UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola d'Enginyeria de Barcelona Est

TRABAJO DE FINAL DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

ESTUDIO DE UNA TOBERA DE FLUJO COMPRESIBLE MEDIANTE COMSOL MULTIPHYSICS

Memoria y Anexos

Autor/a: Raúl Sanabria Reviriego
Director/a: Alfredo de Jesús Guardo Zabaleta

Convocatoria: Junio de 2022

Resumen

El principal objetivo de un programa de simulación computacional es recrear de la manera más veraz posible un fenómeno físico real. En este trabajo se pone a prueba la capacidad de Comsol Multiphysics de intentar predecir con garantías el comportamiento de la tobera de flujo compresible situada en el laboratorio de la EEBE. Para poder verificar dicho objetivo, previamente se realizan una serie de experimentos con la tobera que se desea modelar para, de manera posterior, poder comparar los resultados experimentales con los resultados simulados mediante Comsol Multiphysics.

Los resultados finales de las simulaciones en Comsol Multiphysics guardan un gran parecido a los obtenidos en el laboratorio. Sin embargo, pese seguir siendo similares, los datos obtenidos en las zonas con grandes gradientes de presión, temperatura y número de Mach, es decir, las zonas con un cambio de sección más pronunciado, difieren más de los obtenidos experimentalmente.

Resum

El principal objectiu d'un programa de simulació computacional es recrear de la manera més veraç possible un fenomen físic real. En aquest treball es posa a prova la capacitat del Comsol Multiphysics d'intentar predir amb garanties el comportament de la tovera de flux compressible situada al laboratori de la EEBE. Per poder verificar aquest objectiu, prèviament es realitzen una sèrie d'experiments amb la tovera que es desitja modelar per, de manera posterior, poder comparar els resultats experimentals amb els resultats simulats mitjançant el Comsol Multiphysics.

Els resultats finals de les simulacions al Comsol Multiphysics guarden una gran semblança amb els obtinguts al laboratori. No obstant això, tot i ser similars, les dades obtingudes a les zones amb grans gradients de pressió, temperatura i número de Mach, es a dir, les zones amb un canvi de secció més pronunciat, difereixen més dels obtinguts experimentalment.

Abstract

The main purpose of a computation simulation software is to recreate in the most truthful way possible a physical phenomenon. On this dissertation the Comsol Multiphysics capability to predict the behavior of EEBE's compressible flow nozzle is going to be tested. To achieve this objective, previously are going to be done a set of experiments with the nozzle that is going to be modeled to, subsequently, be able to compare experimental results with Comsol Multiphysics simulated results.

The final results of the Comsol Multiphysics simulation are very close to the one obtained on the laboratory. Nevertheless, even being also similar, the obtained results in the areas with the greatest gradient of pressure, temperature and Mach number, that is to say the areas with the greatest change of section, differ more from those obtained experimentally.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a mi director de proyecto, Alfredo de Jesús Guardo Zabaleta, la ayuda prestada en la supervisión de este proyecto. El mundo de la modelización y simulación de flujos fluidos es muy interesante, a la par que complejo, sin su soporte el resultado no habría sido el mismo.

Agradecer también la ayuda de Alfred Fontanals en la realización del experimento de laboratorio necesario para llevar a cabo este proyecto y a Ricardo Torres, profesor de la asignatura Simulación Computacional en Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor, que me enseño gran parte de lo que se sobre el funcionamiento de Comsol Multiphysics.

Índice

RESUMEN I

RESUM II

ABSTRACT III

AGRADECIMIENTOS IV

1. INTRODUCCIÓN 3

1.1. Motivación del trabajo 3

1.2. Objetivos del trabajo 4

2. MARCO TEÓRICO 5

2.1. Flujo compresible 5

2.1.1. Propiedades de estancamiento 5

2.1.2. Velocidad del sonido 6

2.1.3. Número de Mach 7

2.2. Flujo isentrópico 8

2.3. Introducción a las toberas 8

2.3.1. Toberas convergentes 9

2.3.2. Toberas convergente - divergentes 11

3. EXPERIMENTO EN EL LABORATORIO 13

3.1. Equipo experimental 13

3.2. Medidas experimentales 15

3.2.1. Experimento 1 15

3.2.2. Experimento 2 15

3.3. Resultados 16

3.3.1. Experimento 1 16

3.3.2. Experimento 2 18

4. MODELIZACIÓN DE LA TOBERA 24

5. SIMULACIÓN EN COMSOL 26

5.1. Dimensiones 26

5.2. Módulo 27

5.3. Geometría 27

5.4. Condiciones de contorno 28

5.5. Malla 29

5.6. Estudio 29

5.7. Resultados 29

6. SIMULACIÓN DE LA TOBERA EN COMSOL ____ 30

6.1. Dimensiones 30

6.2. Geometría 30

6.3. Material 31

6.4. Módulo 31

6.5. Malla 34

6.5.1. Primer mallado: 34

6.5.2. Mallado definitivo 35

6.6. Estudios realizados 37

6.6.1. Experimento 1 37

6.6.2. Experimento 2 37

6.7. Resultados obtenidos 38

6.7.1. Experimento 1 38

6.7.2. Experimento 2 39

7. CONCLUSIONES ____ 43

8. ANÁLISIS ECONÓMICO ____ 45

8.1. Costes de personal 45

8.2. Costes de *software* 45

8.3. Costes de hardware 45

8.4. Coste total de proyecto 46

9. IMPACTO AMBIENTAL ____ 47

10. BIBLIOGRAFÍA ____ 48

ANEXO A ____ 49

ANEXO B ____ 50

ANEXO C ____ 51

ANEXO D ____ 55

1. Introducción

1.1. Motivación del trabajo

La motivación principal para realizar este trabajo es una motivación personal. En el cuatrimestre previo a la realización de este trabajo cursé una asignatura optativa llamada Simulación Computacional en Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor que me introdujo al mundo de los programas de CFD, más concretamente en Comsol Multiphysics. Me pareció un programa muy potente para la simulación computacional y que me podría ser muy útil en mi cercano mundo laboral como ingeniero mecánico. Quise profundizar más en su uso, realizando mi Trabajo Final de Grado con cualquier tema en el que lo pudiera usar con tal de aprender mejor como manejarlo. Por ese motivo, contacté con mi director de Trabajo, Alfredo de Jesús Guardo Zabaleta, que me ofreció modelizar la tobera de flujo compresible que tenemos en el laboratorio de la EEBE y no dudé en aceptarlo, era justo lo que quería.

Las toberas son dispositivos aumentan la velocidad de un fluido, reduciendo su presión y temperatura. Se encuentran en numerosas aplicaciones en ingeniería, tales como turbinas de gas y vapor, sistemas de propulsión de aviones y cohetes o sopladores industriales de viento y fuego.

Su uso tan extendido en tantos ámbitos tecnológicos augmenta la importancia de poderlas modelar en entornos virtuales con tal de dimensionarlas de manera óptima para sus diferentes aplicaciones sin necesidad de tener que hacer una comprobación experimental para cerciorarse de su correcto funcionamiento, pudiendo así reducir tanto el tiempo como el dinero destinado a los diferentes proyectos en los que se deba usar una tobera.

La optimización de recursos con la reducción de coste y tiempo en ningún caso debe perjudicar a la funcionalidad o a la seguridad de un diseño, por lo tanto, los resultados obtenidos a partir de simulaciones en entornos virtuales, como es Comsol Multiphysics, deben de ser equivalentes a los resultados que se obtendrían llevando a cabo el mismo experimento con una tobera real en las mismas situaciones de trabajo. Por este motivo, para la realización de este trabajo se han llevado a cabo unas medidas experimentales en un entorno controlado, que después se han replicado en Comsol Multiphysics, para poder obtener los mismos resultados obtenidos en las medidas experimentales con la tobera real. Sin embargo, aunque Comsol Multiphysics sea un programa de CFD con una gran potencia de cálculo en el que se puede replicar de manera muy fiel la realidad, replicar de manera completamente exacta un entorno real pasar por ser inviable, por los recursos que habría que destinar, o directamente imposible. Con tal de que estos resultados sean fiables sin destinar una cantidad de recursos excesiva se debe de valorar que nivel de precisión de cálculos se necesita para poder obtener resultados equivalentes a la realidad.

1.2. Objetivos del trabajo

El principal objetivo del presente trabajo es modelar la tobera de flujo compresible de la EEBE mediante el programa Comsol Multiphysics.

En primer lugar, se investigará, estudiará y comprenderá el marco teórico relacionado con el flujo compresible y las toberas con tal del poder aplicar de manera adecuada los conceptos teóricos para la modelización.

Para poder verificar el modelo, se experimentará con el equipo real para obtener datos experimentales que permitan validar el modelo final de Comsol.

Todo seguido, mediante los datos conseguidos en el laboratorio se calculará y modelará la tobera en el programa de CAD SolidWorks.

A continuación, se simulará la tobera en Comsol, replicando las condiciones con las que se llevaron a cabo los experimentos en el laboratorio en el programa de CFD.

Por último, se compararán los datos obtenidos en las simulaciones en Comsol con los datos obtenidos en el laboratorio para determinar, o no, la consecución del objetivo principal de este trabajo.

2. Marco teórico

En este apartado se hará una introducción teórica necesaria para poder comprender los resultados obtenidos y las explicaciones dadas a lo largo de este trabajo.

2.1. Flujo compresible

Los flujos compresibles son aquellos fluidos que implican cambios importantes en la densidad. Estos flujos compresibles se encuentran en dispositivos de fluidos a velocidades altas, comparables a la velocidad del sonido. Dichos flujos son difíciles de obtener en líquidos, pues necesitan presiones elevadas, cercanas a las 1000 atm, en cambio, en gases se pueden obtener con una relación de presiones 2:1, por lo tanto, cuando se tratan flujos incompresibles lo más habitual es tratar con gases.

2.1.1. Propiedades de estancamiento

En los casos en los que la energía cinética y la potencial son insignificantes, la entalpía representa la energía total del fluido. No obstante, en los flujos a altas velocidades, como los flujos compresibles, la energía cinética deja de ser despreciable y conviene combinar la entalpía y la energía cinética del fluido en un solo término llamado entalpía de estancamiento o entalpía total, h_0:

$$h_0 = h + \frac{v^2}{2} \qquad \left(\frac{kJ}{kg}\right) \qquad \text{(Ec.2.1)}$$

Los flujos a través de toberas, por lo general, tienen una energía potencial insignificante y, por consiguiente, su entalpía de estancamiento representa la energía total del fluido. En estos casos el balance de energía (E_{01}=E_{02}) queda como:

$$h_{01} = h_{02} \qquad \text{(Ec.2.2)}$$

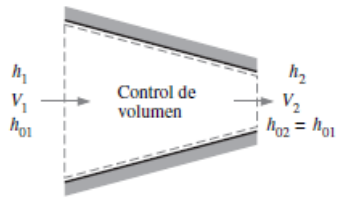


Fig. 2.1. Flujo estacionario de un fluido a través de un ducto adiabático {Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

Durante el proceso de estancamiento, la energía cinética se convierte en entalpía, la cual da como resultado un aumento de la temperatura y la presión. Para un gas con calores específicos constantes, la relación entre presión y temperatura se expresa como:

$$\frac{P_0}{P} = \left(\frac{T_0}{T}\right)^{\frac{k}{k-1}} \qquad \text{(Ec.2.3)}$$

Donde T_0, temperatura de estancamiento, es la temperatura que alcanza un gas ideal cuando se lleva al reposo adiabáticamente y P_0, presión de estancamiento, es la presión que alcanza un fluido cuando se lleva un reposo adiabáticamente.

2.1.2. Velocidad del sonido

Un parámetro importante para el estudio de un flujo compresible es la velocidad del sonido o velocidad sónica, que es la velocidad a la cual una onda de presión infinitésimamente pequeña viaja a través de un medio.

Para calcular la expresión de la velocidad del sonido se considera un volumen de control que encierra al frente de onda y que se mueve con el mediante un émbolo, tal y como se muestra en la *figura 2.1*.

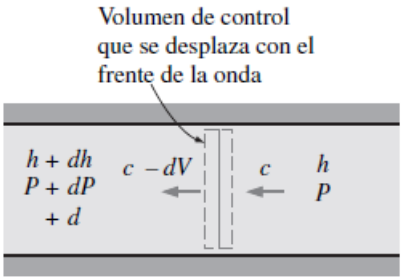


Fig. 2.2. Volumen de control que se mueve con la pequeña onda de presión en un ducto {Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

Si se asume que la variación de energía potencial se puede despreciar y que el fluido es un gas ideal, la velocidad del sonido en este caso se puede calcular mediante la expresión:

$$c = \sqrt{kRT} \qquad \text{(Ec.2.4)}$$

En la *ecuación 2.4* se puede observar que como R es la constante fija del gas ideal, k es una razón de calor especifico que depende de la temperatura y T es la temperatura, la velocidad del sonido de un gas ideal depende de la temperatura.

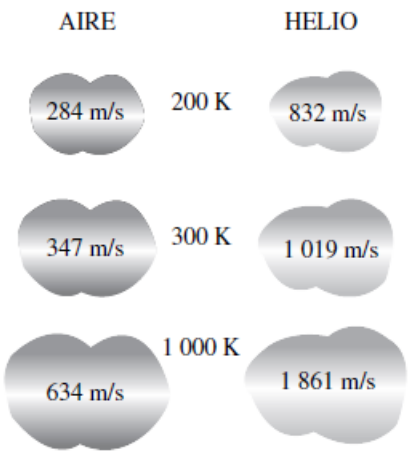


Fig. 2.3. Ejemplo de la dependencia de la temperatura de la velocidad de sonido de un gas ideal {Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

2.1.3. Número de Mach

El número de Mach (Ma) es el parámetro dominante en el análisis de flujos compresibles con efectos distintos dependiendo de su magnitud. Se suelen distinguir entre los diferentes rangos del número de Mach, siendo la siguiente clasificación aproximada la más extendida:

Numero de Mach (Ma)	Tipo de flujo	Descripción del flujo
< 0,3	Flujo compresible	Los efectos de la densidad son insignificantes
0,3 < Ma < 0,8	Flujo subsónico	Los efectos de la densidad son importantes, pero no aparecen ondas de choque
0,8 < Ma < 1,2	Flujo transónico	Aparecen ondas de choque que separan ondas subsónicas y supersónicas dentro del flujo.
1,2 < Ma < 3,0	Flujo supersónico	Existen ondas de choque, pero desaparecen las regiones subsónicas
3,0 < Ma	Flujo hipersónico	Las ondas de choque y otros cambios que experimenta el flujo son notablemente fuertes

Fig. 2.4. Clasificación de los rangos del número de Mach

En los casos de flujos interiores, como las toberas, los tipos de flujo que tienen más relevancia son el flujo subsónico y el flujo supersónico, porqué las variaciones de sección tienen el efecto opuesto que en el caso de los flujos externos.

El número de Mach se puede calcular mediante el cociente de la velocidad real del fluido entre la velocidad del sonido en el mismo fluido:

$$Ma = \frac{V}{c} \qquad \text{(Ec.2.5)}$$

2.2. Flujo isentrópico

La aproximación de un flujo como adiabático y reversible, asumiendo, además, que es un gas ideal permite realizar modelos que se adaptan a los flujos reales de toberas.

A continuación, se muestran las relaciones entre las propiedades estáticas y las de estancamiento para un flujo isentrópico de un gas ideal, con calores específicos constantes, en función de la razón de calores específicos k y el número de Mach:

$$\frac{T_0}{T} = 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma^2 \qquad \text{(Ec.2.6)}$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma^2\right)^{k/(k-1)} \qquad \text{(Ec.2.7)}$$

$$\frac{\rho_0}{\rho} = \left(1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma^2\right)^{1/(k-1)} \qquad \text{(Ec.2.8)}$$

Las propiedades de un fluido en una región donde su número de Mach es unitario (sónico) son llamadas propiedades críticas.

2.3. Introducción a las toberas

Una tobera es un dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido en energía cinética. Para ello es necesario someter al fluido, cuya energía se desea transformar, a una diferencia de presiones entre la entrada y la salida de la tobera. Esta conversión de energía se consigue gracias a un cambio de sección de paso del fluido y a la propiedad compresible de los gases que consigue reducir la presión y acelerar el fluido que pasa a través de la tobera. Existen dos tipos de toberas: convergentes y convergentes-divergentes

La primera persona que se percató de este fenómeno fue, el ingeniero sueco, Gustav de Laval (1845–1912). Que para la invención de su turbina de gas tuvo que conseguir la aceleración máxima de un gas a alta temperatura a través de un conducto. Para conseguirlo, diseñó un conducto de sección variable con dos secciones diferenciadas, una convergente y otra divergente, unidas por una garganta, que era lo zona menor sección transversal.

Años más tarde, Robert Goddard utilizó el diseño del conducto diseñado por de Laval para su turbina de vapor para construir el primer cohete propulsado por líquido de la historia, en el 1926. Desde entonces, las toberas convergente-divergentes también son llamadas toberas de tipo Laval.

Fig. 2.5. Robert Goddard junto a su cohete propulsado por líquido [Diseño de la tobera de un cohete con el método de las características y comparación con código CFD]

2.3.1. Toberas convergentes

Una tobera convergente es un dispositivo que consta de una entrada de fluido, que va estrechándose, disminuyendo su sección hasta llegar hasta la salida, en el caso de la tobera convergente: garganta.

Fig. 2.6. Tobera convergente [Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

Para que una tobera funcione para el propósito que está diseñada, acelerar un fluido al pasar a través de ella, se necesita un flujo a través del interior de la tobera y para ello, se necesita una diferencia de presiones entre la entrada y la salida.

Tomando el ejemplo de la *Fig.2.7.*, se toma P_0 como presión inicial, P_b como la presión de salida y $V_f = 0$ como la velocidad del fluido, que es está en reposo. En el caso en el que $P_0 = P_b$, no habrá flujo a través de la tobera y, por lo tanto, la velocidad del fluido seguirá siendo nula. En el caso en el que $P_b > P_0$, siendo $P_b = P_2$, se origina un flujo cuya presión desciende a lo largo de la tobera hasta llegar a P_2 y cuya velocidad pasa del reposo a una velocidad subsónica (Ma < 1). Si se reduce P_b a P_3, se llega al punto de máxima aceleración de un fluido de una tobera convergente siendo su velocidad sónica (Ma = 1), llegados a este punto nos encontramos con un flujo bloqueado, ya que por mucho que se siga bajando la presión, a valores P_4 o P_5 en este ejemplo, su velocidad no seguirá aumentando y quedará estancada en Ma = 1.

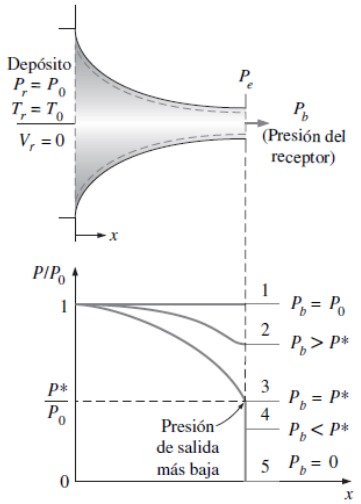


Fig.2.7. Efectos de diferentes presiones de salida en una tobera convergente [Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

Se podría llegar a pensar en que alargando la longitud transversal de la tobera convergente se podría, superar el valor de Ma = 1, sin embargo, tan solo se conseguiría trasladar la sección transversal cónica corriente abajo y disminuir el caudal másico del flujo.

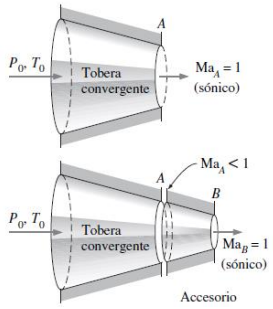


Fig.2.8. Límite de velocidad de un fluido en toberas convergentes [Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

En condiciones de flujo isentrópico, el caudal másico de este es una función de las propiedades de estancamiento del fluido, el área del flujo y el número de Mach y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{m} = \frac{AMaP_0\sqrt{\frac{k}{RT_0}}}{\left(1+\frac{(k-1)Ma^2}{2}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}}} \qquad \text{(Ec.2.9)}$$

Dicha ecuación se obtiene a partir de las ecuaciones 2.6, 2.7 y de la ecuación del caudal másico es válida para cualquier sección transversal y, por lo tanto, $\dot{m}$ puede ser calculador para cada punto a lo largo de la tobera.

En el caso de querer encontrar el caudal másico máximo posible de una tobera, se debe de diferenciar la *Ec.2.9* respecto a Ma e igualar a 0. Obteniendo un Ma = 1. Sabiendo que en una tobera convergente el único punto en el cual se puede obtener Ma = 1 es la garganta, se denomina su sección como A* y se substituye Ma = 1 para obtener la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_{max} = A * P_0 \sqrt{\frac{k}{RT_0}} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \qquad \text{(Ec.2.10)}$$

2.3.2. Toberas convergente - divergentes

Las toberas convergentes – divergentes son toberas en las cuales la sección mínima o garganta de la tobera se encuentra, a diferencia de las toberas convergentes, en un punto medio entre la entrada y la salida de la tobera, diferenciándose así dos tramos: un tramo convergente y un tramo divergente.

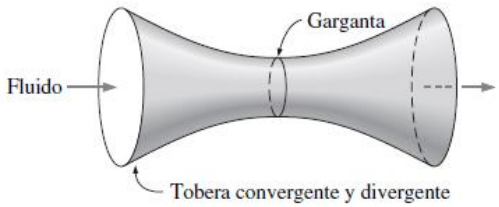


Fig.2.9. Tobera convergente-divergente [Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

El objetivo de añadir una sección divergente a una tobera convergente, formando así una tobera convergente – divergente, es poder acelerar el fluido a velocidades supersónicas (Ma > 1). Sin embargo, hacer pasar un flujo por este tipo de dispositivos no asegura que el fluido acelerará hasta velocidades supersónicas. De hecho, el fluido podría desacelerarse al pasar por la sección divergente, en vez de acelerarse. Como en la tobera convergente, la diferencia de presiones entre la entrada y la salida es el parámetro que determina como será el flujo a lo largo de la tobera.

Considerándose el ejemplo de la *Fig.2.10.* se tienen los parámetros iniciales P_0, que es la presión a la entrada de la tobera y P_b, que es la presión a la salida de la tobera.

Caso	Tipo de flujo a la salida de la tobera	Descripción del flujo
$P_b = P_0$	Flujo subsónico	No hay flujo a través de la tobera
$P_0 > P_b > P_C$	Flujo subsónico	El flujo a través de la tobera es subsónico. La velocidad de fluido augmenta en la sección convergente pero no alcanza velocidades sónicas. Sin embargo, la sección convergente acuta como difusor y decelera el flujo.
$P_b = P_C$	Flujo subsónico	La presión de la garganta pasa a ser P* (presión critica) por lo tanto, la velocidad en la garganta es sónica (Ma = 1), que es la máxima que puede alcanzar en la sección convergente. Sin embargo, como en el caso anterior, la sección divergente de la tobera continúa actuando como un difusor y disminuye la velocidad del flujo a velocidades subsónicas.
$P_c > P_b > P_E$	Flujo subsónico (con choque en la tobera)	El fluido alcanza velocidad sónica en la garganta (Ma = 1), la velocidad máxima que puede alcanzar el fluido en una tobera convergente. Una vez pasada la garganta el fluido continúa acelerándose alcanzando velocidades supersónicas, aunque, en cierto punto, se genera una onda de choque normal en la sección transversal entre la garganta y el plano de salida de la tobera, lo que causa una desaceleración y un

		incremento de la presión repentino del fluido que lo lleva a velocidades subsónicas. El punto en el que se produce la onda de choque se acerca más a la salida de la tobera conforme P_b se aproxima a P_E
$P_b = P_E$	Flujo subsónico (con choque en la tobera)	Se produce el mismo fenómeno que en el caso anterior, con la diferencia de que la onda de choque se genera justo en el plano de salida de la tobera y el flujo es supersónico hasta ese punto que la atraviesa y pasa a ser subsónico
$P_E > P_b > P_0$	Flujo supersónico	El flujo en la sección divergente es supersónico, se expande hasta P_F y no se forma ninguna onda de choque normal dentro de la tobera. De esta manera, el flujo a través de la tobera puede considerarse supersónico. En este caso se pueden distinguir tres tipos de comportamientos diferentes del flujo una vez sale de la tobera: • $P_b = P_F$: No se forma ningún tipo de onda de choque ni dentro ni fuera de la tobera • $P_b < P_F$: Unos corrientes de mezclado irreversible y ondas de expansión ocurren más abajo del plano de salida de la tobera. • $P_b > P_F$: En la región de la estala formada por el flujo corriente abajo del plano de salida de la tobera se generan unas ondas de choque oblicuas y la presión del fluido aumenta de manera irreversible desde P_F hasta P_b

Fig.2.11. Descripción de los efectos de las diferentes presiones de salidas en una tobera convergente – divergente.

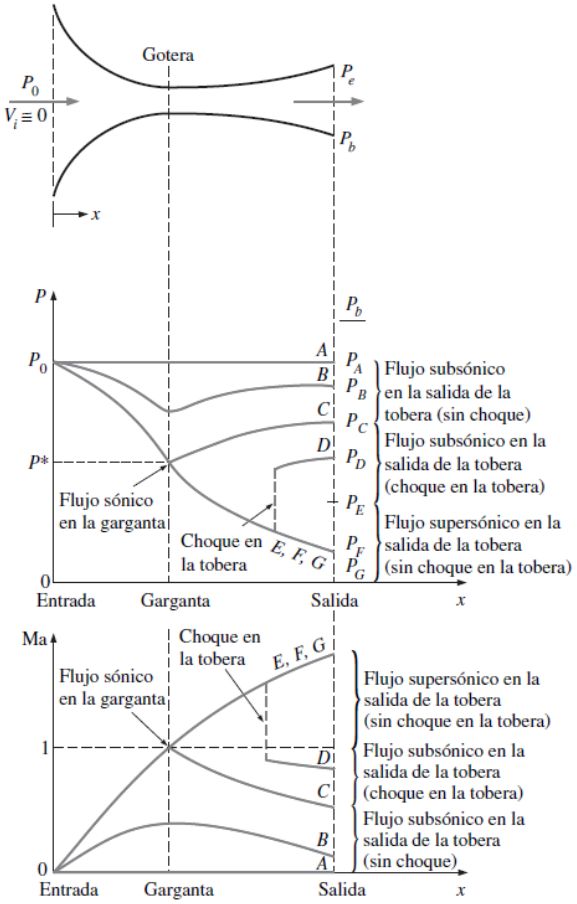


Fig.2.11. Efectos de la presión de salida en una tobera convergente – divergente [Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones]

3. Experimento en el laboratorio

En este apartado se explicará el proceso experimental que se realizó en el laboratorio de la EEBE con la tobera real objeto de este trabajo.

Con el objetivo de poder modelar la tobera en SolidWorks, para su posterior exportación a Comsol Multiphysics, y para la comprobación de los resultados de la simulación era necesario realizar una serie de experimentos, que se expondrán a continuación.

Así mismo, después de ejecutar el experimento el equipo fue desmontado para la toma de medidas de sus componentes.

3.1. Equipo experimental

Para poder realizar un experimento controlado, el equipo experimental consta de diversos componentes además de la tobera. Como se puede observar en las *Fig. 3.2* y *3.*3 el equipo consta de:

Punto	Componente	Función
1	Compresor	Suministra aire comprimido al calderín (punto 2)
2	Calderín	Recipiente donde se almacena el aire comprimido
2-3	Válvula	Permite regular la presión de estancamiento (p_0) de la tobera y regula el caudal $\dot{m}$
3	Cuerpo central	Zona donde se aloja la tobera que se va a estudiar. También se encuentran: • Manómetro p_0: permite medir la presión de estancamiento (p_0) • Manómetro p: permite medir la presión a lo largo de la tobera que se ensaya puesto que está acoplado a una toma de presión axial que puede desplazarse • Termómetro t_0: permite media la temperatura de estancamiento
3-4	Válvula	Permite regular la presión exterior (p_b)
t_1	Termómetro	Permite medir la temperatura del aire una vez ha pasado por la tobera
4	Manómetro inclinado	Lectura de la presión diferencial que genera la placa orificio medidora. Permite calcular el caudal másico real ($\dot{m}$
5	Barómetro	No forma parte del equipo en sí, pero es necesario para poder calcular las presiones absolutas del ensayo

Fig.3.1. Descripción del equipo experimental de la EEBE.

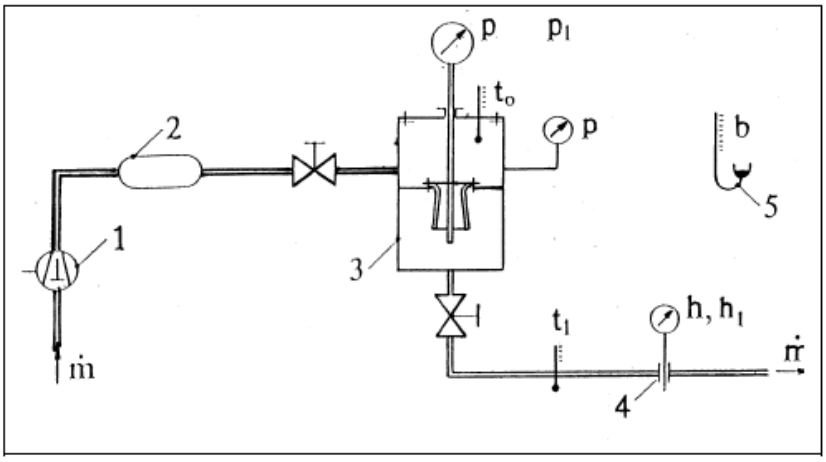


FIg.3.2. Esquema del equipo experimental de la EEBE [Flujo compresible en toberas]

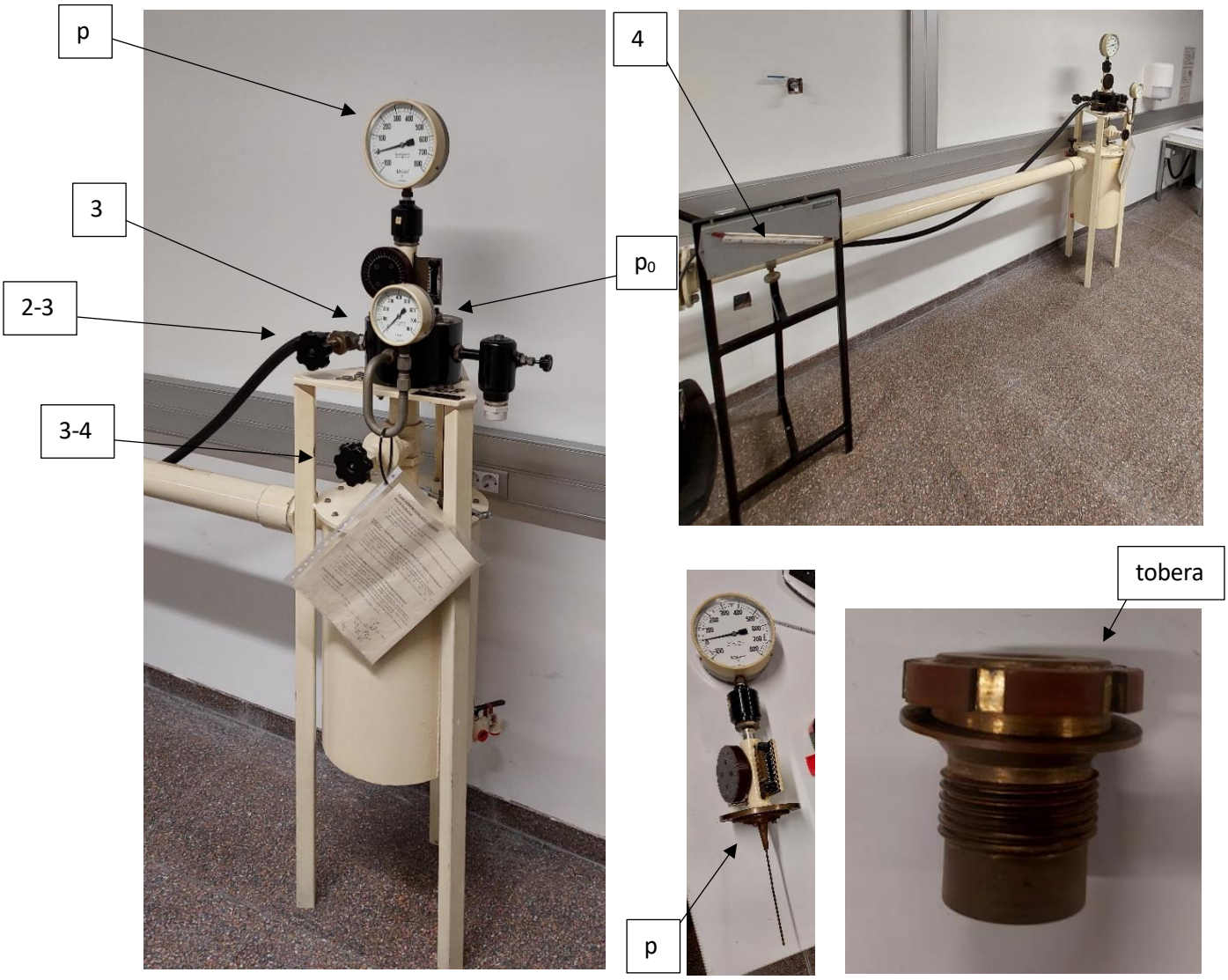


Fig3.3. Fotografías del equipo experimental de la EEBE

3.2. Medidas experimentales

3.2.1. Experimento 1

En este caso se establece una presión de estancamiento (p_0) fija y se varia la presión de salida (p_b). Se empieza una p_0 cercana a p_b y se aumenta la diferencia entre ambas hasta llevar p_b a 0 KPa. En cada caso se mide la temperatura del aire una vez pasado por la tobera (t_1) y la diferencia de presión real (Δh) Así mismo, es también importante la medición las condiciones ambientales en el momento de hacer el experimento (pamb y tamb).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_{0,\,rel}$	280 KPa	280 KPa	280 KPa	280 KPa	280 KPa	280 KPa	280 KPa	280 KPa	280 KPa
$p_{b,rel}$	260 KPa	240 KPa	200 KPa	170 KPa	140 KPa	100 KPa	80 KPa	40 KPa	0 KPa
t_1	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C	24 °C
Δh	19,6 Pa	36,0 Pa	75,5 Pa	95,9 Pa	95,0 Pa	96,4 Pa	97,0 Pa	98,0 Pa	100,0 Pa
tamb	24 °C								
patm	1023 hPa								

Fig.3.4. Datos experimentales del experimento 1.

3.2.2. Experimento 2

En este experimento se establecen condiciones de flujo estacionarias en la entrada (p_0, t_0) y presión constante en la salida (p_b) de la tobera y se mide la presión (p) a lo largo de la tobera. Este proceso se repite en diversas ocasiones para poder observar los diferentes comportamientos del flujo en el interior de la tobera en fusión de la diferencia de presiones entre p_0 y p_b. Las condiciones establecidas para cada caso quedan reflejadas en la *Fig.3.5.* Así mismo, se consideran las condiciones ambientales (tamb y patm) de la *Fig3.4.* puesto que son medidas el mismo día con 15 minutos de diferencia.

	1	2	3	4
p_0	382,30 KPa	372,30 KPa	372,30 KPa	372,30 KPa
p_b	312,30 KPa	192,30 KPa	102,30 KPa	162,30 KPa

Fig.3.5. Condiciones iniciales establecidas para el experimento 2.

	1		2		3		4	
N.º	p_{rel}	p/p_0	p_{rel}	p/p_0	p_{rel}	p/p_0	p_{rel}	p/p_0
5	280 KPa	1,00	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00
6	270 KPa	0,97	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00
7	265 KPa	0,96	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00
8	270 KPa	0,97	260 KPa	0,97	270 KPa	1,00	270 KPa	1,00
9	260 KPa	0,95	260 KPa	0,97	260 KPa	0,97	260 KPa	0,97
10	250 KPa	0,92	240 KPa	0,92	240 KPa	0,92	240 KPa	0,92
11	220 KPa	0,84	190 KPa	0,79	190 KPa	0,79	190 KPa	0,79
12	200 KPa	0,79	140 KPa	0,65	140 KPa	0,65	140 KPa	0,65
13	190 KPa	0,76	120 KPa	0,60	100 KPa	0,54	100 KPa	0,54
14	190 KPa	0,76	80 KPa	0,49	80 KPa	0,49	80 KPa	0,49
15	190 KPa	0,76	60 KPa	0,44	40 KPa	0,38	60 KPa	0,44
16	195 KPa	0,78	40 KPa	0,38	40 KPa	0,38	60 KPa	0,44
17	195 KPa	0,78	30 KPa	0,36	30 KPa	0,36	50 KPa	0,41
18	200 KPa	0,79	30 KPa	0,36	30 KPa	0,36	50 KPa	0,41
19	200 KPa	0,79	20 KPa	0,33	20 KPa	0,33	40 KPa	0,38
20	200 KPa	0,79	20 KPa	0,33	20 KPa	0,33	40 KPa	0,38
21	200 KPa	0,79	10 KPa	0,30	10 KPa	0,30	30 KPa	0,36
22	200 KPa	0,79	10 KPa	0,30	10 KPa	0,30	30 KPa	0,36
23	200 KPa	0,79	10 KPa	0,30	10 KPa	0,30	30 KPa	0,36
24	200 KPa	0,79	0 KPa	0,27	0 KPa	0,27	20 KPa	0,33
25	200 KPa	0,79	0 KPa	0,27	0 KPa	0,27	20 KPa	0,33
26	210 KPa	0,82	0 KPa	0,27	0 KPa	0,27	20 KPa	0,33
27	210 KPa	0,82	80 KPa	0,49	0 KPa	0,27	60 KPa	0,44
28	210 KPa	0,82	90 KPa	0,52	0 KPa	0,27	70 KPa	0,46
29	205 KPa	0,80	90 KPa	0,52	0 KPa	0,27	70 KPa	0,46
30	210 KPa	0,82	90 KPa	0,52	0 KPa	0,27	60 KPa	0,44
31	210 KPa	0,82	90 KPa	0,52	0 KPa	0,27	60 KPa	0,44
32	210 KPa	0,82	90 KPa	0,52	0 KPa	0,27	70 KPa	0,46
33	210 KPa	0,82	90 KPa	0,52	-		-	-
34	210 KPa	0,82	-		-		-	-

Fig.3.6 Datos experimentales del experimento 1

3.3. Resultados

3.3.1. Experimento 1

A partir de los datos tomados, se calculan las presiones absolutas, puesto que las obtenidas son relativas, sumándoles la presión atmosférica, que es de 102,30 KPa, a las presiones relativas.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_0	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa	382,30 KPa
p_b	362,30 KPa	342,30 KPa	302,30 KPa	272,30 KPa	242,30 KPa	202,30 KPa	182,30 KPa	142,30 KPa	102,30 KPa

Fig.3.7. Cálculo de presiones absolutas

Una vez calcadas las presiones absolutas obtenidas durante el experimento se calcula p_0/p_b, el caudal másico experimental $\dot{m}_c$ (*Ec.3.1.)* y el caudal másico teórico $\dot{m}_t$ (*Ec.3.2*)

$$\dot{m} = 3{,}90 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{hh_0}{T_1}} \qquad \text{(Ec.3.1)}$$

$$\dot{m}_t = \frac{\sqrt{2} A_1 p_0}{R' T_0} \psi_1 \qquad \text{(Ec.3.2)}$$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\dot{m}$	0,008860 kg/s	0,012008 kg/s	0,017389 kg/s	0,019598 kg/s	0,019506 kg/s	0,019649 kg/s	0,019710 kg/s	0,019811 kg/s	0,020013 kg/s
$\dot{m}_t$ *	0,005567 kg/s	0,008636 kg/s	0,011057 kg/s	0,020713 kg/s	0,020713 kg/s	0,020713 kg/s	0,020713 kg/s	0,020713 kg/s	0,020713 kg/s

Fig.3.8 Resultado de los caudales másicos experimentales y teóricos en diferentes puntos de la tobera

*Se han escogido los puntos más próximos a los experimentales, la tabla completa se encuentra en el Anexo A

A continuación, se grafica y compara el caudal experimental y el teórico.

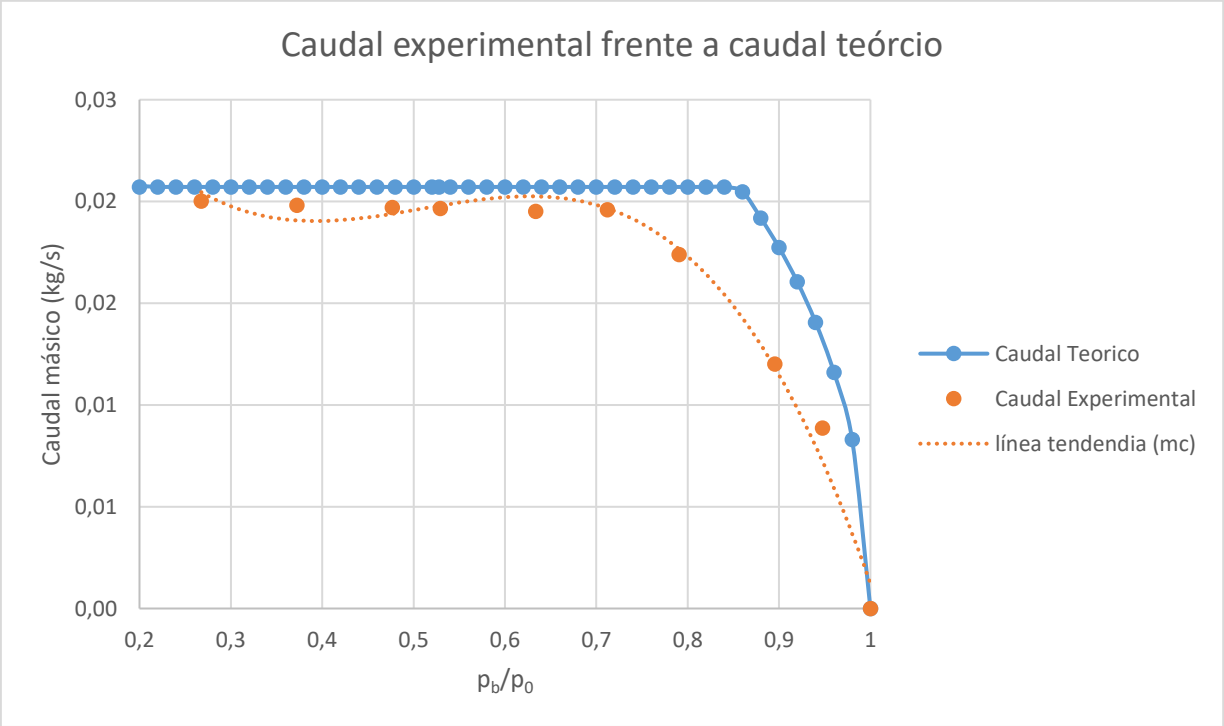


Fig.3.9. Comparación del caudal másico teórico frente al caudal másico experimental

El caudal teórico es en todo momento, y de manera regular, mayor al caudal experimental. Este suceso es debido al que el cálculo experimental no tiene en cuenta que el flujo no es exactamente adiabático, el efecto del rozamiento del fluido y el efecto de la capa límite.

3.3.2. Experimento 2

Para verificar que los datos obtenidos experimentalmente son correctos, se grafica p/p_0 para cada conjunto de datos obtenido. Para ello se calculan las presiones absolutas, p y p_0, sumándole la presión atmosférica a las presiones relativas obtenida.

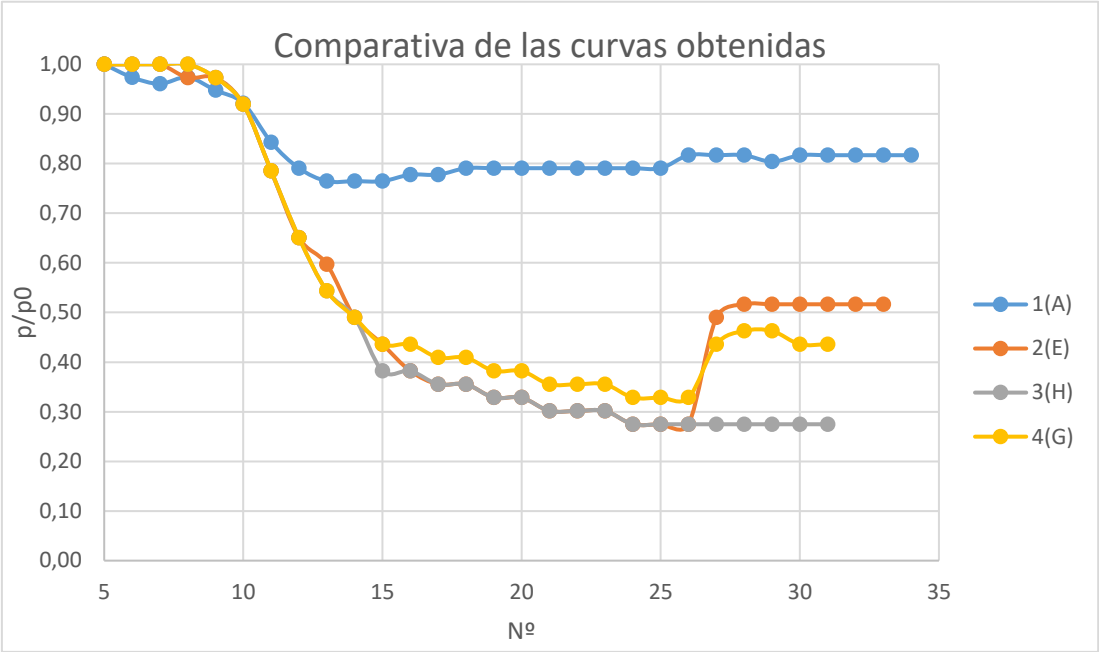
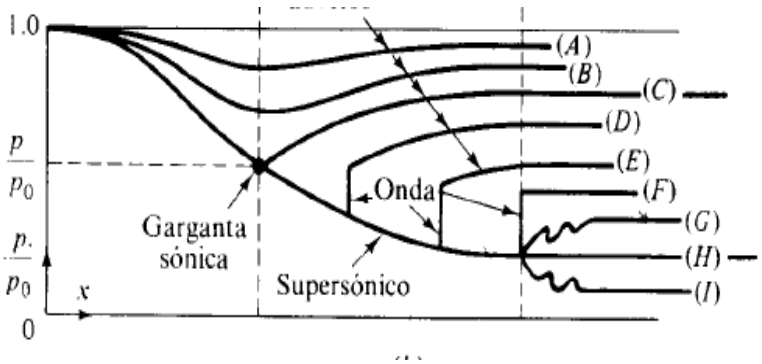


Fig.3.10. Comparativa de las curvas obtenidas para cada conjunto de datos obtenidos experimentalmente



1. Flujo subsónico (A)
2. Flujo supersónico con onda de choque (E)
3. Flujo supersónico (H)
4. Flujo supersónico con perturbaciones (G)

Fig.3.11. Distribución teórica de p/p_0 a lo largo de la tobera [Flujo compresible en toberas]

Comparando las *Fig.3.10* y *3.11* se puede comprobar que el comportamiento de la tobera es el esperado y los datos obtenidos quedan verificados.

A continuación, se calcula la temperatura, la velocidad y el número de Mach en cada punto para cada conjunto de datos experimentales.

La temperatura (T) de calcula mediante la *Ec.3.3*.

$$T = T_0 \left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}} \qquad \text{(Ec.3.3)}$$

La velocidad (c) se calcula a partir de la *Ec.3.4.*

$$c = \sqrt{R' T_0} W \qquad \text{(Ec.3.4)}$$

Donde W se interpola linealmente para cada valor de p/p_0 a partir de la tabla 2 del Anexo B.

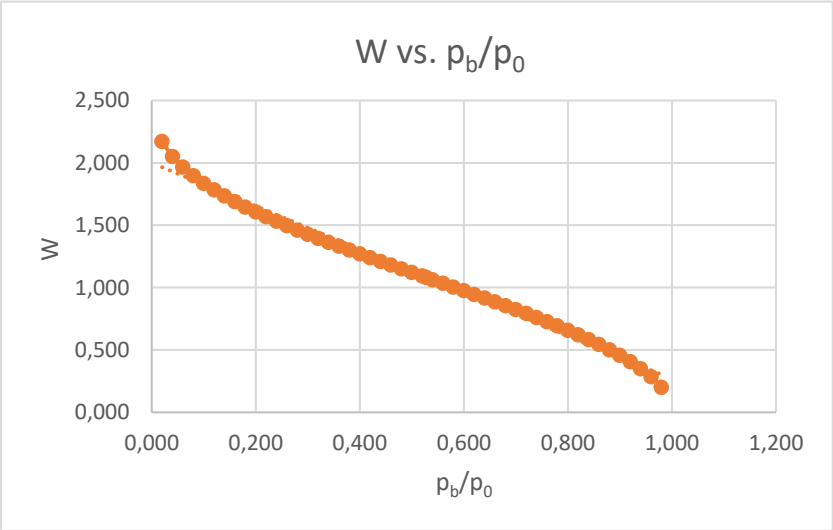


Fig.3.12. Interpolación lineal de W respecto p/p_0

$$y = -1{,}7316x + 1{,}9999 \qquad \text{(Ec.3.5)}$$

$$R^2 = 0{,}9892 \qquad \text{(Ec.3.6)}$$

El número de Mach se calcula por interpolación polinómica de grado 3 para cada valor de p/p_0 a partir de la tabla 2 del Anexo B.

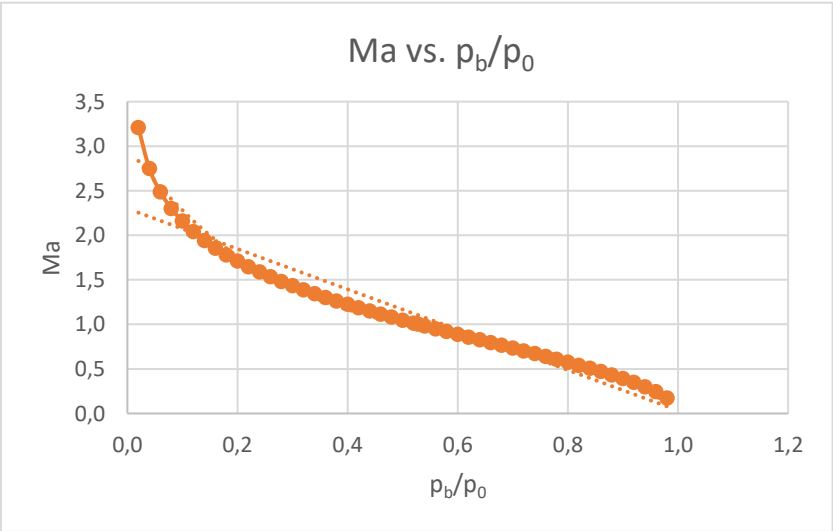


Fig.3.13 Interpolación polinómica de Ma respecto p/p_0

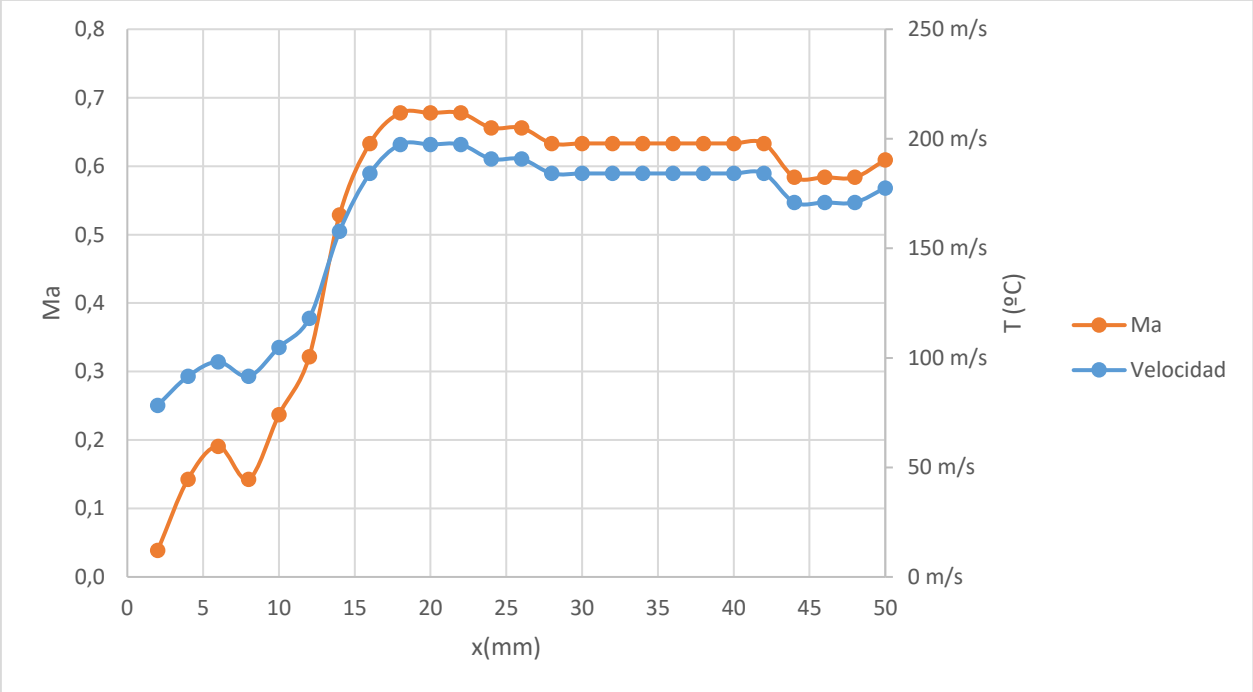
$$y = -6{,}5286x3 + 11{,}837x2 - 8{,}2654x + 2{,}9956 \quad \text{(Ec.3.7)}$$

$$R^2 = 0{,}9877 \quad \text{(Ec.3.8)}$$

Los resultados de los cálculos descritos para cada conjunto de datos se incluyen en el Anexo C de esta memoria.

Por último, para cada conjunto de datos se gráfica T, c y Ma en función del punto de toma de cada dato.

- Flujo subsónico



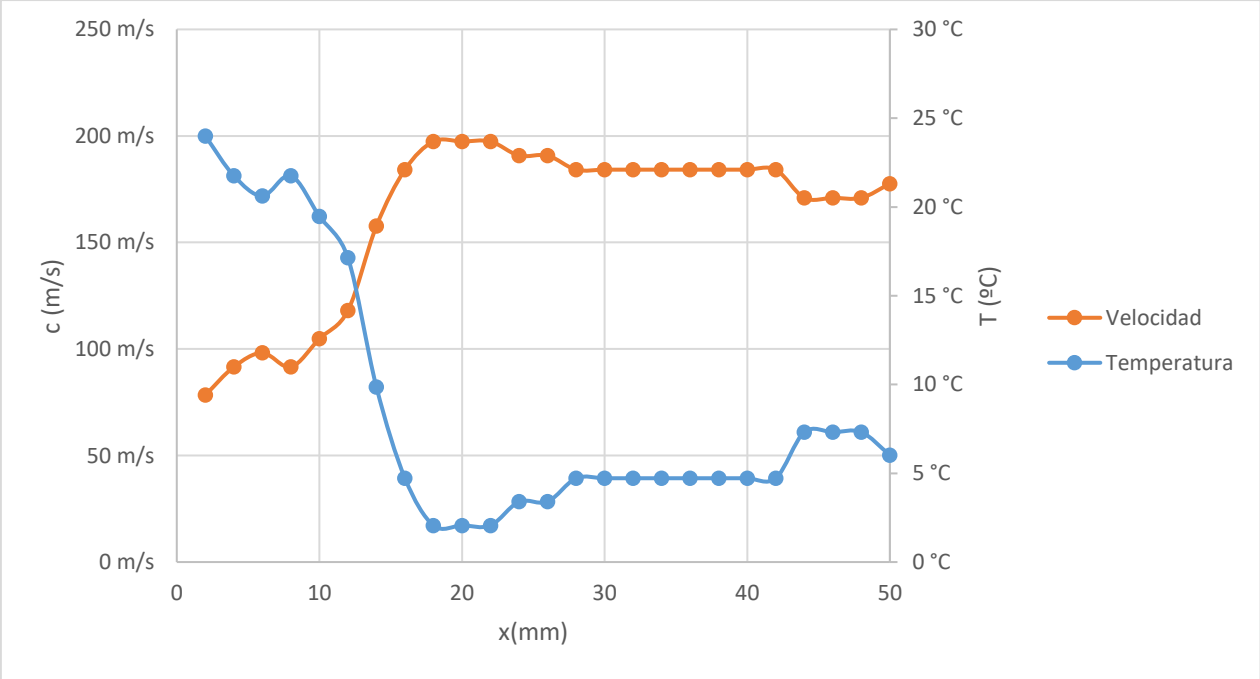
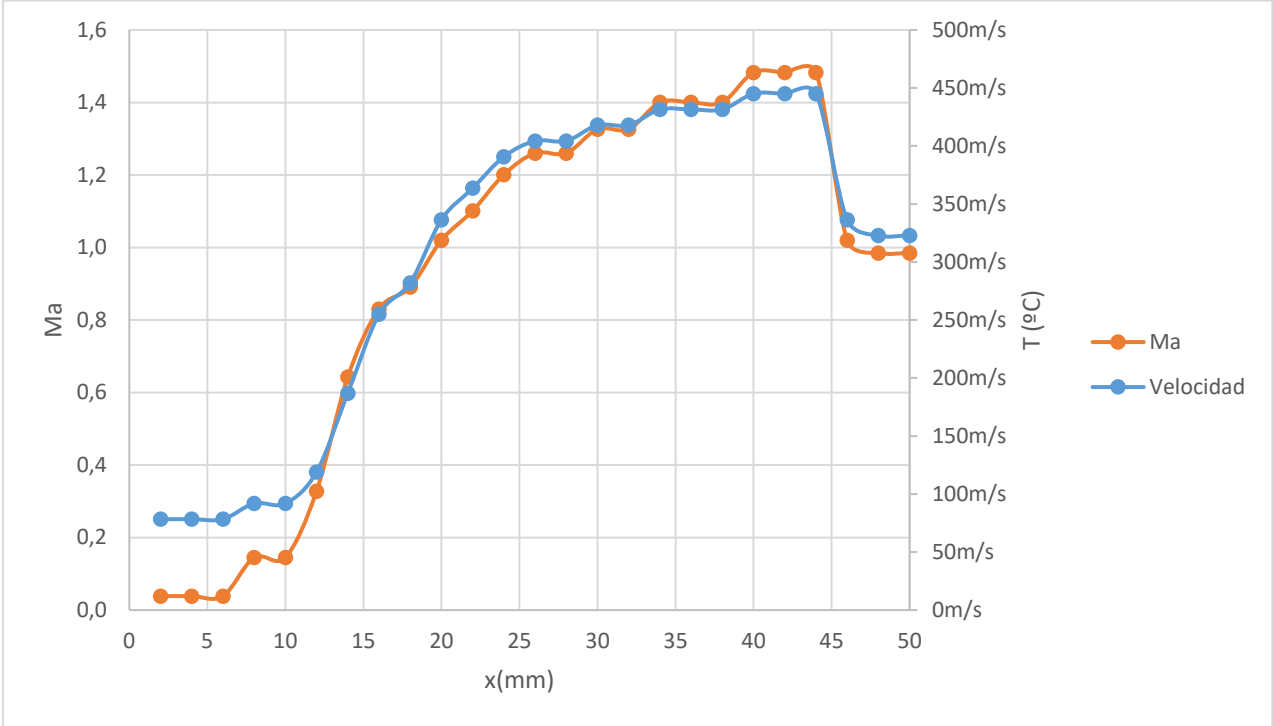


Fig.3.14 (superior). y 3.15 (inferior) Ma, T y c frente el punto de toma de presión para el conjunto de datos 1.

- Flujo supersónico con onda de choque



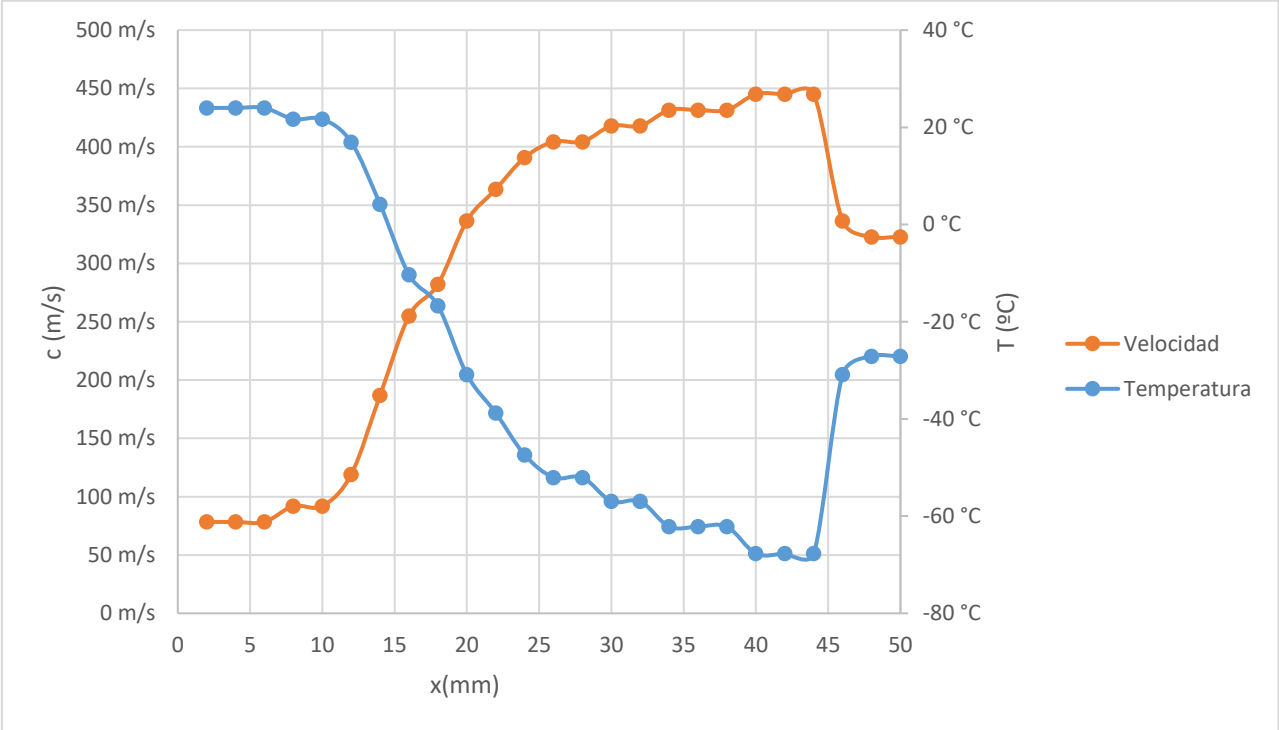
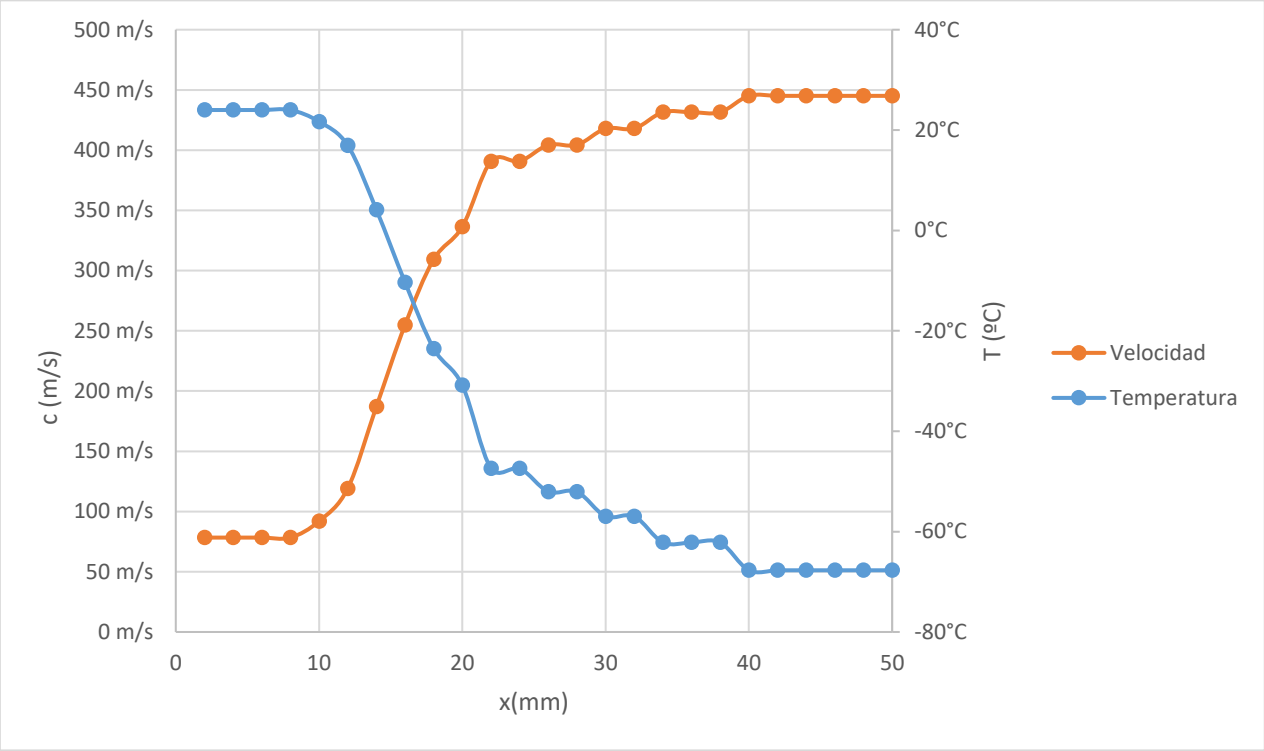


Fig.3.16 (superior). y 3.17 (inferior) Ma, T y c frente el punto de toma de presión para el conjunto de datos 2.

- Flujo supersónico



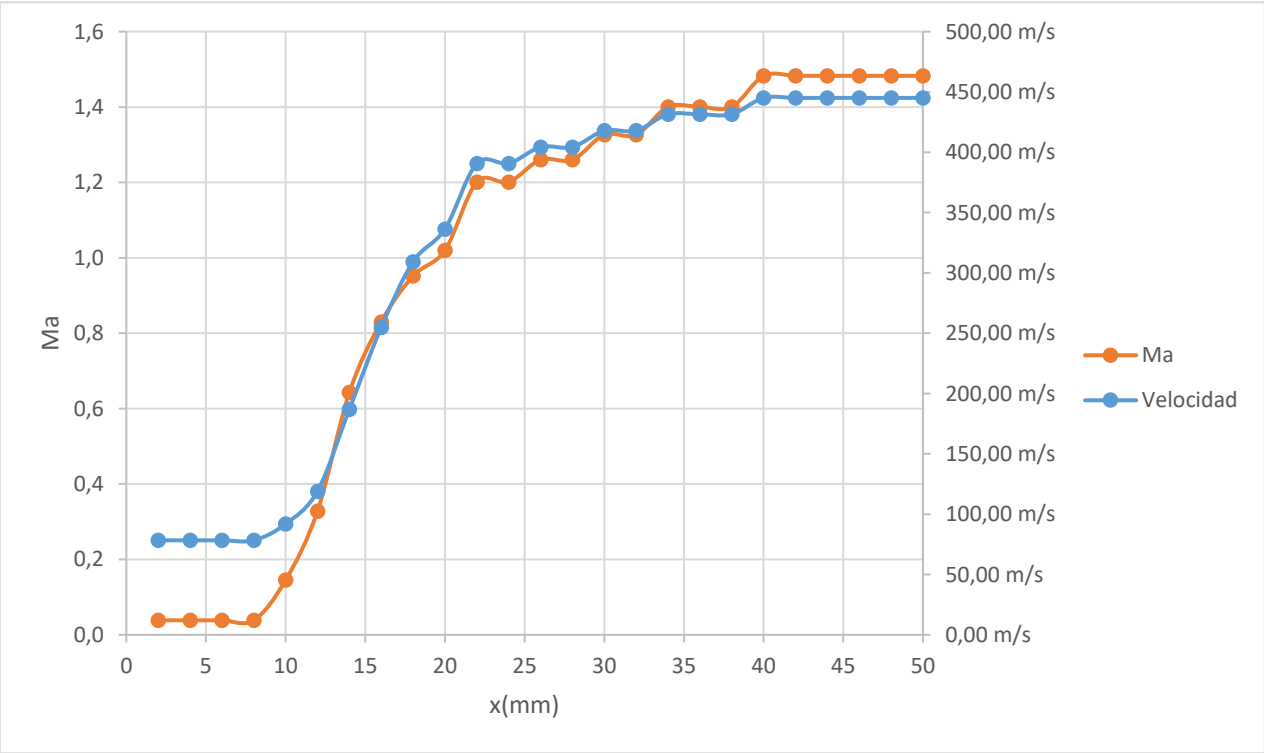
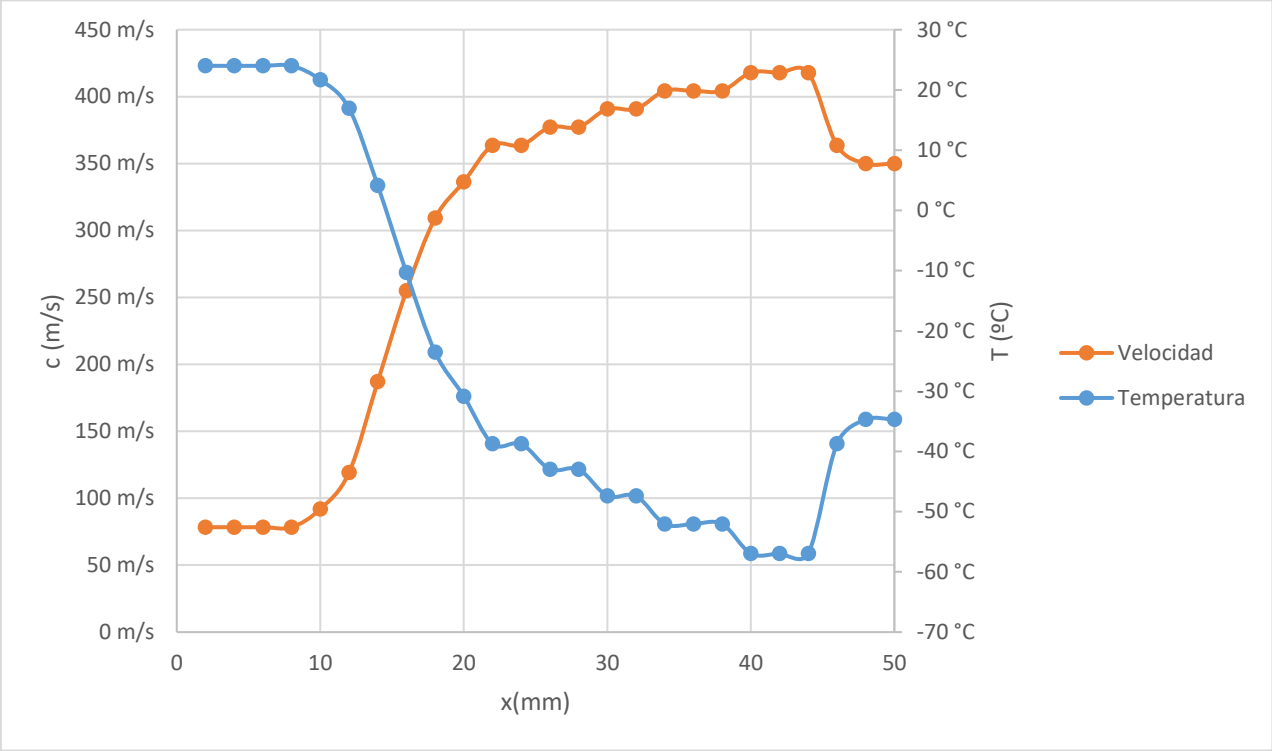


Fig.3.18 (superior). y 3.19 (inferior) Ma, T y c frente el punto de toma de presión para el conjunto de datos 3.

- Flujo supersónico con perturbaciones



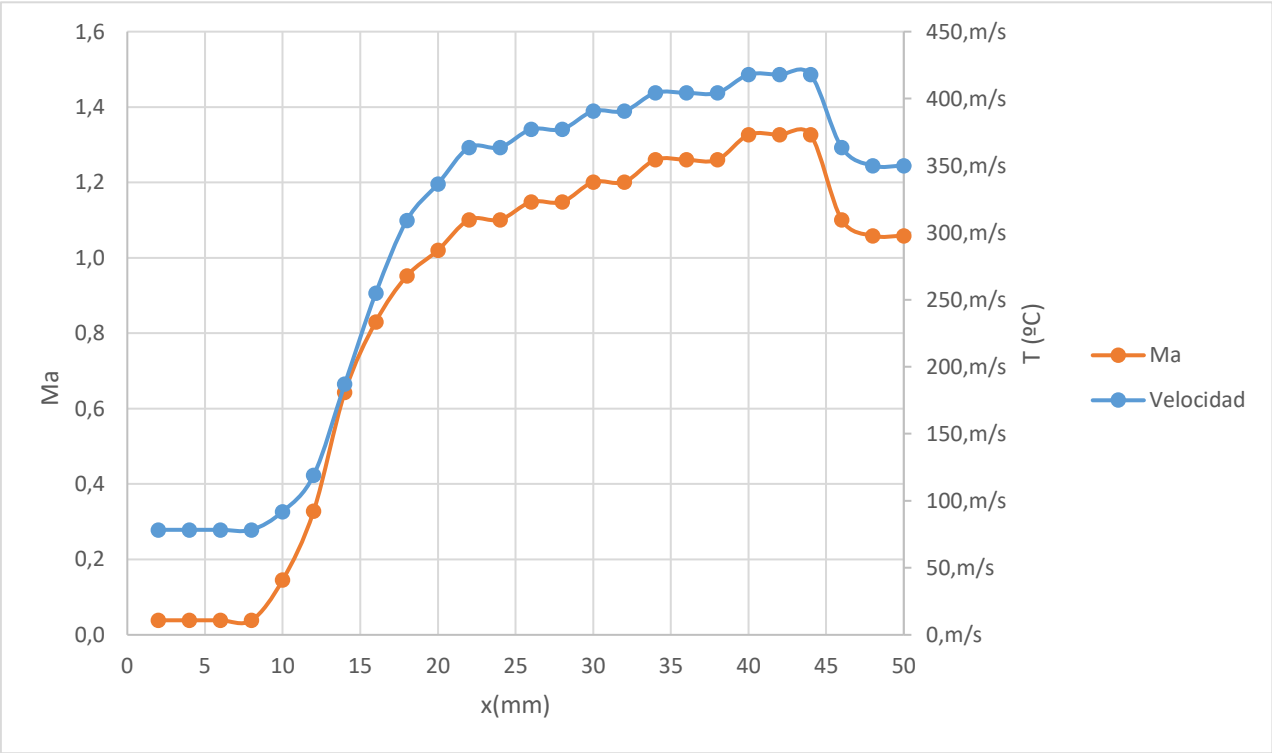


Fig.3.20 (superior). y 3.21 (inferior) Ma, T y c frente el punto de toma de presión para el conjunto de datos 4.

4. Modelización de la tobera

Una vez recogidos los datos experimentales sobre los cuales se basará el estudio, se modela la tobera para poder trabajar con ella en Comsol Multiphysics.

Teniendo en cuenta que la tobera a estudiar es un objeto simétrico, y que Comsol permite hacer este tipo de cálculos, se toma un corte 2D del plano longitudinal del interior de la tobera y se indicará en Comsol que se trata de un plano axisimétrico para que la simulación sea válida.

Asimismo, como se explica en el punto **3.1 «Equipo experimental»** de esta memoria, la presión p se mide mediante un sensor cilíndrico de presión de 3.32 mm de diámetro que pasa a través del interior de la tobera.

Dicho sensor se debe tener en cuenta para la modelización de la tobera para ello se calcula el radio de la tobera a partir de A, que es el área efectiva de la tobera en cada punto, que viene dado por la tabla del Anexo D

Toma	x(mm)	A(mm^2)	R(mm)
7	0	496,46	12,57
8	2	138,71	6,64
9	4	67,82	4,65
10	6	37,87	3,47
11	8	25,54	2,85
12	10	23,22	2,72
13	12	23,63	2,74
14	14	24,05	2,77
15	16	24,47	2,79
16	18	24,9	2,82
17	20	25,32	2,84
18	22	25,75	2,86
19	24	26,19	2,89

Toma	x(mm)	A(mm^2)	R(mm)
20	26	26,62	2,91
21	28	27,06	2,93
22	30	27,5	2,96
23	32	27,95	2,98
24	34	28,39	3,01
25	36	28,84	3,03
26	38	29,29	3,05
27	40	29,75	3,08
28	42	30,2	3,10
29	44	30,66	3,12
30	46	31,13	3,15
31	48	31,59	3,17
32	50	32,06	3,19

Fig. 4.1. Cálculo de R a partir de A

Una vez se obtiene R para punto X de toma de presión se exportan dichos puntos a SolidWorks.

Fig.4.2. Interior de la tobera en SolidWorks

Asimismo, se añade la cámara de aire previa a la entrada a la tobera y la tubería de la salida para que la modelización se asemeje lo máximo posible al equipo del laboratorio.

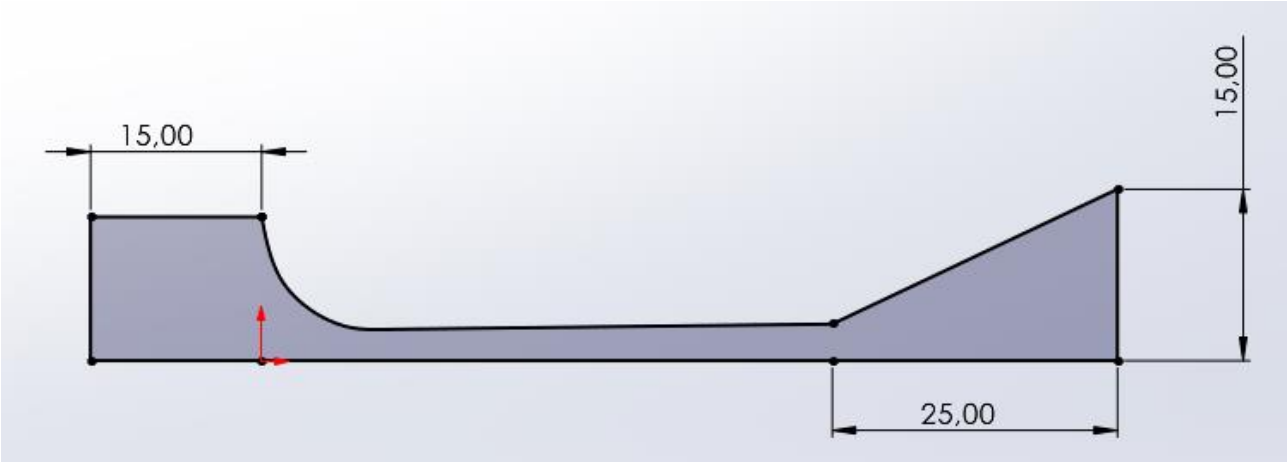


Fig.4.3. Modelización del equipo experimental en SolidWorks.

5. Simulación en Comsol

Una vez realizada la modelización de la geometría se debe exportar y a Comsol. En este apartado se explicarán los procesos que se deben realizar para que la simulación funcione de manera correcta. El programa dispone de diversos módulos para diferentes tipos de estudios, como podrían circuitos eléctricos, acústica, transporte de especies químicas, transferencia de calor y mecánica estructural. En este caso se utilizará el módulo de flujo de fluido.

El método de cálculo utilizado por Comsol para la resolución de las simulaciones es el método de elementos finitos.

5.1. Dimensiones

Para empezar una simulación en Comsol Multiphysics, una de las primeras decisiones que se debe de tomar para iniciar el trabajo es decidir la dimensión, o dimensiones en las que se trabaja. Puesto que el programa brinda diferentes opciones con distintas posibilidades.

Fig.5.1. Dimensiones en Comsol Multiphysics.

Dimensión	Descripción
0D	Modelo dimensional más simple de Comsol. Asigna un valor de eficiencia a las diferentes partes de la geometría y relacionándolas entre si mediante ecuaciones de conservación, dichos valores de eficiencia son difíciles de aplicar de manera correcta ya que requiere mucho estudio previo y un cambio en la geometría puede variar los resultados notablemente. Por otro lado, este tipo de modelo no puede calcular características locales del flujo.
1D	Los modelos de una dimensión son capaces de consideras las diferentes geometrías de, por ejemplo, una tobera dado que conocen el área de paso para cada coordenada de su único eje. Pueden registrar ondas de choque y predecir el caudal con y desviaciones cercanas al 5%.
1D axisimétrico	El modelo 1D asimétrico procede como el modelo 1D simula el flujo en una dimensión asumiendo que tiene un eje de simetría sobre el cual revoluciona.
2D	Este tipo de modelo simula el flujo en un plano 2D.
2D axisimétrico	El modelo 2D asimétrico simula el flujo en 2 dimensiones asumiendo que existe un eje de simetría alrededor del cual todas las condiciones son iguales. Su principal ventaja es en comparación con el modelo 3D, requiere muchos menos recursos y reduce en gran medida el tiempo de simulación.
3D	El modelo 3D simula toda la geometría sin simplificar y sin asumir ninguna simetría. Es el modelo que más se acerca a la realidad, pero también el que requiere más tiempo de cálculo.

Fig.5.2. Descripción de los diferentes modelos dimensionales en Comsol Multiphysics.

5.2. Módulo

Comsol Multiphysics tiene infinidad de aplicaciones en ingeniería como previamente se ha mencionado. Siendo útil para simulaciones de corrientes eléctricas, acústica, transferencia de calor transporte de especies químicas, mecánica estructural y flujo fluido.

Cabe destacar que la física de flujo fluido, la que será utilizada en este estudio, dispone, en misma, diversos métodos de cálculo de un flujo fluido. Pudiendo calcular flujos laminares, turbulentos y flujos con un número de Mach alto, entre otros.

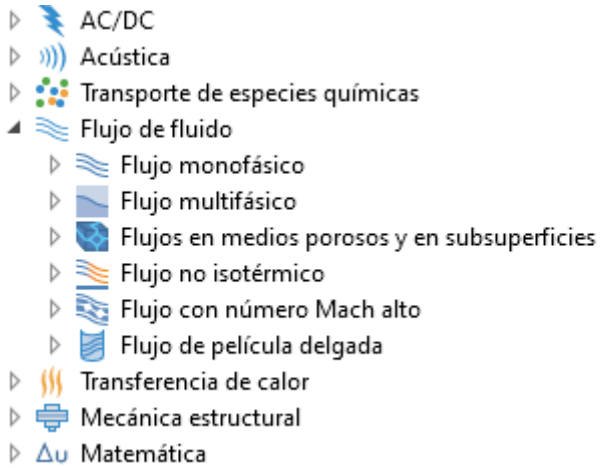


Fig.5.3. Diferentes tipos de físicas en Comsol Multiphysics.

Los tipos de modelos de cálculo más utilizados son los modelos *RANS* (*Reynolds Averaged Navier-Stokes)*, caracterizados por resolver las ecuaciones de Navier-Stokes usando valores promedio de variables fluctuantes.

5.3. Geometría

Introducir la geometría de objeto que se desea simular es una de las partes más importantes de una simulación puesto que en muchos casos pequeñas variaciones en la geometría puede tener grandes consecuencias en el resultado final.

Principalmente existen dos opciones principales para construir la geometría deseada. La primera, y seguramente la más adecuada para geometrías simples, Comsol Multiphysics dispone de un creador de geometrías simple, aunque práctico y funcional. Este creador permite crear geometrías a partir de segmentos, geometrías simples y otros polígonos mediante la introducción de coordenadas, vectores y tablas de datos. Por otro lado, es posible importar geometrías desde programas de CAD, como SolidWorks, para trabajar con geometrías más complejas.

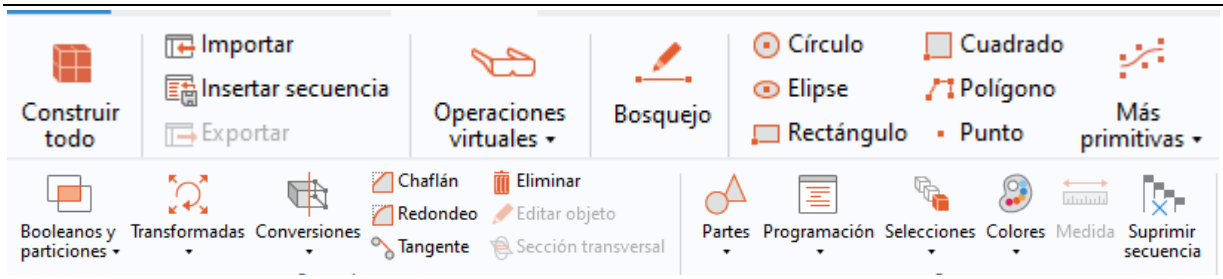


Fig.5.4. Menú de geometría en Comsol Multiphysics.

5.4. Condiciones de contorno

Resulta esencial la determinación de las condiciones en las que se va a realizar un estudio. Definir por donde entrará o saldrá el fluido, el aislamiento térmico o no del objeto de estudio o la temperatura de inicio del estudio son algunas de las condiciones a determinar.

Definir el material que se va a trabajar resulta sencillo en Comsol debido a la galería de materiales de la cual dispone para realizar estudios e incluso comparativas entre distintos materiales. Por otro lado, si el material que se desea estudiar no se encuentra en la galería de materiales de Comsol, existe la opción de establecer propiedades personalizadas de materiales para el estudio.

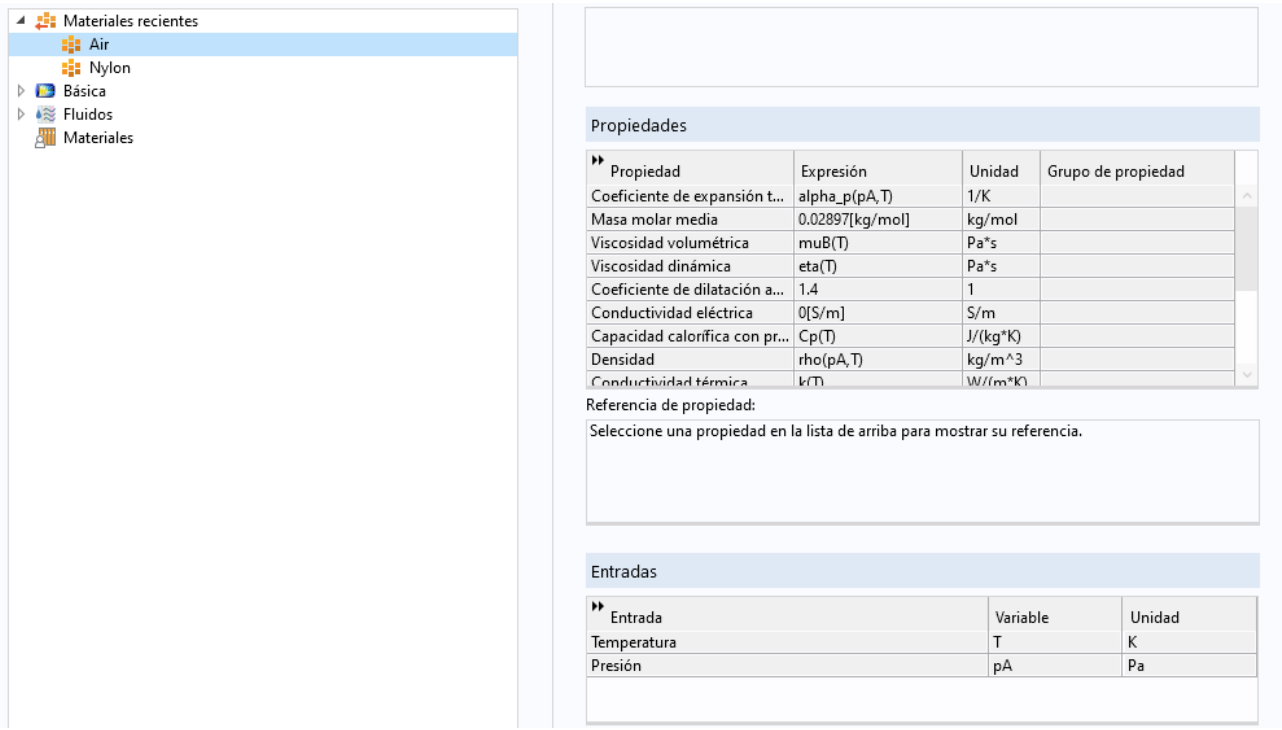


Fig.5.5 Galería de materiales de Comsol Multiphysics.

5.5. Malla

El tipo de malla a utilizar en el cálculo de la simulación puede determinar la convergencia, o no, de los resultados obtenidos. Una malla demasiado gruesa puede llevar a obtener resultados inverosímiles y una malla demasiado fina puede acarrear que los tiempos de cálculo puedan ser desorbitados o que directamente el resultado no converja. Por eso mismo, es de vital importancia conocer las características de la geometría a estudiar para poder adaptar la malla en función de esta. Afinar la malla donde la figura a estudiar sea compleja o los resultados que desean obtener en cierto punto sean críticos y hacer la malla más gruesa en aquellas zonas en las que la geometría sea simple o el resultado que se desea obtener sea trivial.

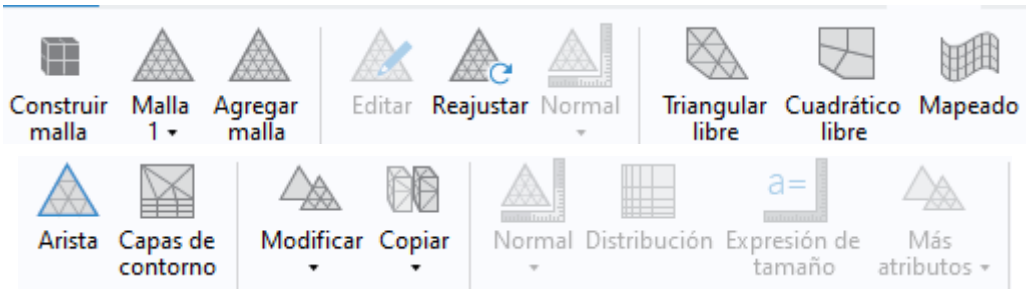


Fig.5.6. Menú de mallado de Comsol Multiphysics.

5.6. Estudio

En Comsol existen diferentes tipos de estudios. Destacan principalmente los estudios estacionaros, que su resultado no depende del tiempo o temporal, que sus resultados dependen del tiempo de estudio. Cabe destacar que, al tratarse de estudios de gran complejidad, pese a haber introducido las condiciones de contorno correctamente y haber hecho una malla aparentemente adecuada a la geometría, es posible que el estudio no llegue a converger. En estos casos se debe de cambiar el tamaño de malla hasta encontrar una solución.

5.7. Resultados

Una vez se ha completado el estudio, es el momento de analizar los resultados obtenidos. Comsol permite visualizarlos en diferentes tipos de gráficas aplicando diferentes tipos de condiciones y cortes de sección, tanto en 3D como en 2D. Además, también tiene una herramienta para la creación automática de informes técnicos de los estudios realizados.

6. Simulación de la tobera en Comsol

6.1. Dimensiones

Considerando la simetría de la tobera que se desea estudiar, se estima que el modelo dimensional más óptimo para la simulación es el modelo 2D axisimétrico.

6.2. Geometría

La geometría modelizada en SolidWorks se exporta a formato .dxf y se importa a Comsol.

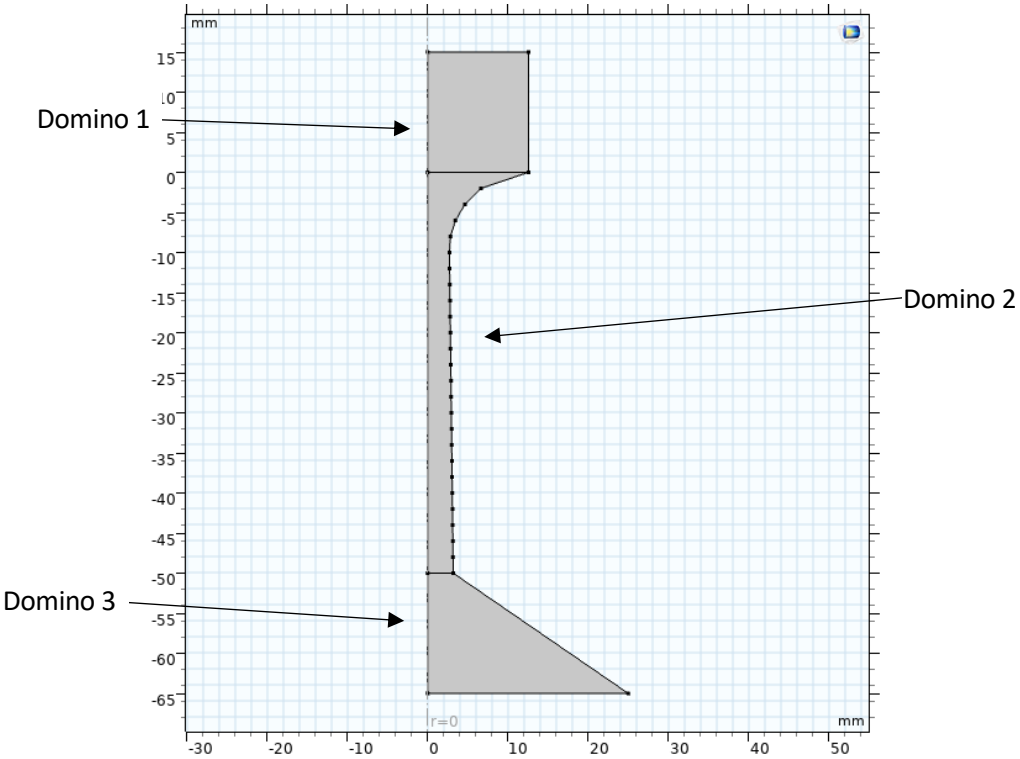


Fig.6.1 Tobera modelizada exportada a Comsol Multiphysics.

Para poder definir de manera adecuada las condiciones del estudio, el módulo y el mallado; se separa la geometría en tres dominios:

- Dominio 1: cámara de entrada
- Dominio 2: interior de la tobera
- Dominio 3: tubería de salida

Una vez importada la geometría, al estar trabajando en un modelo dimensional 2D axisimétrico, Comsol permite visualizar como sería el modelo en 3D.

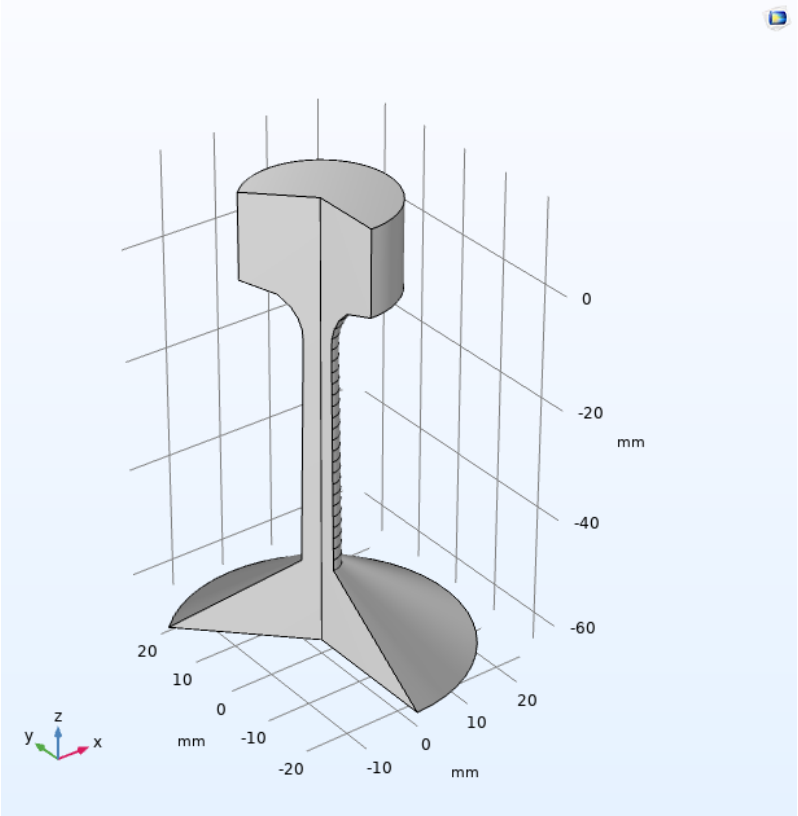


Fig.6.2. Modelo 3D de la tobera de flujo compresible.

6.3. Material

Como en el experimento en el laboratorio, el material escogido para la simulación es el aire. El material se selecciona desde la galería de materiales de Comsol y se define para todos los dominios

6.4. Módulo

Después de diversas pruebas con diversos módulos de cálculo, el seleccionado para la simulación de la tobera de flujo compresible es el módulo flujo con número de Mach alto con la opción de flujo turbulento y modelo de turbulencia k-ε.

En dicho modulo se define:

- **Fluido**: en este caso, el único material seleccionado, el aire, que, como ya se ha mencionado, está presente en todos los dominios de la geometría
- **Simetría axial**: como se selecciona el modelo 2D axisimétrico, se ha de definir el contorno de simetría por el cual revolucionara la geometría para generes la tobera real en 3D.

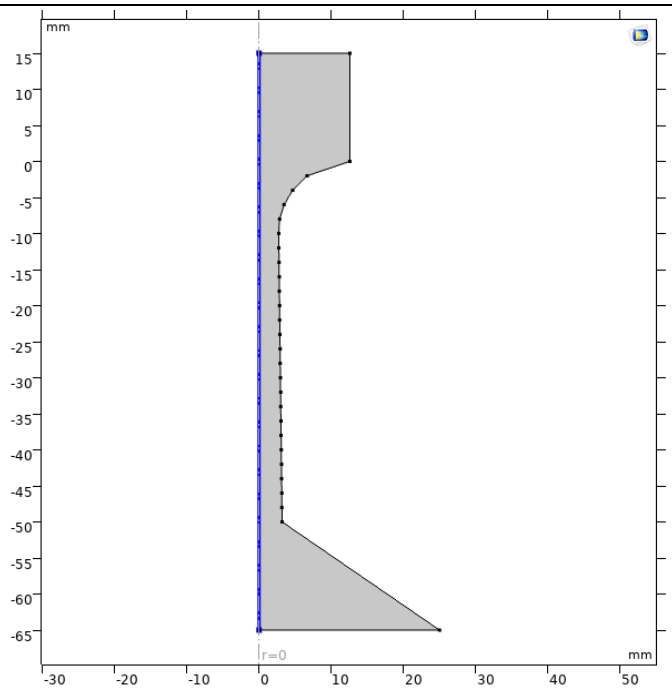


Fig.6.3. Simetría axial del modelo.

- **Paredes y aislamiento térmico**: se define los contornos del modelo que forman las paredes de la tobera y, por lo tanto, el aislamiento térmico en ellas.

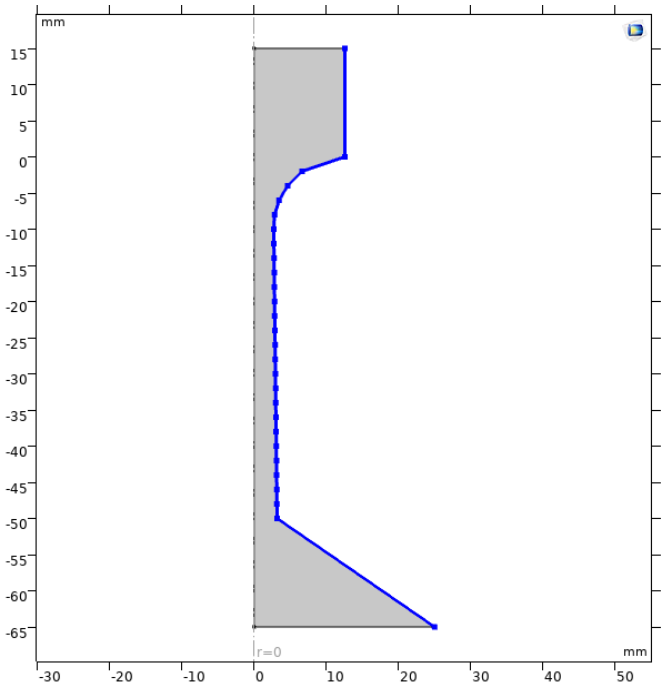


Fig.6.4. Paredes con aislamiento térmico del modelo.

- **Entrada**: se define el contorno por el cual entrará el fluido y los valores iniciales de presión, temperatura y número de Mach de este.

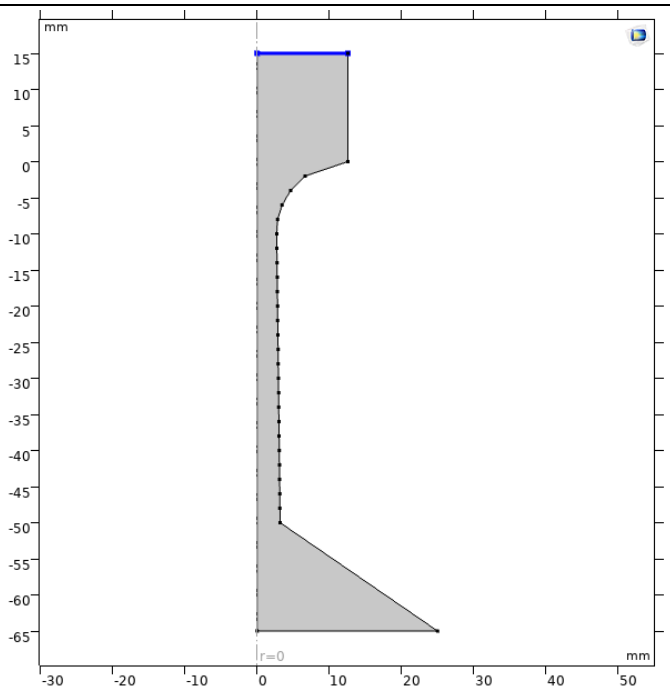


Fig.6.5. Contorno de entrada del fluido.

- **Salida**: se define el contorno por el cual saldrá el fluido, así como la presión en ese punto.

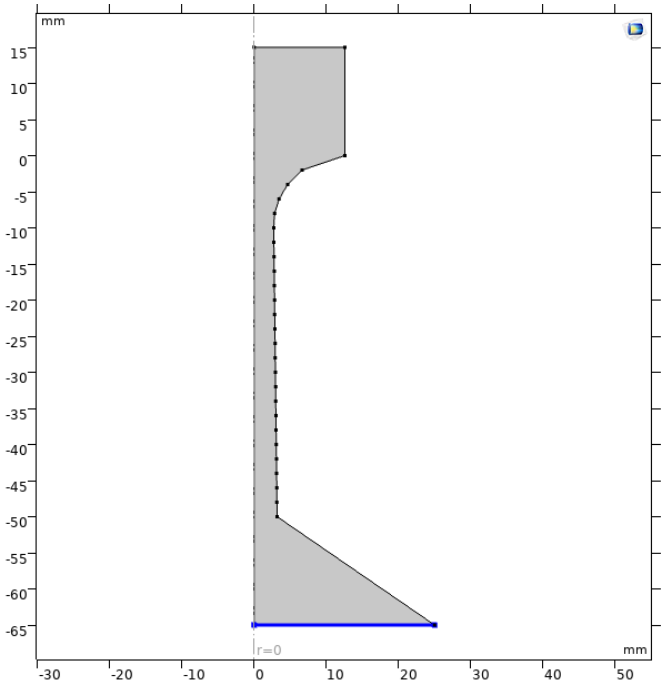


Fig.6.6. Contorno de salida del fluido.

6.5. Malla

Para el mallado se realiza un proceso iterativo en el cual se prueban distintos tipos de malla con tal de conseguir los resultados más similares a la realidad posibles.

Para mostrar este proceso iterativo se muestra la primera malla con la cual la simulación convergió y el último mallado calculado, en el cual se considera que no es necesario refinar más la malla, debido a que la mejora de la precisión obtenida no compensa el tiempo de cálculo necesario.

6.5.1. Primer mallado:

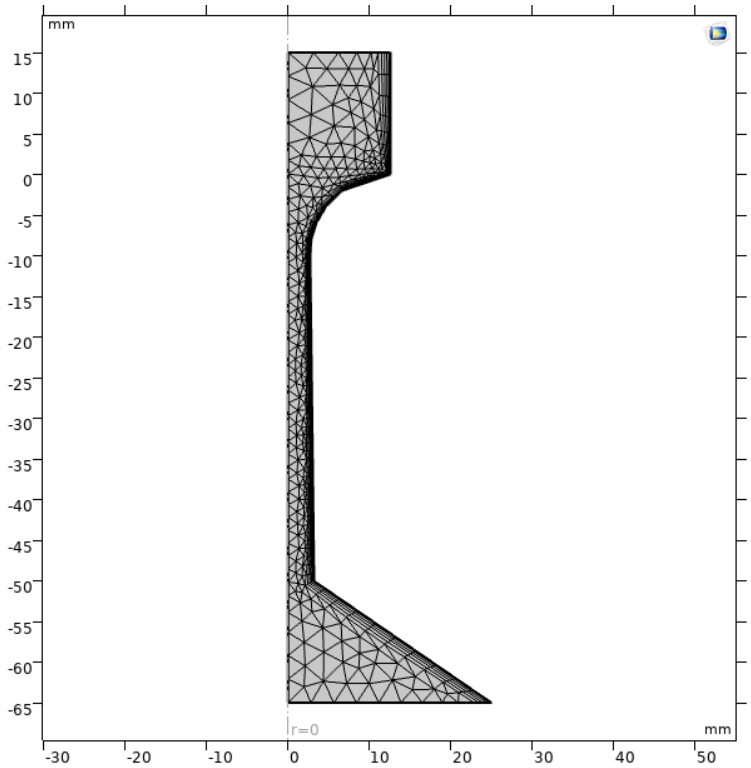


Fig.6.7. Vista del mallado de la tobera.

En este primer mallado se aplica una malla más fina en los dominios 1 y 3, y una malla extra fina en el dominio 2, debido a su criticidad. Además, se realiza un mallado de capas de contorno para poder tener en cuenta los efectos de la capa límite del flujo dentro de la tobera.

6.5.2. Mallado definitivo

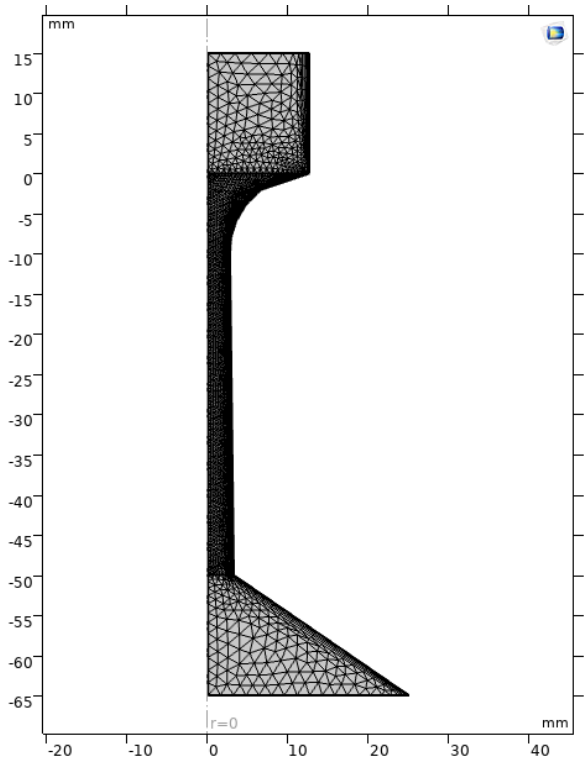


Fig.6.8. Vista del mallado definitivo de la tobera.

Como se puede observar en las *Fig. 6.9* y *6.10* el mallado en los dominios 1 y 3 es más grueso, ya que en esos dominios se esperan manos cambios en el comportamiento del flujo, es decir, no debería haber grandes cambios de presión, temperatura y velocidad. Además, son zonas de las cuales no se tienen datos experimentales, consecuentemente, no es tan critico obtener datos tan precisos para constatar la validez de la simulación.

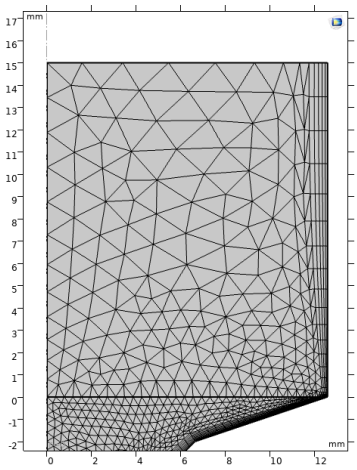


Fig.6.9. Vista del mallado del dominio 1

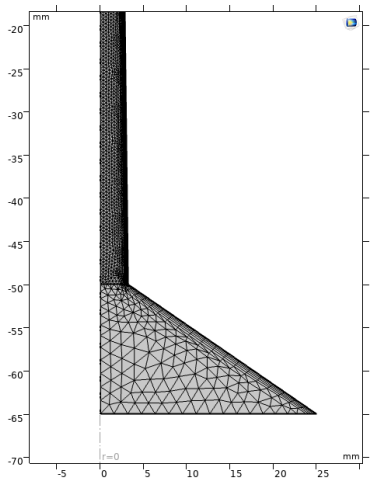


Fig.6.10. Vista del mallado del dominio 3

Por otro lado, teniendo en cuenta los cambios de velocidad que se producen dentro del interior de la tobera, en la sección dos se malla con una mallado extra fino y un refinamiento posterior, como se observa en la *Fig.6.11.*

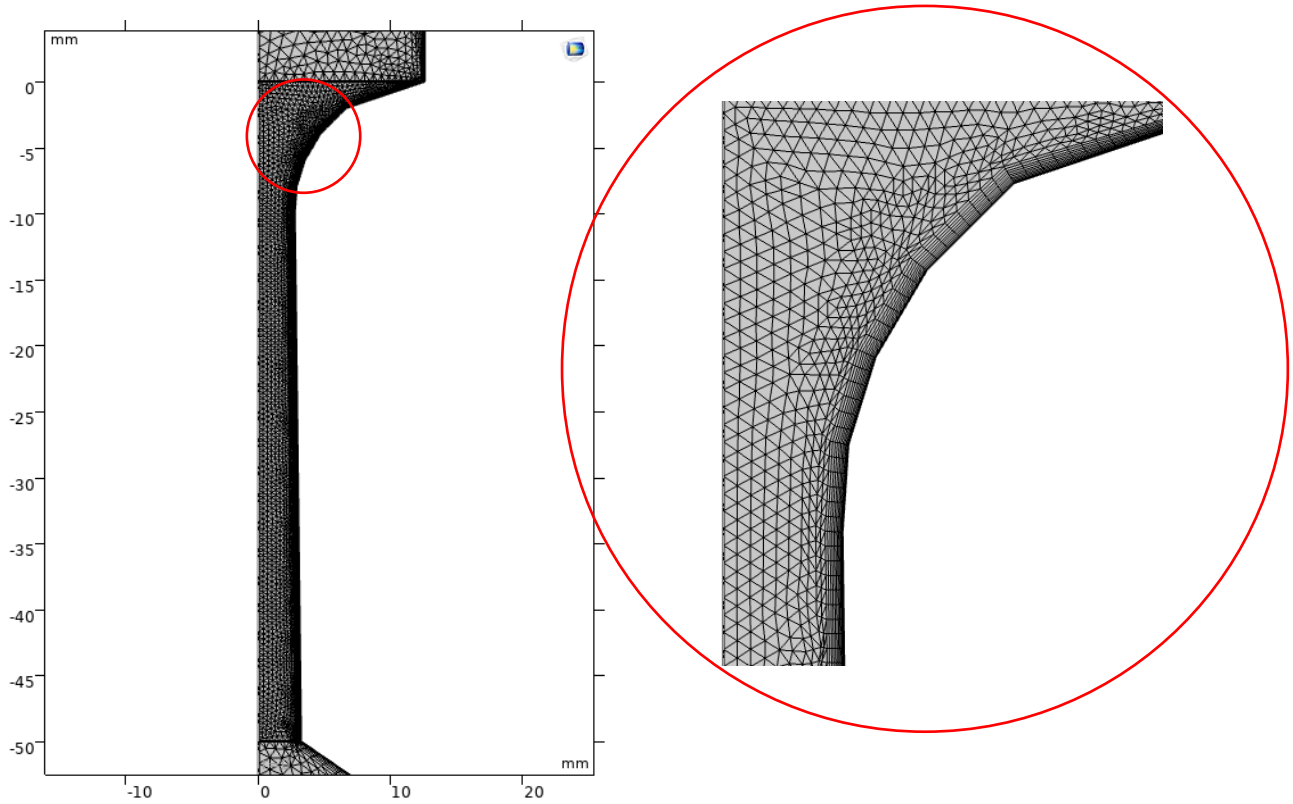


Fig.6.11. Vista del mallado del dominio 2-

Por último, como en el primer mallado, se hace una mallado de refinamiento de esquinas y un mallado de capas de contorno para tener en cuenta los efectos de la capa límite del flujo, como se muestra en las *Fig. 6.12* y *6.13.*

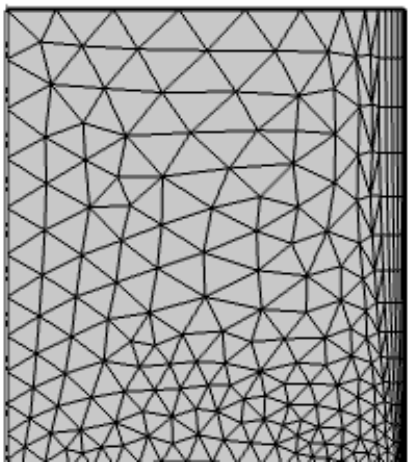


Fig.6.12. Vista al detalle del mallado de la capa límite en el dominio 1.

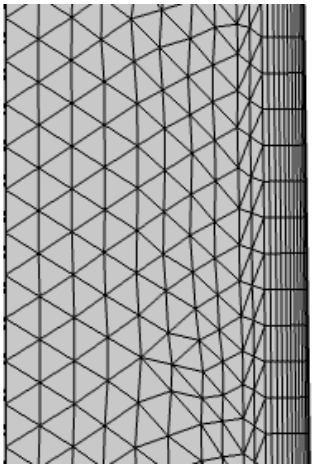


Fig.6.13. Vista al detalle del mallado de la capa límite en el dominio 2

6.6. Estudios realizados

Para verificar la modelización de la tobera se reproducen los dos experimentos realizados en el laboratorio de la EEBE en Comsol Multiphysics.

6.6.1. Experimento 1

Para la simulación del primer experimento se define:

Punto	Magnitud	Valor	Unidad
Entrada	Presión	382,3	kPa
	Temperatura	24	ºC
	Número de Mach	0	-
Salida	Presión	Barrido paramétrico: 362,3 342,3 302,3 272,3 242,3 202,3 182,3 142,3 102,3	kPa

Fig-6.14. Condiciones del experimento 1.

6.6.2. Experimento 2

Para la simulación del segundo experimento se define:

Punto	Magnitud	Valor	Unidad
Entrada	Presión	Parrido paramétrico: 382,3 372,3 372,3 372,3	kPa
	Temperatura	24	ºC
	Número de Mach	0	-
Salida	Presión	Barrido paramétrico: 312,3 192,36 102,3 162,3	kPa

Fig-6.15. Condiciones del experimento 2.

6.7. Resultados obtenidos

6.7.1. Experimento 1

En este primer experimento, el resultado final es el cálculo del caudal másico para cada valor dado de presión de salida. Estos valores de caudal experimental se grafican en función de sus respectivos valores de presión y se compraran con la curva de caudal másico teórico obtenida previamente (*Fig-3.11).*

Para comprobar los cálculos realizados por Comsol, se añaden los caudales obtenidos por el programa a dicha gráfica.

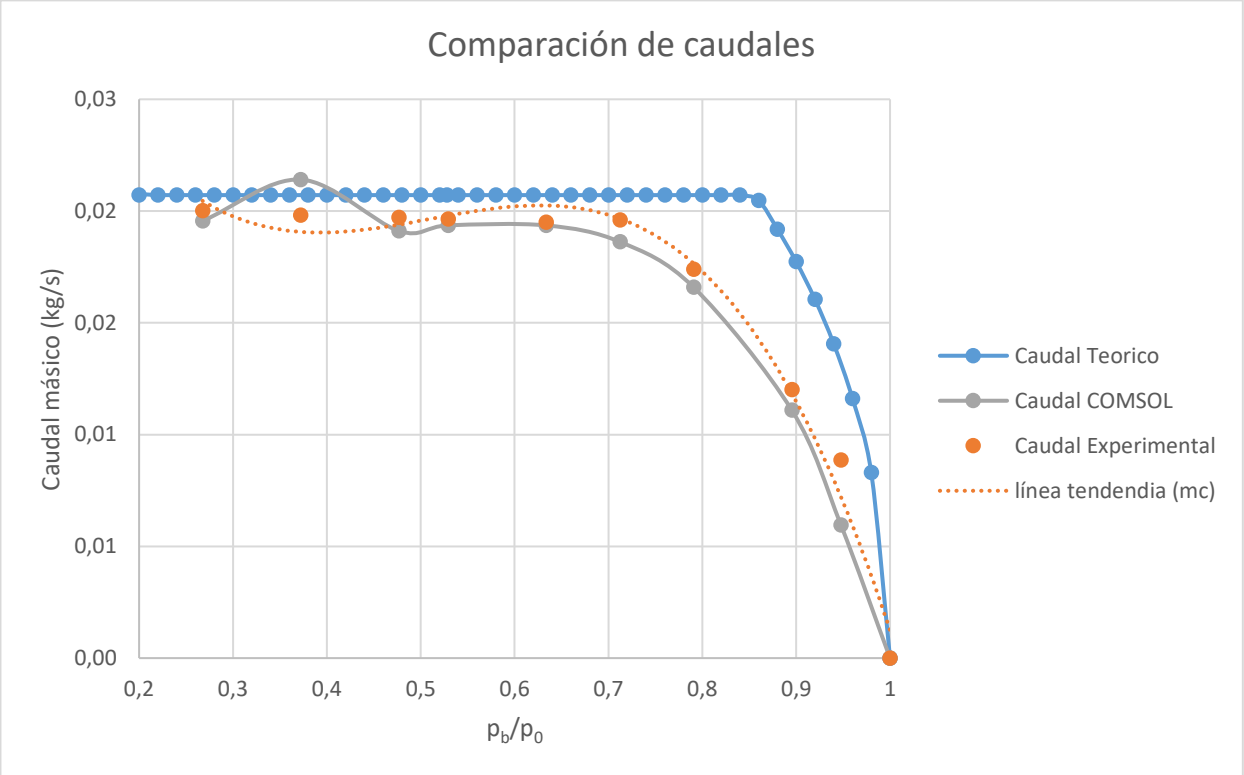


Fig.6.16. Comparación de caudal experimental, caudal teórico y caudal calculado en Comsol.

Los resultados de la simulación en Comsol son muy similares a los obtenidos experimentalmente, con un error de un 3,5%. Tan solo el punto con 0,95 p_b/p_0, que se desvía en un 30%, tiene un error mayor del esperado.

También vemos que los resultados obtenidos en Comsol se asemejan muchos más a los experimentales que a los teóricos. Este hecho parece lógico puesto que el diseño de la tobera se ha llevado a cabo para modelizar una tobera **real**, no un modelo teórico.

6.7.2. Experimento 2

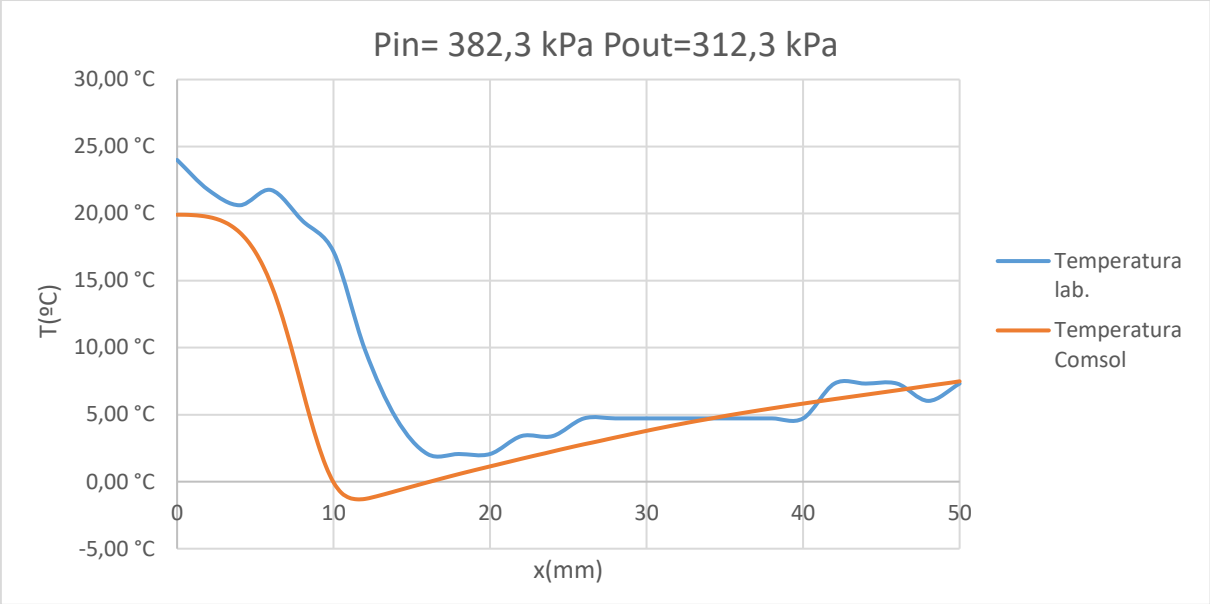


Fig.6.17. Comparación de temperatura experimental y temperatura calculada en Comsol de la serie de datos 1 del experimento 2

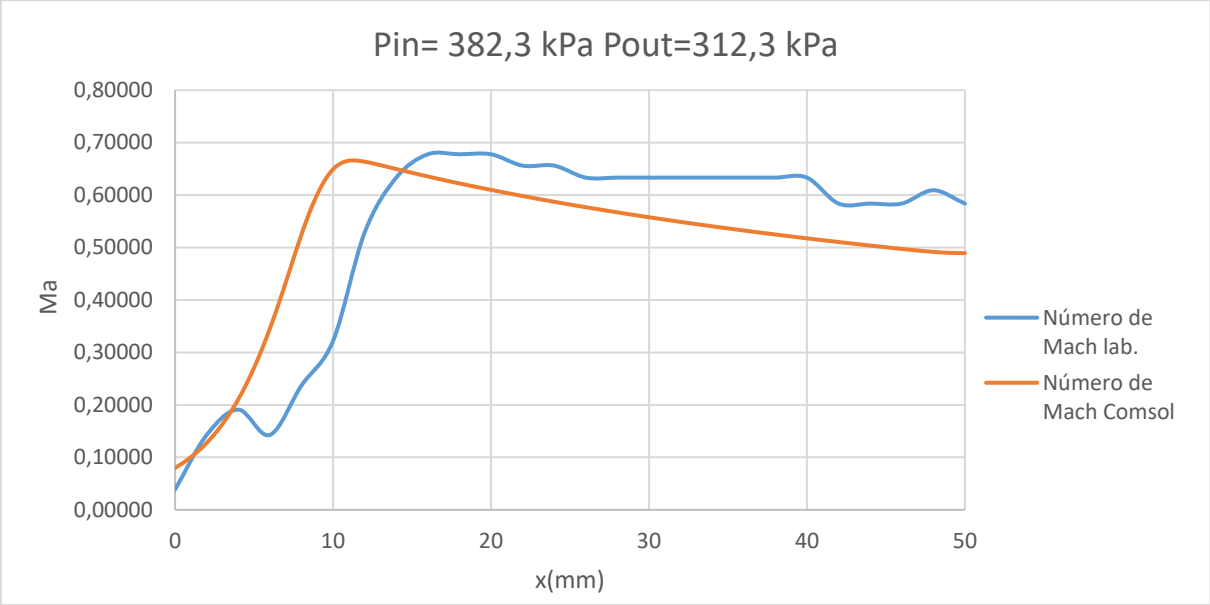


Fig.6.18. Comparación del número de Mach experimental y del número de Mach calculado en Comsol de la serie de datos 1 del experimento 2

En ambas gráficas se puede observar que tanto los datos experimentales como los calculados en Comsol son bastante similares, excepto en la zona de la garganta, donde se encuentra la mayor divergencia de resultados entre los dos casos.

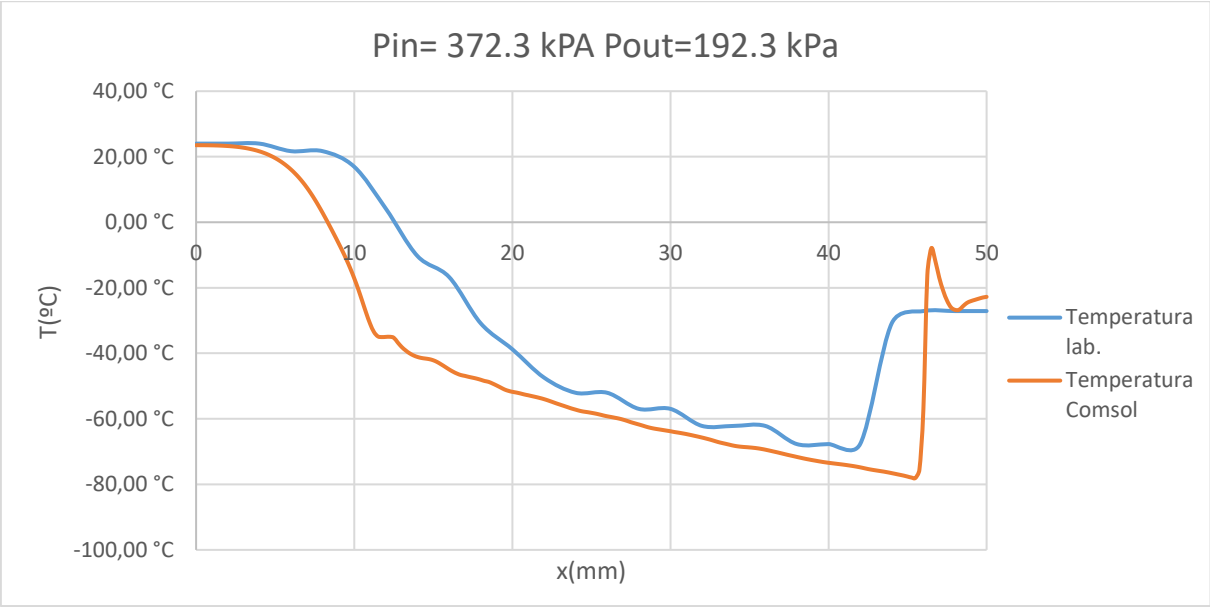


Fig.6.19. Comparación de temperatura experimental y temperatura calculada en Comsol de la serie de datos 2 del experimento 2

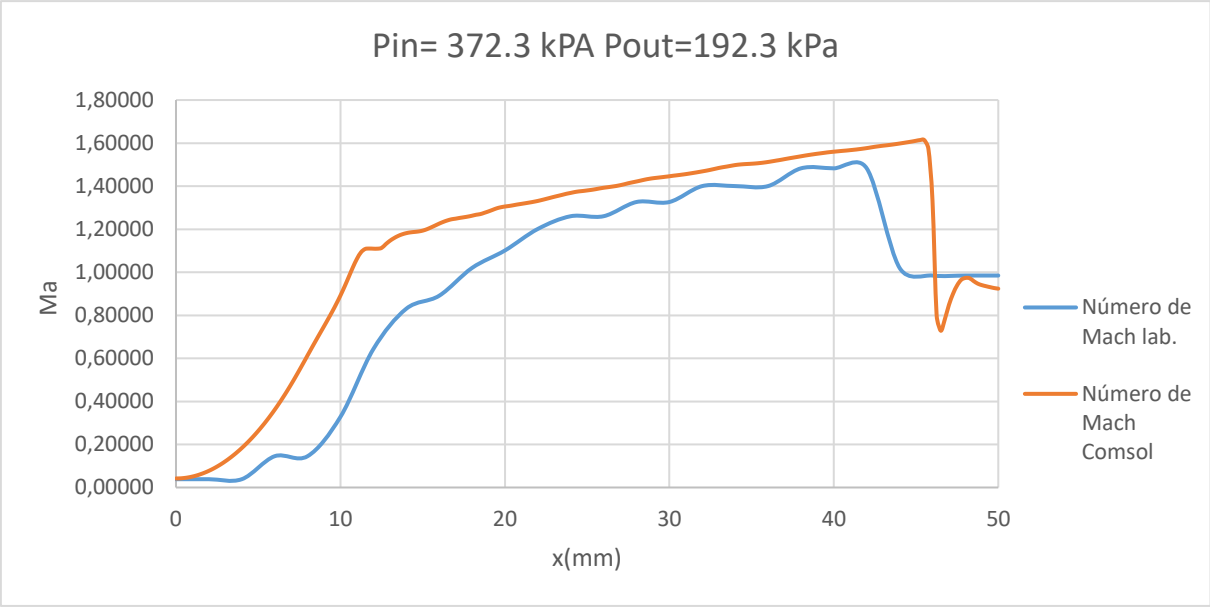


Fig.6.20. Comparación del número de Mach experimental y del número de Mach calculado en Comsol de la serie de datos 2 del experimento 2

En este conjunto de datos, las variaciones de Temperatura y de número de Mach son más pronunciadas en el modelo de Comsol que en los datos experimentales tanto en la garganta como en la salida de la tobera.

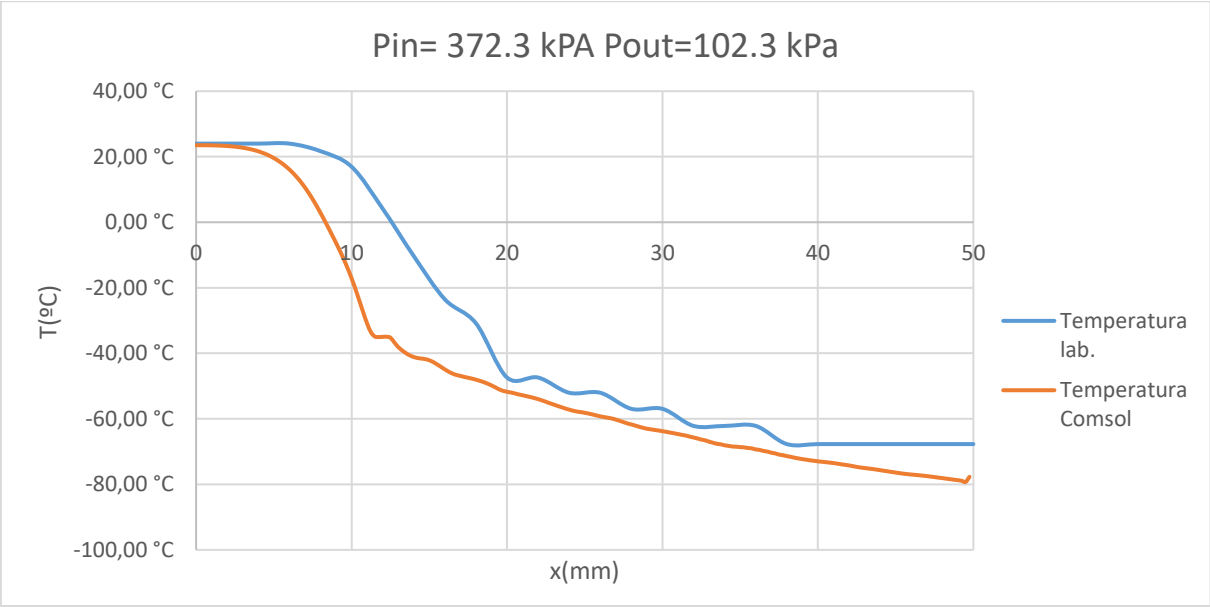


Fig.6.21. Comparación de temperatura experimental y temperatura calculada en Comsol de la serie de datos 3 del experimento 2

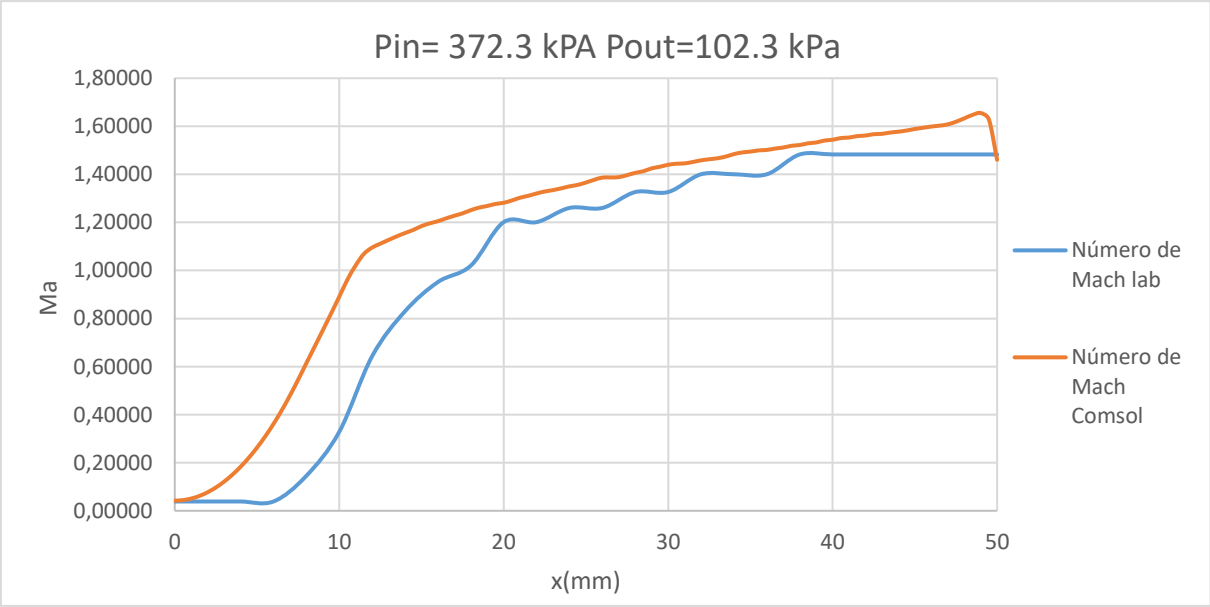


Fig.6.22. Comparación del número de Mach experimental y del número de Mach calculado en Comsol de la serie de datos 3 del experimento 2

Como en el primer caso del experimento 2, con estos datos, la simulación se comporta de manera muy similar a la tobera real, a excepción de la zona de la garganta donde se encuentran algunas diferencias ligeramente más significativas.

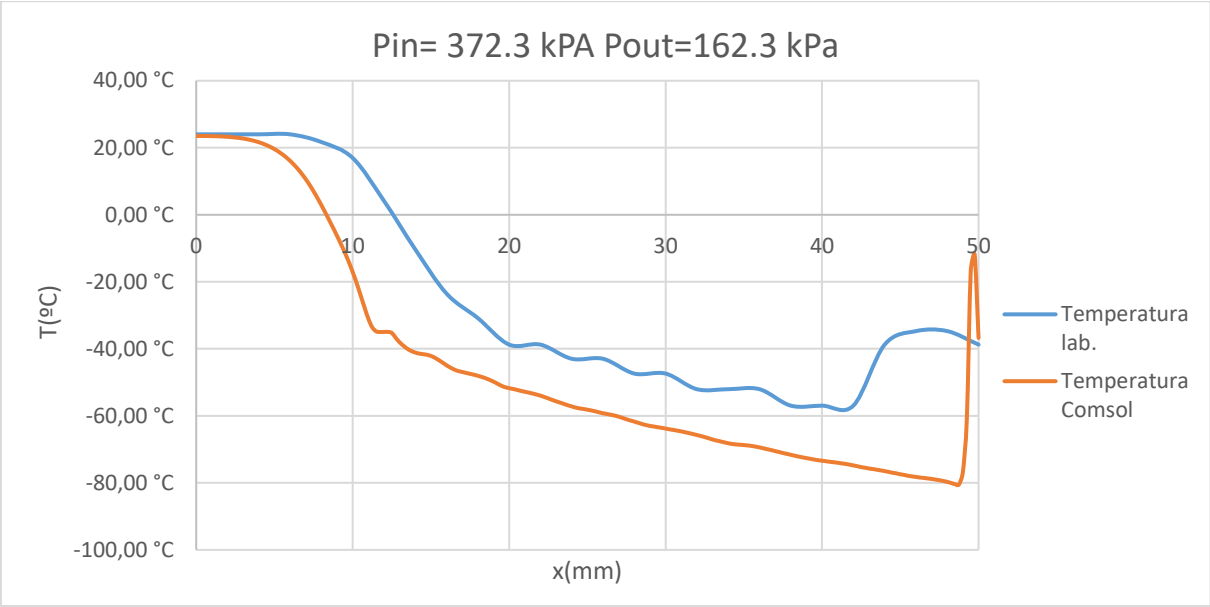


Fig.6.23. Comparación de temperatura experimental y temperatura calculada en Comsol de la serie de datos 4 del experimento 2

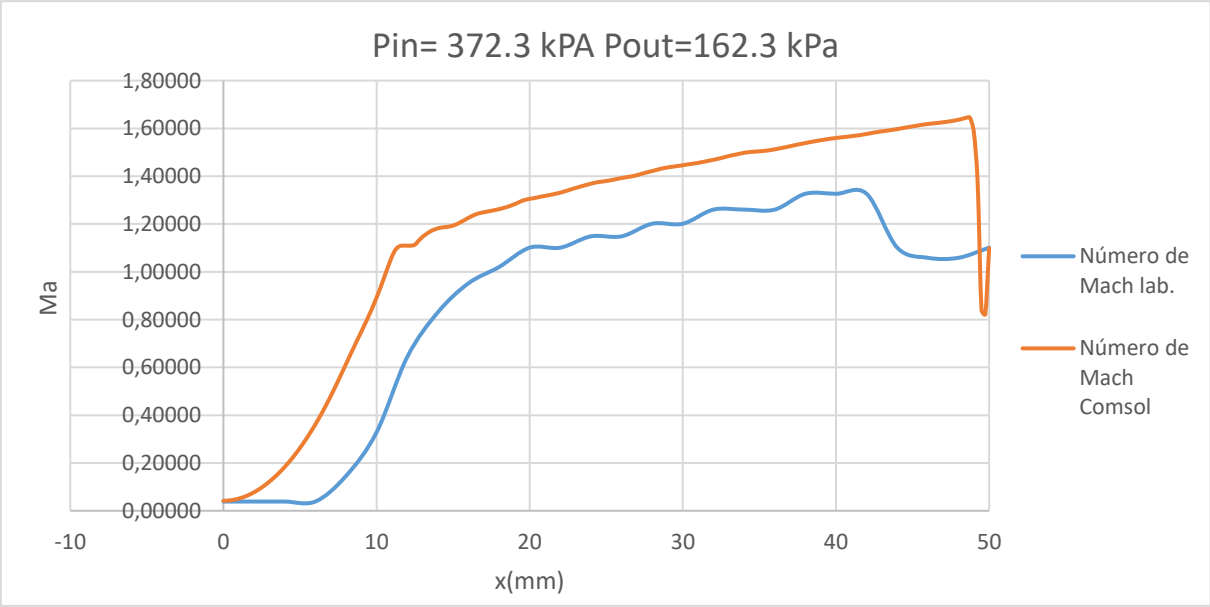


Fig.6.24. Comparación del número de Mach experimental y del número de Mach calculado en Comsol de la serie de datos 4 del experimento 2

En este último caso, como en el segundo conjunto de datos de este experimento, las variaciones tanto en la garganta como en la salida de la tobera son más pronunciadas en el modelo de Comsol que en la tobera real. En la zona intermedia de la tobera se comportan de maneras similares.

7. Conclusiones

En el presente trabajo se partió de una tobera real situada en el laboratorio de mecánica de fluidos de la EEBE y como objetivo principal se estableció modelarla mediante Comsol Multiphysics.

Para comenzar el trabajo, se realizó un recerca y estudio del marco teórico relacionado con el flujo compresible en toberas.

Más adelante se experimentó con la tobera real en el laboratorio, puesto que se consideró la mejor mamera de modelar la tobera real. Una vez realizado el experimento se trataron los datos obtenidos y se obtuvieron unos resultados experimentales que fueron considerados como válidos.

Una vez se obtuvieron los resultados experimentales, se realizó el modelado de la tobera que se experimentó en SolidWorks. En ese punto del trabajo, debido que la tobera es simétrica, se creyó oportuno modelar la tobera creando un modelo 2D axisimétrico para, así, simplificar los cálculos y optimizar los recursos necesarios para ellos.

A continuación, se exporto la tobera modelada a Comsol para su simulación. De manera previa a la simulación se tuvo que realizar el mallado de la pieza, para ello se siguió un proceso iterativo en el que mediante el ensayo y error se encontró el tipo de mallado más eficiente para el modelo que se estaba simulando.

En cuanto se logró el mallado más optimo posible, se calcularon las simulaciones y se trataron los datos obtenidos, una vez tratados se compraron con los resultados experimentales.

En el caso del experimento 1, los datos calculados en Comsol resultan ser muy similares a los obtenidos en el laboratorio. La curva de caudales obtenidos mediante simulación tiene la misma tendencia que la curva de los caudales masicos obtenidos experimentalmente.

En el caso del segundo experimento, los datos calculados en Comsol no son tan similares a los obtenidos en el laboratorio. En los casos de las presiones de salida de 312,3 kPa y 102,3 kPa, la gráfica de la temperatura y el número del Mach de Comsol es muy similar a la experimental, excepto en las zonas próximas en la garganta. En los casos de las presiones de salida de 192,3 kPa y 162,3 kPa, en la zona central de la tobera las gráficas de temperatura y presión tienen un comportamiento similar a las experimentales y, es estos casos, donde se encuentran las mayores divergencias es en la garganta y en la salida de la tobera. En todos los casos, se obtiene mayor diferencia entre los resultados experimentales y los obtenidos en Comsol en las zonas en las que el gradiente de presión y temperatura es mayor. Esto puede ser cauda de diversos motivos:

- Poca precisión en los datos experimentales recogidos. Los aparatos de media del laboratorio eran analógicos, por lo que la probabilidad de error humano en la toma de datos era alta. Por otro lado, en el laboratorio se tomó la presión de entrada como estacionaria todo el tiempo, circunstancia imposible de mantener durante todo el experimento.

- Imprecisión de los cálculos de Comsol. El modelo 2D axisimétrico es una modelo que puede obtener gran exactitud de resultados, pero que en puntos críticos podría no llegar a ser igual de exacto que el modelo 3D.
- Limitación de recursos. Es posible que algunos resultados con un mallado más preciso no hayan llegado a converger debido a la limitación de haber llevado a cabo los cálculos en un ordenador doméstico, con una capacidad de cálculo limitada.

En conclusión, se considera que, pese a alguna divergencia en el segundo experimento de los cálculos obtenidos en Comsol respecto a los experimentales, el modelado de la tobera de flujo compresible del laboratorio de mecánica de fluidos de la EEBE se ha realizado con éxito.

8. Análisis Económico

En este capítulo se expondrán los costes económicos que han supuesto realizar este trabajo.

8.1. Costes de personal

En este apartado se asume que el estudiante que realiza el trabajo ya no es estudiante y se le considera ingeniero junior y el director de proyecto, que ha supervisado el trabajo, es considerado como ingeniero senior.

El coste estimado de por hora del ingeniero junior es de 30 €/h y el del ingeniero senior es de 60 €/h.

Personal	Tarea	Precio por hora	Horas	Coste total
Ingeniero junior	Experimentación	30 €/h	10 h	300 €
	Planificación		15 h	450 €
	Investigación		20 h	600 €
	Modelización		100 h	3.000 €
	Simulación		200 h	6.000 €
	Redacción		300 h	7.500 €
Ingeniero senior	Supervisión	60 €/h	30 h	1.800 €
Coste de personal				**19.650 €**

Fig.8.1. Costes de personal.

8.2. Costes de *software*

Para el cálculo de los costes de *software* se asume que los programas han sido comprados para la realización del trabajo.

Software	Precio
Microsoft Office 365 Personal	69 €
Comsol Multiphysics	100 €
SolidWorks	947 €
Coste de *software*	**1.116 €**

Fig.8.2. Costes de software.

8.3. Costes de hardware

Para el cálculo de los costes de *hardware* se asume que se ha comprado un ordenador para la realización del trabajo. Se estima que el coste del ordenador es de **1.000 €.**

8.4. Coste total de proyecto

Tipo de coste	Coste
Personal	19.650 €
Software	1.116 € €
Hardware	1.000 €
Coste total del proyecto	**21.766 €**

Fig.8.3. Coste total de proyecto.

9. Impacto ambiental

Para el cálculo del impacto ambiental del proyecto se calculan los kilogramos de carbono generados debido a la realización de este proyecto.

Para simplificar los resultados se estima que, de media, un ordenador consume 200W, que todas las horas destinadas a este trabajo han sido utilizando un ordenador; en total 625 h de uso, y por, ultimo, que cada kWh de electricidad consumido en España emite a la atmosfera 500 g de CO_2.

$$kg_{CO_2} = 200\ W \cdot \frac{1\ kW}{1000\ W} \cdot\ 625\ h \cdot 500\ g \cdot 1\frac{kg}{1000\ g} = 62,25\ kg_{CO_2} \qquad \text{(Ec.8.1)}$$

El total de kg de CO_2 emitidos a la atmosfera debido a la realización de este proyecto es de 62,25 kg.

10. Bibliografía

[1] Frank M. White. «Mecánica de fluidos». 5ª edición. Mc Graw-Hill, 2003.

[2] Yunus A. Çengel, John M. Cimbala. «Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones». 1ª edición. Mc Graw-Hill, 2006.

[3] C. Valera. «Diseño de la tobera de un cohete con el método de las características y comparación con código CFD». Universitat Politècnica de Catalunya, 2012.

[4] A. Gràcia. «Estudio experimental y computacional del flujo en un eyector para su uso como sistema de recirculación en pilas de combustible tipo PEM». Universitat Politècnica de Catalunya, 2019.

[5] C. Villegas. «Estudio de un eyector para su uso como sistema de recirculación en pilas de combustible tipo PEM». Universitat Politècnica de Catalunya, 2022.

[6] Desconocido. «Flujo compresible en toberas». Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.

Anexo A

m_t	$m_{tcorregido}$
0,005567 kg/s	0,005567 kg/s
0,008636 kg/s	0,008636 kg/s
0,011057 kg/s	0,011057 kg/s
0,013105 kg/s	0,013105 kg/s
0,014879 kg/s	0,014879 kg/s
0,016458 kg/s	0,016458 kg/s
0,017871 kg/s	0,017871 kg/s
0,019147 kg/s	0,019147 kg/s
0,020298 kg/s	0,020298 kg/s
0,020933 kg/s	0,020713 kg/s
0,022310 kg/s	0,020713 kg/s
0,023182 kg/s	0,020713 kg/s
0,023972 kg/s	0,020713 kg/s
0,024696 kg/s	0,020713 kg/s
0,025349 kg/s	0,020713 kg/s
0,025936 kg/s	0,020713 kg/s
0,026459 kg/s	0,020713 kg/s
0,026927 kg/s	0,020713 kg/s
0,027337 kg/s	0,020713 kg/s
0,027693 kg/s	0,020713 kg/s
0,027996 kg/s	0,020713 kg/s
0,028245 kg/s	0,020713 kg/s
0,028441 kg/s	0,020713 kg/s
0,028589 kg/s	0,020713 kg/s
0,028684 kg/s	0,020713 kg/s

m_t	$m_{tcorregido}$
0,028732 kg/s	0,020713 kg/s
0,028726 kg/s	0,020713 kg/s
0,028726 kg/s	0,020713 kg/s
0,028672 kg/s	0,020713 kg/s
0,028566 kg/s	0,020713 kg/s
0,028405 kg/s	0,020713 kg/s
0,028192 kg/s	0,020713 kg/s
0,027931 kg/s	0,020713 kg/s
0,027604 kg/s	0,020713 kg/s
0,027224 kg/s	0,020713 kg/s
0,026785 kg/s	0,020713 kg/s
0,026281 kg/s	0,020713 kg/s
0,025705 kg/s	0,020713 kg/s
0,025064 kg/s	0,020713 kg/s
0,024340 kg/s	0,020713 kg/s
0,023527 kg/s	0,020713 kg/s
0,022619 kg/s	0,020713 kg/s
0,021610 kg/s	0,020713 kg/s
0,020470 kg/s	0,020470 kg/s
0,019188 kg/s	0,019188 kg/s
0,017734 kg/s	0,017734 kg/s
0,016048 kg/s	0,016048 kg/s
0,014060 kg/s	0,014060 kg/s
0,011609 kg/s	0,011609 kg/s
0,008297 kg/s	0,008297 kg/s
0,000000 kg/s	0,000000 kg/s

Anexo B

Tabla 2			
c	ψ	W	Ma
0,020	0,094	2,170	3,207
0,040	0,146	2,051	2,746
0,060	0,186	1,966	2,484
0,080	0,221	1,896	2,299
0,100	0,251	1,836	2,157
0,120	0,277	1,783	2,040
0,140	0,301	1,734	1,941
0,160	0,323	1,689	1,854
0,180	0,342	1,646	1,777
0,200	0,353	1,606	1,708
0,220	0,376	1,567	1,645
0,240	0,391	1,531	1,586
0,260	0,404	1,495	1,532
0,280	0,416	1,460	1,480
0,300	0,427	1,427	1,432
0,320	0,437	1,394	1,387
0,340	0,446	1,362	1,343
0,360	0,454	1,331	1,301
0,380	0,461	1,300	1,261
0,400	0,467	1,269	1,223
0,420	0,472	1,239	1,185
0,440	0,476	1,209	1,149
0,460	0,479	1,180	1,114
0,480	0,482	1,150	1,080

c	ψ	W	Ma
0,500	0,483	1,121	1,046
0,520	0,484	1,092	1,013
0,528	0,484	1,080	1,000
0,540	0,484	1,063	0,981
0,560	0,483	1,033	0,949
0,580	0,481	1,004	0,918
0,600	0,479	0,975	0,886
0,620	0,475	0,945	0,855
0,640	0,471	0,915	0,825
0,660	0,465	0,885	0,794
0,680	0,459	0,855	0,763
0,700	0,451	0,824	0,732
0,720	0,443	0,792	0,701
0,740	0,433	0,760	0,670
0,760	0,422	0,727	0,639
0,780	0,410	0,693	0,607
0,800	0,396	0,658	0,574
0,820	0,381	0,621	0,540
0,840	0,364	0,583	0,505
0,860	0,345	0,543	0,469
0,880	0,323	0,501	0,431
0,900	0,299	0,456	0,391
0,920	0,270	0,406	0,347
0,940	0,237	0,350	0,299
0,960	0,196	0,285	0,242
0,980	0,140	0,201	0,170

Anexo C

1.Flujo subsónico				
T	T	W	c	Ma
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
294,91 K	21,76 °C	0,3136	91,58 m/s	0,14268
293,77 K	20,62 °C	0,3362	98,19 m/s	0,19096
294,91 K	21,76 °C	0,3136	91,58 m/s	0,14268
292,62 K	19,47 °C	0,3589	104,81 m/s	0,23686
290,29 K	17,14 °C	0,4042	118,03 m/s	0,32183
283,00 K	9,85 °C	0,5401	157,72 m/s	0,52856
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
275,21 K	2,06 °C	0,6759	197,40 m/s	0,67772
275,21 K	2,06 °C	0,6759	197,40 m/s	0,67772
275,21 K	2,06 °C	0,6759	197,40 m/s	0,67772
276,55 K	3,40 °C	0,6533	190,78 m/s	0,65605
276,55 K	3,40 °C	0,6533	190,78 m/s	0,65605
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
277,87 K	4,72 °C	0,6307	184,17 m/s	0,63323
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
279,18 K	6,03 °C	0,6080	177,56 m/s	0,60915
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374
280,47 K	7,32 °C	0,5854	170,94 m/s	0,58374

2.Flujo supersónico con onda de choque				
T	T	W	c	Ma
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
294,85 K	21,70 °C	0,3148	91,93 m/s	0,14534
294,85 K	21,70 °C	0,3148	91,93 m/s	0,14534
290,10 K	16,95 °C	0,4078	119,10 m/s	0,32830
277,30 K	4,15 °C	0,6404	187,01 m/s	0,64318
262,83 K	-10,32 °C	0,8729	254,93 m/s	0,83036
256,44 K	-16,71 °C	0,9660	282,09 m/s	0,89073
242,31 K	-30,84 °C	1,1520	336,42 m/s	1,02000
234,40 K	-38,75 °C	1,2450	363,59 m/s	1,10105
225,75 K	-47,40 °C	1,3381	390,75 m/s	1,20114
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
210,99 K	-62,16 °C	1,4776	431,50 m/s	1,40026
210,99 K	-62,16 °C	1,4776	431,50 m/s	1,40026
210,99 K	-62,16 °C	1,4776	431,50 m/s	1,40026
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
242,31 K	-30,84 °C	1,1520	336,42 m/s	1,02000
246,04 K	-27,11 °C	1,1055	322,84 m/s	0,98472
246,04 K	-27,11 °C	1,1055	322,84 m/s	0,98472
246,04 K	-27,11 °C	1,1055	322,84 m/s	0,98472
246,04 K	-27,11 °C	1,1055	322,84 m/s	0,98472
246,04 K	-27,11 °C	1,1055	322,84 m/s	0,98472
246,04 K	-27,11 °C	1,1055	322,84 m/s	0,98472

3.Flujo supersónico				
T	T	W	c	Ma
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
294,85 K	21,70 °C	0,3148	91,93 m/s	0,14534
290,10 K	16,95 °C	0,4078	119,10 m/s	0,32830
277,30 K	4,15 °C	0,6404	187,01 m/s	0,64318
262,83 K	-10,32 °C	0,8729	254,93 m/s	0,83036
249,63 K	-23,52 °C	1,0590	309,26 m/s	0,95192
242,31 K	-30,84 °C	1,1520	336,42 m/s	1,02000
225,75 K	-47,40 °C	1,3381	390,75 m/s	1,20114
225,75 K	-47,40 °C	1,3381	390,75 m/s	1,20114
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
210,99 K	-62,16 °C	1,4776	431,50 m/s	1,40026
210,99 K	-62,16 °C	1,4776	431,50 m/s	1,40026
210,99 K	-62,16 °C	1,4776	431,50 m/s	1,40026
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273
205,44 K	-67,71 °C	1,5241	445,08 m/s	1,48273

4.Flujo supersónico con perturbaciones				
T	T	W	c	Ma
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
297,15 K	24,00 °C	0,2683	78,35 m/s	0,03860
294,85 K	21,70 °C	0,3148	91,93 m/s	0,14534
290,10 K	16,95 °C	0,4078	119,10 m/s	0,32830
277,30 K	4,15 °C	0,6404	187,01 m/s	0,64318
262,83 K	-10,32 °C	0,8729	254,93 m/s	0,83036
249,63 K	-23,52 °C	1,0590	309,26 m/s	0,95192
242,31 K	-30,84 °C	1,1520	336,42 m/s	1,02000
234,40 K	-38,75 °C	1,2450	363,59 m/s	1,10105
234,40 K	-38,75 °C	1,2450	363,59 m/s	1,10105
230,18 K	-42,97 °C	1,2915	377,17 m/s	1,14834
230,18 K	-42,97 °C	1,2915	377,17 m/s	1,14834
225,75 K	-47,40 °C	1,3381	390,75 m/s	1,20114
225,75 K	-47,40 °C	1,3381	390,75 m/s	1,20114
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
221,10 K	-52,05 °C	1,3846	404,33 m/s	1,26022
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
216,19 K	-56,96 °C	1,4311	417,92 m/s	1,32634
234,40 K	-38,75 °C	1,2450	363,59 m/s	1,10105
238,44 K	-34,71 °C	1,1985	350,00 m/s	1,05853
238,44 K	-34,71 °C	1,1985	350,00 m/s	1,05853
234,40 K	-38,75 °C	1,2450	363,59 m/s	1,10105
234,40 K	-38,75 °C	1,2450	363,59 m/s	1,10105
238,44 K	-34,71 °C	1,1985	350,00 m/s	1,05853

Anexo D

Toma	X (m)	A (m^2)	A/A1
7	0	0,00049646	15,49
8	0,002	0,00013871	4,33
9	0,004	0,00006782	2,12
10	0,006	0,00003787	1,18
11	0,008	0,00002554	0,80
12	0,01	0,00002322	0,72
13	0,012	0,00002363	0,74
14	0,014	0,00002405	0,75
15	0,016	0,00002447	0,76
16	0,018	0,0000249	0,78
17	0,02	0,00002532	0,79
18	0,022	0,00002575	0,80
19	0,024	0,00002619	0,82
20	0,026	0,00002662	0,83
21	0,028	0,00002706	0,84
22	0,03	0,0000275	0,86
23	0,032	0,00002795	0,87
24	0,034	0,00002839	0,89
25	0,036	0,00002884	0,90
26	0,038	0,00002929	0,91
27	0,04	0,00002975	0,93
28	0,042	0,0000302	0,94
29	0,044	0,00003066	0,96
30	0,046	0,00003113	0,97
31	0,048	0,00003159	0,99
32	0,05	0,00003206	1,00