra el contorno de presión para los dos casos analizados con metano.

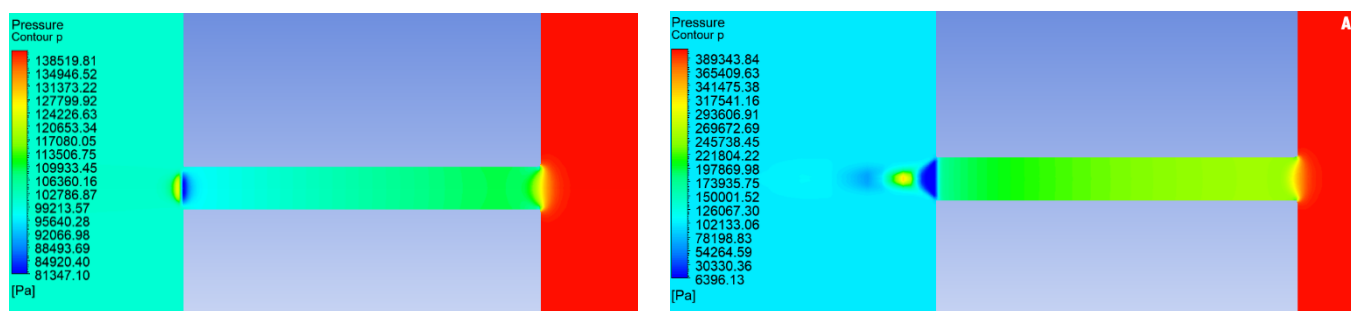


Figura C.7. Contorno de presión.  $P = 1,063$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha).  
Metano.

En cuanto a la evolución de la presión en la zona del orificio, se puede ver como en ambos casos existe una reducción gradual de la presión desde la entrada hasta la salida del mismo, aunque esta es más acusada en el caso subsónico (izquierda).

Precisamente es en la salida del orificio en donde se produce la mayor diferencia entre los dos casos. En ambos existe una zona con presión por debajo de la de descarga, especialmente en el caso sónico.

### Contorno de velocidad

En la Figura C.8 en la parte superior de la figura se analiza el número de Mach y, en la parte inferior, la magnitud de la velocidad en m/s.

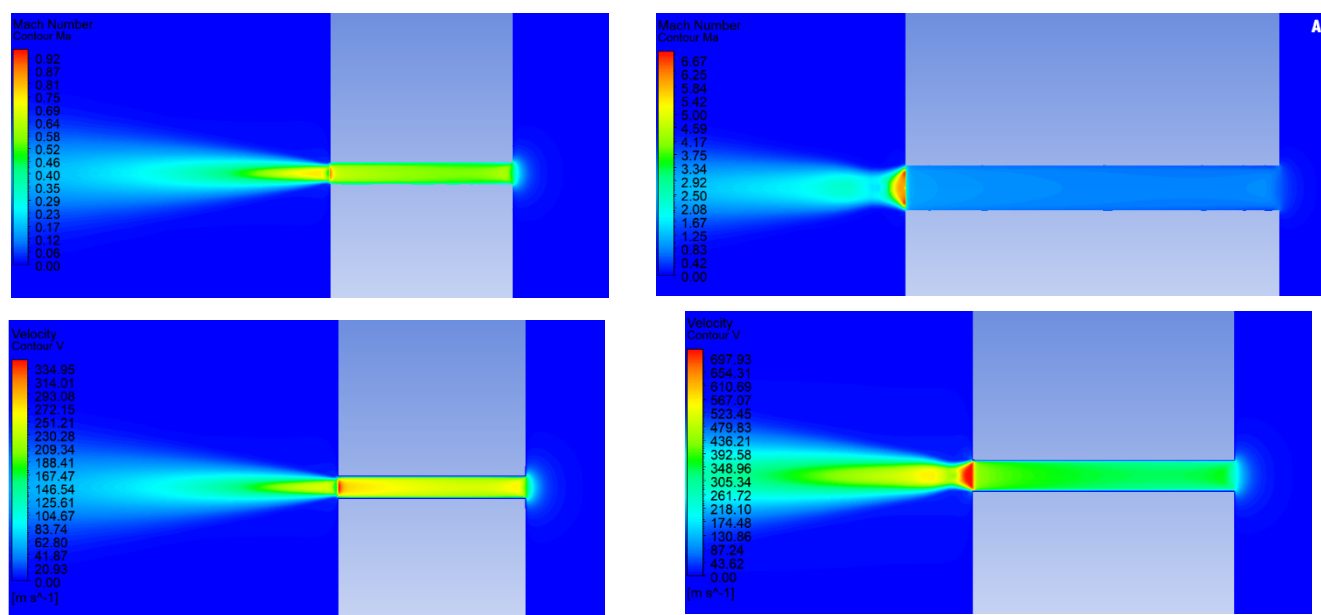


Figura C.8. Contorno de velocidad.  $P = 1,063$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha).  
Metano.

Al igual que en el caso del aire se dispone tanto del contorno del número de Mach como el de la velocidad del fluido. Comparando el caso subsónico y el sónico se aprecian semejanzas y diferencias. Mientras que a lo largo del orificio la velocidad se mantiene prácticamente constante (en torno a los 300 m/s en el caso subsónico y 340 m/s en el sónico alrededor del eje del orificio), en la zona de salida del orificio el fluido se acelera de una manera mucho más acentuada en el caso con registros sónicos incluso con números de Mach superiores a 6. Aun así, puede observarse

como el penacho abarca una longitud mucho mayor a la total del orificio, que es de 2 mm.

### Contorno de temperatura

La evolución de la temperatura se presenta en la Figura C.9.

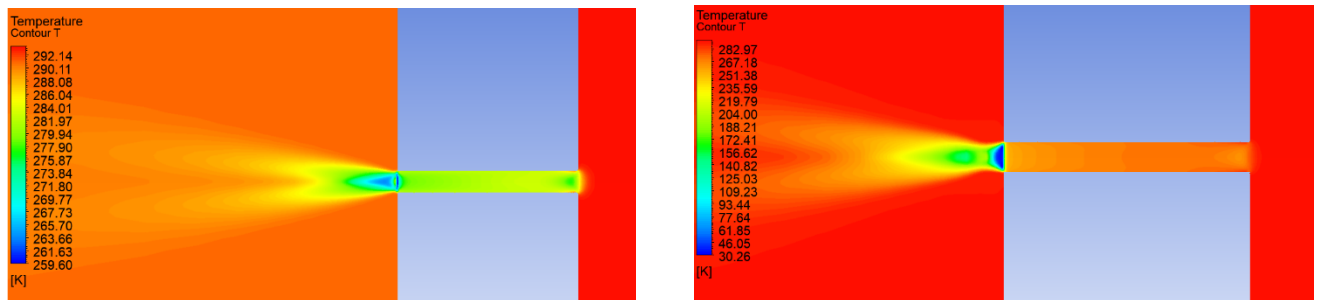


Figura C.9. Contorno de temperatura.  $P = 1,063$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha). Metano.

Al igual que en los contornos anteriores, se mantienen las similitudes entre ambos casos, pero en el caso supersónico se acentúan los efectos a la salida del orificio. En este caso, se puede ver como se produce un fenómeno de enfriamiento a la salida del orificio pasando desde los 280 K a los 260 K en el caso subsónico y desde los 250 K hasta prácticamente 30 K en el caso sónico. Estos cambios bruscos se traducirán en una alta variabilidad de la densidad del fluido. La zona de extremadamente baja temperatura es de solo unas décimas de mm, como se puede apreciar al comparar la anchura del orificio (0,24 mm) con la parte azul oscura de la imagen derecha de la figura.

### Contorno de densidad

En la Figura C.10 se presenta el contorno densidad.

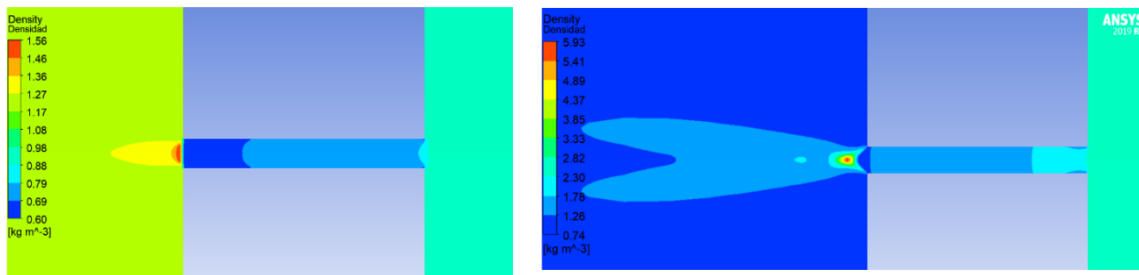


Figura C.10. Contorno de densidad.  $P = 1,063$  bar (izquierda) y  $P = 4,053$  bar (derecha).  
Metano.

Las diferencias observadas en los perfiles de presión, velocidad y temperatura hacen que el contorno de densidad sea tan distinto entre el caso subsónico y el sónico. Mientras que en ambos se puede observar como a lo largo de todo el orificio hay una densidad menor tanto a la de la zona de la tubería como la de la cámara exterior, existe una gran diferencia en la zona de salida del orificio, ya que en el caso sónico se produce un cambio brusco de la densidad desde aproximadamente  $1 \text{ kg/m}^3$  hasta casi  $6 \text{ kg/m}^3$  en una zona de muy reducidas dimensiones. La diferencia entre las propiedades del metano y del aire pueden justificar el comportamiento tan diferenciado de los contornos de densidad para el aire y el metano.

#### Vectores velocidad en la salida del orificio

En la Figura C.11 y C.12, respectivamente, se muestran los vectores velocidad, y el perfil de velocidad para el caso de  $P = 4,053$  bar. Las explicaciones de estas gráficas son similares a las comentadas previamente para el aire.

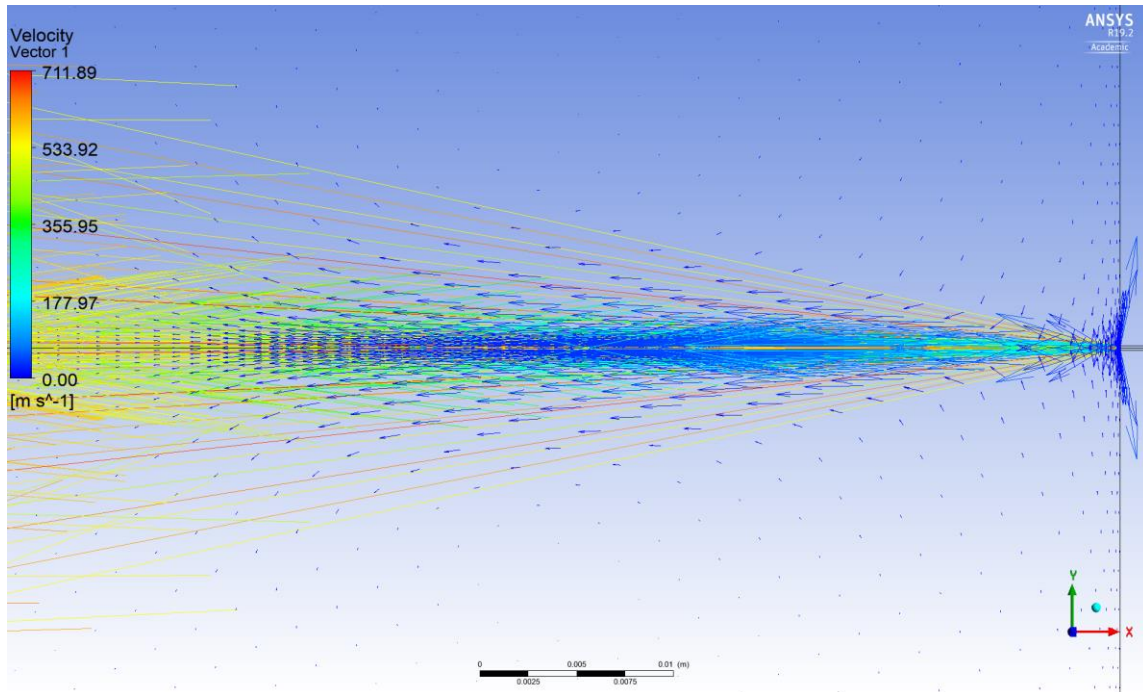


Figura C.11. Vectores velocidad para el caso de  $P = 4,053$  bar. Metano.

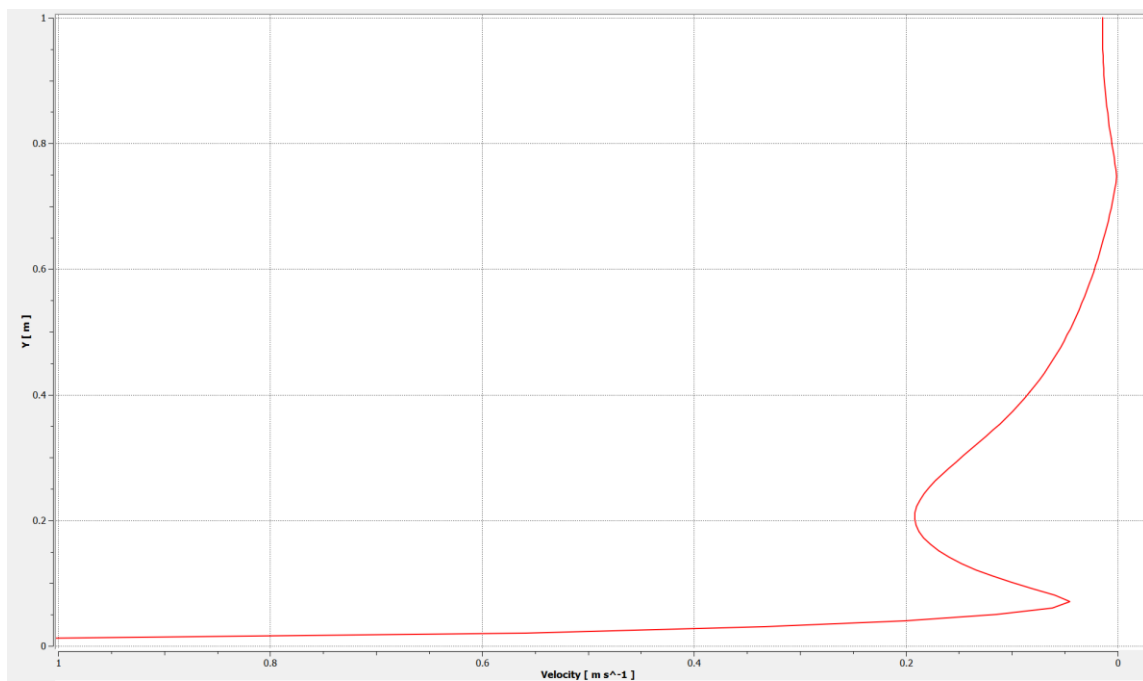


Figura C.12. Perfil de velocidad en la cámara externa a 10 mm de la descarga para el caso de  $P = 4,053$  bar. Metano.



## **MODELOS DE REGRESIÓN, RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS**

En este Anexo se exponen las gráficas y ecuaciones correspondientes a los modelos de regresión, además de los resultados experimentales para todos los diámetros de orificio ensayados obtenidos a través de la elaboración de modelos de regresión. Además, se realiza un breve análisis de estos resultados.

### **D.1 Gráficas: modelos de regresión**

---

En el capítulo 4 se expone el método para la obtención de modelos de regresión. En este apartado se muestran todas las gráficas y las ecuaciones correspondientes a estos modelos.

#### **D.1.1 Aire**

Diámetro 0,16 mm

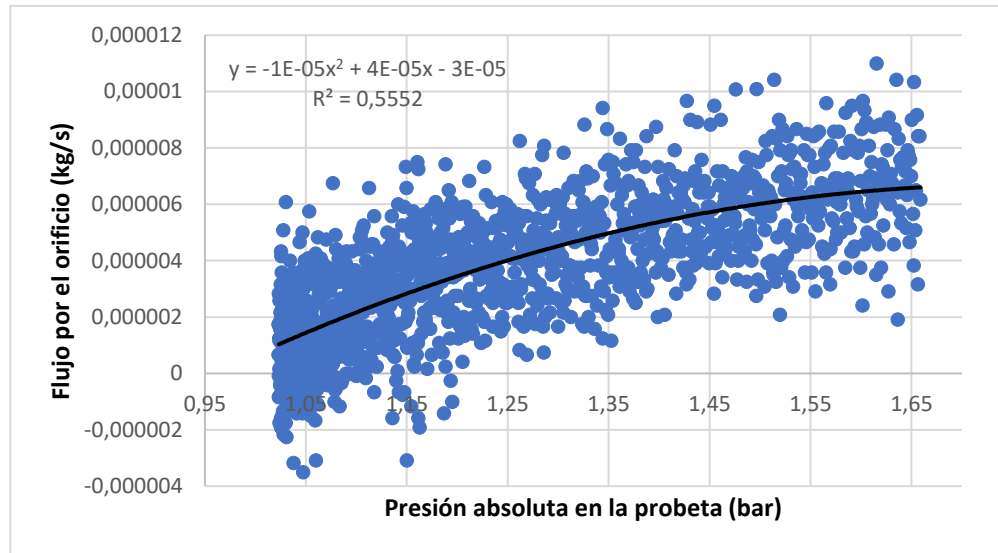


Figura D.1. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Aire, d=0,16 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -1,07 \cdot 10^{-5} \cdot P^2(bar) + 3,74 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 2,61 \cdot 10^{-5} \quad (D.1)$$

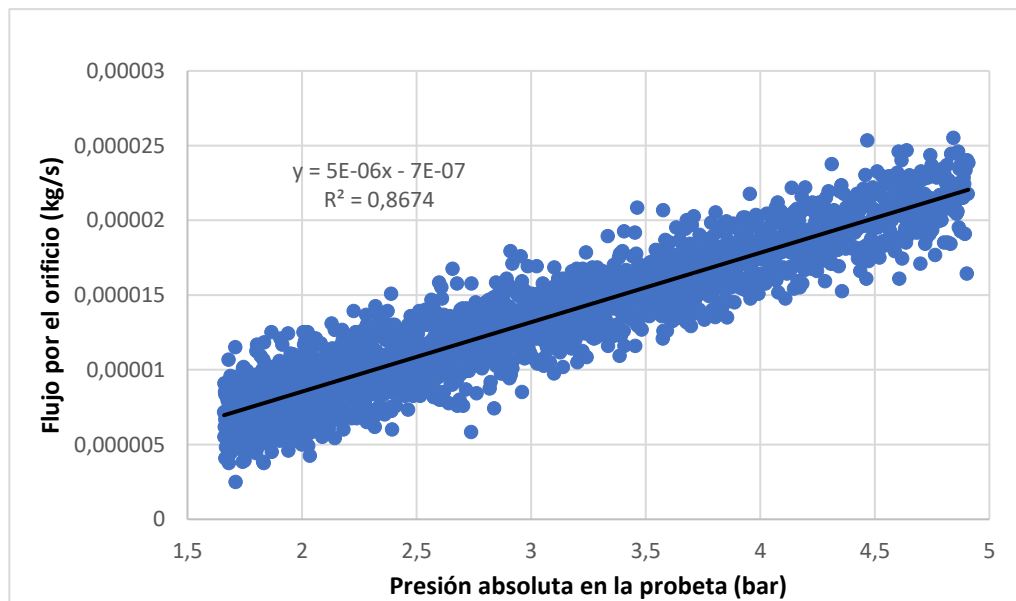


Figura D.2. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Aire, d=0,16 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 4,64 \cdot 10^{-6} \cdot P - 7,42 \cdot 10^{-7} \quad (D.2)$$

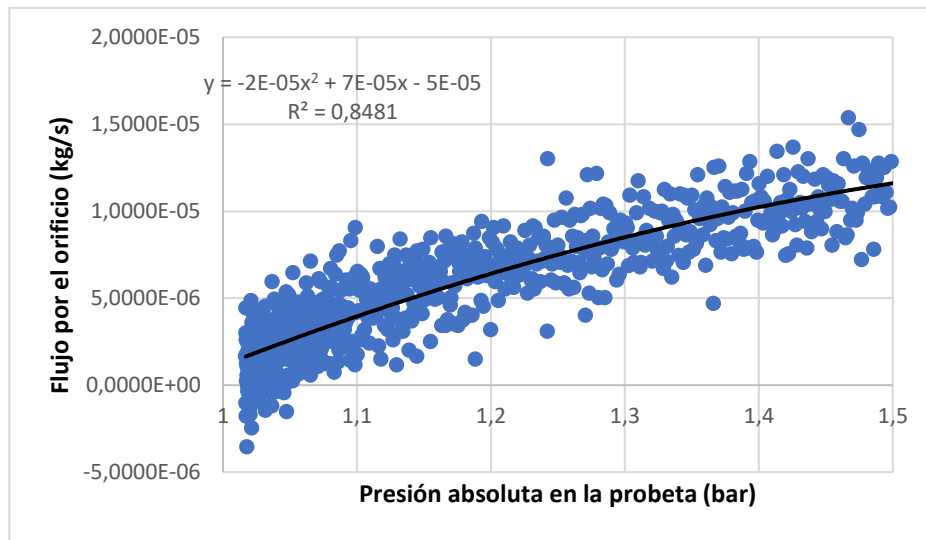
Diámetro 0,24 mm

Figura D.3. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Aire. Set 1, d=0,24 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -1,81 \cdot 10^{-5} \cdot P^2(bar) + 6,61 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 4,69 \cdot 10^{-5} \quad (D.3)$$

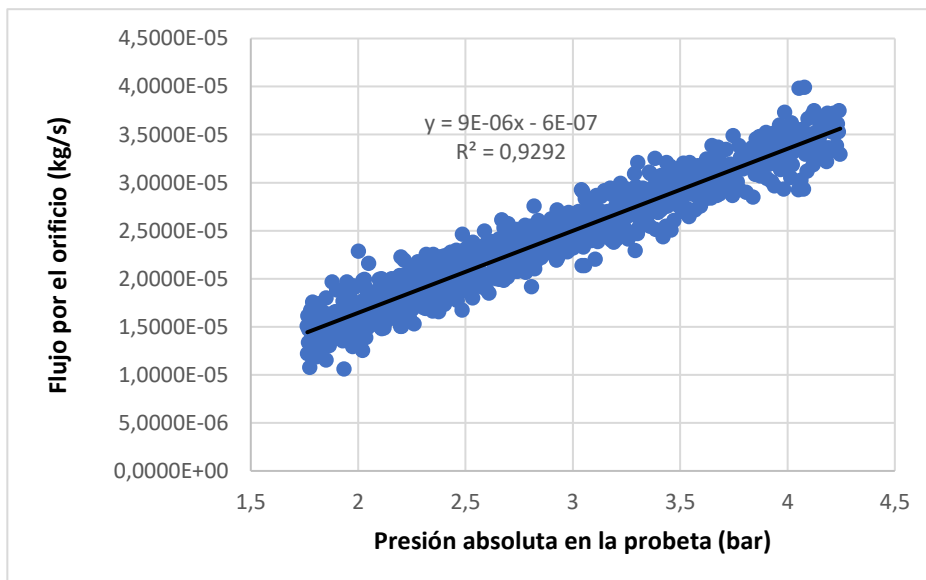


Figura D.4. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Aire. Set 1, d=0,24 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 8,54 \cdot 10^{-6} \cdot P(bar) - 6,27 \cdot 10^{-7} \quad (D.4)$$



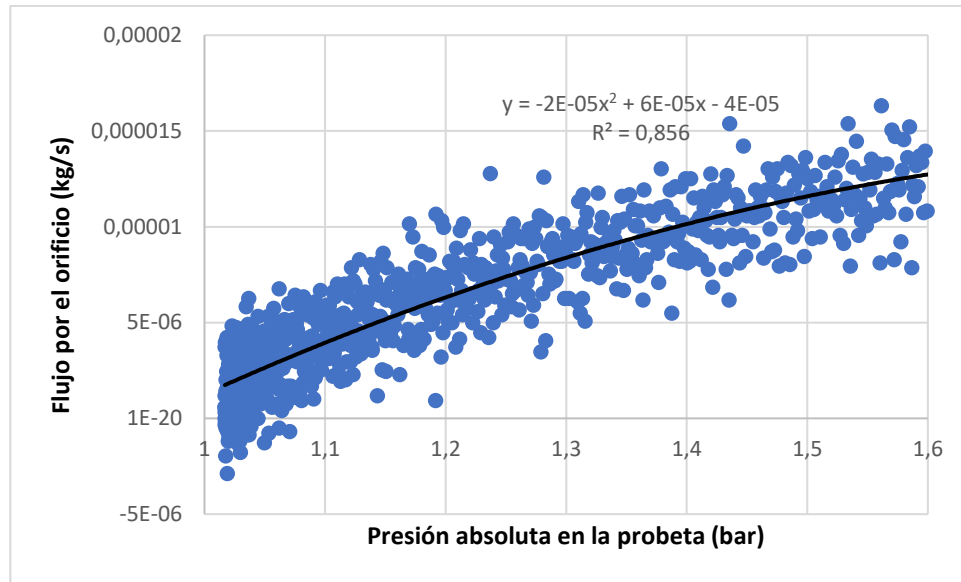


Figura D.5. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Aire. Set 2, d=0,24 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -1,54 \cdot 10^{-5} \cdot P^2(bar) + 5,92 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 4,25 \cdot 10^{-5} \quad (D.5)$$

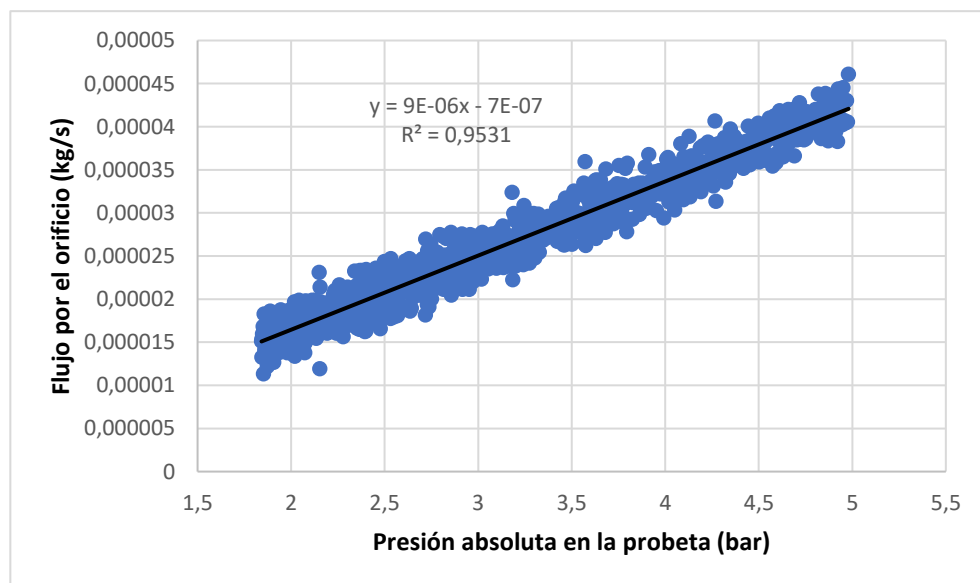


Figura D.6. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Aire. Set 2, d=0,24 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 8,60 \cdot 10^{-6} \cdot P(bar) - 7,42 \cdot 10^{-7} \quad (D.6)$$

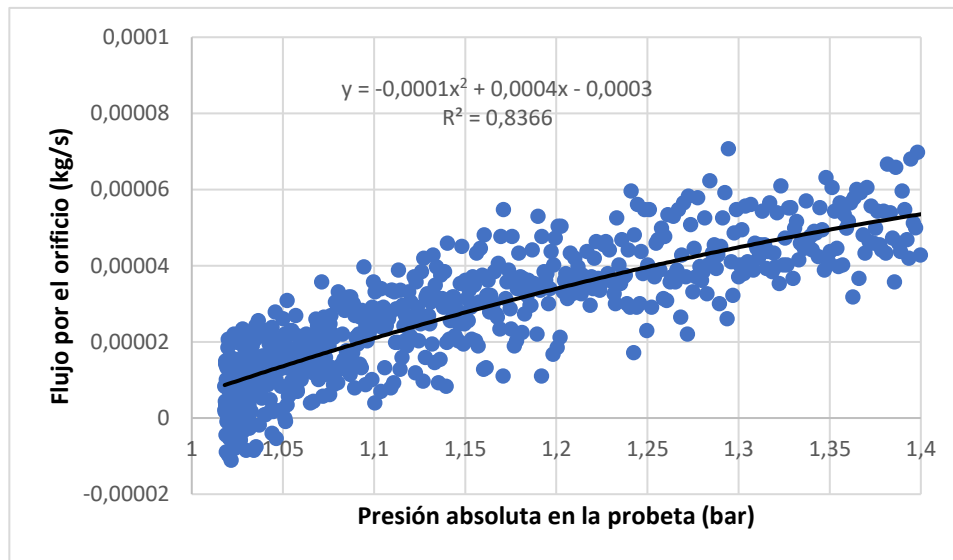
Diámetro 0,525 mm

Figura D.7. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Aire, d=0,525 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -1,08 \cdot 10^{-4} \cdot P^2(bar) + 3,79 \cdot 10^{-4} \cdot P(bar) - 2,65 \cdot 10^{-4} \quad (D.7)$$

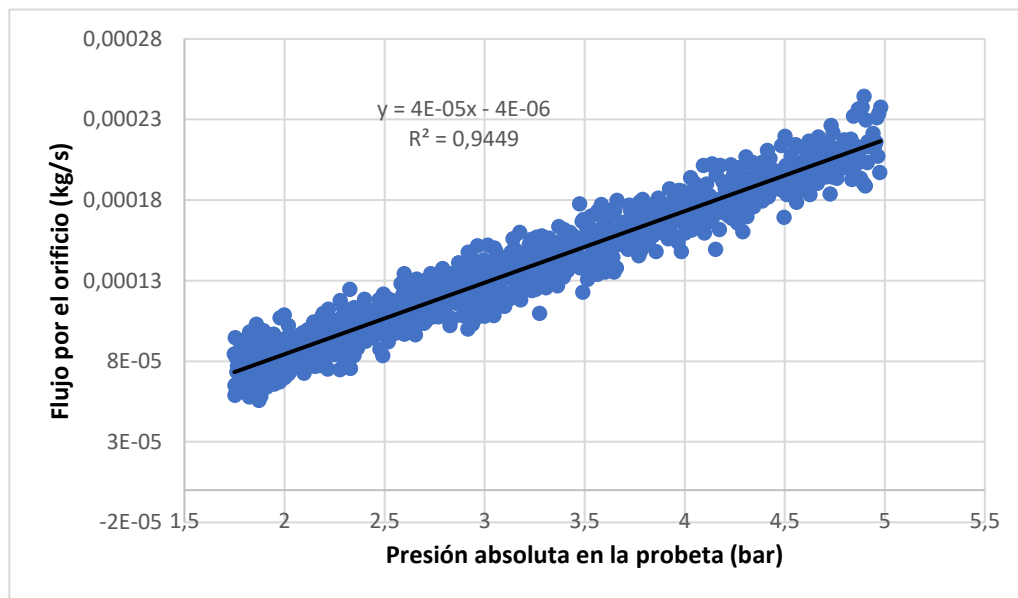


Figura D.8. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Aire, d=0,525 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 4,44 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 4,45 \cdot 10^{-6} \quad (D.8)$$

### D.1.2 Metano

#### Diámetro 0,16 mm

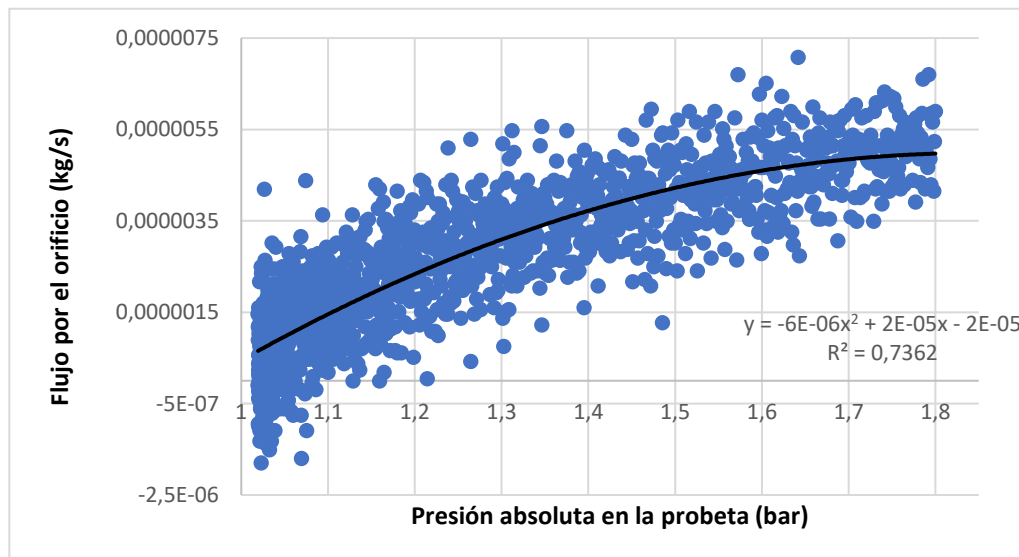


Figura D.9. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Metano, d=0,16 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -6,31 \cdot 10^{-6} \cdot P^2(bar) + 2,33 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 1,66 \cdot 10^{-5} \quad (D.9)$$

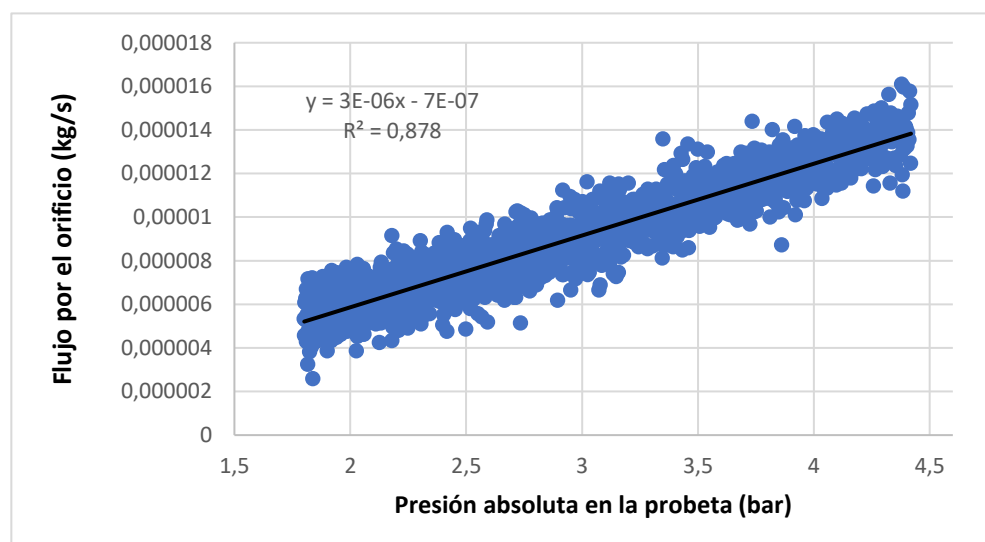


Figura D.10. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Metano, d=0,16 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 3,29 \cdot 10^{-6} \cdot P(bar) - 7,20 \cdot 10^{-7} \quad (D.10)$$

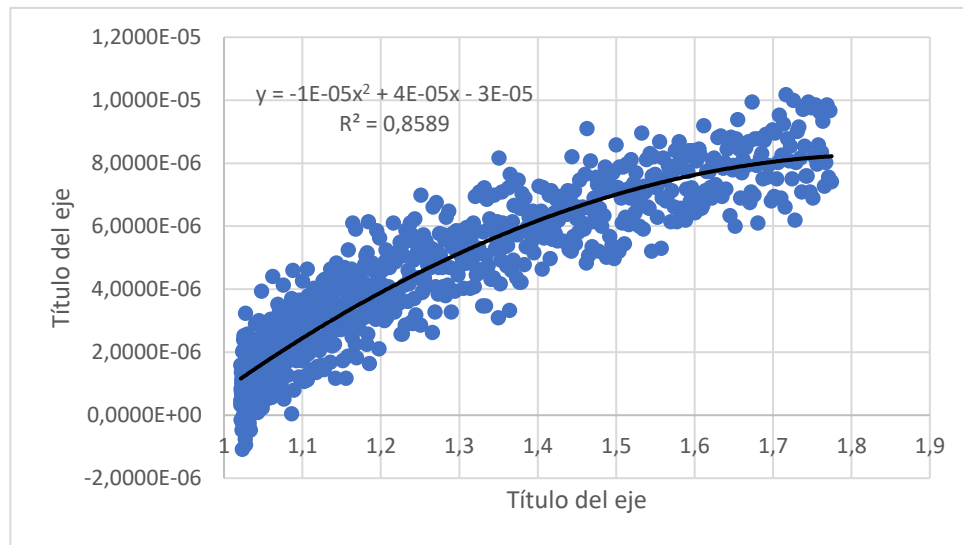
Diámetro 0,24 mm

Figura D.11. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Metano, d=0,24 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -1,03 \cdot 10^{-5} \cdot P^2(bar) + 3,83 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 2,71 \cdot 10^{-5} \quad (D.11)$$

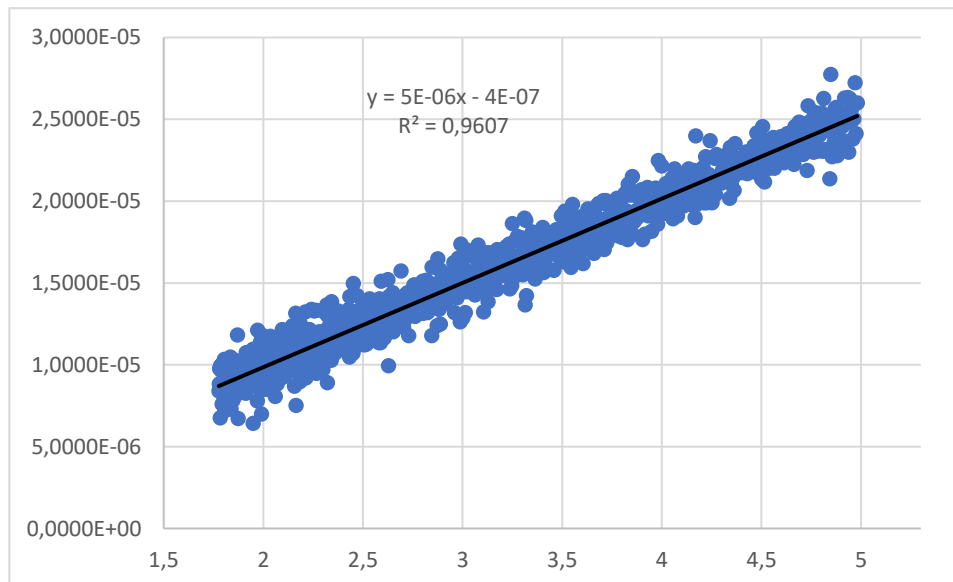


Figura D.12. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Metano, d=0,24 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 5,15 \cdot 10^{-6} \cdot P(bar) - 4,45 \cdot 10^{-7} \quad (D.12)$$

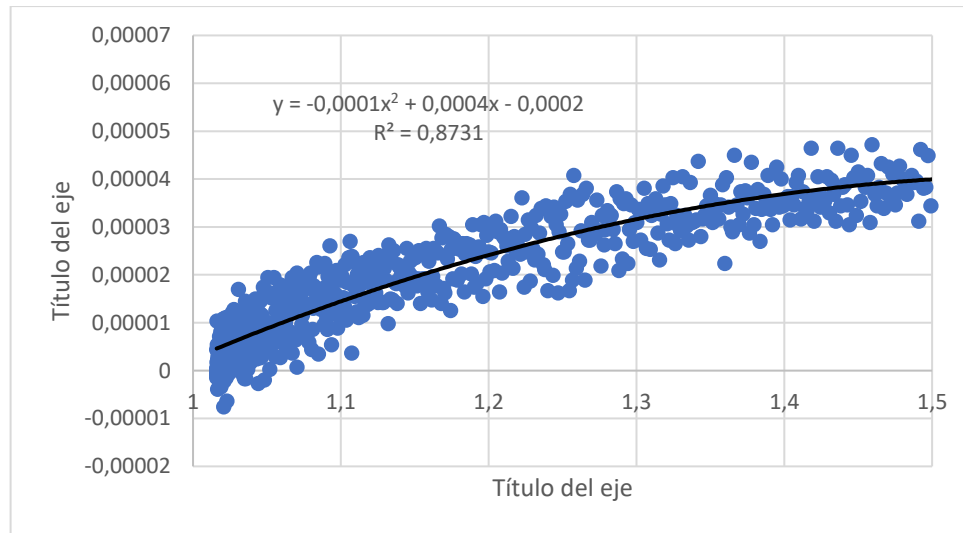
Diámetro 0,525 mm

Figura D.13. Ajuste zona cuadrática de los resultados experimentales. Metano, d=0,525 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = -1,10 \cdot 10^{-4} \cdot P^2(bar) + 3,50 \cdot 10^{-4} \cdot P(bar) - 2,38 \cdot 10^{-4} \quad (D.13)$$

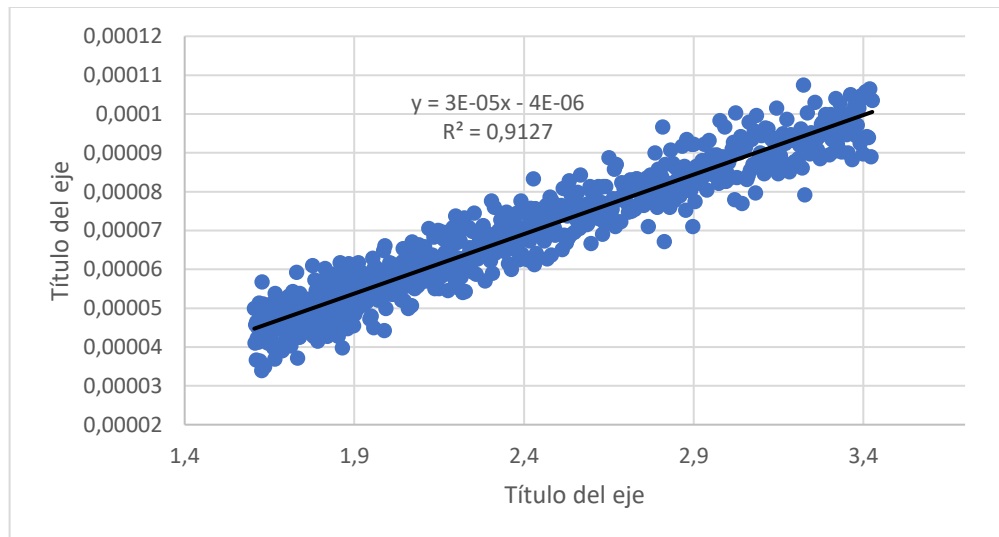


Figura D.14. Ajuste zona lineal de los resultados experimentales. Metano, d=0,525 mm

$$\dot{m}_g \left( \frac{kg}{s} \right) = 3,06 \cdot 10^{-5} \cdot P(bar) - 4,46 \cdot 10^{-6} \quad (D.14)$$

## D.2 Resultados experimentales y análisis

### D.2.1 Aire

En primer lugar, en las Tablas D.1 a D.4 se muestran los resultados obtenidos para el caso del aire.

*Tabla D.1: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: aire. Diámetro: 0,16 mm*

$P$ [bar]	$Y$ [kg/s]	Límite inferior [kg/s]	Límite superior [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,063</b>	$1,6296 \cdot 10^{-6}$	$1,4999 \cdot 10^{-6}$	$1,7593 \cdot 10^{-6}$	7,96%
<b>1,122</b>	$2,4605 \cdot 10^{-6}$	$2,2585 \cdot 10^{-6}$	$2,5624 \cdot 10^{-6}$	8,21%
<b>1,262</b>	$4,1353 \cdot 10^{-6}$	$4,0051 \cdot 10^{-6}$	$4,2700 \cdot 10^{-6}$	3,15%
<b>1,409</b>	$5,4410 \cdot 10^{-6}$	$5,3087 \cdot 10^{-6}$	$5,5732 \cdot 10^{-6}$	2,43%
<b>1,683</b>	$7,0714 \cdot 10^{-6}$	$6,9466 \cdot 10^{-6}$	$7,1962 \cdot 10^{-6}$	1,76%
<b>2,027</b>	$8,6683 \cdot 10^{-6}$	$8,5643 \cdot 10^{-6}$	$8,7724 \cdot 10^{-6}$	1,20%
<b>3,040</b>	$1,3374 \cdot 10^{-5}$	$1,3301 \cdot 10^{-5}$	$1,3447 \cdot 10^{-5}$	0,54%
<b>4,053</b>	$1,8079 \cdot 10^{-5}$	$1,7968 \cdot 10^{-5}$	$1,819 \cdot 10^{-5}$	0,61%

*Tabla D.2: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: aire. Diámetro: 0,24 mm.  
Primer set de datos experimentales*

$P$ [bar]	$Y$ [kg/s]	Límite inferior [kg/s]	Límite superior [kg/s]	Incertidumbre [%]
<b>1,063</b>	$2,9474 \cdot 10^{-6}$	$2,7858 \cdot 10^{-6}$	$3,1090 \cdot 10^{-6}$	5,48%
<b>1,122</b>	$4,5193 \cdot 10^{-6}$	$4,3863 \cdot 10^{-6}$	$4,6523 \cdot 10^{-6}$	2,94%
<b>1,262</b>	$7,7748 \cdot 10^{-6}$	$7,5812 \cdot 10^{-6}$	$7,9153 \cdot 10^{-6}$	1,81%
<b>1,409</b>	$1,0373 \cdot 10^{-5}$	$1,0190 \cdot 10^{-5}$	$1,0446 \cdot 10^{-5}$	0,71%
<b>1,683</b>	$1,3178 \cdot 10^{-5}$	$1,2886 \cdot 10^{-5}$	$1,3469 \cdot 10^{-5}$	2,21%
<b>2,027</b>	$1,6674 \cdot 10^{-5}$	$1,6509 \cdot 10^{-5}$	$1,6840 \cdot 10^{-5}$	0,99%
<b>3,040</b>	$2,5325 \cdot 10^{-5}$	$2,5325 \cdot 10^{-5}$	$2,5441 \cdot 10^{-5}$	0,46%
<b>4,053</b>	$3,3976 \cdot 10^{-5}$	$3,3755 \cdot 10^{-5}$	$3,4197 \cdot 10^{-5}$	0,65%

Tabla D.3: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: aire. Diámetro: 0,24 mm.  
Segundo set de datos experimentales

<b><i>P</i> [bar]</b>	<b><i>Y</i> [kg/s]</b>	<b>Límite inferior [kg/s]</b>	<b>Límite superior [kg/s]</b>	<b>Incertidumbre [%]</b>
<b>1,063</b>	$2,9799 \cdot 10^{-6}$	$2,8157 \cdot 10^{-6}$	$3,1443 \cdot 10^{-6}$	5,51%
<b>1,122</b>	$4,4870 \cdot 10^{-6}$	$4,3532 \cdot 10^{-6}$	$4,6208 \cdot 10^{-6}$	2,98%
<b>1,262</b>	$7,6354 \cdot 10^{-6}$	$7,4771 \cdot 10^{-6}$	$7,7936 \cdot 10^{-6}$	2,07%
<b>1,409</b>	$1,0287 \cdot 10^{-5}$	$1,0104 \cdot 10^{-5}$	$1,0469 \cdot 10^{-5}$	1,78%
<b>1,683</b>	$1,3444 \cdot 10^{-5}$	$1,3227 \cdot 10^{-5}$	$1,3661 \cdot 10^{-5}$	1,61%
<b>2,027</b>	$1,6681 \cdot 10^{-5}$	$1,6512 \cdot 10^{-5}$	$1,6851 \cdot 10^{-5}$	1,02%
<b>3,040</b>	$2,5394 \cdot 10^{-5}$	$2,5287 \cdot 10^{-5}$	$2,5500 \cdot 10^{-5}$	0,42%
<b>4,053</b>	$3,4105 \cdot 10^{-5}$	$3,3955 \cdot 10^{-5}$	$3,4255 \cdot 10^{-5}$	0,44%

Tabla D.4: datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: aire. Diámetro: 0,525 mm.

<b><i>P</i> [bar]</b>	<b><i>Y</i> [kg/s]</b>	<b>Límite inferior [kg/s]</b>	<b>Límite superior [kg/s]</b>	<b>Incertidumbre [%]</b>
<b>1,063</b>	$1,5517 \cdot 10^{-5}$	$1,4618 \cdot 10^{-5}$	$1,6382 \cdot 10^{-5}$	5,57%
<b>1,122</b>	$2,3947 \cdot 10^{-5}$	$2,3238 \cdot 10^{-5}$	$2,4655 \cdot 10^{-5}$	2,96%
<b>1,262</b>	$4,0944 \cdot 10^{-5}$	$4,0052 \cdot 10^{-5}$	$4,1836 \cdot 10^{-5}$	2,18%
<b>1,409</b>	$5,4202 \cdot 10^{-5}$	$5,3233 \cdot 10^{-5}$	$5,5170 \cdot 10^{-5}$	1,79%
<b>1,683</b>	$6,6407 \cdot 10^{-5}$	$6,4792 \cdot 10^{-5}$	$6,8022 \cdot 10^{-5}$	2,43%
<b>2,027</b>	$8,5504 \cdot 10^{-5}$	$8,4607 \cdot 10^{-5}$	$8,6401 \cdot 10^{-5}$	1,05%
<b>3,040</b>	$1,3048 \cdot 10^{-4}$	$1,2989 \cdot 10^{-4}$	$1,3108 \cdot 10^{-4}$	0,45%
<b>4,053</b>	$1,7546 \cdot 10^{-4}$	$1,7460 \cdot 10^{-4}$	$1,7632 \cdot 10^{-4}$	0,49%

Como se comenta en el apartado 4.4, y al igual que sucede con los resultados CFD, se pueden diferenciar dos grandes zonas, la lineal para altas presiones y la cuadrática para bajas. Aunque con el método experimental no se ha medido la velocidad a la que fuga el fluido, los cálculos de velocidad promedio en el orificio indican que la zona lineal se corresponde con flujo sónico y la cuadrática con flujo subsónico.

Por otra parte, al comparar los resultados obtenidos para la misma presión de operación y distintos diámetros del orificio, no es posible llegar a las mismas conclusiones que se obtuvieron al analizar los resultados de las simulaciones CFD. En este caso, la relación entre el área de los orificios (dependiente del diámetro al cuadrado) y la cantidad de aire que se fuga no es tan evidente en la zona sónica, como se puede apreciar en las Tablas D.5 y D.6.

*Tabla D.5 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación: 3,040 bar*

<b>Presión operación (bar)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Área orificio (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Relación de áreas</b>	<b>Flujo por el orificio (kg/s)</b>	<b>Relación de flujo</b>
<b>3,040</b>	0,16	0,0201	1	$1,3374 \cdot 10^{-5}$	1
<b>3,040</b>	0,24	0,0452	2,25	$2,5325 \cdot 10^{-5}$	1,8936
<b>3,040</b>	0,24	0,0452	2,25	$2,5394 \cdot 10^{-5}$	1,8988
<b>3,040</b>	0,525	0,2165	10,77	$1,3048 \cdot 10^{-4}$	9,7562

*Tabla D.6 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación 4,053 bar*

<b>Presión operación (bar)</b>	<b>Diámetro (mm)</b>	<b>Área orificio (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Relación de áreas</b>	<b>Flujo por el orificio (kg/s)</b>	<b>Relación de flujo</b>
<b>4,053</b>	0,16	0,0201	1	$1,8079 \cdot 10^{-5}$	1
<b>4,053</b>	0,24	0,0452	2,25	$3,3976 \cdot 10^{-5}$	1,8793
<b>4,053</b>	0,24	0,0452	2,25	$3,4105 \cdot 10^{-5}$	1,8864
<b>4,053</b>	0,525	0,2165	10,77	$1,7546 \cdot 10^{-4}$	9,7052

No obstante, tampoco es posible encontrar esta relación para los casos con pequeñas diferencias entre la presión de operación y la de descarga, como se puede ver en las Tablas D.7 y D.8.



Tabla D.7 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación: 1,063 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
1,063	0,16	0,0201	1	$1,6296 \cdot 10^{-6}$	1
1,063	0,24	0,0452	2,25	$2,9474 \cdot 10^{-6}$	1,8087
1,063	0,24	0,0452	2,25	$2,9800 \cdot 10^{-6}$	1,8287
1,063	0,525	0,2165	10,77	$1,5517 \cdot 10^{-5}$	9,522

Tabla D.8 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Aire. Presión de operación 1,262 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
1,262	0,16	0,0201	1	$4,1353 \cdot 10^{-6}$	1
1,262	0,24	0,0452	2,25	$7,7748 \cdot 10^{-6}$	1,8801
1,262	0,24	0,0452	2,25	$7,6354 \cdot 10^{-6}$	1,8464
1,262	0,525	0,2165	10,77	$4,0944 \cdot 10^{-5}$	9,9011

## D.2.2 Metano

A continuación, en las Tablas D.9 a D.11 se muestran los resultados obtenidos para el caso del metano:

Tabla D.9: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: metano. Diámetro: 0,16 mm

<i>P</i> [bar]	<i>Y</i> [kg/s]	Límite inferior [kg/s]	Límite superior [kg/s]	Incertidumbre [%]
1,063	$1,0947 \cdot 10^{-6}$	$1,0247 \cdot 10^{-6}$	$1,1646 \cdot 10^{-6}$	6,39%
1,122	$1,6575 \cdot 10^{-6}$	$1,6011 \cdot 10^{-6}$	$1,7138 \cdot 10^{-6}$	3,40%
1,262	$2,8179 \cdot 10^{-6}$	$2,7504 \cdot 10^{-6}$	$2,8854 \cdot 10^{-6}$	2,40%
1,409	$3,7687 \cdot 10^{-6}$	$3,6923 \cdot 10^{-6}$	$3,8451 \cdot 10^{-6}$	2,03%
1,683	$4,8116 \cdot 10^{-6}$	$4,7091 \cdot 10^{-6}$	$4,9141 \cdot 10^{-6}$	2,13%
2,027	$5,9516 \cdot 10^{-6}$	$5,8774 \cdot 10^{-6}$	$6,0258 \cdot 10^{-6}$	1,25%
3,040	$9,2873 \cdot 10^{-6}$	$9,2382 \cdot 10^{-6}$	$9,3363 \cdot 10^{-6}$	0,53%
4,053	$1,2623 \cdot 10^{-5}$	$1,2534 \cdot 10^{-5}$	$1,2711 \cdot 10^{-5}$	0,70%

Tabla D.10: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: metano. Diámetro: 0,24 mm

<b><i>P</i> [bar]</b>	<b><i>Y</i> [kg/s]</b>	<b>Límite inferior [kg/s]</b>	<b>Límite superior [kg/s]</b>	<b>Incertidumbre [%]</b>
<b>1,063</b>	$1,8512 \cdot 10^{-6}$	$1,7481 \cdot 10^{-6}$	$1,9543 \cdot 10^{-6}$	5,57%
<b>1,122</b>	$2,2777 \cdot 10^{-6}$	$2,6960 \cdot 10^{-6}$	$2,8593 \cdot 10^{-6}$	2,94%
<b>1,262</b>	$4,6893 \cdot 10^{-6}$	$4,5919 \cdot 10^{-6}$	$4,7867 \cdot 10^{-6}$	2,08%
<b>1,409</b>	$6,2582 \cdot 10^{-6}$	$6,1492 \cdot 10^{-6}$	$6,3671 \cdot 10^{-6}$	1,74%
<b>1,683</b>	$7,9877 \cdot 10^{-6}$	$7,8262 \cdot 10^{-6}$	$8,1492 \cdot 10^{-6}$	2,02%
<b>2,027</b>	$9,9899 \cdot 10^{-6}$	$9,8972 \cdot 10^{-6}$	$1,0083 \cdot 10^{-5}$	0,93%
<b>3,040</b>	$1,5208 \cdot 10^{-5}$	$1,5148 \cdot 10^{-5}$	$1,5268 \cdot 10^{-5}$	0,40%
<b>4,053</b>	$2,0425 \cdot 10^{-5}$	$2,0339 \cdot 10^{-5}$	$2,0512 \cdot 10^{-5}$	0,43%

Tabla D.11: Datos experimentales y límites tras regresión. Fluido: metano. Diámetro: 0,525 mm

<b><i>P</i> [bar]</b>	<b><i>Y</i> [kg/s]</b>	<b>Límite inferior [kg/s]</b>	<b>Límite superior [kg/s]</b>	<b>Incertidumbre [%]</b>
<b>1,063</b>	$1,0281 \cdot 10^{-5}$	$9,7859 \cdot 10^{-6}$	$1,0776 \cdot 10^{-5}$	4,81%
<b>1,122</b>	$1,6748 \cdot 10^{-5}$	$1,6300 \cdot 10^{-5}$	$1,7196 \cdot 10^{-5}$	2,68%
<b>1,262</b>	$2,9028 \cdot 10^{-5}$	$2,8414 \cdot 10^{-5}$	$2,9642 \cdot 10^{-5}$	2,12%
<b>1,409</b>	$3,7252 \cdot 10^{-5}$	$3,6659 \cdot 10^{-5}$	$3,7845 \cdot 10^{-5}$	1,59%
<b>1,683</b>	$4,7095 \cdot 10^{-5}$	$4,6449 \cdot 10^{-5}$	$4,7741 \cdot 10^{-5}$	1,37%
<b>2,027</b>	$5,7631 \cdot 10^{-5}$	$5,7162 \cdot 10^{-5}$	$5,8100 \cdot 10^{-5}$	0,81%
<b>3,040</b>	$8,8676 \cdot 10^{-5}$	$8,8067 \cdot 10^{-5}$	$8,9284 \cdot 10^{-5}$	0,69%

Como se ha comentado para el caso del aire, con el metano tampoco se observa un comportamiento constante de la razón del flujo de fuga y el área del orificio en la zona lineal (mayor presión diferencial), ver Tablas D.12 y D.13, ni tampoco en los casos con menor diferencia de presiones (Tablas D.14 y D.15).

Tabla D.12 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Metano. Presión de operación: 2,027 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
2,027	0,16	0,0201	1	$5,9516 \cdot 10^{-6}$	1
2,027	0,24	0,0452	2,25	$9,9899 \cdot 10^{-6}$	1,6785
2,027	0,525	0,2165	10,77	$5,7631 \cdot 10^{-5}$	9,6833

Tabla D.13 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Metano. Presión de operación 3,040 bar

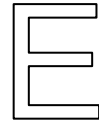
Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
3,040	0,16	0,0201	1	$9,2873 \cdot 10^{-6}$	1
3,040	0,24	0,0452	2,25	$1,5208 \cdot 10^{-5}$	1,6375
3,040	0,525	0,2165	10,77	$8,8676 \cdot 10^{-5}$	9,5481

Tabla D.14 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Metano. Presión de operación: 1,063 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
1,063	0,16	0,0201	1	$1,0946 \cdot 10^{-6}$	1
1,063	0,24	0,0452	2,25	$1,8512 \cdot 10^{-6}$	1,6912
1,063	0,525	0,2165	10,77	$1,0281 \cdot 10^{-5}$	9,3925

Tabla D.15 – Comparación entre relación de áreas y flujo. Metano. Presión de operación 1,262 bar

Presión operación (bar)	Diámetro (mm)	Área orificio (mm <sup>2</sup> )	Relación de áreas	Flujo por el orificio (kg/s)	Relación de flujo
1,262	0,16	0,0201	1	$2,8179 \cdot 10^{-6}$	1
1,262	0,24	0,0452	2,25	$4,6893 \cdot 10^{-6}$	1,6641
1,262	0,525	0,2165	10,77	$2,9028 \cdot 10^{-5}$	10,3013



## TABLAS Y GRÁFICAS COMPARATIVAS: RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CFD

En este anexo se presentan las tablas y gráficas comparativas entre los resultados obtenidos a partir de la teoría de flujo compresible 1-D y los resultados CFD.

### E.1 Aire

#### Diámetro 0,16 mm

*Tabla E.1 – Comparación de resultados. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,16 mm*

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio experimental (kg/s)
1,063	$9,7783 \cdot 10^{-7}$	Subsónico	$1,6296 \cdot 10^{-6}$
1,122	$1,6159 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,4604 \cdot 10^{-6}$
1,262	$2,7358 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$4,1353 \cdot 10^{-6}$
1,409	$3,6659 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$5,4409 \cdot 10^{-6}$
1,683	$5,1056 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$7,0714 \cdot 10^{-6}$
2,027	$6,6597 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$8,6683 \cdot 10^{-6}$
3,040	$1,0579 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,3374 \cdot 10^{-5}$
4,053	$1,4125 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,8079 \cdot 10^{-5}$
5,066	$1,7867 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-
6,079	$2,1543 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-

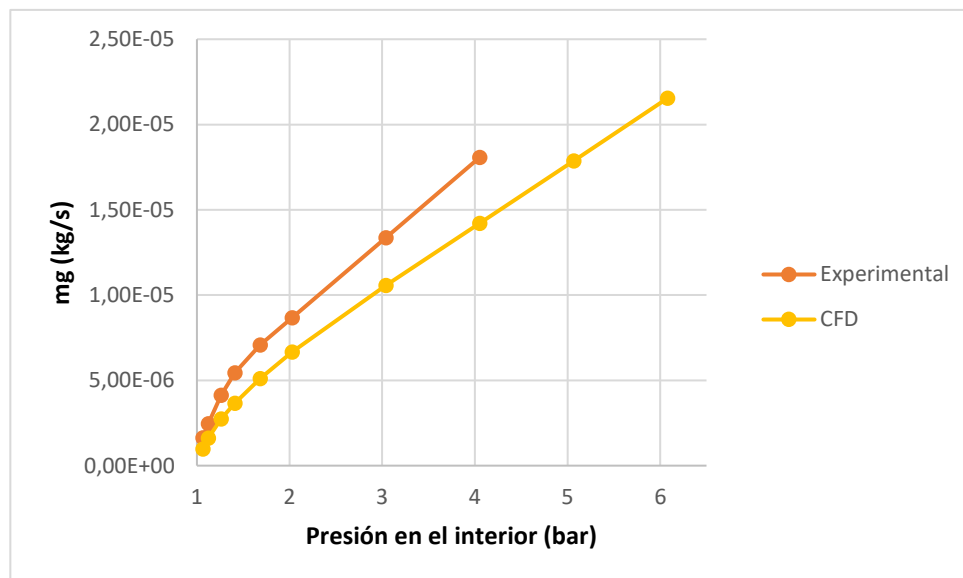


Figura E.1. Comparación de resultados experimentales y CFD. Caudales. Aire.  $d = 0,16$  mm

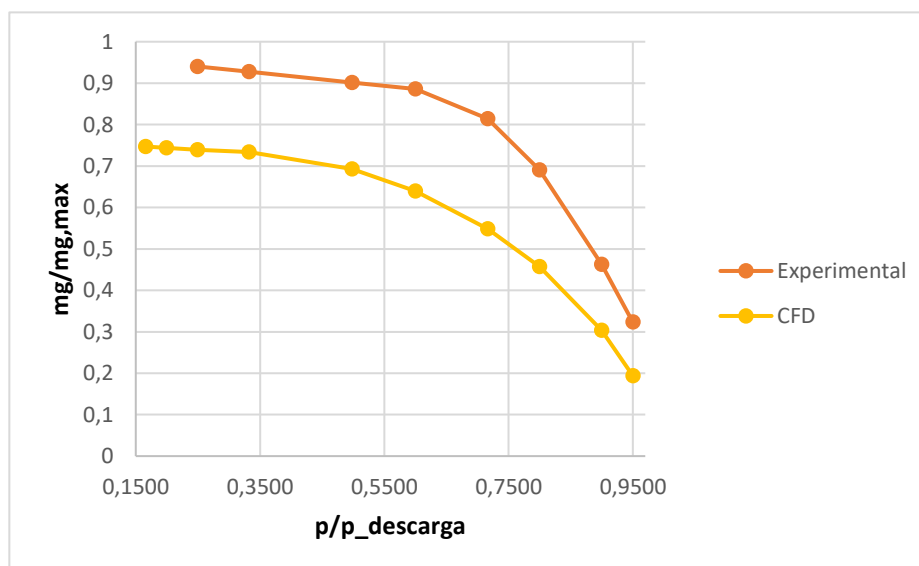


Figura E.2. Comparación de resultados experimentales y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire.  $d = 0,16$  mm

Diámetro 0,24 mm

Tabla E.2 – Comparación de resultados. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,24 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio experimental (kg/s)	
			Set 1	Set 2
<b>1,063</b>	$2,7072 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,9474 \cdot 10^{-6}$	$2,9800 \cdot 10^{-6}$
<b>1,122</b>	$4,2635 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$4,5193 \cdot 10^{-6}$	$4,4870 \cdot 10^{-6}$
<b>1,262</b>	$6,9152 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$7,7748 \cdot 10^{-6}$	$7,6354 \cdot 10^{-6}$
<b>1,409</b>	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$1,0373 \cdot 10^{-5}$	$1,0287 \cdot 10^{-5}$
<b>1,683</b>	$1,2370 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,3178 \cdot 10^{-5}$	$1,3444 \cdot 10^{-5}$
<b>2,027</b>	$1,5888 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,6674 \cdot 10^{-5}$	$1,6681 \cdot 10^{-5}$
<b>3,040</b>	$2,4711 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$2,5325 \cdot 10^{-5}$	$2,5394 \cdot 10^{-5}$
<b>4,053</b>	$3,3134 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$3,3976 \cdot 10^{-5}$	$3,4105 \cdot 10^{-5}$
<b>5,066</b>	$4,1577 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-	-
<b>6,079</b>	$5,0038 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-	-

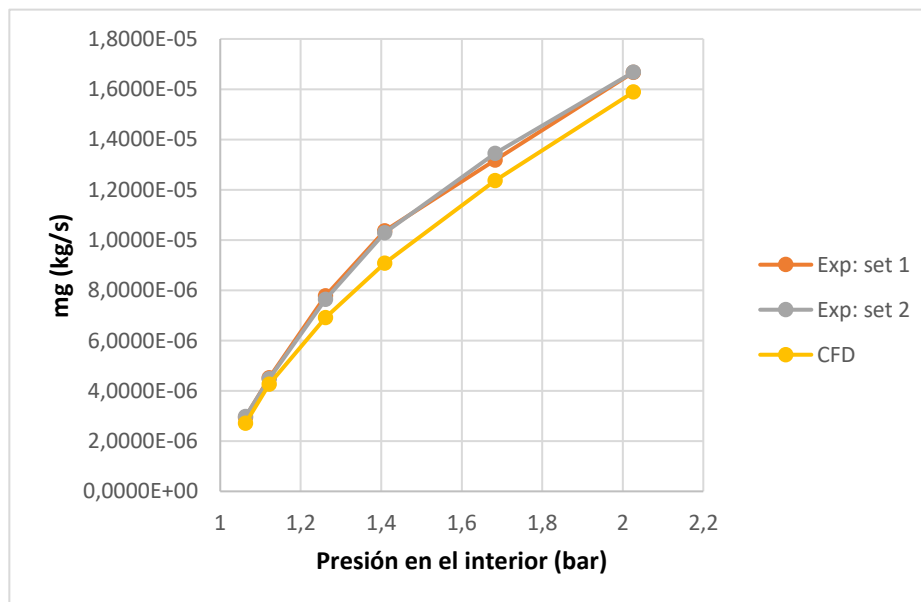


Figura E.3. Comparación de resultados experimentales y CFD. Caudales. Aire. d = 0,24 mm

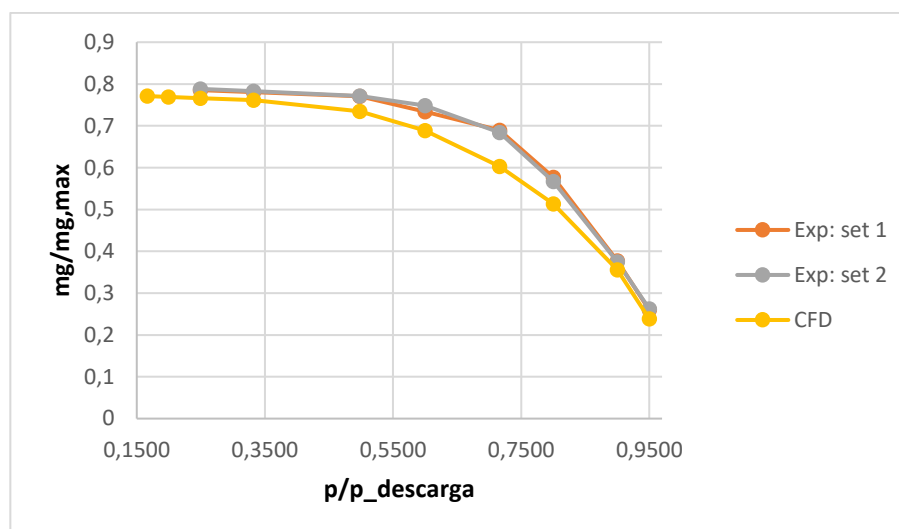


Figura E.4. Comparación de resultados experimentales y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire.  $d = 0,24$  mm

### Diámetro 0,525 mm

Tabla E.3 – Comparación de resultados. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio experimental (kg/s)
1,063	$1,6043 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,5517 \cdot 10^{-5}$
1,122	$2,4115 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$2,3947 \cdot 10^{-5}$
1,262	$3,7447 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$4,0944 \cdot 10^{-5}$
1,409	$4,8045 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$5,4201 \cdot 10^{-5}$
1,683	$6,4068 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$6,6407 \cdot 10^{-5}$
2,027	$8,0904 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$8,5504 \cdot 10^{-5}$
3,040	$1,2343 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$1,3048 \cdot 10^{-4}$
4,053	$1,6498 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$1,7546 \cdot 10^{-4}$
5,066	$2,0656 \cdot 10^{-4}$	Sónico	-
6,079	$2,4817 \cdot 10^{-4}$	Sónico	-

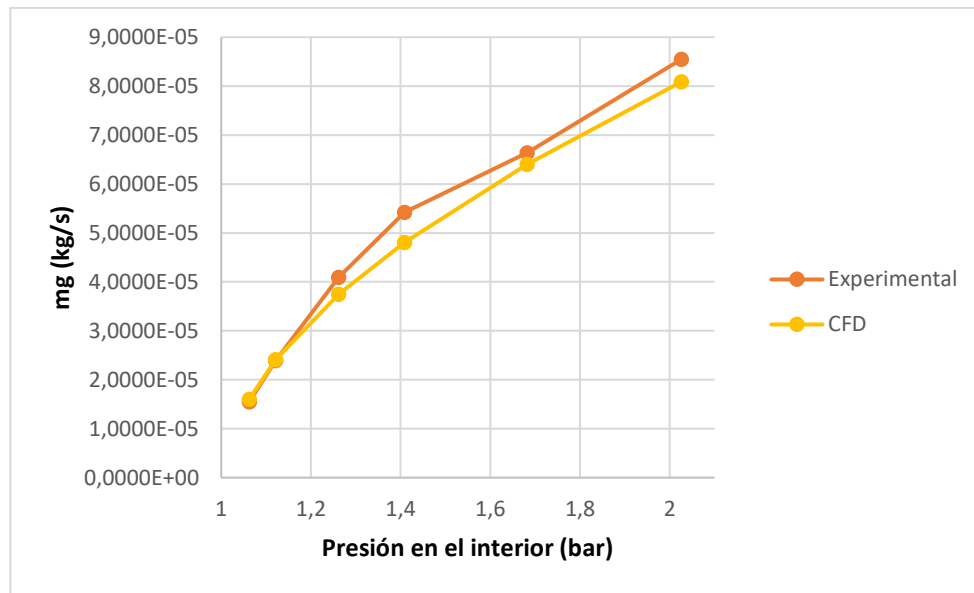


Figura E.5. Comparación de resultados experimentales y CFD. Caudales. Aire.  $d = 0,525$  mm

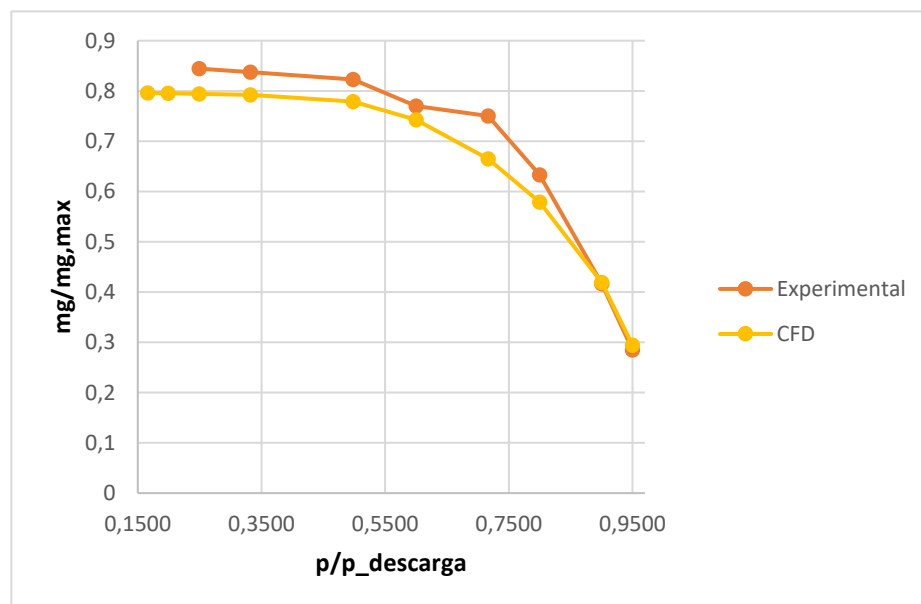


Figura E.6. Comparación de resultados experimentales y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire.  $d = 0,525$  mm



## E.2 Metano

### Diámetro 0,16 mm

Tabla E.4 – Comparación de resultados. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,16 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio experimental (kg/s)
1,063	$7,9535 \cdot 10^{-7}$	Subsónico	$1,0946 \cdot 10^{-6}$
1,122	$1,3049 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$1,6574 \cdot 10^{-6}$
1,262	$2,1934 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,8179 \cdot 10^{-6}$
1,409	$2,9182 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$3,7687 \cdot 10^{-6}$
1,683	$4,0014 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$4,8116 \cdot 10^{-6}$
2,027	$5,0956 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$5,9516 \cdot 10^{-6}$
3,040	$7,8100 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$9,2873 \cdot 10^{-6}$
4,053	$1,0483 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,2623 \cdot 10^{-5}$
5,066	$1,3166 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-
6,079	$1,5861 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-

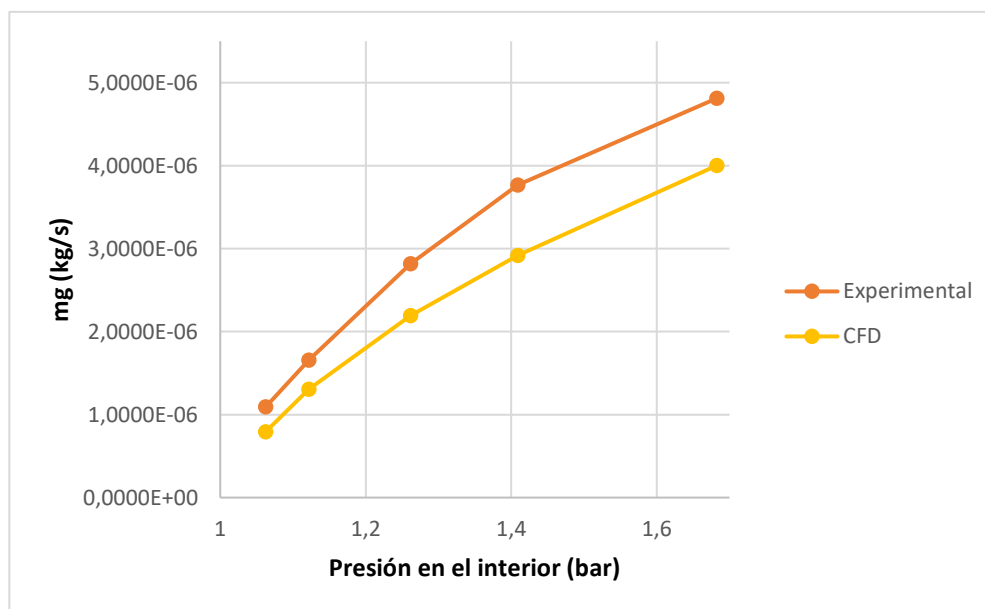


Figura E.7. Comparación de resultados experimentales y CFD. Caudales. Metano. d = 0,16 mm

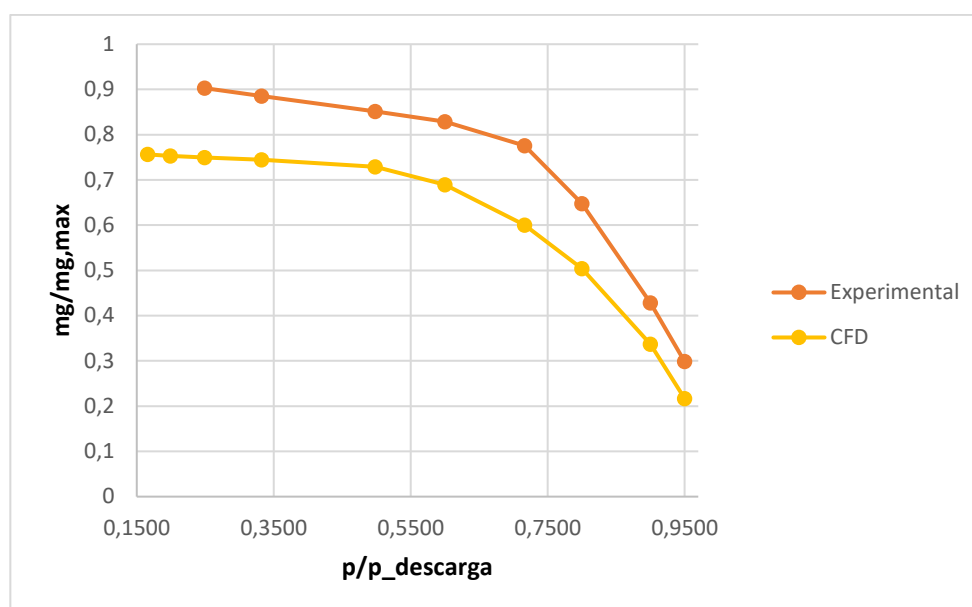


Figura E.8. Comparación de resultados experimentales y CFD. Ratios de caudal y presión. Metano.  $d = 0,16$  mm

### Diámetro 0,24 mm

Tabla E.5 – Comparación de resultados. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,24 mm.

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio experimental (kg/s)
1,063	$2,1644 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$1,8512 \cdot 10^{-6}$
1,122	$3,4018 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,7777 \cdot 10^{-6}$
1,262	$5,4979 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$4,6893 \cdot 10^{-6}$
1,409	$7,1650 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$6,2582 \cdot 10^{-6}$
1,683	$9,6018 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$7,7877 \cdot 10^{-6}$
2,027	$1,2006 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$9,9899 \cdot 10^{-6}$
3,040	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,5208 \cdot 10^{-5}$
4,053	$2,4376 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$2,0425 \cdot 10^{-5}$
5,066	$3,0569 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-
6,079	$3,6794 \cdot 10^{-5}$	Sónico	-

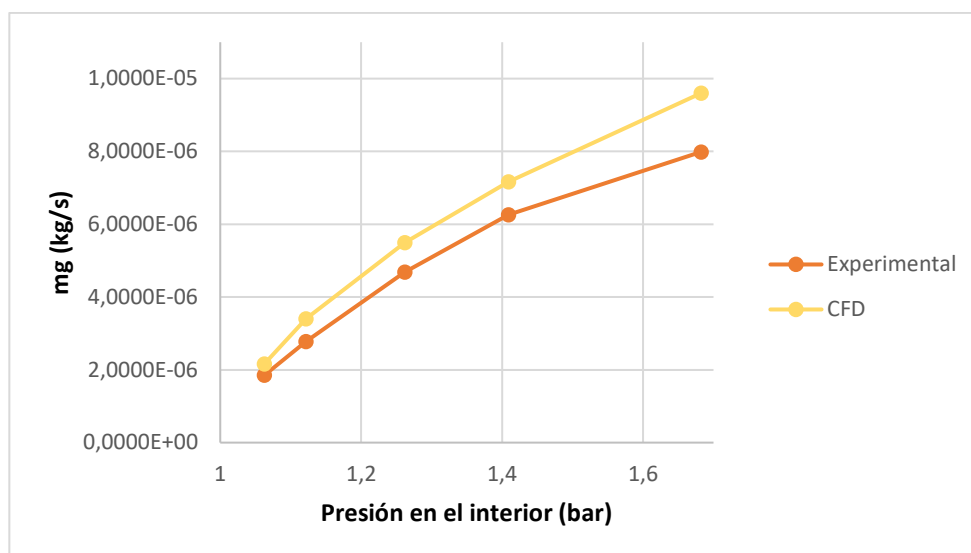


Figura E.9. Comparación de resultados experimentales y CFD. Caudales. Metano.  $d = 0,24$  mm

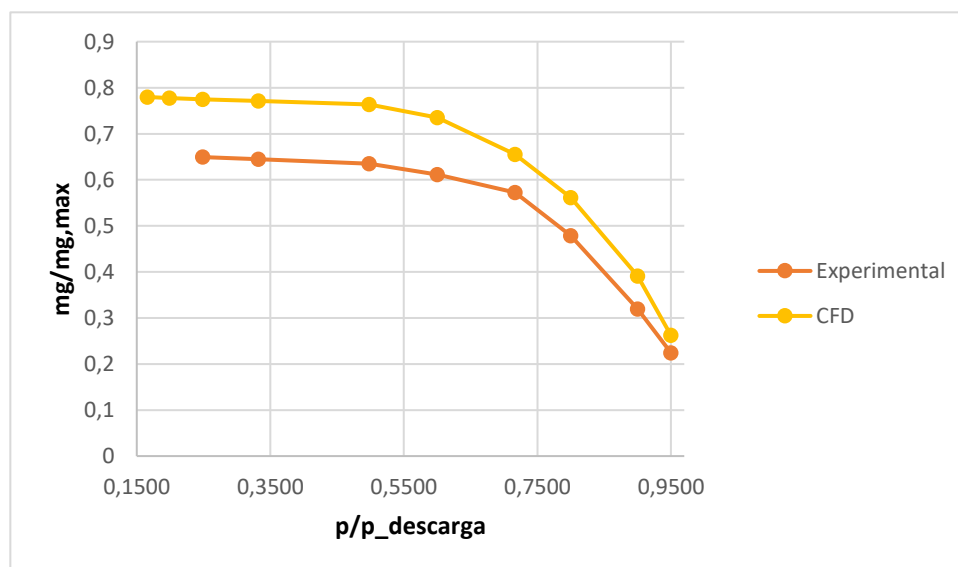


Figura E.10. Comparación de resultados experimentales y CFD. Ratios de caudal y presión. Metano.  $d = 0,24$  mm

Diámetro 0,525 mm

Tabla E.6 – Comparación de resultados. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,525 mm.

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio experimental (kg/s)
1,063	$1,2877 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,0281 \cdot 10^{-5}$
1,122	$1,9424 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,6748 \cdot 10^{-5}$
1,262	$3,0095 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$2,9028 \cdot 10^{-5}$
1,409	$3,8269 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$3,7252 \cdot 10^{-5}$
1,683	$4,9527 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$4,7095 \cdot 10^{-5}$
2,027	$6,0280 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$5,7631 \cdot 10^{-5}$
3,040	$9,0766 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$8,8676 \cdot 10^{-5}$
4,053	-	Sónico	-
5,066	$1,5179 \cdot 10^{-4}$	Sónico	-
6,079	$1,8236 \cdot 10^{-4}$	Sónico	-

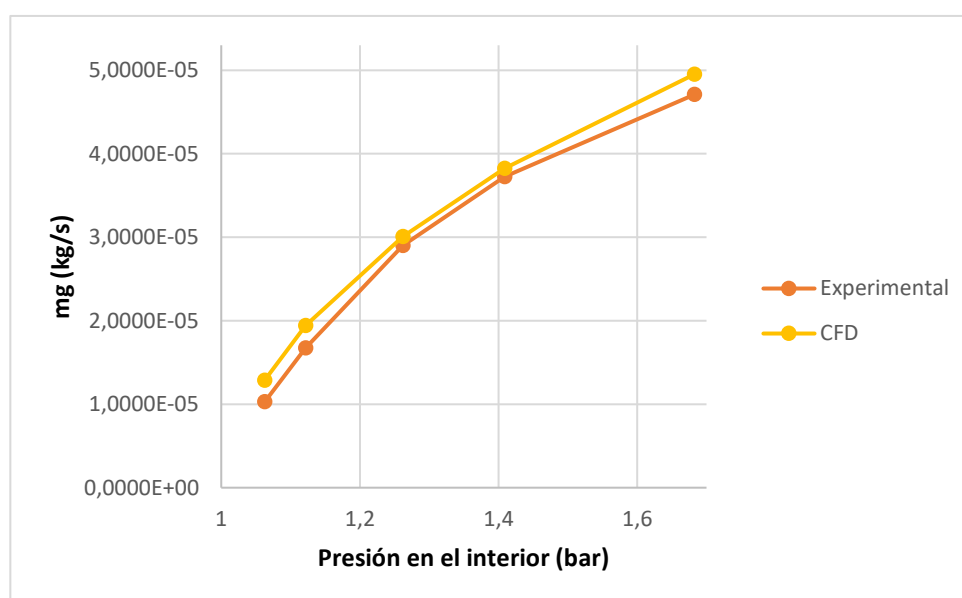


Figura E.11. Comparación de resultados experimentales y CFD. Caudales. Metano. d = 0,525 mm

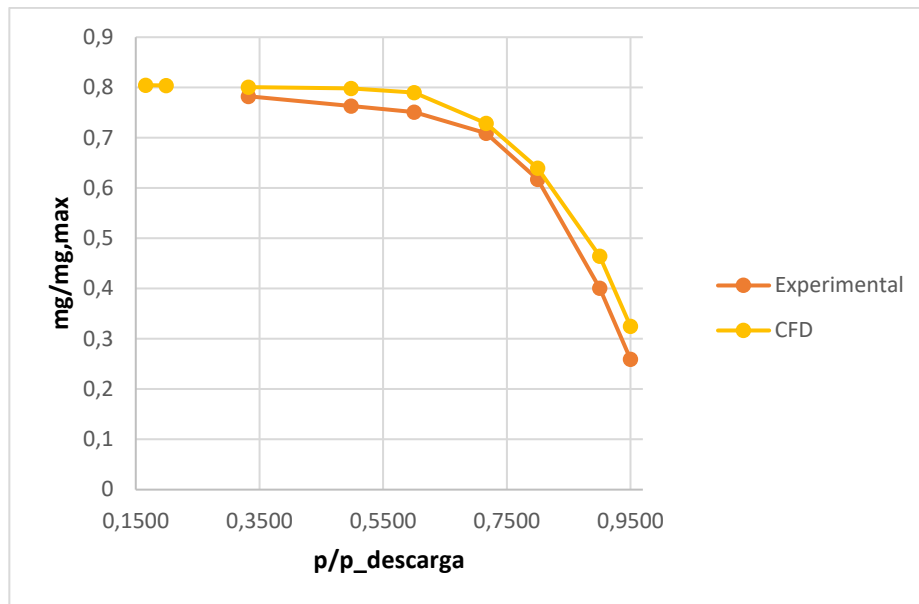
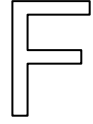


Figura E.12. Comparación de resultados experimentales y CFD. Ratios de caudal y presión. Metano.  $d = 0,525$  mm



## DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE DESCARGA DE LOS ORIFICIOS.

En este se desarrolla el método de obtención del coeficiente de descarga,  $C_D$ , utilizado para la determinación de resultados teóricos en el capítulo 5.

El coeficiente de descarga,  $C_D$ , es un factor relacionado con la geometría de los orificios y se obtiene experimentalmente, relacionando el flujo que circula por el orificio con respecto al máximo flujo teórico calculado mediante la ecuación 5.4:

$$\dot{m}_{g,max} = A \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^\beta} \frac{p}{\sqrt{R_g T}} \quad (5.4)$$

Tras validar el modelo CFD y comprobar la baja fiabilidad de los resultados experimentales en el capítulo 4, se optó por obtener el coeficiente de descarga a partir de los resultados CFD. Para ello se empleó la relación  $\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}} = \frac{\dot{m}_{g,CFD}}{A \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^\beta} \frac{p}{\sqrt{R_g T}}}$

## F.1 Orificio de diámetro 0,16 mm

En primer lugar, se muestran las tablas F.1 y F.2 en las que se puede ver la evolución del valor del ratio que enfrenta el flujo por el orificio obtenido a partir del modelo CFD y el máximo teórico. El valor del ratio se aproxima a 0,75 conforme aumenta la presión. Además, en los casos más sónicos, despreciar los efectos viscosos no tiene relevancia por lo que se supone que el ratio para estos casos se corresponde con el coeficiente de descarga,  $C_D$ .

Tabla F.1 – Evolución del cociente de flujos. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,16 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$
1,063	0,194
1,122	0,304
1,262	0,457
1,409	0,548
1,683	0,640
2,027	0,693
3,040	0,734
4,053	0,739
5,066	0,743
6,079	0,747

Tabla F.2 – Evolución del cociente de flujos. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,16 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$
1,063	0,217
1,122	0,337
1,262	0,504
1,409	0,600
1,683	0,689
2,027	0,729
3,040	0,745
4,053	0,750
5,066	0,753
6,079	0,756

Por lo tanto y teniendo en cuenta el comportamiento asintótico que muestra la Figura F.1, se escoge 0,75 como el coeficiente de descarga para el orificio de diámetro 0,16 mm.

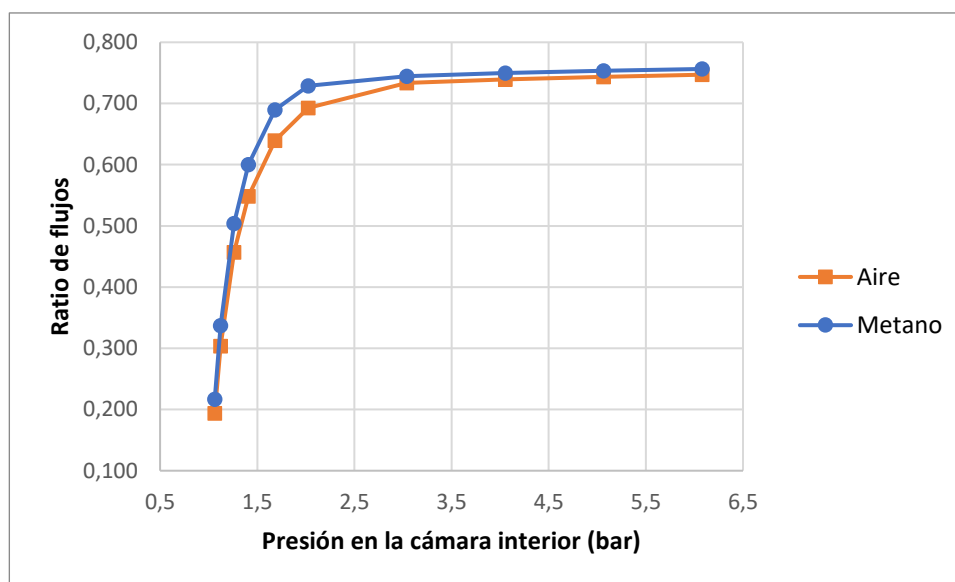


Figura F.1. Evolución del ratio  $\dot{m}_{g,CFD}/\dot{m}_{g,max}$  en función de la presión.  $d = 0,16$  mm

## F.2 Orificio de diámetro 0,24 mm

Al igual que en el apartado anterior, se muestran las tablas F.3 y F.4 en las que se puede ver la evolución del valor del ratio que enfrenta el flujo por el orificio obtenido a partir del modelo CFD y el máximo teórico, tendiendo hacia 0,78, valor que se ha tomado como coeficiente de descarga para el orificio de 0,24 mm de diámetro.



Tabla F.3 – Evolución del cociente de flujos. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,24 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$
1,063	0,239
1,122	0,356
1,262	0,513
1,409	0,603
1,683	0,689
2,027	0,735
3,040	0,762
4,053	0,766
5,066	0,769
6,079	0,771

Tabla F.4 – Evolución del cociente de flujos. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,24 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$
1,063	0,262
1,122	0,391
1,262	0,561
1,409	0,655
1,683	0,735
2,027	0,763
3,040	0,771
4,053	0,775
5,066	0,777
6,079	0,780

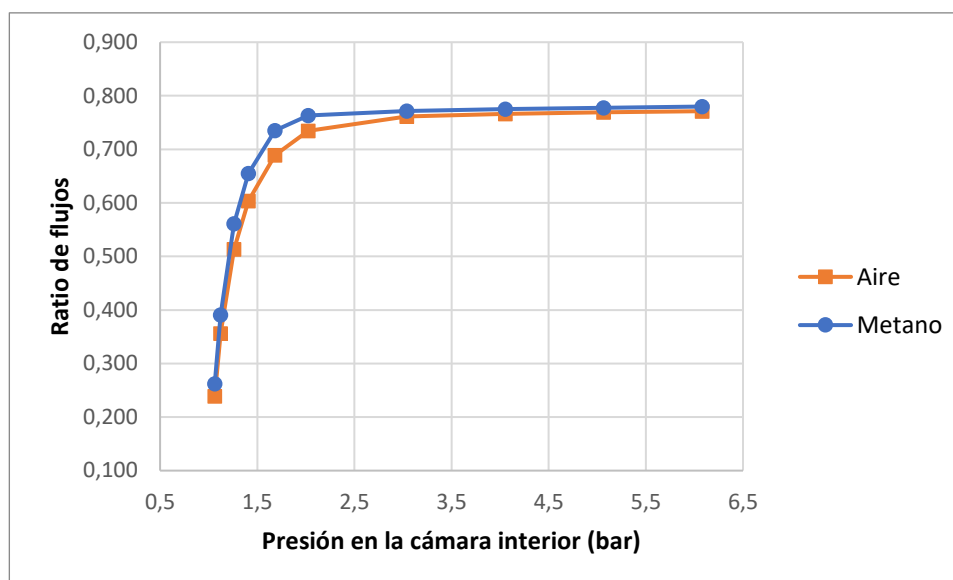


Figura F.2. Evolución del ratio  $\dot{m}_{g,CFD}/\dot{m}_{g,max}$  en función de la presión.  $d = 0,24$  mm

### F.3 Orificio de diámetro 0,525 mm

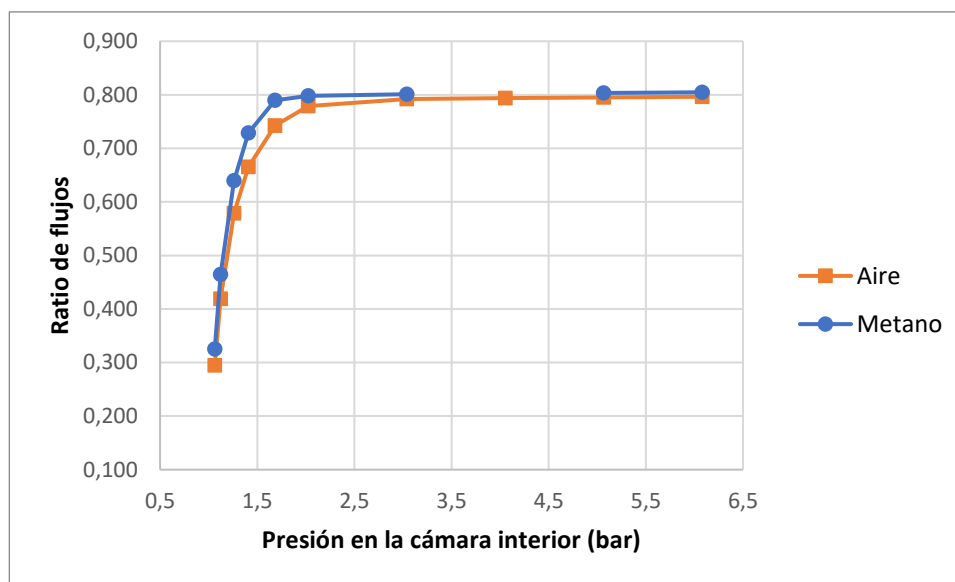
En este caso las tablas F.5 y F.6 muestran la evolución del valor del ratio que enfrenta el flujo por el orificio obtenido a partir del modelo CFD y el máximo teórico, tendiendo hacia 0,8, valor que se ha tomado como coeficiente de descarga para el orificio de 0,525 mm de diámetro.

Tabla F.5 – Evolución del cociente de flujos. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$
1,063	0,294
1,122	0,419
1,262	0,579
1,409	0,665
1,683	0,743
2,027	0,779
3,040	0,792
4,053	0,794
5,066	0,795
6,079	0,796

Tabla F.6 – Evolución del cociente de flujos. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$
1,063	0,325
1,122	0,465
1,262	0,640
1,409	0,729
1,683	0,790
2,027	0,798
3,040	0,801
4,053	-
5,066	0,804
6,079	0,805

Figura F.3. Evolución del ratio  $\frac{\dot{m}_{g,CFD}}{\dot{m}_{g,max}}$  en función de la presión. d = 0,525 m



## RESULTADOS DE LA TEORÍA COMPRESIBLE 1-D

En este Anexo se exponen los resultados obtenidos a partir de la teoría de flujo compresible 1-D. Se muestran en tablas para diferentes diámetros de orificio y distintos gases. En las tablas se incluye, para las diferentes presiones ensayadas, el tipo de régimen del flujo según el valor que toma la relación crítica,  $\varphi$ , además del flujo de fuga por el orificio.

Para el cálculo del flujo másico se ha tenido en cuenta que la temperatura del gas en el interior de la tubería es de 293,5 K y que la presión del aire ambiente es de 100954 Pa, condiciones similares a las del laboratorio y las supuestas en las simulaciones CFD.

### G.1 Aire

---

En primer lugar, las siguientes tablas exponen los resultados numéricos obtenidos para el aire.

Tabla G.1 – Resultados teóricos. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,16 mm

Presión interior (bar)	$\varphi$	Flujo por el orificio (kg/s)	Régimen
1,063	0,449	$1,6986 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	0,617	$2,4629 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	0,819	$3,6761 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	0,918	$4,6013 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,683	0,989	$5,9178 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
2,027	1	$7,2098 \cdot 10^{-6}$	Sónico
3,040	1	$1,0815 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4,053	1	$1,4420 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5,066	1	$1,8025 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6,079	1	$2,1628 \cdot 10^{-5}$	Sónico

Tabla G.2 – Resultados teóricos. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,24 mm

Presión interior (bar)	$\varphi$	Flujo por el orificio (kg/s)	Régimen
1,063	0,449	$3,9748 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	0,617	$5,7632 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	0,819	$8,6021 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	0,918	$1,0767 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,683	0,989	$1,3848 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2	1	$1,6871 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3	1	$2,5307 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4	1	$3,3742 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5	1	$4,2178 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6	1	$5,0609 \cdot 10^{-5}$	Sónico

Tabla G.3 – Resultados teóricos. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión interior (bar)	$\varphi$	Flujo por el orificio (kg/s)	Régimen
1,063	0,449	$1,9582 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,122	0,617	$2,8393 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,262	0,819	$4,2379 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,409	0,918	$5,3044 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,683	0,989	$6,8222 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2	1	$8,3116 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3	1	$1,2468 \cdot 10^{-4}$	Sónico
4	1	$1,6623 \cdot 10^{-4}$	Sónico
5	1	$2,0779 \cdot 10^{-4}$	Sónico
6	1	$2,4933 \cdot 10^{-4}$	Sónico

Para facilitar el análisis, se representan los resultados de forma gráfica. La Figura G.1 muestra el comportamiento del flujo con respecto a la presión para los diámetros ensayados. Como no se pueden apreciar con suficiente claridad los resultados para los diámetros más pequeños, en la Figura G.2 se incluyen únicamente los resultados para los diámetros de 0,16 y 0,24 mm.

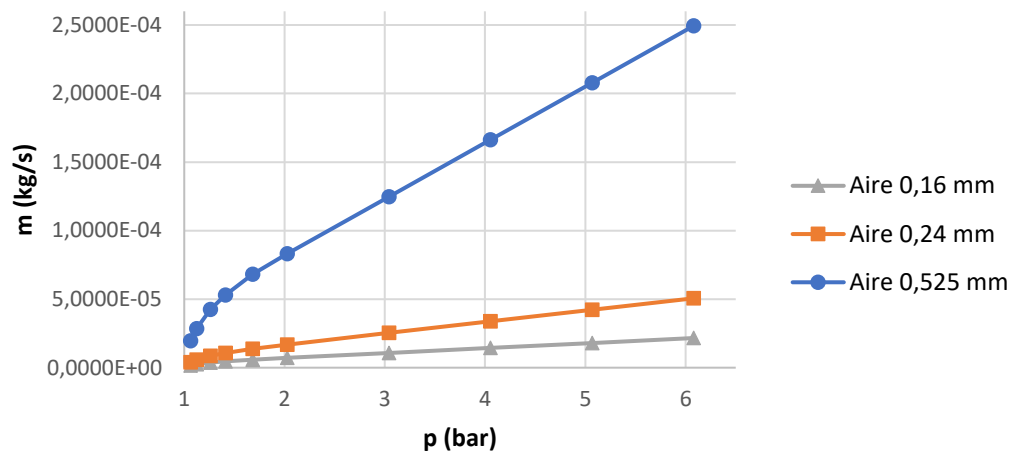


Figura G.1. Resultados teóricos. Aire. Todos los diámetros

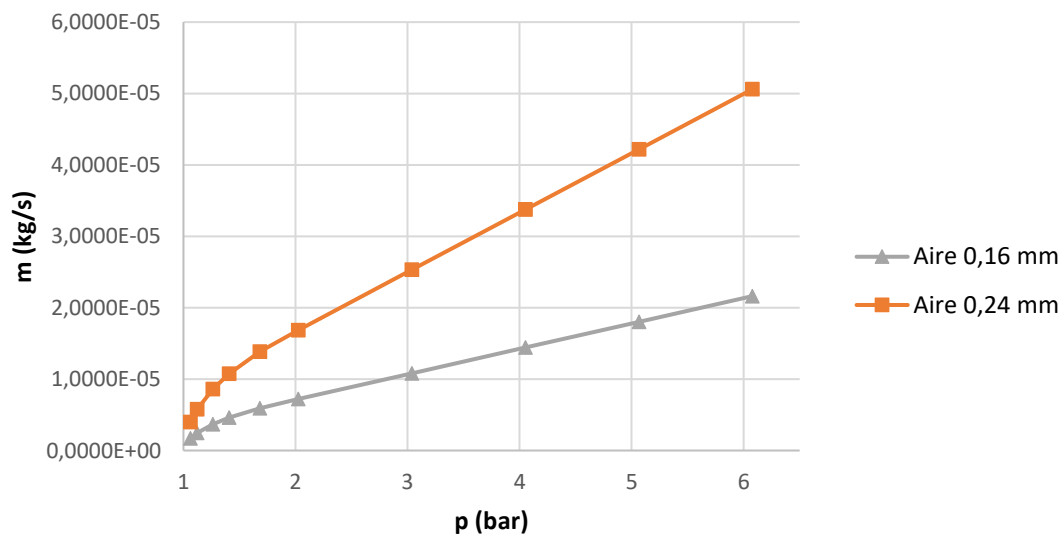


Figura G.2. Resultados teóricos. Aire.  $d = 0,16; 0,24$  mm

Como se puede ver, la magnitud de la fuga para el diámetro de 0,525 mm es la mayor debido a la influencia del área,  $A$ , en la ecuación 5.1. Por otra parte, se confirma la tendencia de los resultados CFD y experimentales: una zona sónica

donde el caudal de fuga depende linealmente de la presión, y otra zona subsónica donde la dependencia es de tipo cuadrática. El parámetro  $\varphi$  es el encargado de cuantificar la no linealidad en la zona de bajas presiones.

## G.2 Metano

A continuación, se exponen los resultados numéricos obtenidos para el metano.

*Tabla G.4 – Resultados teóricos. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,16 mm*

Presión interior (bar)	$\varphi$	Flujo por el orificio (kg/s)	Régimen
1,063	0,459	$1,2617 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	0,629	$1,8257 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	0,831	$2,7132 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	0,928	$3,3821 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,683	0,993	$4,3212 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
2	1	$5,2425 \cdot 10^{-6}$	Sónico
3	1	$7,8639 \cdot 10^{-6}$	Sónico
4	1	$1,0485 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5	1	$1,3106 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6	1	$1,5726 \cdot 10^{-5}$	Sónico

*Tabla G.5 – Resultados teóricos. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,24 mm*

Presión interior (bar)	$\varphi$	Flujo por el orificio (kg/s)	Régimen
1,063	0,459	$2,9523 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	0,629	$4,2721 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	0,831	$6,3489 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	0,928	$7,9142 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,683	0,993	$1,0112 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2	1	$1,2267 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3	1	$1,8402 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4	1	$2,4535 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5	1	$3,0669 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6	1	$3,6799 \cdot 10^{-5}$	Sónico

Tabla G.6 – Resultados teóricos. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	$\varphi$	Flujo por el orificio (kg/s)	Régimen
1,063	0,459	$1,4545 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,122	0,629	$2,1047 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,262	0,831	$3,1278 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,409	0,928	$3,8990 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,683	0,993	$4,9816 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2	1	$6,0437 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3	1	$9,0656 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4	1	$1,2087 \cdot 10^{-4}$	Sónico
5	1	$1,5109 \cdot 10^{-4}$	Sónico
6	1	$1,8129 \cdot 10^{-4}$	Sónico

De manera análoga al apartado anterior, se presentan los resultados gráficamente en las Figuras G.3 y G.4, obteniéndose las mismas conclusiones que para las Figuras G.1 y G.2.

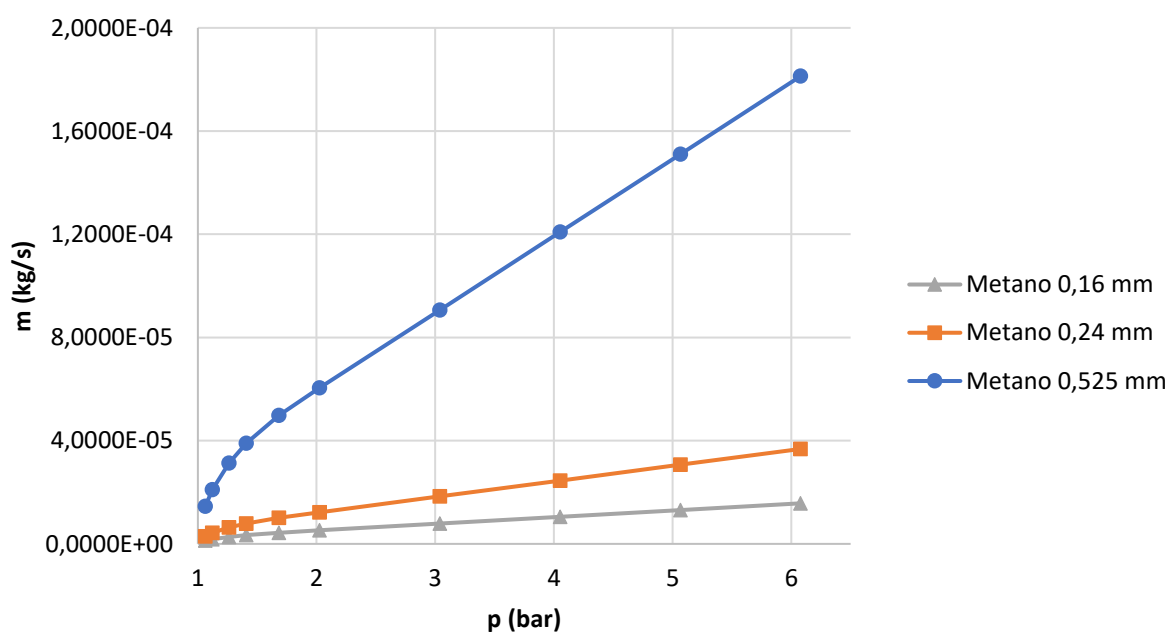


Figura G.3. Resultados teóricos. Metano. Todos los diámetros



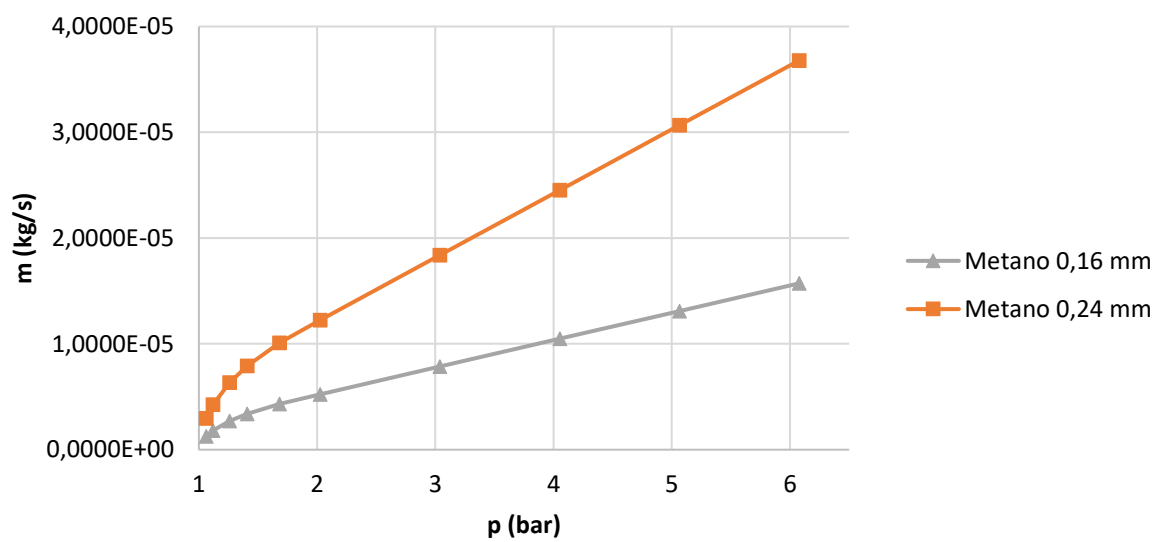
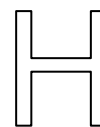


Figura G.4. Resultados teóricos. Metano.  $d = 0,16; 0,24$  mm



## TABLAS Y GRÁFICAS COMPARATIVAS: TEORÍA COMPRESIBLE 1-D Y CFD

En este Anexo se presentan las tablas y gráficas comparativas entre los resultados obtenidos a partir de la teoría de flujo compresible 1-D y los resultados CFD.

### H.1 Aire

Diámetro 0,16 mm

*Tabla H.1 – Comparación de resultados. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,16 mm*

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Régimen teórico
1,063	$9,7783 \cdot 10^{-7}$	Subsónico	$1,6986 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	$1,6159 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,4629 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	$2,7358 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$3,6761 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	$3,6659 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$4,6013 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,683	$5,1056 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$5,9178 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
2,027	$6,6597 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$7,2098 \cdot 10^{-6}$	Sónico
3,040	$1,0579 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,0815 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4,053	$1,4125 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,4420 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5,066	$1,7867 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,8025 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6,079	$2,1543 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$2,1628 \cdot 10^{-5}$	Sónico

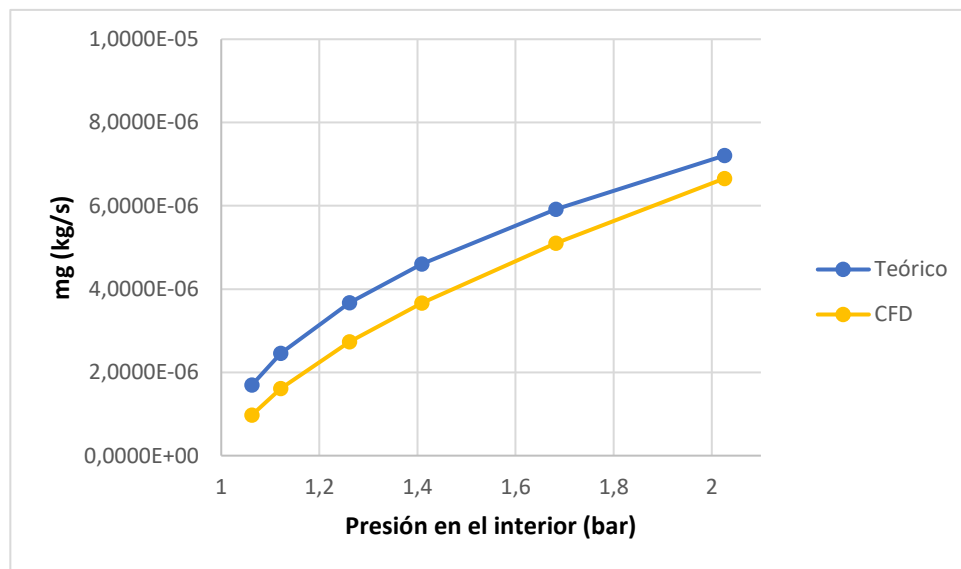


Figura H.1. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire.  $d = 0,16$  mm

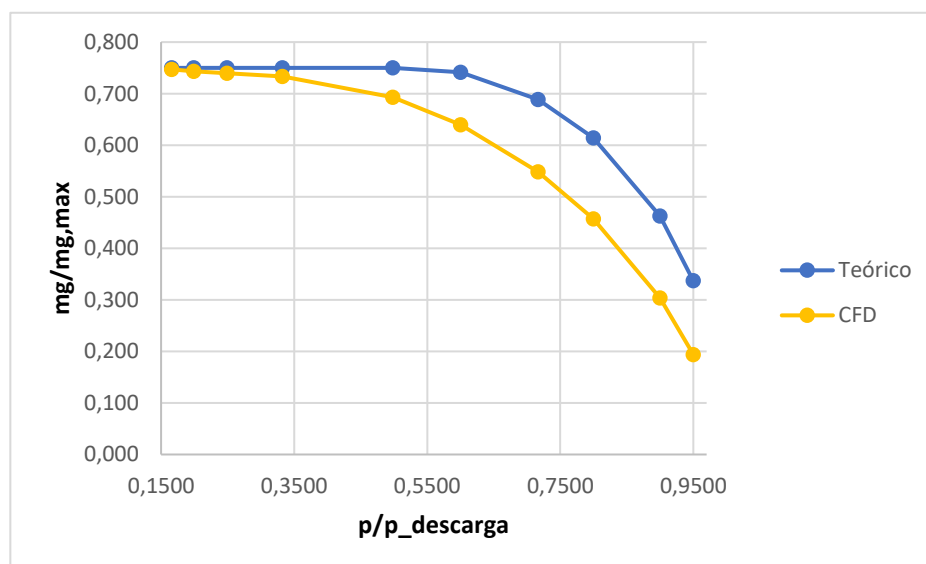


Figura H.2. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire.  
 $d = 0,16$  mm

Diámetro 0,24 mm

Tabla H.2 – Comparación de resultados. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,24 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Régimen teórico
<b>1,063</b>	$2,7072 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$3,9748 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
<b>1,122</b>	$4,2635 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$5,7632 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
<b>1,262</b>	$6,9152 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$8,6021 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
<b>1,409</b>	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$1,0767 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
<b>1,683</b>	$1,2370 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,3848 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
<b>2,027</b>	$1,5888 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,6871 \cdot 10^{-5}$	Sónico
<b>3,040</b>	$2,4711 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$2,5307 \cdot 10^{-5}$	Sónico
<b>4,053</b>	$3,3134 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$3,3742 \cdot 10^{-5}$	Sónico
<b>5,066</b>	$4,1577 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$4,2178 \cdot 10^{-5}$	Sónico
<b>6,079</b>	$5,0038 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$5,0609 \cdot 10^{-5}$	Sónico

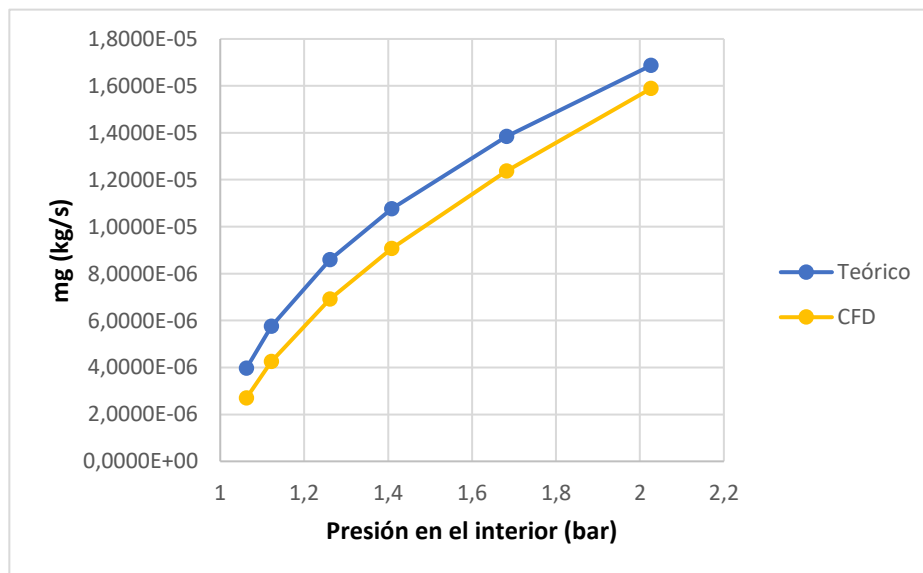


Figura H.3. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire. d = 0,24 mm

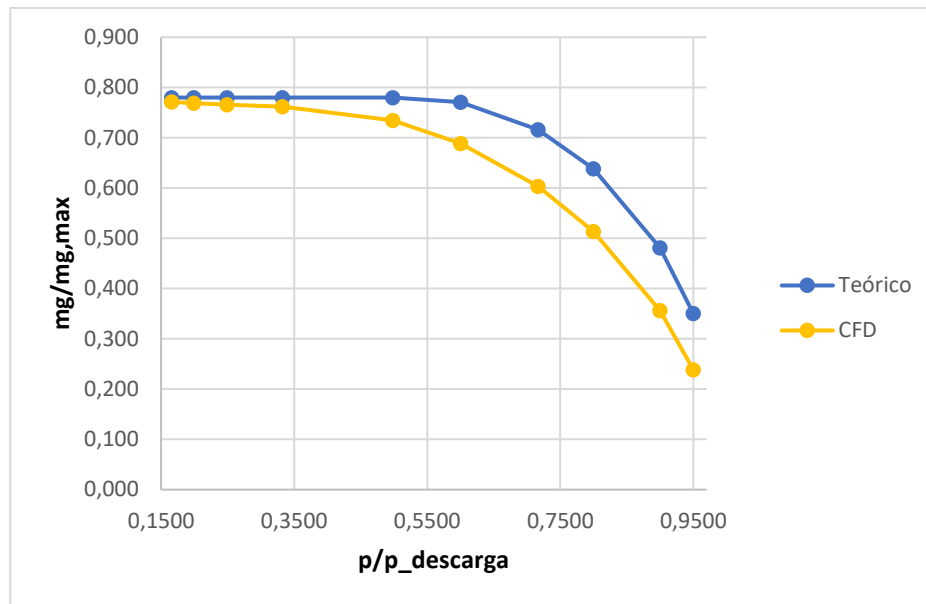


Figura H.4. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire.  
 $d = 0,24 \text{ mm}$

### Diámetro 0,525 mm

Tabla H.3 – Comparación de resultados. Fluido: aire. Diámetro del orificio: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Régimen teórico
1,063	$1,6043 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,9582 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,122	$2,4115 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$2,8393 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,262	$3,7447 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$4,2379 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,409	$4,8045 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$5,3044 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,683	$6,4068 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$6,8222 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2,027	$8,0904 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$8,3116 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3,040	$1,2343 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$1,2468 \cdot 10^{-4}$	Sónico
4,053	$1,6498 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$1,6623 \cdot 10^{-4}$	Sónico
5,066	$2,0656 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$2,0779 \cdot 10^{-4}$	Sónico
6,079	$2,4817 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$2,4933 \cdot 10^{-4}$	Sónico

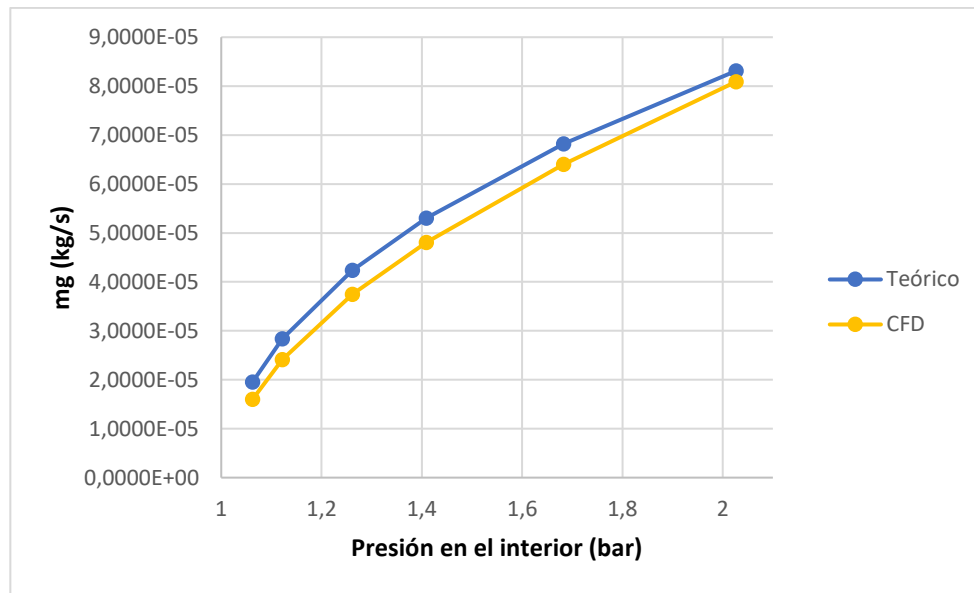


Figura H.5. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire.  $d = 0,525$  mm

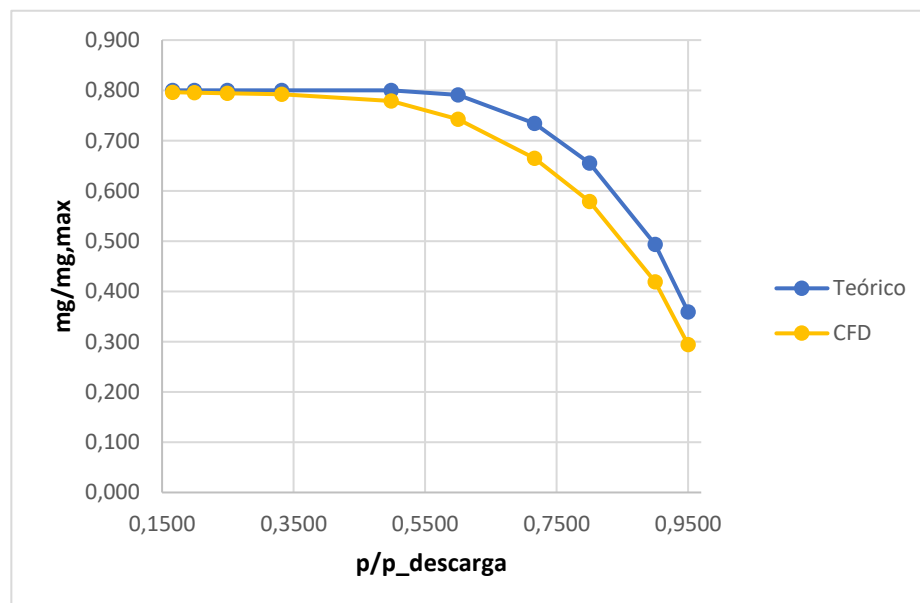


Figura H.6. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire.  
 $d = 0,525$  mm

## H.2 Metano

### Diámetro 0,16 mm

Tabla H.4 – Comparación de resultados. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,16 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio teórico(kg/s)	Régimen teórico
1,063	$7,9535 \cdot 10^{-7}$	Subsónico	$1,2617 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	$1,3049 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$1,8257 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	$2,1934 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,7132 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	$2,9182 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$3,3821 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,683	$4,0014 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$4,3212 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
2,027	$5,0956 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$5,2425 \cdot 10^{-6}$	Sónico
3,040	$7,8100 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$7,8639 \cdot 10^{-6}$	Sónico
4,053	$1,0483 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,0485 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5,066	$1,3166 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,3106 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6,079	$1,5861 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,5726 \cdot 10^{-5}$	Sónico

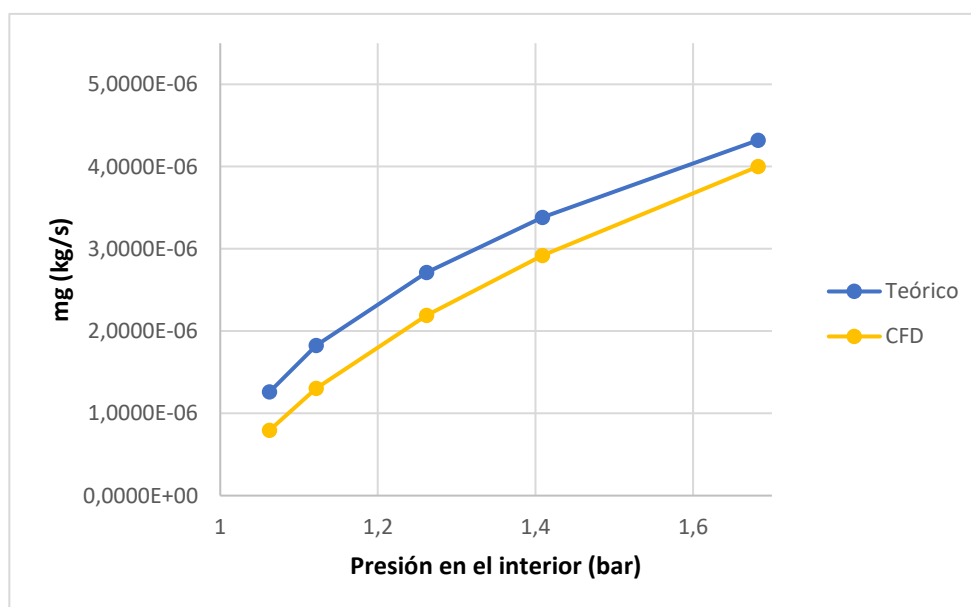


Figura H.7. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano. d = 0,16 mm

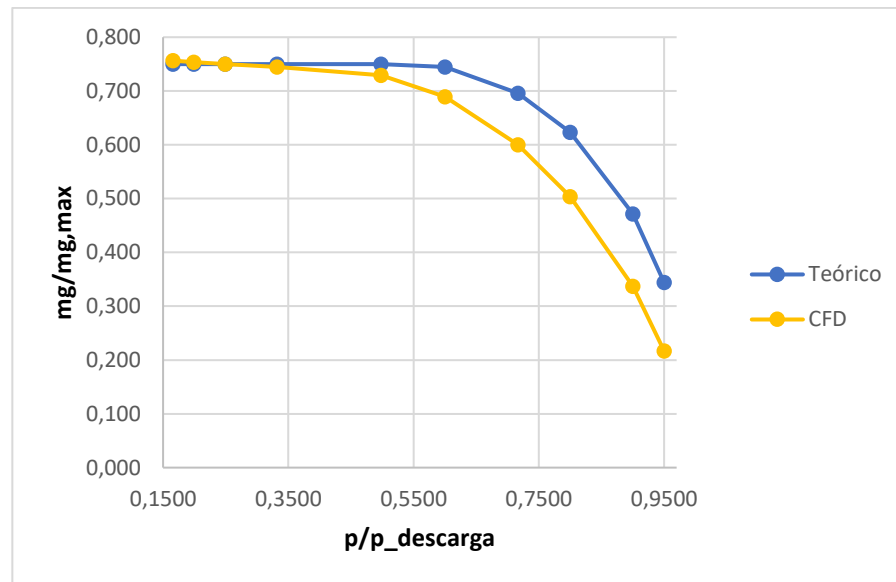


Figura H.8. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión.

Metano.  $d = 0,16 \text{ mm}$

#### Diámetro 0,24 mm

Tabla H.5 – Comparación de resultados. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,24 mm.

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio teórico(kg/s)	Régimen teórico
1,063	$2,1644 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$2,9523 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,122	$3,4018 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$4,2721 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,262	$5,4979 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$6,3489 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,409	$7,1650 \cdot 10^{-6}$	Subsónico	$7,9142 \cdot 10^{-6}$	Subsónico
1,683	$9,6018 \cdot 10^{-6}$	Sónico	$1,0112 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2,027	$1,2006 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,2267 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3,040	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$1,8402 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4,053	$2,4376 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$2,4535 \cdot 10^{-5}$	Sónico
5,066	$3,0569 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$3,0669 \cdot 10^{-5}$	Sónico
6,079	$3,6794 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$3,6799 \cdot 10^{-5}$	Sónico



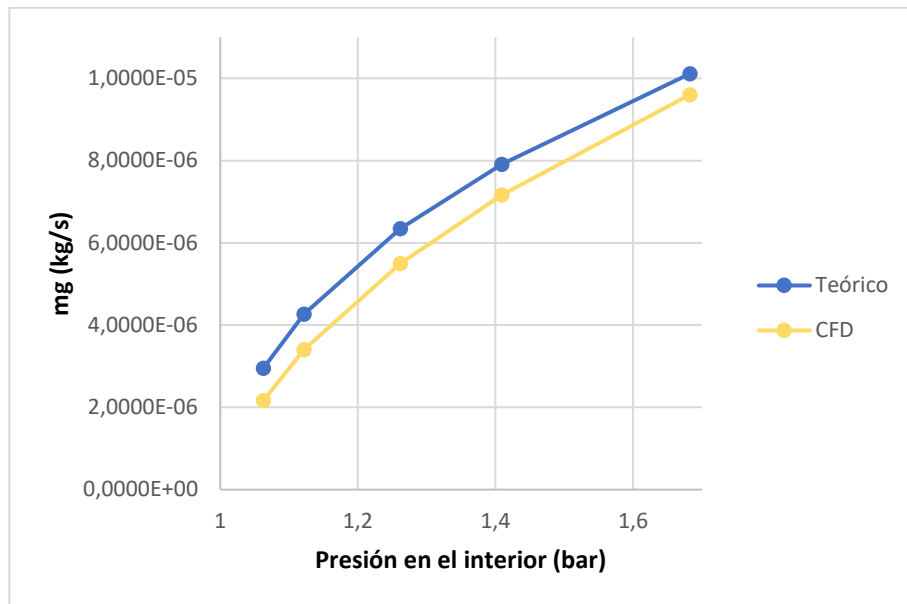


Figura H.9. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano.  $d = 0,24$  mm

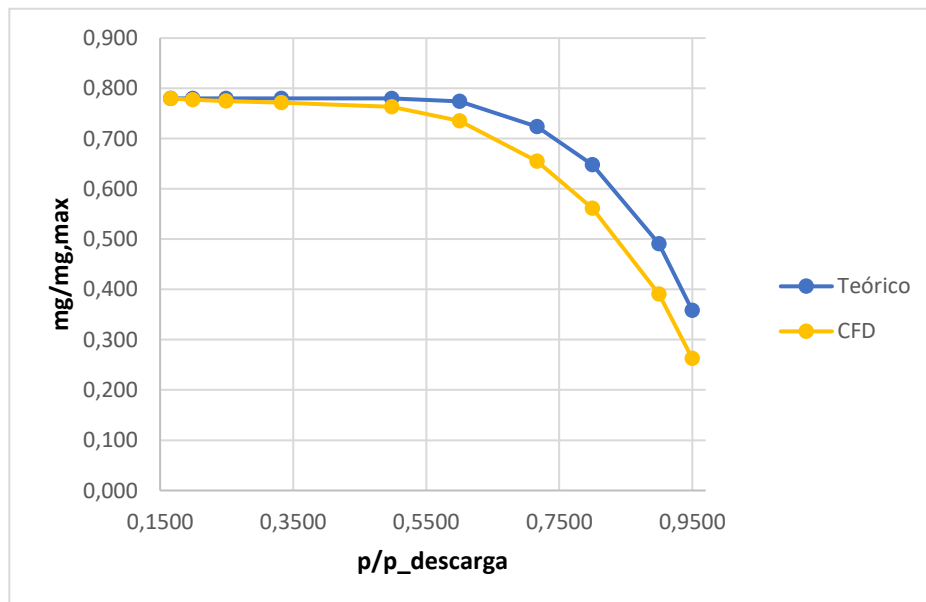


Figura H.10. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Metano.  $d = 0,24$  mm

Diámetro 0,525 mm

Tabla H.6 – Comparación de resultados. Fluido: metano. Diámetro del orificio: 0,525 mm.

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Régimen CFD	Flujo por el orificio teórico(kg/s)	Régimen teórico
1,063	$1,2877 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$1,4545 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,122	$1,9424 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$2,1047 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,262	$3,0095 \cdot 10^{-5}$	Subsónico	$3,1278 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,409	$3,8269 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$3,8990 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
1,683	$4,9527 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$4,9816 \cdot 10^{-5}$	Subsónico
2,027	$6,0280 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$6,0437 \cdot 10^{-5}$	Sónico
3,040	$9,0766 \cdot 10^{-5}$	Sónico	$9,0656 \cdot 10^{-5}$	Sónico
4,053	-	Sónico	$1,2087 \cdot 10^{-4}$	Sónico
5,066	$1,5179 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$1,5109 \cdot 10^{-4}$	Sónico
6,079	$1,8236 \cdot 10^{-4}$	Sónico	$1,8129 \cdot 10^{-4}$	Sónico

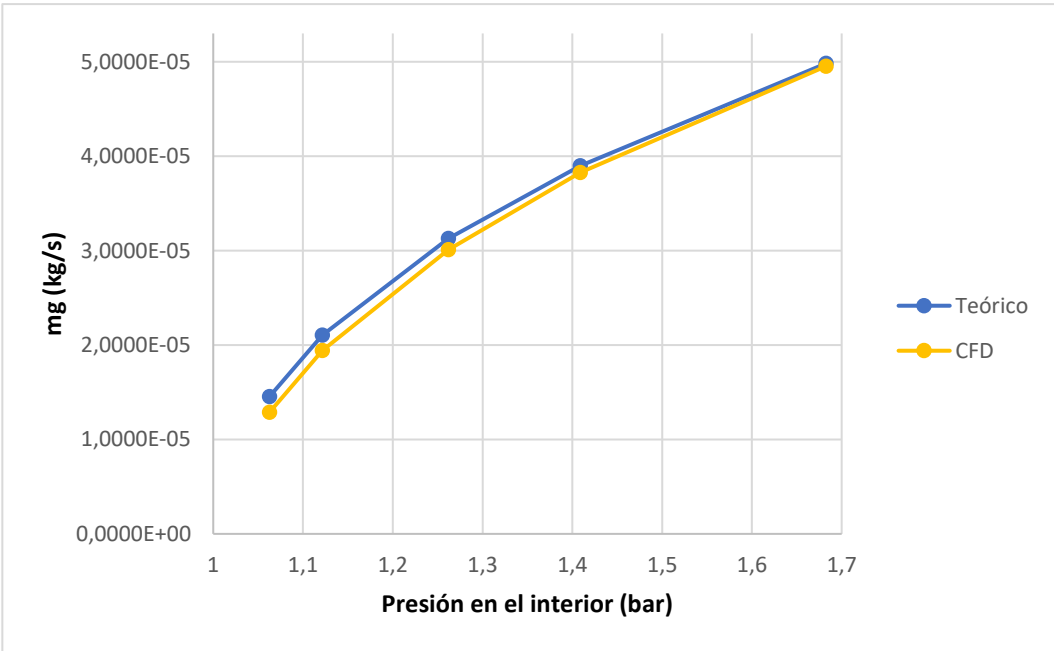


Figura H.11. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano. d = 0,525 mm

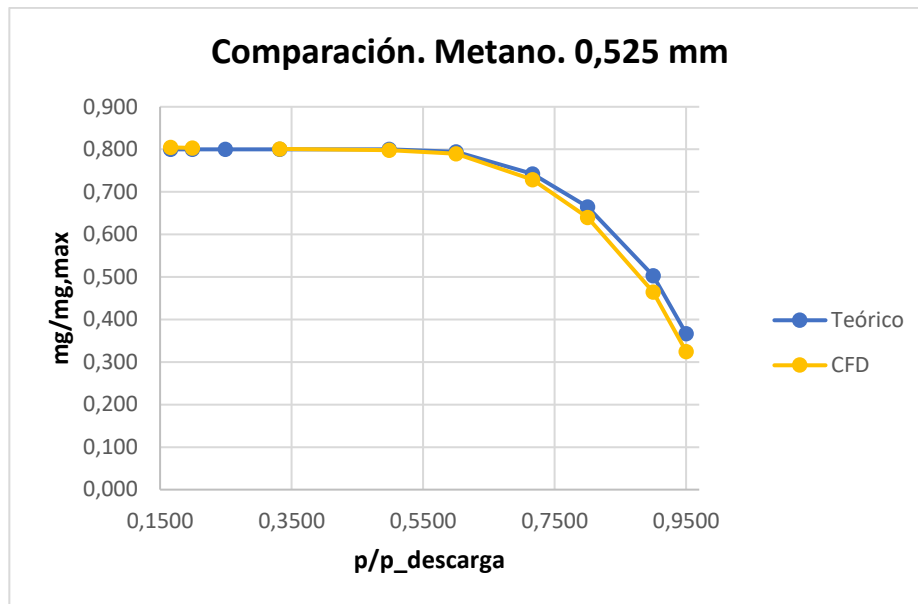


Figura H.12. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión.  
Metano.  $d = 0,525$  mm

## RESULTADOS TEORÍA COMPRESIBLE 1-D VISCOSA. TABLAS Y GRÁFICAS COMPARATIVAS CON TEORÍA COMPRESIBLE 1-D Y CFD

Tras la elaboración de un nuevo modelo compresible-viscoso en el capítulo 5, en este anexo se presentan los resultados, así como las tablas y gráficas comparativas con la teoría de flujo compresible 1-D y los resultados CFD.

### I.1 Aire

#### I.1.1 Diámetro 0,16 mm

*Tabla I.1: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Aire. Diámetro: 0,16 mm*

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
<b>1,063</b>	$9,7783 \cdot 10^{-7}$	$1,6986 \cdot 10^{-6}$	$1,0459 \cdot 10^{-6}$
<b>1,122</b>	$1,6159 \cdot 10^{-6}$	$2,4629 \cdot 10^{-6}$	$1,6922 \cdot 10^{-6}$
<b>1,262</b>	$2,7358 \cdot 10^{-6}$	$3,6761 \cdot 10^{-6}$	$2,7704 \cdot 10^{-6}$
<b>1,409</b>	$3,6659 \cdot 10^{-6}$	$4,6013 \cdot 10^{-6}$	$3,5426 \cdot 10^{-6}$
<b>1,683</b>	$5,1056 \cdot 10^{-6}$	$5,9178 \cdot 10^{-6}$	$4,7748 \cdot 10^{-6}$
<b>2,027</b>	$6,6597 \cdot 10^{-6}$	$7,2098 \cdot 10^{-6}$	$7,2098 \cdot 10^{-6}$
<b>3,040</b>	$1,0579 \cdot 10^{-5}$	$1,0815 \cdot 10^{-5}$	$1,0815 \cdot 10^{-5}$
<b>4,053</b>	$1,4125 \cdot 10^{-5}$	$1,4420 \cdot 10^{-5}$	$1,4420 \cdot 10^{-5}$
<b>5,066</b>	$1,7867 \cdot 10^{-5}$	$1,8025 \cdot 10^{-5}$	$1,8025 \cdot 10^{-5}$
<b>6,079</b>	$2,1543 \cdot 10^{-5}$	$2,1628 \cdot 10^{-5}$	$2,1628 \cdot 10^{-5}$

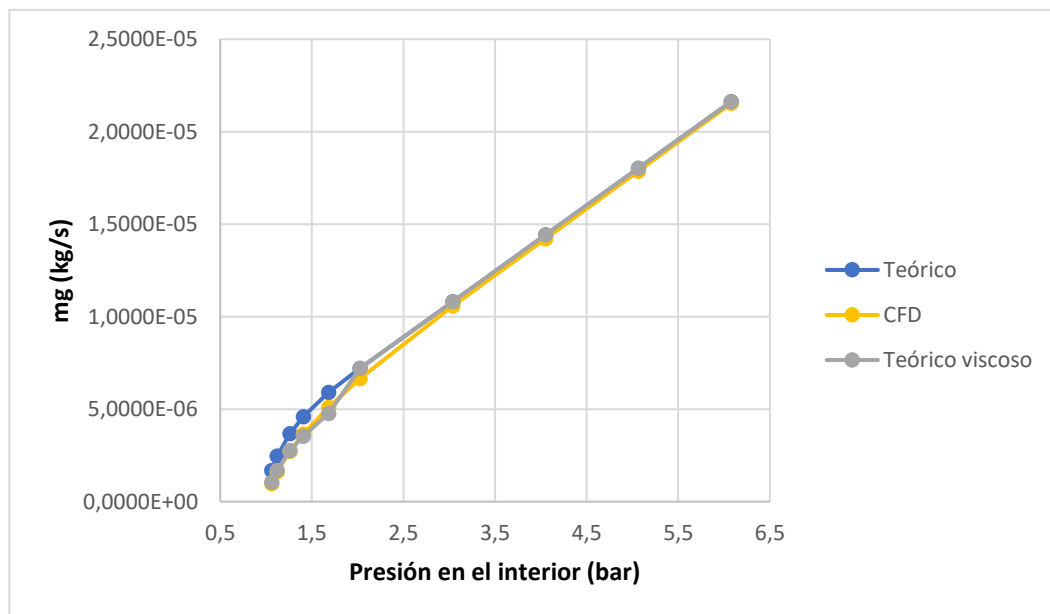


Figura I.1. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire,  $d = 0,16$  mm

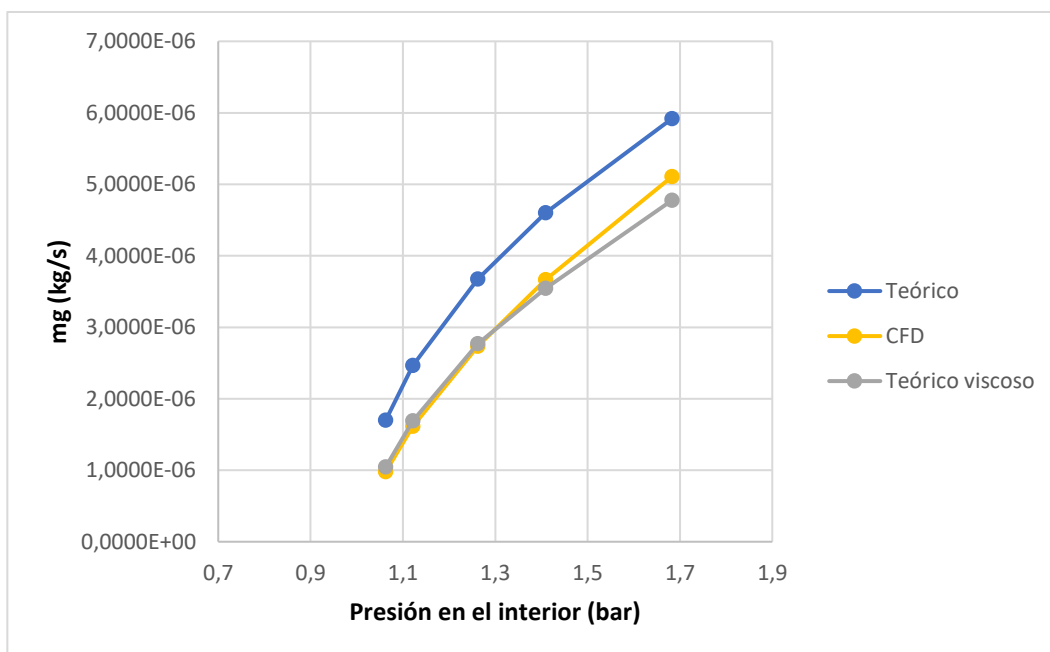


Figura I.2. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Aire,  $d = 0,16$  mm

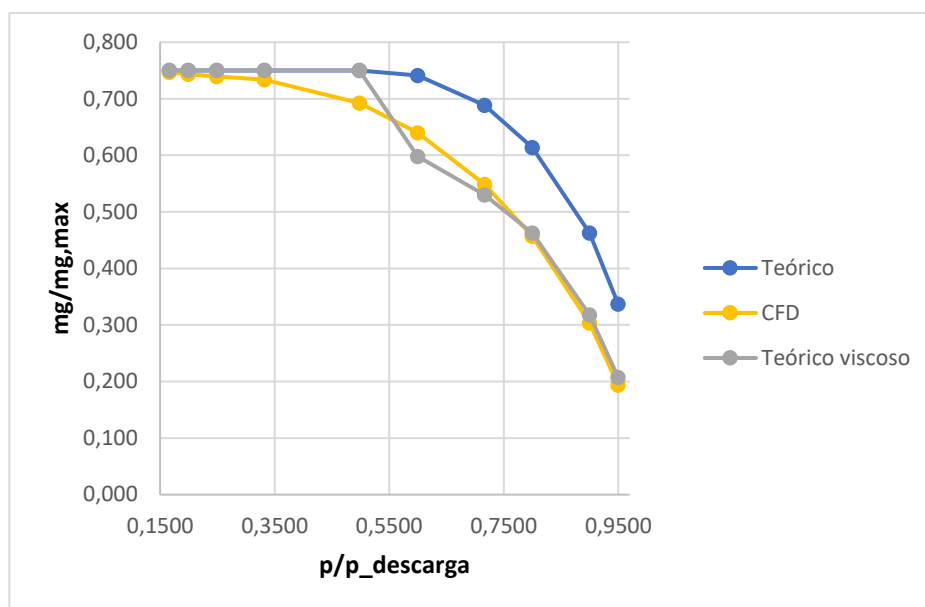
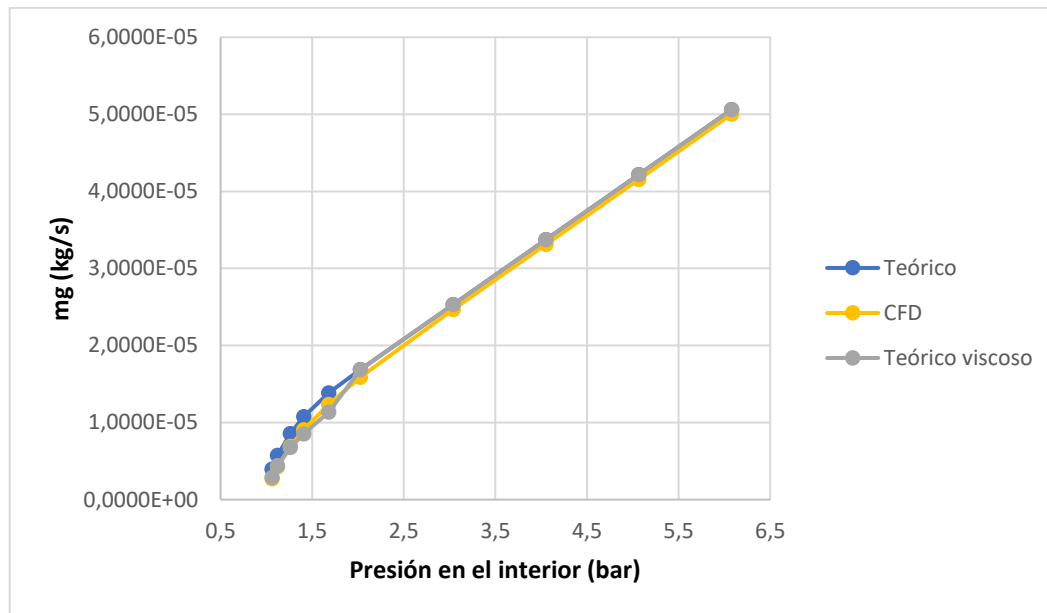
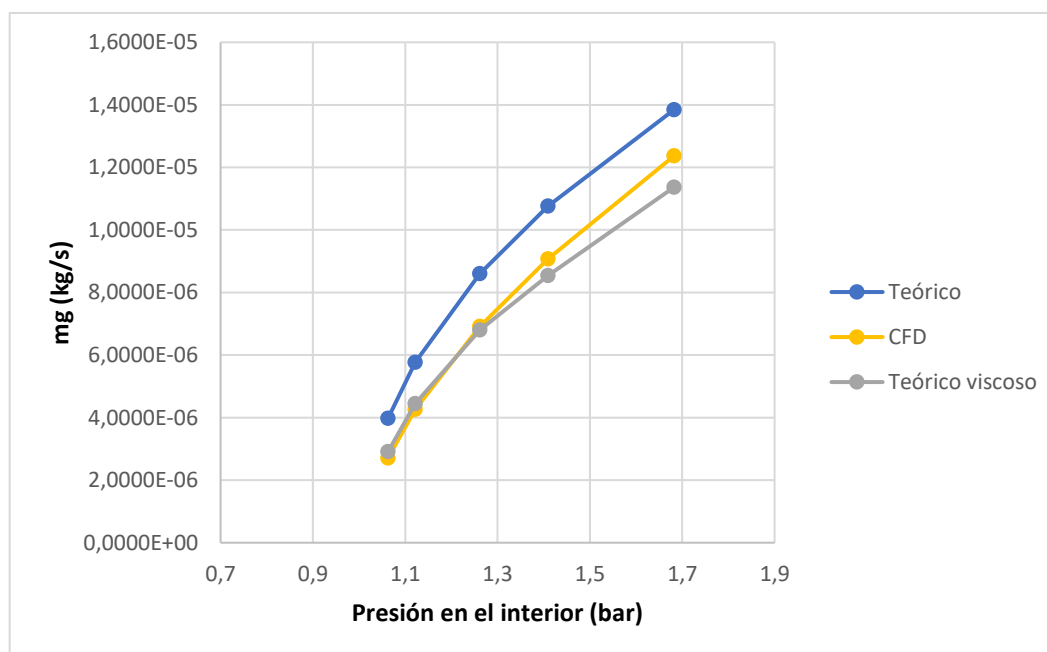


Figura I.3. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire,  $d = 0,16$  mm

### I.1.2 Diámetro 0,24 mm

Tabla I.2: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Aire. Diámetro: 0,24 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
<b>1,063</b>	$2,7072 \cdot 10^{-6}$	$3,9748 \cdot 10^{-6}$	$2,9077 \cdot 10^{-6}$
<b>1,122</b>	$4,2635 \cdot 10^{-6}$	$5,7632 \cdot 10^{-6}$	$4,4444 \cdot 10^{-6}$
<b>1,262</b>	$6,9152 \cdot 10^{-6}$	$8,6021 \cdot 10^{-6}$	$6,8036 \cdot 10^{-6}$
<b>1,409</b>	$9,0747 \cdot 10^{-6}$	$1,0767 \cdot 10^{-5}$	$8,5389 \cdot 10^{-6}$
<b>1,683</b>	$1,2370 \cdot 10^{-5}$	$1,3848 \cdot 10^{-5}$	$1,1370 \cdot 10^{-5}$
<b>2,027</b>	$1,5888 \cdot 10^{-5}$	$1,6871 \cdot 10^{-5}$	$1,6871 \cdot 10^{-6}$
<b>3,040</b>	$2,4711 \cdot 10^{-5}$	$2,5307 \cdot 10^{-5}$	$2,5307 \cdot 10^{-5}$
<b>4,053</b>	$3,3134 \cdot 10^{-5}$	$3,3742 \cdot 10^{-5}$	$3,3742 \cdot 10^{-5}$
<b>5,066</b>	$4,1577 \cdot 10^{-5}$	$4,2178 \cdot 10^{-5}$	$4,2178 \cdot 10^{-5}$
<b>6,079</b>	$5,0038 \cdot 10^{-5}$	$5,0609 \cdot 10^{-5}$	$5,0609 \cdot 10^{-5}$

Figura I.4. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire,  $d = 0,24 \text{ mm}$ Figura I.5. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Aire,  $d = 0,24 \text{ mm}$

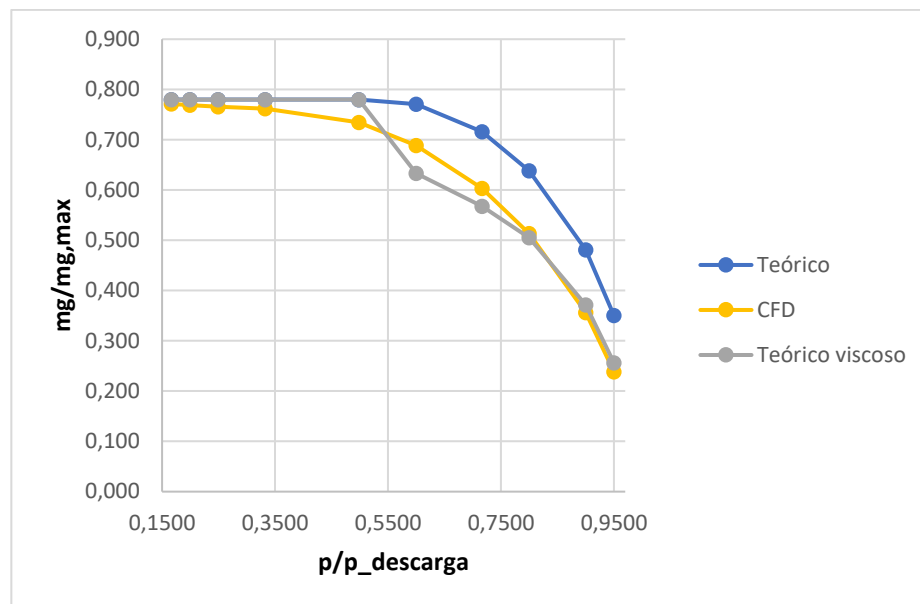


Figura I.6. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire,  $d = 0,24 \text{ mm}$

### I.1.3 Diámetro 0,525 mm

Tabla I.3: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Aire. Diámetro: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
<b>1,063</b>	$1,6043 \cdot 10^{-5}$	$1,9582 \cdot 10^{-5}$	$1,5829 \cdot 10^{-5}$
<b>1,122</b>	$2,4115 \cdot 10^{-5}$	$2,8393 \cdot 10^{-5}$	$2,2937 \cdot 10^{-5}$
<b>1,262</b>	$3,7447 \cdot 10^{-5}$	$4,2379 \cdot 10^{-5}$	$3,4895 \cdot 10^{-5}$
<b>1,409</b>	$4,8045 \cdot 10^{-5}$	$5,3044 \cdot 10^{-5}$	$4,4387 \cdot 10^{-5}$
<b>1,683</b>	$6,4068 \cdot 10^{-5}$	$6,8222 \cdot 10^{-5}$	$5,8546 \cdot 10^{-5}$
<b>2,027</b>	$8,0904 \cdot 10^{-5}$	$8,3116 \cdot 10^{-5}$	$8,3116 \cdot 10^{-5}$
<b>3,040</b>	$1,2343 \cdot 10^{-4}$	$1,2468 \cdot 10^{-4}$	$1,2468 \cdot 10^{-4}$
<b>4,053</b>	$1,6498 \cdot 10^{-4}$	$1,6623 \cdot 10^{-4}$	$1,6623 \cdot 10^{-4}$
<b>5,066</b>	$2,0656 \cdot 10^{-4}$	$2,0779 \cdot 10^{-4}$	$2,0779 \cdot 10^{-4}$
<b>6,079</b>	$2,4817 \cdot 10^{-4}$	$2,4933 \cdot 10^{-4}$	$2,4933 \cdot 10^{-4}$



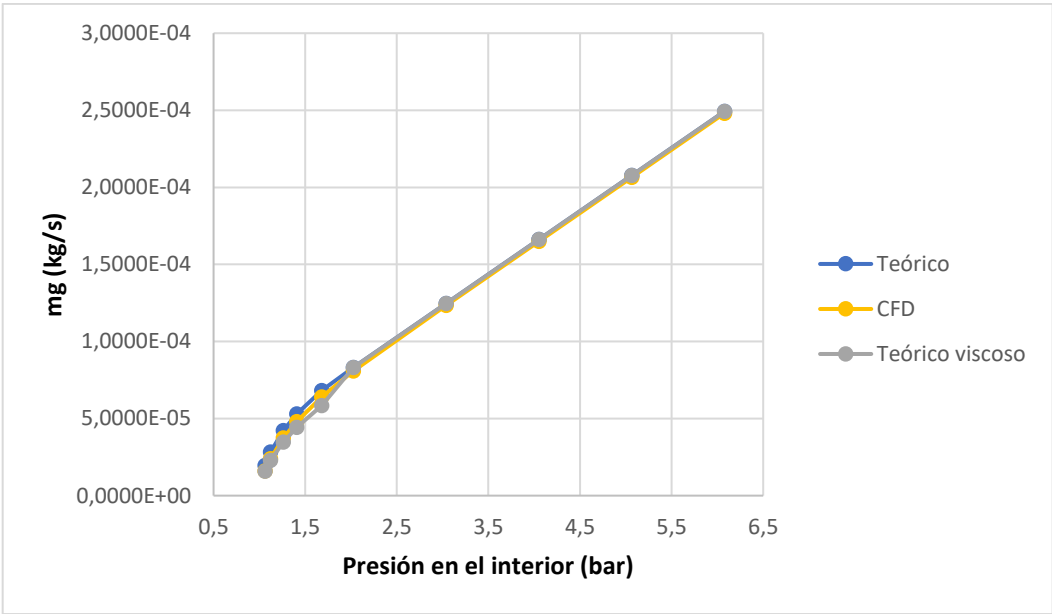


Figura I.7. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Aire, d = 0,525 mm

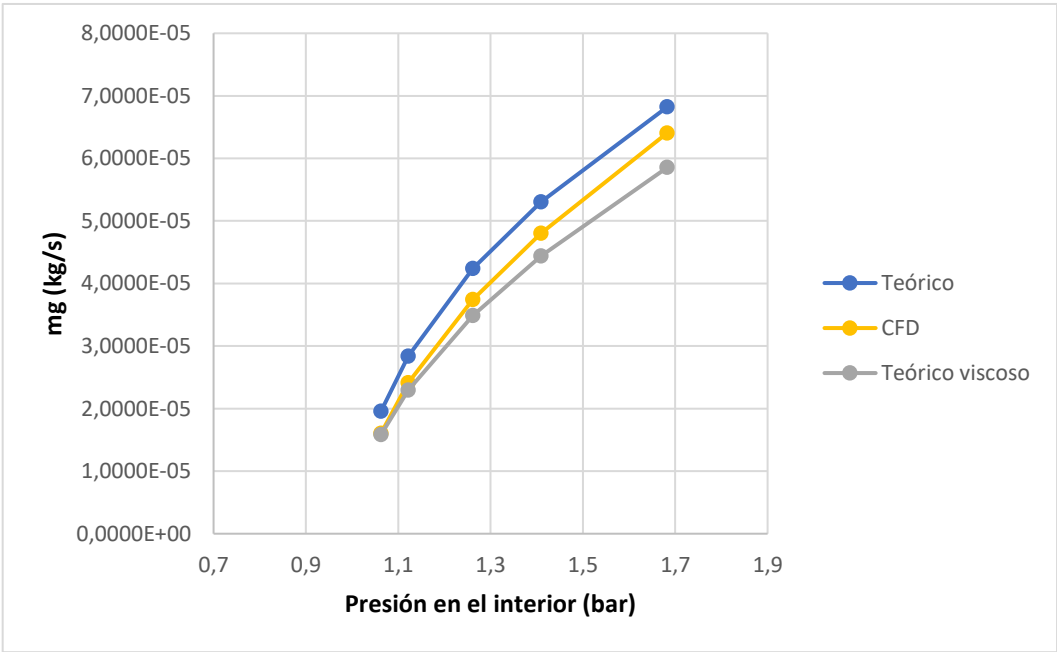


Figura I.8. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Aire, d = 0,525 mm

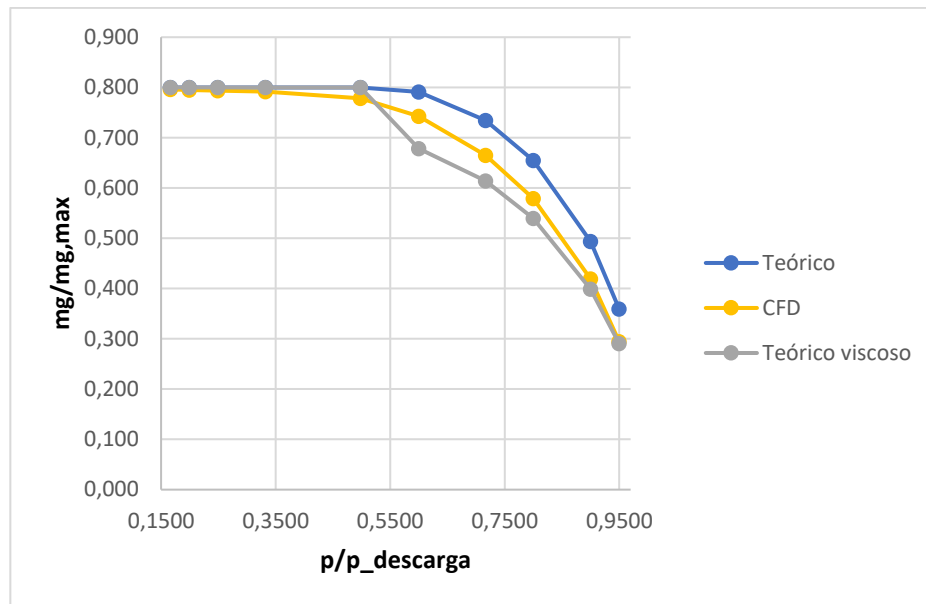


Figura I.9. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión. Aire,  $d = 0,525 \text{ mm}$

## I.2 Metano

### I.2.1 Diámetro 0,16 mm

Tabla I.4: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Metano: 0,16 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
1,063	$7,935 \cdot 10^{-7}$	$1,2617 \cdot 10^{-6}$	$8,2261 \cdot 10^{-7}$
1,122	$1,3049 \cdot 10^{-6}$	$1,8257 \cdot 10^{-6}$	$1,3053 \cdot 10^{-6}$
1,262	$2,1934 \cdot 10^{-6}$	$2,7132 \cdot 10^{-6}$	$2,0498 \cdot 10^{-6}$
1,409	$2,9182 \cdot 10^{-6}$	$3,3821 \cdot 10^{-6}$	$2,6489 \cdot 10^{-6}$
1,683	$4,0014 \cdot 10^{-6}$	$4,3212 \cdot 10^{-6}$	$3,4481 \cdot 10^{-6}$
2,027	$5,0956 \cdot 10^{-6}$	$5,2425 \cdot 10^{-6}$	$5,2425 \cdot 10^{-6}$
3,040	$7,8100 \cdot 10^{-6}$	$7,8639 \cdot 10^{-6}$	$7,8639 \cdot 10^{-5}$
4,053	$1,0483 \cdot 10^{-5}$	$1,0485 \cdot 10^{-5}$	$1,0485 \cdot 10^{-5}$
5,066	$1,3166 \cdot 10^{-4}$	$1,3106 \cdot 10^{-5}$	$1,3106 \cdot 10^{-5}$
6,079	$1,5861 \cdot 10^{-4}$	$1,5726 \cdot 10^{-5}$	$1,5726 \cdot 10^{-5}$

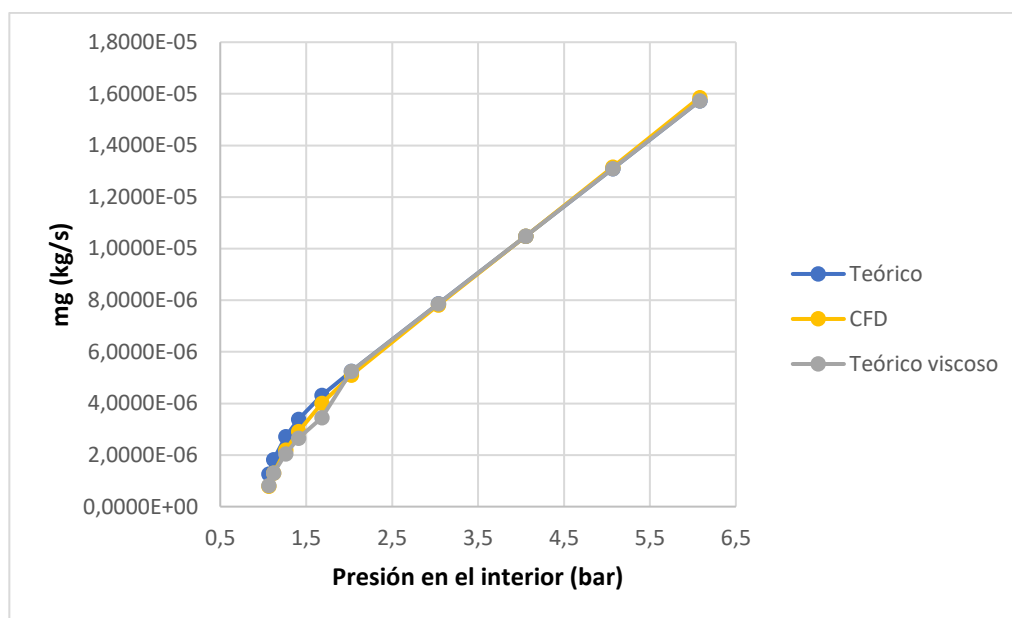


Figura I.10. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano,  $d = 0,16$  mm

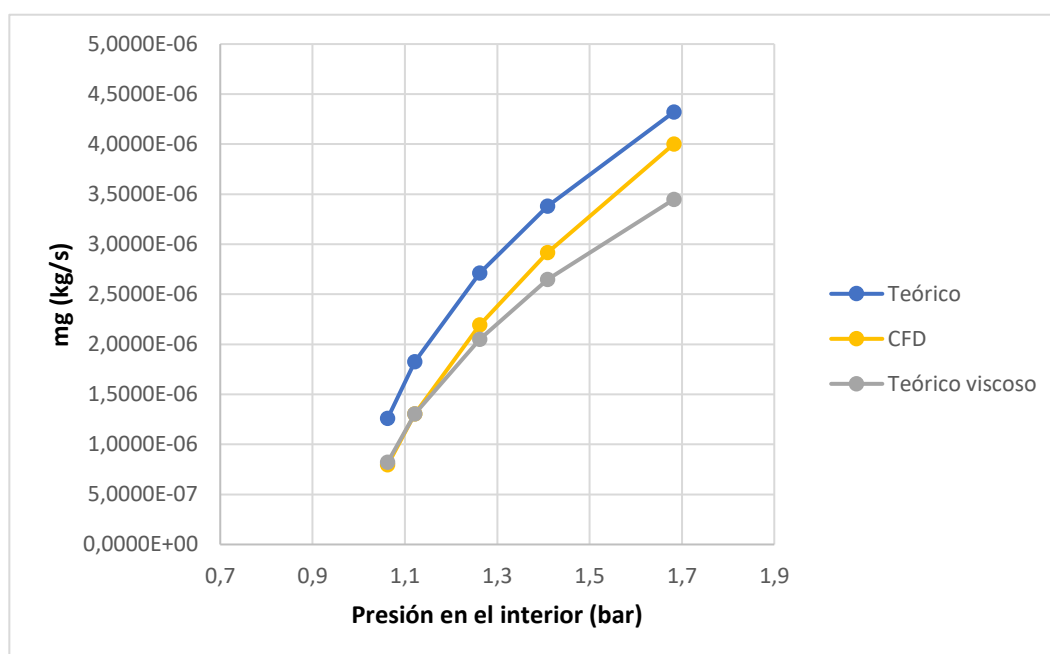


Figura I.11. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Metano,  $d = 0,16$  mm

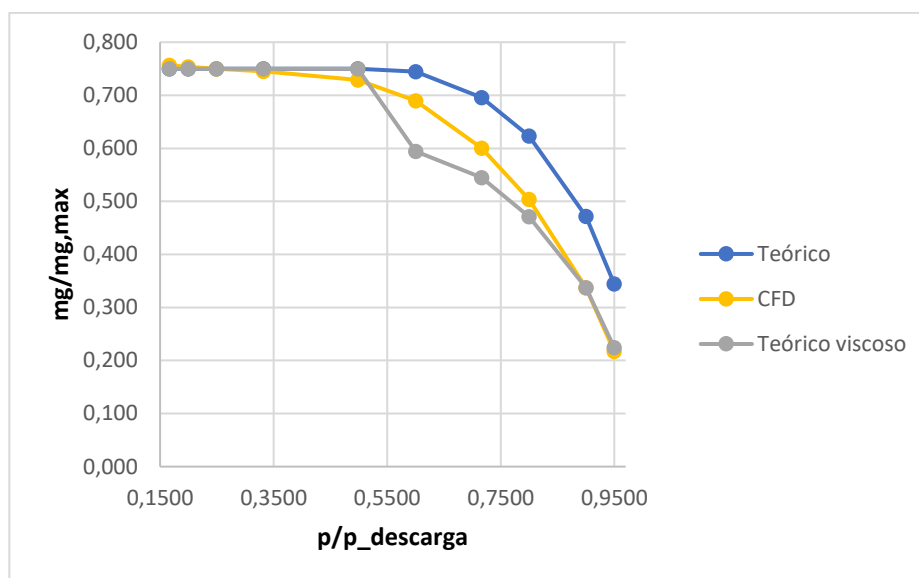


Figura I.12. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión.  
Metano,  $d = 0,16$  mm

### I.2.2 Diámetro 0,24 mm

Tabla I.5: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Metano: 0,24 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
1,063	$2,1644 \cdot 10^{-6}$	$2,9523 \cdot 10^{-6}$	$2,2183 \cdot 10^{-6}$
1,122	$3,4018 \cdot 10^{-6}$	$4,2721 \cdot 10^{-6}$	$3,2927 \cdot 10^{-6}$
1,262	$5,4979 \cdot 10^{-6}$	$6,3489 \cdot 10^{-6}$	$4,9599 \cdot 10^{-6}$
1,409	$7,1650 \cdot 10^{-6}$	$7,9142 \cdot 10^{-6}$	$6,3374 \cdot 10^{-6}$
1,683	$9,6018 \cdot 10^{-6}$	$1,0112 \cdot 10^{-5}$	$8,3974 \cdot 10^{-6}$
2,027	$1,2006 \cdot 10^{-5}$	$1,2267 \cdot 10^{-5}$	$1,2267 \cdot 10^{-5}$
3,040	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	$1,8402 \cdot 10^{-5}$	$1,8402 \cdot 10^{-5}$
4,053	$2,4376 \cdot 10^{-5}$	$2,4535 \cdot 10^{-5}$	$2,4535 \cdot 10^{-5}$
5,066	$3,0569 \cdot 10^{-5}$	$3,0669 \cdot 10^{-5}$	$3,0669 \cdot 10^{-5}$
6,079	$3,6794 \cdot 10^{-5}$	$3,6799 \cdot 10^{-5}$	$3,6799 \cdot 10^{-5}$

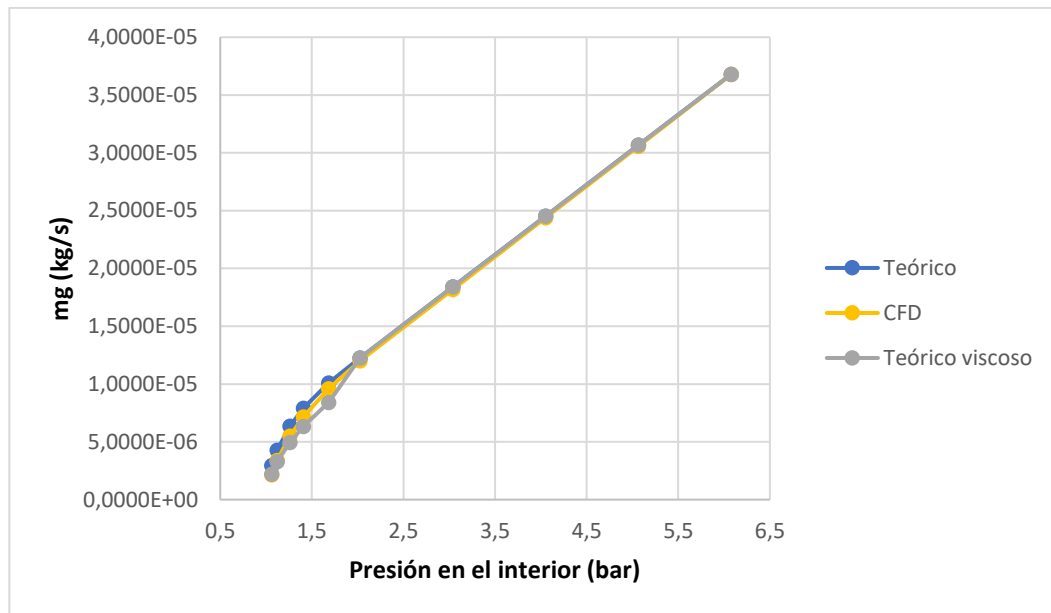


Figura I.13. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano,  $d = 0,24$  mm

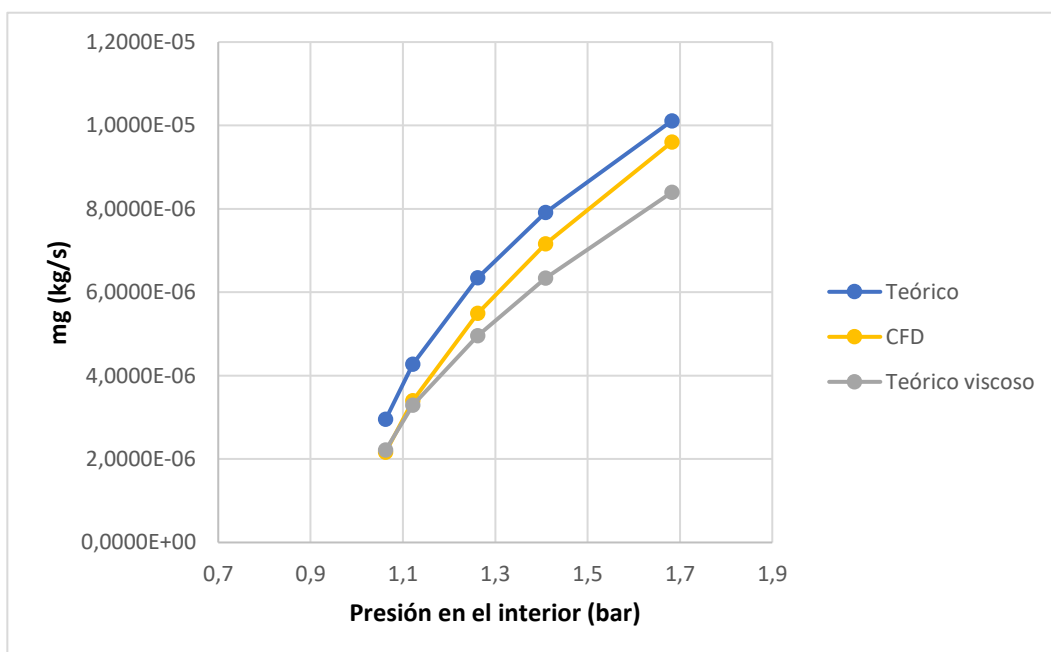


Figura I.14. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Metano,  $d = 0,24$  mm

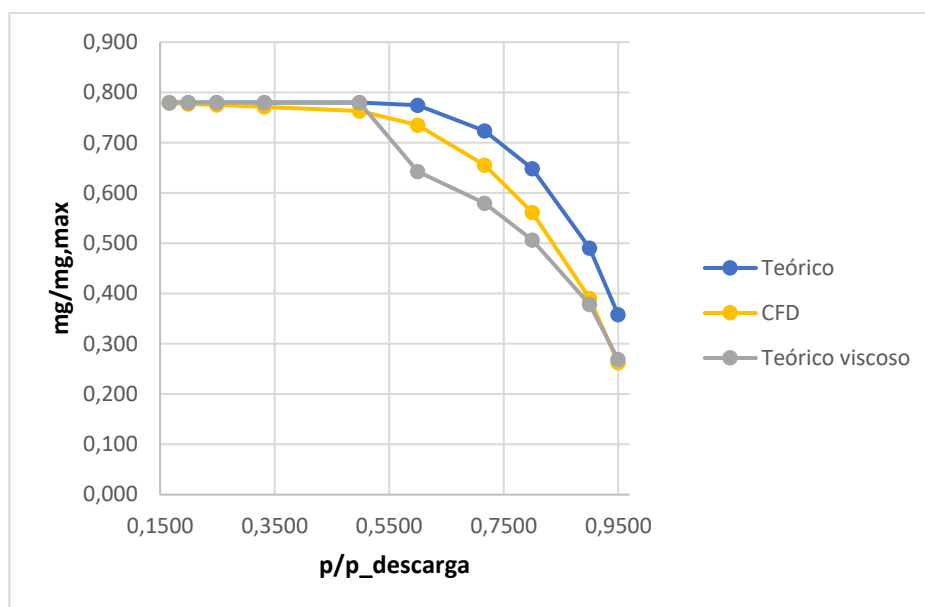


Figura I.15. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión.

Metano,  $d = 0,24 \text{ mm}$

### I.2.3 Diámetro 0,525 mm

Tabla I.6: Comparación resultados CFD y modelo compresible viscoso. Metano: 0,525 mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio teórico (kg/s)	Flujo por el orificio teórico viscoso (kg/s)
<b>1,063</b>	$1,2877 \cdot 10^{-5}$	$1,4545 \cdot 10^{-5}$	$1,1657 \cdot 10^{-5}$
<b>1,122</b>	$1,9424 \cdot 10^{-5}$	$2,1047 \cdot 10^{-5}$	$1,7069 \cdot 10^{-5}$
<b>1,262</b>	$3,0095 \cdot 10^{-5}$	$3,1278 \cdot 10^{-5}$	$2,5888 \cdot 10^{-5}$
<b>1,409</b>	$3,8269 \cdot 10^{-5}$	$3,8990 \cdot 10^{-5}$	$3,2833 \cdot 10^{-5}$
<b>1,683</b>	$4,9527 \cdot 10^{-5}$	$4,9816 \cdot 10^{-5}$	$4,3094 \cdot 10^{-5}$
<b>2,027</b>	$6,0280 \cdot 10^{-5}$	$6,0437 \cdot 10^{-5}$	$6,0437 \cdot 10^{-5}$
<b>3,040</b>	$9,0766 \cdot 10^{-5}$	$9,0656 \cdot 10^{-5}$	$9,0656 \cdot 10^{-5}$
<b>4,053</b>	-	$1,2087 \cdot 10^{-4}$	$1,2087 \cdot 10^{-4}$
<b>5,066</b>	$1,5179 \cdot 10^{-4}$	$1,5109 \cdot 10^{-4}$	$1,5109 \cdot 10^{-4}$
<b>6,079</b>	$1,8236 \cdot 10^{-4}$	$1,8129 \cdot 10^{-4}$	$1,8129 \cdot 10^{-4}$

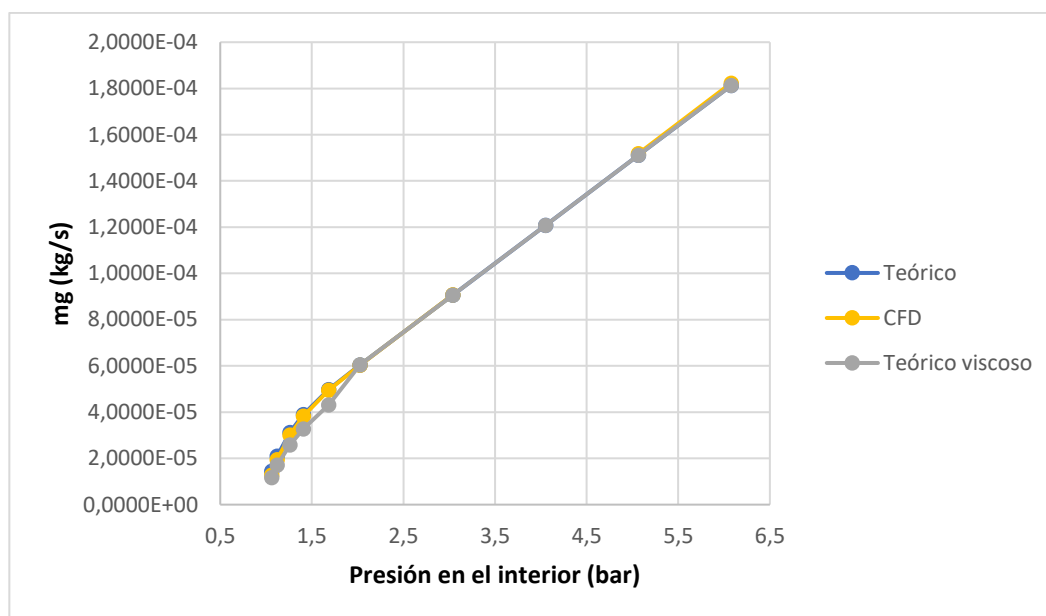


Figura I.16. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales. Metano,  $d = 0,525$  mm

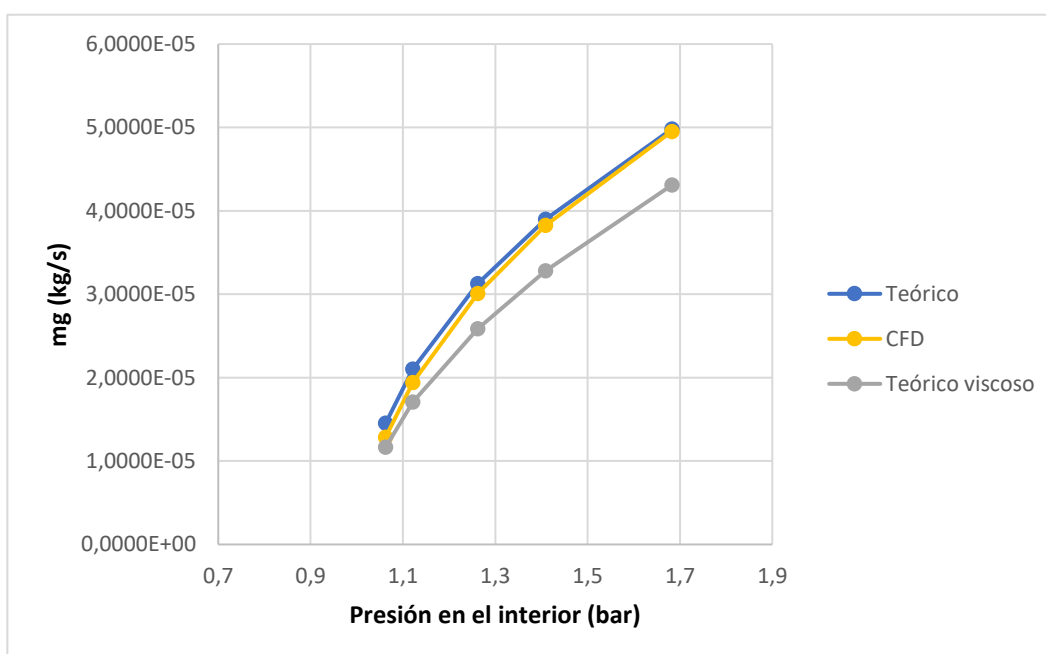


Figura I.17. Comparación de resultados teóricos y CFD. Caudales, ampliación. Metano,  $d = 0,525$  mm

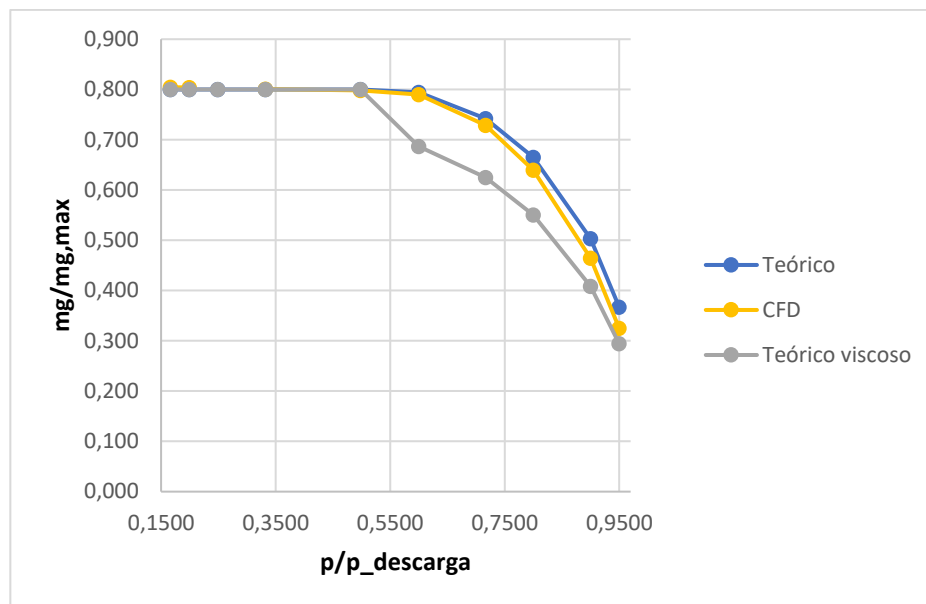


Figura I.18. Comparación de resultados teóricos y CFD. Ratios de caudal y presión.  
Metano,  $d = 0,525$  mm



## RESULTADOS MÉTODO DE CONVERSIÓN AIRE - METANO

En este Anexo se muestran los resultados del método de conversión aire – metano expuesto en el capítulo 5. Para todos los casos estudiados, en primer lugar, se presentan los resultados en una tabla que contiene los resultados CFD para el metano, el caudal de metano estimado a partir de los resultados CFD para el aire y una columna que muestra el error relativo de la conversión. En segundo lugar, se presentan tres figuras. La primera de ellas muestra los resultados presentados en la tabla, la segunda es una ampliación de la primera para poder apreciar mejor los resultados con menores presiones y la tercera muestra los resultados adimensionalizados.

## J.1 Diámetro 0,16 mm

Tabla J.1: Comparación resultados CFD metano método de conversión.  $d = 0,16$  mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio método de conversión (kg/s)	Error relativo (%)
1,063	$7,9535 \cdot 10^{-7}$	$6,8003 \cdot 10^{-7}$	14,50
1,122	$1,3049 \cdot 10^{-6}$	$1,1742 \cdot 10^{-6}$	10,02
1,262	$2,1934 \cdot 10^{-6}$	$2,1415 \cdot 10^{-6}$	2,37
1,409	$2,9182 \cdot 10^{-6}$	$2,9513 \cdot 10^{-6}$	1,36
1,683	$4,0014 \cdot 10^{-6}$	$4,3202 \cdot 10^{-6}$	7,97
2,027	$5,0956 \cdot 10^{-6}$	$4,8425 \cdot 10^{-6}$	4,97
3,040	$7,8100 \cdot 10^{-6}$	$7,6923 \cdot 10^{-6}$	1,51
4,053	$1,0483 \cdot 10^{-5}$	$1,0336 \cdot 10^{-5}$	1,40
5,066	$1,3166 \cdot 10^{-5}$	$1,2992 \cdot 10^{-5}$	1,33
6,079	$1,5861 \cdot 10^{-5}$	$1,5666 \cdot 10^{-5}$	1,23

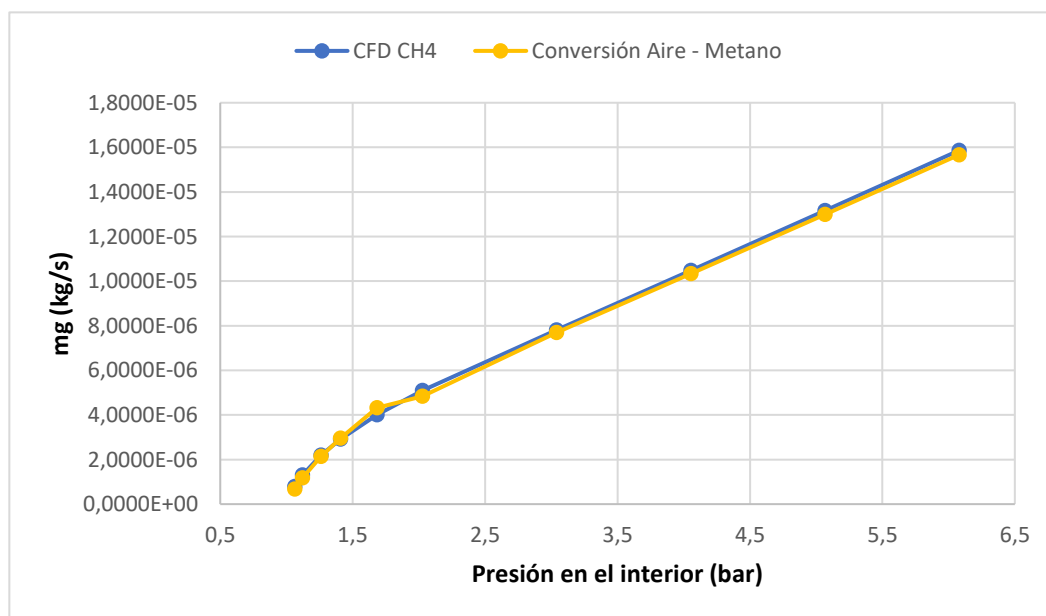


Figura J.1. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales.  $d = 0,16$  mm

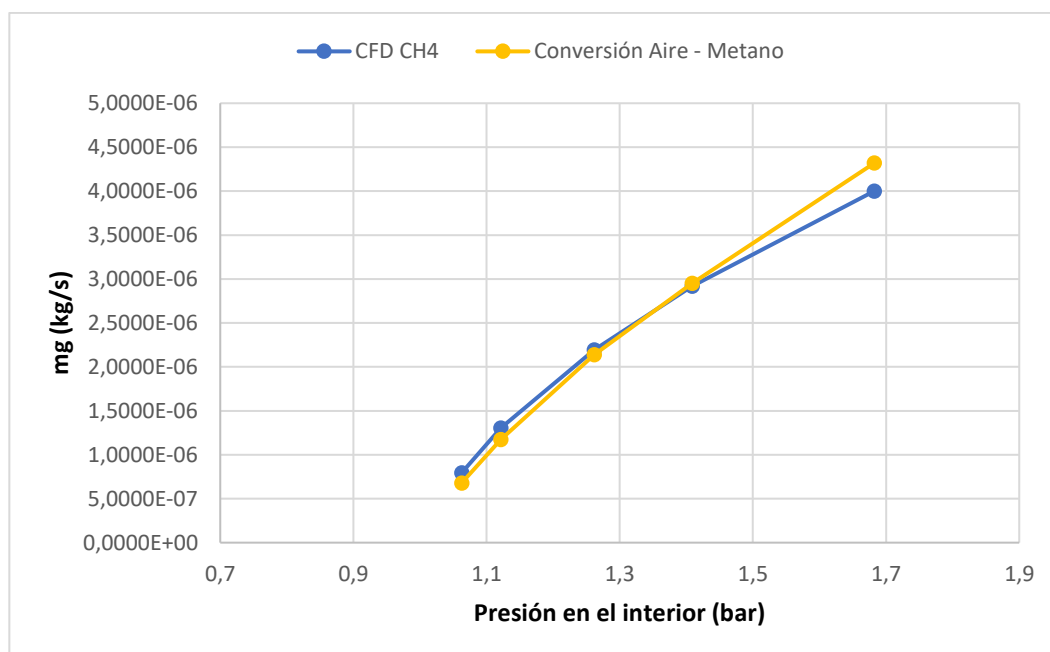


Figura J.2. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales, ampliación.  $d = 0,16$  mm

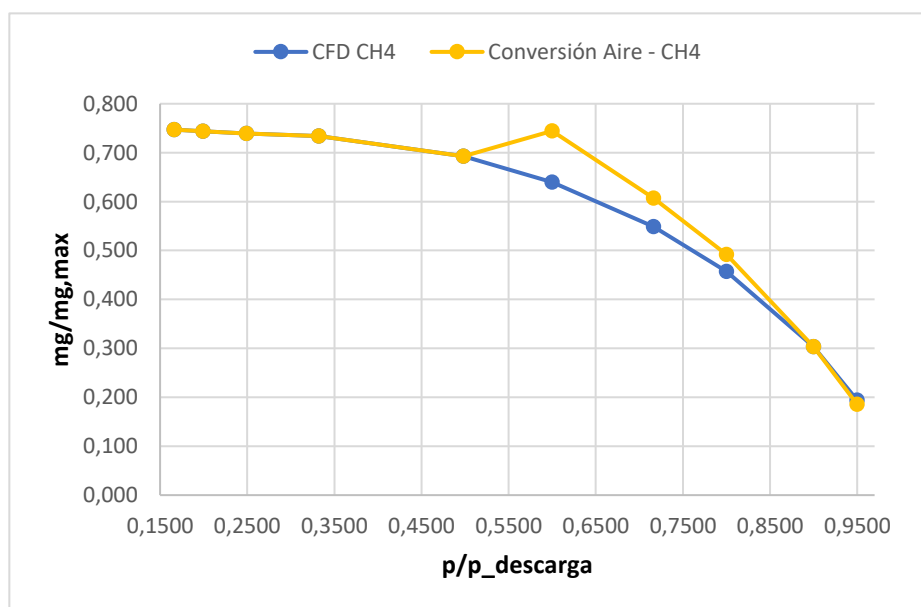


Figura J.3. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Ratios de caudal y presión.  $d = 0,16$  mm

## J.2 Diámetro 0,24 mm

Tabla J.2: Comparación resultados CFD metano método de conversión.  $d = 0,24$  mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio método de conversión (kg/s)	Error relativo (%)
1,063	$2,1644 \cdot 10^{-6}$	$1,9238 \cdot 10^{-6}$	11,12
1,122	$3,4018 \cdot 10^{-6}$	$3,1710 \cdot 10^{-6}$	6,78
1,262	$5,4979 \cdot 10^{-6}$	$5,4039 \cdot 10^{-6}$	1,71
1,409	$7,1650 \cdot 10^{-6}$	$7,2561 \cdot 10^{-6}$	1,27
1,683	$9,6018 \cdot 10^{-6}$	$1,0271 \cdot 10^{-5}$	6,96
2,027	$1,2006 \cdot 10^{-5}$	$1,1553 \cdot 10^{-5}$	3,78
3,040	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	$1,7968 \cdot 10^{-5}$	1,25
4,053	$2,4376 \cdot 10^{-5}$	$2,4093 \cdot 10^{-5}$	1,16
5,066	$3,0569 \cdot 10^{-5}$	$3,0232 \cdot 10^{-5}$	1,10
6,079	$3,6794 \cdot 10^{-5}$	$3,6285 \cdot 10^{-5}$	1,11

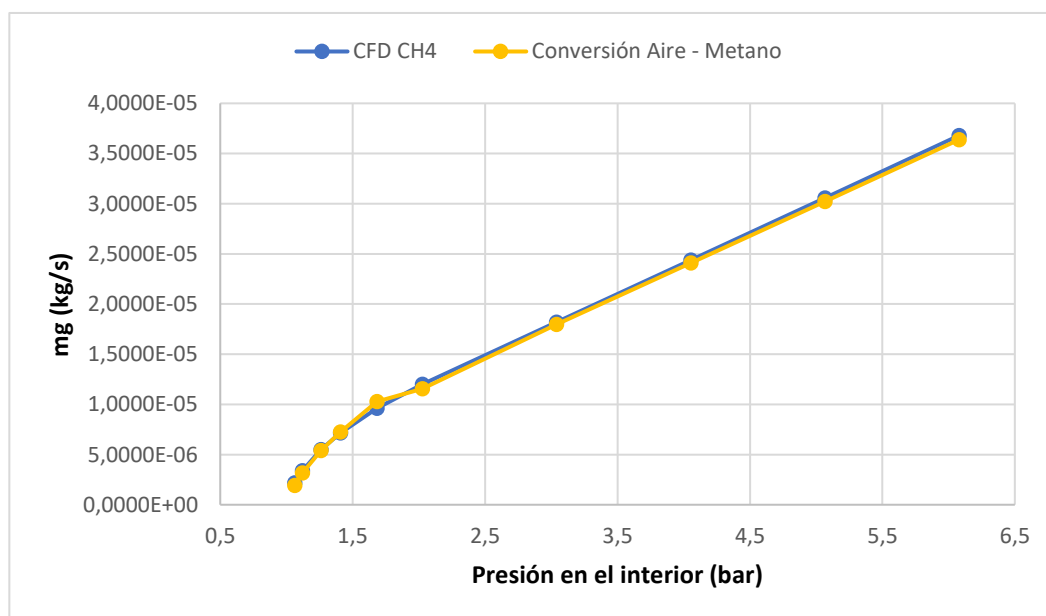


Figura J.4. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales.  $d = 0,24$  mm

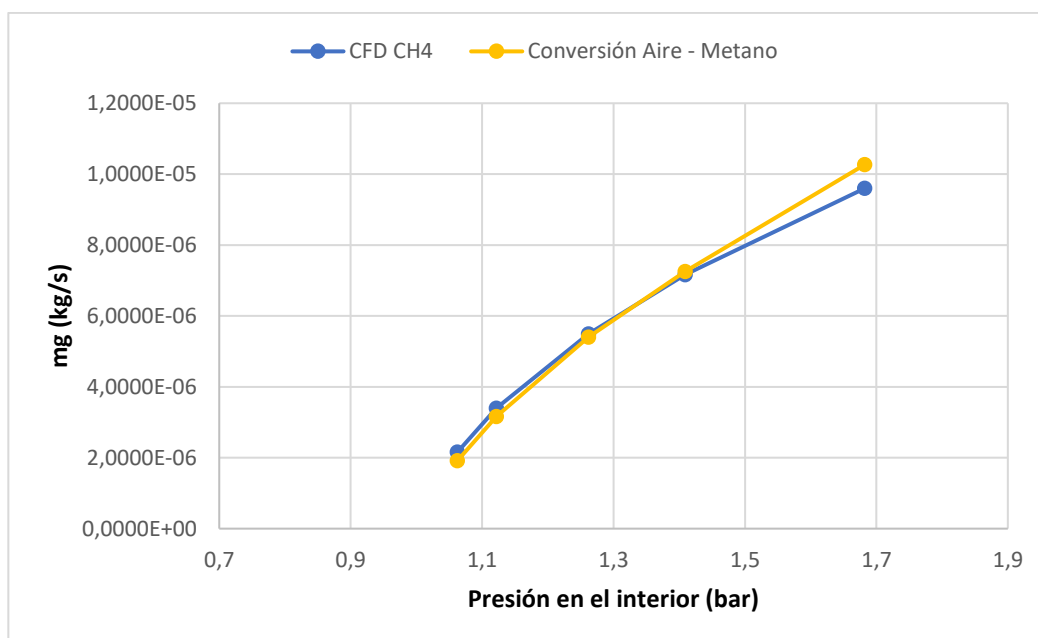


Figura J.5. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales, ampliación.  $d = 0,24$  mm

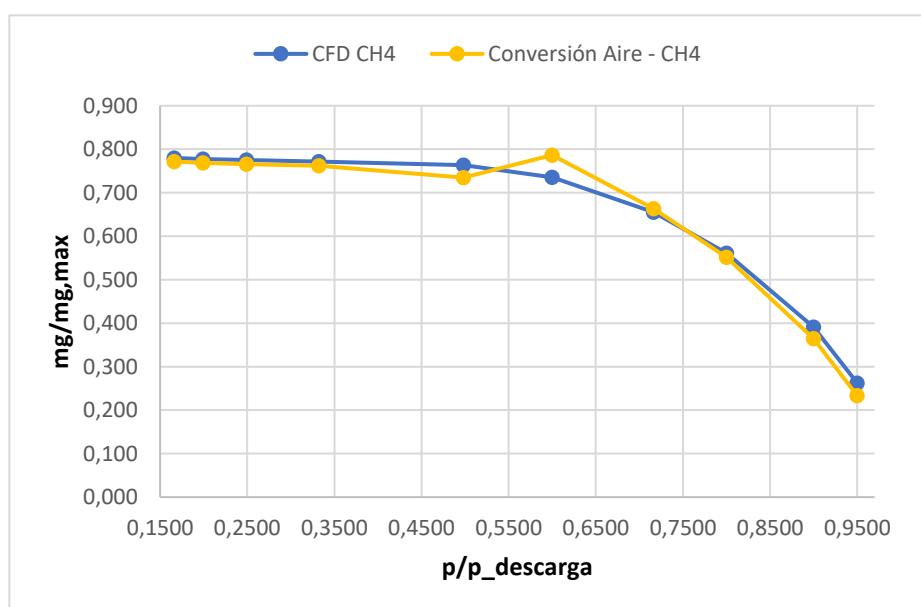


Figura J.6. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Ratios de caudal y presión.  $d = 0,24$  mm

### J.3 Diámetro 0,525 mm

Tabla J.3: Comparación resultados CFD metano método de conversión.  $d = 0,525$  mm

Presión de la cámara interior (bar)	Flujo por el orificio CFD (kg/s)	Flujo por el orificio método de conversión (kg/s)	Error relativo (%)
1,063	$1,2877 \cdot 10^{-5}$	$1,1715 \cdot 10^{-5}$	9,03
1,122	$1,9424 \cdot 10^{-5}$	$1,7760 \cdot 10^{-5}$	8,57
1,262	$3,0095 \cdot 10^{-5}$	$2,8572 \cdot 10^{-5}$	5,06
1,409	$3,8269 \cdot 10^{-5}$	$3,7650 \cdot 10^{-5}$	1,62
1,683	$4,9527 \cdot 10^{-5}$	$5,1784 \cdot 10^{-5}$	4,56
2,027	$6,0280 \cdot 10^{-5}$	$5,8828 \cdot 10^{-5}$	2,41
3,040	$9,0766 \cdot 10^{-5}$	$8,9750 \cdot 10^{-5}$	1,12
4,053	-	$1,1996 \cdot 10^{-4}$	-
5,066	$1,5179 \cdot 10^{-4}$	$1,5020 \cdot 10^{-4}$	1,05
6,079	$1,8236 \cdot 10^{-4}$	$1,8045 \cdot 10^{-4}$	1,04

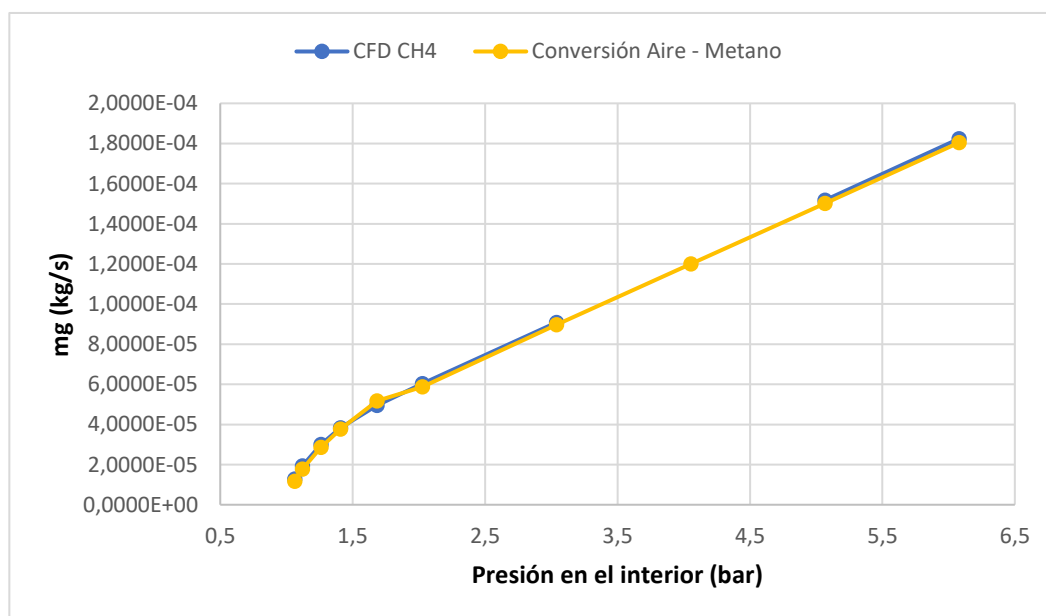


Figura J.7. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales.  $d = 0,525$  mm

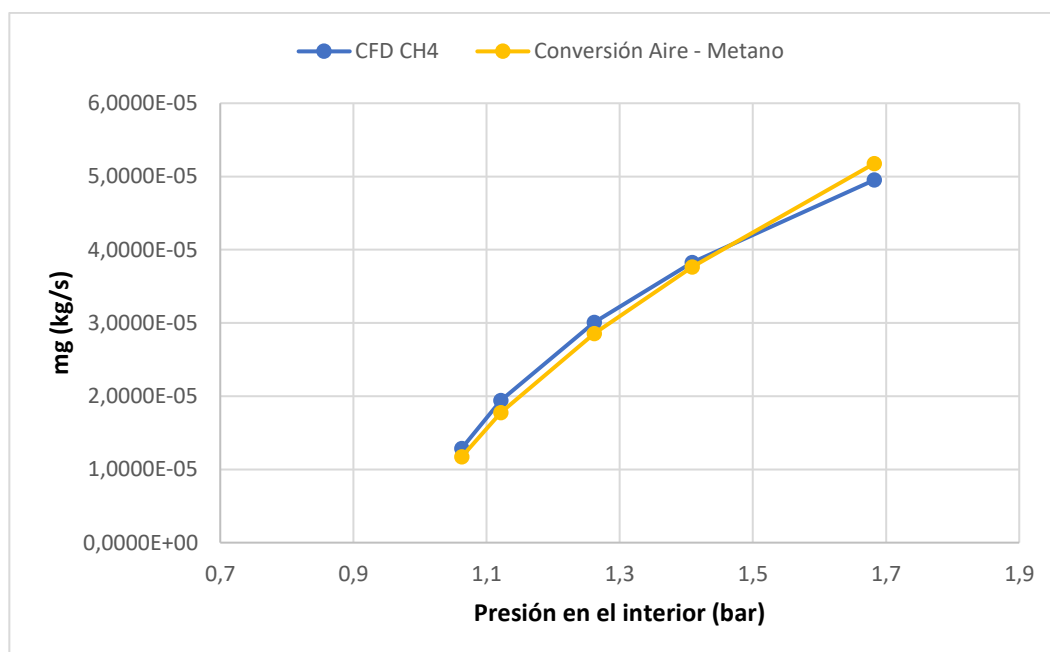


Figura J.8. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Caudales, ampliación.  $d = 0,525$  mm

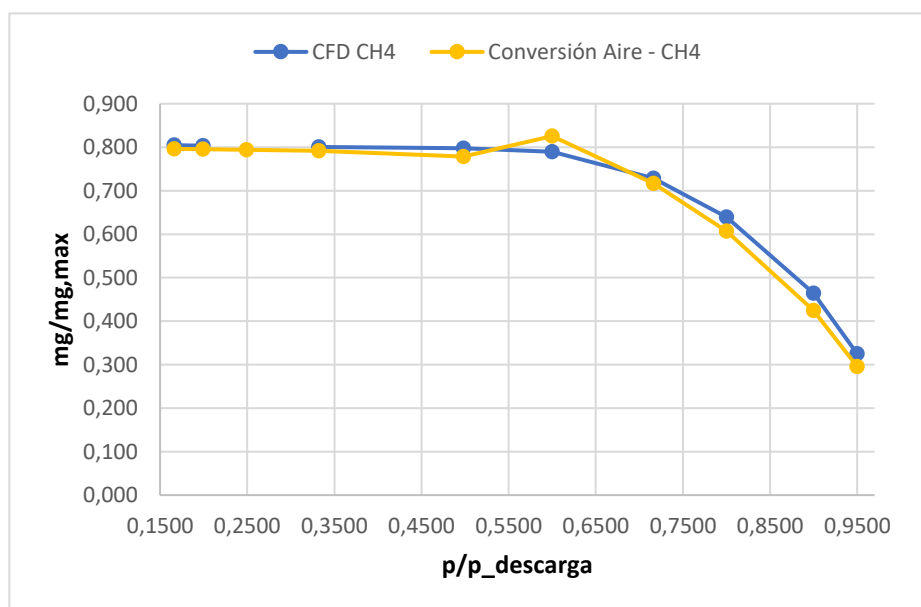


Figura J.9. Comparación de resultados CFD y método de conversión. Ratios de caudal y presión.  $d = 0,525$  mm