



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Proyecto de Innovación
Convocatoria 2024/2025
Nº Proyecto 507

Introducción a la dinámica de fluidos computacional en el grado de ingeniería
química UCM mediante el aprendizaje basado en investigación

Responsable del Proyecto: Jaime Carbajo Olleros

Facultad de Ciencias Químicas
Departamento de Ingeniería Química y de Materiales

1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

Como principal objetivo, en este Proyecto de Innovación Educativa (PIE) se propuso la introducción del manejo de software basado en Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en las competencias del grado de Ingeniería Química de la UCM, en particular, en las asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica del grado de Ingeniería Química (GIQ), asignaturas impartidas en el segundo y tercer curso de la titulación, respectivamente. Y es que, a pesar de que los programas docentes de estas asignaturas llevan muchos cursos asentados en el grado y recogen los pilares fundamentales de estas materias, no abordan por el momento el empleo de software basado en CFD, cuyo uso se ha ido generalizado en los últimos años en la práctica profesional convirtiéndose en herramientas fundamentales en el campo de la Ingeniería química. En este sentido, el software basado en CFD (Comsol-Multiphysics, Ansys Fluent, etc.) permite predecir el comportamiento complejo de la mecánica de fluidos mediante la resolución de las ecuaciones fundamentales de conservación de masa, energía y cantidad de movimiento, y su uso es ya un requisito indispensable en las competencias del ingeniero químico.

Por todo ello, en este PIE, se planteó la implementación de Casos Prácticos mediante el uso de Aplicaciones creadas en Comsol MultiPhysics (Comsol-MP) que permitieran a los alumnos afianzar, por una parte, conceptos fundamentales más o menos complejos que son tratados en las asignaturas de Ingeniería Térmica (3º GIQ) y Mecánica de Fluidos (2º GIQ) y, por otra, introducir a los alumnos en el uso de herramientas CFD para resolver problemas de mecánica de fluidos y transferencia de calor. Como principal metodología, se ha aplicado el Aprendizaje Basado en Investigación (ABI) para incorporar el manejo básico de software CFD mediante la resolución de casos prácticos que logren una actualización y mejora significativa de la formación de los estudiantes del GIQ, y una mejora del proceso enseñanza-aprendizaje en el currículo formativo del Ingeniero Químico. La introducción de los casos prácticos no pretende lograr un manejo avanzado en software basado en CFD (lo que requeriría la impartición de un curso específico destinado a esta materia), pero sí un contacto introductorio con los módulos de CFD y de Transferencia de Calor de Comsol-MP, de mucha utilidad y cada vez más demandados en los entornos laborales del ámbito de la ingeniería química. Como resultado se espera que, una vez egresados, los estudiantes conozcan los potenciales usos y aplicaciones de estas herramientas y que las puedan aplicar en el desempeño de su labor profesional.

Con estos objetivos, se planteó diseñar distintas Guías de Resolución para cada uno de los casos prácticos con los que los alumnos/as podrán resolver retos o problemas planteados a través de la utilización directa y autónoma del software (Comsol Multiphysics v.5.6) en el Aula de Informática. Estas Guías implementan la metodología de Aprendizaje Basado en Investigación (Research Based Learning) y recogen el planteamiento de problemas o retos relacionados con el CFD que incluyan casos reales de análisis y solución para generar conocimientos a través de la experiencia directa de los alumnos/as con la aplicación.

Por tanto, el desarrollo de los Casos Prácticos propuestos en este PIE pretende que los estudiantes logren los siguientes objetivos específicos:

- Comprobar la veracidad de una hipótesis relacionada con CFD mediante metodologías de aprendizaje basado en problemas o retos.

- Conocer la interfaz de un simulador basado en CFD como ComsolMP y relacionar la influencia de las variables que gobiernan el transporte de cantidad de movimiento, cantidad de energía y calor en distintos dispositivos.
- Comprender y aplicar las ecuaciones de conservación de materia y energía y su resolución mediante la visualización de movimiento de fluido y flujos de calor en diferentes elementos, tales como tuberías, toberas, cuerpos sólidos, etc.
- Realizar estudios de sensibilidad y cambios de variables de forma rápida en distintos dispositivos.
- Mejorar el grado de motivación en el proceso de aprendizaje e incentivar el trabajo autónomo y en equipo.
- Adquirir nuevas competencias relativas al empleo de simuladores profesionales, cada vez más utilizados y demandados en el ámbito de la ingeniería química.

Así mismo, se pretende:

- Mejorar y adaptar en currículum de los egresados del GIQ.
- Fomentar el trabajo colaborativo de miembros del PDI, PAS y estudiantes de la UCM para la consecución de un proyecto conjunto.

Finalmente, se espera introducir los Casos Prácticos preparados en este PIE como contenido adicional a través del espacio reservado en el Campus Virtual destinado a las asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica, de manera que los alumnos/as puedan resolver de forma voluntaria a modo de prueba piloto cada caso en el presente curso 2025-2026. Si los resultados son satisfactorios, se propondrá a los docentes responsables de las asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica incorporar estos contenidos a las Guías Docentes en el próximo el curso 2026-2027.

2. Objetivos alcanzados

La ejecución de las tareas propuestas en PIE ha conducido a lograr buena parte de los objetivos inicialmente propuestos, entre los que cabe destacar los siguientes:

- Se han elaborado 4 Casos Prácticos que serán presentados como material adicional con sus correspondientes Guías Prácticas en el Campus Virtual de las asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica, impartidas en el segundo y tercer curso del grado de Ingeniería Química de la UCM, respectivamente.
- Los materiales propuestos permitirán a los alumnos/as del GIQ tomar un primer contacto con el software COMSOL-MP siguiendo las pautas del Aprendizaje Basado en Investigación.
- El diseño de los casos prácticos permitirá reforzar aspectos concretos de las asignaturas citadas, como son las transformaciones de energía en un flujo compresible y no compresible, afianzando contenidos impartidos como son presión de Laval, definición de tobera, efectos de la presión exterior en toberas ampliadas y convergentes, ondas de choque o el cálculo del flujo calor y perfil de temperaturas en sólidos, entre otros.
- De cara a la introducción de los casos prácticos a los alumnos/as del GIQ, se propondrá la inclusión de este contenido en la Guías Docentes de las

asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica en el próximo curso 2026-2027 o en los Laboratorios de Prácticas de estas asignaturas.

- Los resultados alcanzados en este PIE son consistentes con 2 de las líneas preferentes de la convocatoria Innova-Docencia 2023-2024 que recoge, entre otras prioridades, la “Innovación en recursos educativos basados en competencias digitales” y el desarrollo de “Propuestas metodológicas que puedan incorporarse a la memoria del título, según se establece en el RD 822/21” que incluye entre otras “aprendizaje basado en el trabajo por proyectos, en la resolución de problemas o casos prácticos y trabajo colaborativo”.

3. Metodología Empleada en el Proyecto.

Para elaborar los Casos Prácticos y las Guías de Resolución en este PIE se han aplicado metodologías basadas en el Aprendizaje Basado en Investigación, y se han seguido las siguientes etapas:

1. Definición de los objetivos y alcance de los Casos Prácticos: Se definieron inicialmente de acuerdo con los objetivos de aprendizaje de las asignaturas involucradas (Mecánica de Fluidos, Ingeniería Térmica) 4 casos prácticos: 1 dirigido al intercambio de calor por conducción en sólidos, 1 caso práctico al flujo de fluidos no compresible y 2 casos prácticos al flujo de fluidos compresible.
2. Selección del módulo e introducción de la geometría de objetos: Una vez definidos los casos, se procedió a la selección del módulo de la física de flujo fluido o transmisión de calor en cada caso práctico en Comsol-MPV5.6 (transferencia de calor en sólidos, flujo de fluidos turbulento, flujo de fluidos con elevado número de Mach, etc.), y el tipo de estudio (temporal o estacionario). Así mismo, se procedió a definir la geometría, dimensionamiento y mallado de los distintos dispositivos diseñados para cada uno de los cuatro casos prácticos (venturímetro 2D, Tobera Convergente 2D, Tobera Convergente-divergente 2D, y cuerpo cilíndrico 3D) mediante la interfaz de Comsol-MP.
3. Definición de condiciones de contorno y material: Para la resolución inicial de cada uno de los casos prácticos resulta esencial la determinación de las condiciones en las que se va a realizar un estudio. Definir condiciones de contorno (entrada -salida) en cada geometría y, en su caso, el aislamiento térmico o no del objeto de estudio, velocidad, la temperatura, presión de entrada. Así mismo, se definió el material empleando para ello la galería de materiales de Comsol-MP.
4. Estudio y simulación de los resultados: Una vez definidas las condiciones de contorno se calculó una primera solución y se seleccionaron los distintos gráficos de respuesta (superficies o curvas de nivel con las variables estudiadas).
5. Elaboración de las Guías de Aplicación: Se elaboraron 4 breves guías prácticas para poder resolver de forma autónoma cada uno de los 4 casos prácticos. En estas guías se ha incluido un breve fundamento teórico para cada caso práctico, una descripción de los pasos a dar para definir el módulo, la geometría, las condiciones de contorno iniciales y el cálculo de cada una de las simulaciones propuesta y, finalmente, se proponen un conjunto de cuestiones que los estudiantes deben ir resolviendo de forma autónoma con distintas simulaciones para lo que deben ir modificando las condiciones en la propia aplicación de Comsol-MP.

6. Retroalimentación de los estudiantes: Los casos prácticos elaborados fueron testados por los distintos estudiantes de grado y de doctorado participantes de este PIE con el fin de recabar su opinión y recibir retroalimentación, lo que ha permitido hacer mejoras y adaptaciones en las Guías Prácticas para cada uno de los 4 casos prácticos planteados.
7. Implantación de los Casos Prácticos en el programa docente: Durante el curso 2025-2026 se presentarán los casos prácticos como contenido adicional en el espacio del Campus Virtual dedicado a las asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica para que sean voluntariamente resueltos por los alumnos/as. Se propondrá a los docentes responsables incorporar estos contenidos a las Guías Docentes de las asignaturas de Mecánica de Fluidos e Ingeniería Térmica en el próximo el curso 2026-2027.

4. Recursos Humanos

Este PIE ha sido ejecutado por un equipo formado por 8 profesores, 1 miembro del Personal de Administración y Servicios (PAS) y 10 estudiantes del Grado en Ingeniería Química/MásterIQ e investigadores predoctorales. Los docentes participantes en este proyecto han sido los responsables de liderar el diseño conceptual de los casos prácticos. También ha participado 1 investigador postdoctoral en estas labores, Andrés Cañada.

2 catedráticos: Juan García Rodríguez y José Antonio Delgado Dobladez. 3 Profesores Titulares: Vicente Ismael Águeda Maté, Marcos Larriba Martínez, Silvia Álvarez Torrellas. 3 Profesores Ayudante Doctor: María Martín Martínez, Jaime Carbajo Olleros y Adriana Souza Olivera.

Además, los miembros del PDI han coordinado la labor del resto de miembros participantes en el proyecto, que forman parte del PAS y del colectivo de estudiantes. En este proyecto ha participado en el equipo de trabajo un miembro del PTGAS (María Cristina Peinado Serrano), y un buen número de investigadores predoctorales (Luis Alejandro Enríquez Loyza, Diego Huber, Diego Martín, y Eva Portillo, Pablo Suárez, Alejandro Pinzolas) y estudiantes de último curso de GIQ/MIQ (Eduardo Funes, Diego Galeote, Jing Lin), que han sido los encargados de la etapa fundamental de evaluar las Guías Prácticas y realizar los casos prácticos para proponer mejoras a los materiales docentes finales.

5. Desarrollo de Actividades / anexos

El desarrollo de los casos prácticos fue llevado a cabo empleando COMSOL MULTIPHYSICS en su versión 5.6. Para cada uno de los casos prácticos se elaboró una guía docente incluyendo una breve introducción de los fundamentos teóricos y la metodología a seguir para resolver cada una de las cuestiones planteadas de forma autónoma siguiendo los principios del Aprendizaje Basado en Investigación:

CASO 1. Flujo no compresible. Tubo de Venturi

El objetivo de este primer caso práctico fue el estudio de las transformaciones de energía mecánica que experimenta un fluido NO compresible en un Tubo de Venturi y que están regidas por la Ecuación de Bernoulli. Para la definición del modelo se empleó Flujo turbulento, $k-\epsilon$. La geometría 2D del venturímetro se realizó creando una geometría

rectangular de 0,28x0,1m y aplicando una partición por diferencia con 2 elipses de 0,08 x 0,03 m, dando como lugar una sección de entrada y salida de 0,1 m de diámetro y una sección en la garganta del dispositivo de 0,03 m (ver malla Fig.1).

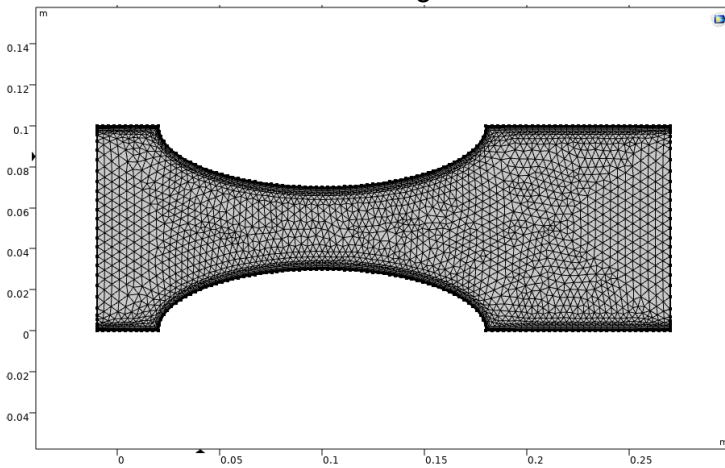
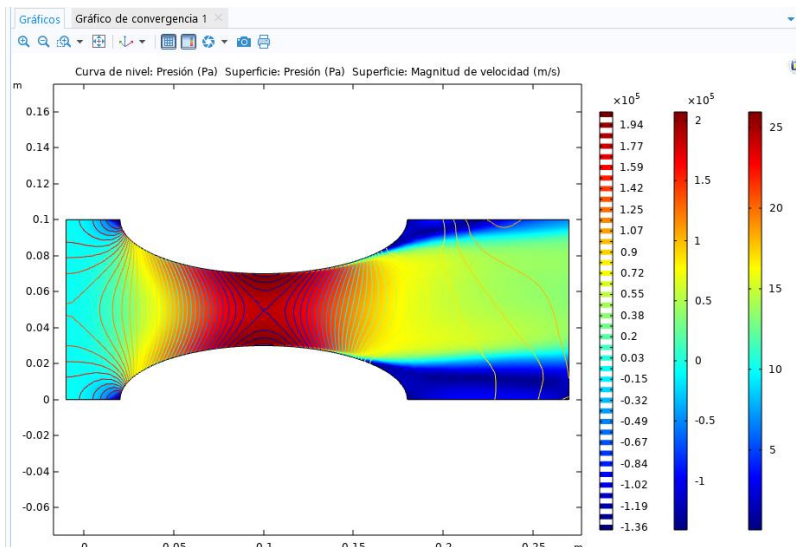


Fig. 1

Como fluido modelo se seleccionó *water,liquid* en la biblioteca de materiales de la aplicación y se definieron las condiciones de contorno para un primer cálculo (Inlet $V_0 = 10$ m/s, $T_0=298$ K, Outlet: $P_1=101325$ Pa) como condición de partida.

A partir de la primera solución (ver Fig. 2) se propone a los alumnos/as la modificación de las condiciones de contorno para discutir las transformaciones de la energía mecánica analizando las diferencias de presión existente entre entrada y salida, la



velocidad y su correlación con los principios de conservación de la energía mecánica, el principio de continuidad y el estudio de las pérdidas de energía correspondientes en el Venturi.

Fig.2

Para este primer caso práctico se diseñó también una instalación experimental en el laboratorio donde se pudo contrastar los resultados simulados en la

aplicación con los observados en el laboratorio a través de las medidas realizadas en diferentes puntos de toma de presión del tubo de Venturi utilizando para ello manómetros diferenciales, con los que se pudo medir la presión a lo largo del dispositivo a distintos caudales y analizar las transformaciones de la energía mecánica en cada caso.

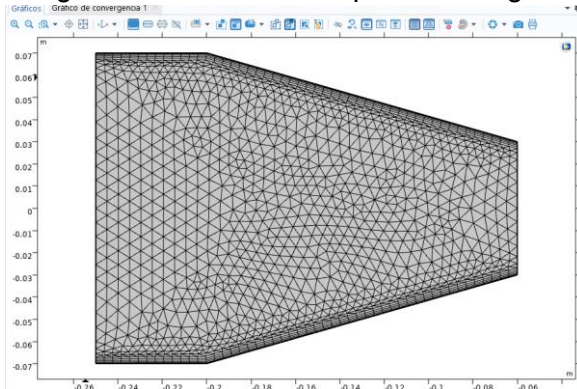
CASO 2. Flujo compresible. Tobera convergente

El objetivo del segundo y tercer caso práctico ha sido el estudio de las transformaciones de energía mecánica y energía total que experimenta un gas compresible, así como comprender los efectos de la compresibilidad (con cambios significativos de densidad) en una tobera convergente y una tobera convergente-divergente.

Para ello, se ha diseñado en este segundo caso práctico una tobera convergente (boquilla) para acelerar a velocidades sónicas un gas compresible como el aire desde un depósito en reposo (en condiciones de estancamiento). Este caso práctico permitirá además identificar el bloqueo de una tobera convergente, producido cuando la presión

exterior a la salida de la tobera alcanza la presión crítica de Laval, alcanzándose así el caudal másico máximo. La correlación de los resultados obtenidos con la aplicación efecto de la compresibilidad, permitirá a los alumnos/as analizar las ecuaciones de continuidad, conservación de la materia y energía mecánica aplicando un modelo de flujo isentrópico adiabático y reversible (asumiendo ausencia de pérdidas por rozamiento). Con este objetivo, se diseñó en este segundo caso práctico una boquilla (tobera convergente) y se empleó un modelo de flujo con número de Mach alto, $k-\epsilon$ (hmnf) en la aplicación de Comsol-MP.

La geometría 2D de la boquilla convergente permitió simular el aceleramiento de un gas

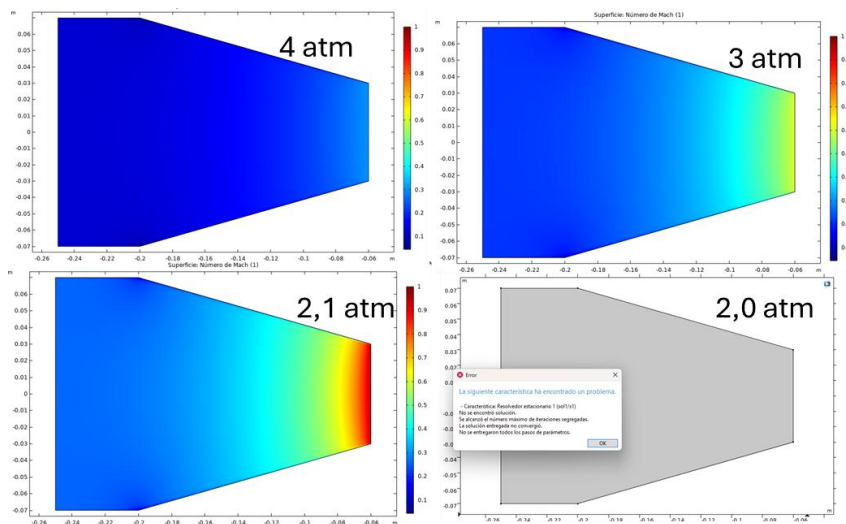


en reposo en condiciones de estancamiento en un depósito acoplado a una boquilla convergente cónica con un diámetro de entrada de 0,14 m y sección en la de salida (garganta) de 0,08 m de diámetro (ver malla en la Fig. 3).

Fig.3

Como fluido compresible se escogió aire en la biblioteca de la aplicación (air, gas: $\gamma=1,4$, ideal gas), y se definieron como

valores iniciales de contorno para una primera solución las siguientes condiciones en la entrada (Inlet $V_0 = 0$ m/s (condiciones de estancamiento), $T_0=300K$, $P_0=5atm$), y aislamiento térmico en pared para simular modelo de flujo adiabático, proponiendo una presión de salida inicialmente de 4 atmósferas. (Outlet: $P_2=4atm$). A partir de esa primera solución, se propone a los alumnos/as la modificación de las condiciones de contorno para ir incrementando la fuerza impulsora (diferencia de presión existente entre el depósito y salida), resolviéndose los perfiles de velocidad y el número de Mach de



acuerdo con los principios de conservación de la energía mecánica, el principio de continuidad y las transformaciones de la energía total.

Fig.4

En las distintas soluciones los alumnos/as podrán observar la transformación de

la entalpía (temperatura) en energía cinética (velocidad) progresivamente, hasta alcanzarse el bloqueo de la tobera a una presión exterior próxima a 2 atm (P_{Laval}), a partir de la cual, cualquier presión inferior no tiene solución en COMSOL-MP, de lo cual deben deducir que se ha producido el bloqueo y se ha alcanzado el límite a $Mach=1$ como predice la teoría para una sección convergente limitada por la presión de Laval (ver solución para el número de Mach a diferentes presiones exteriores, Fig 4).

CASO 3. Flujo compresible. Tobera convergente-divergente (ampliada)

El objetivo del tercer caso práctico, en línea con el segundo, es el estudio de las transformaciones de energía mecánica y energía total que experimenta un gas compresible en una tobera, en particular, comprender los efectos de la compresibilidad en una tobera convergente-divergente (ampliada). Para ello se han diseñado una tobera ampliada, dispositivo que permite acelerar a velocidades supersónicas un gas ($Mach > 1$). Se podrá también observar la aparición de ondas choques, el bloqueo de la tobera, y el valor de la presión de diseño en el exterior para el dispositivo diseñado.

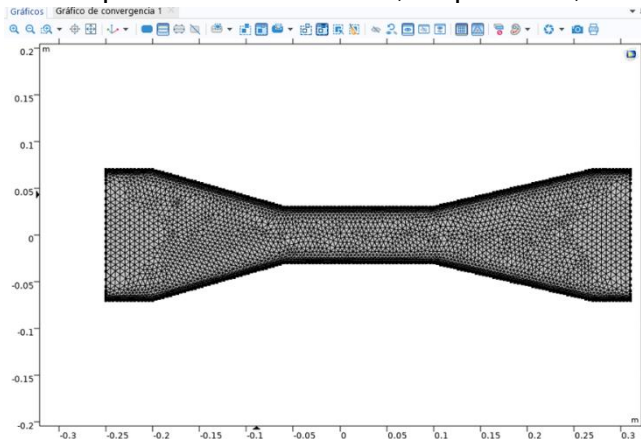


Fig.5

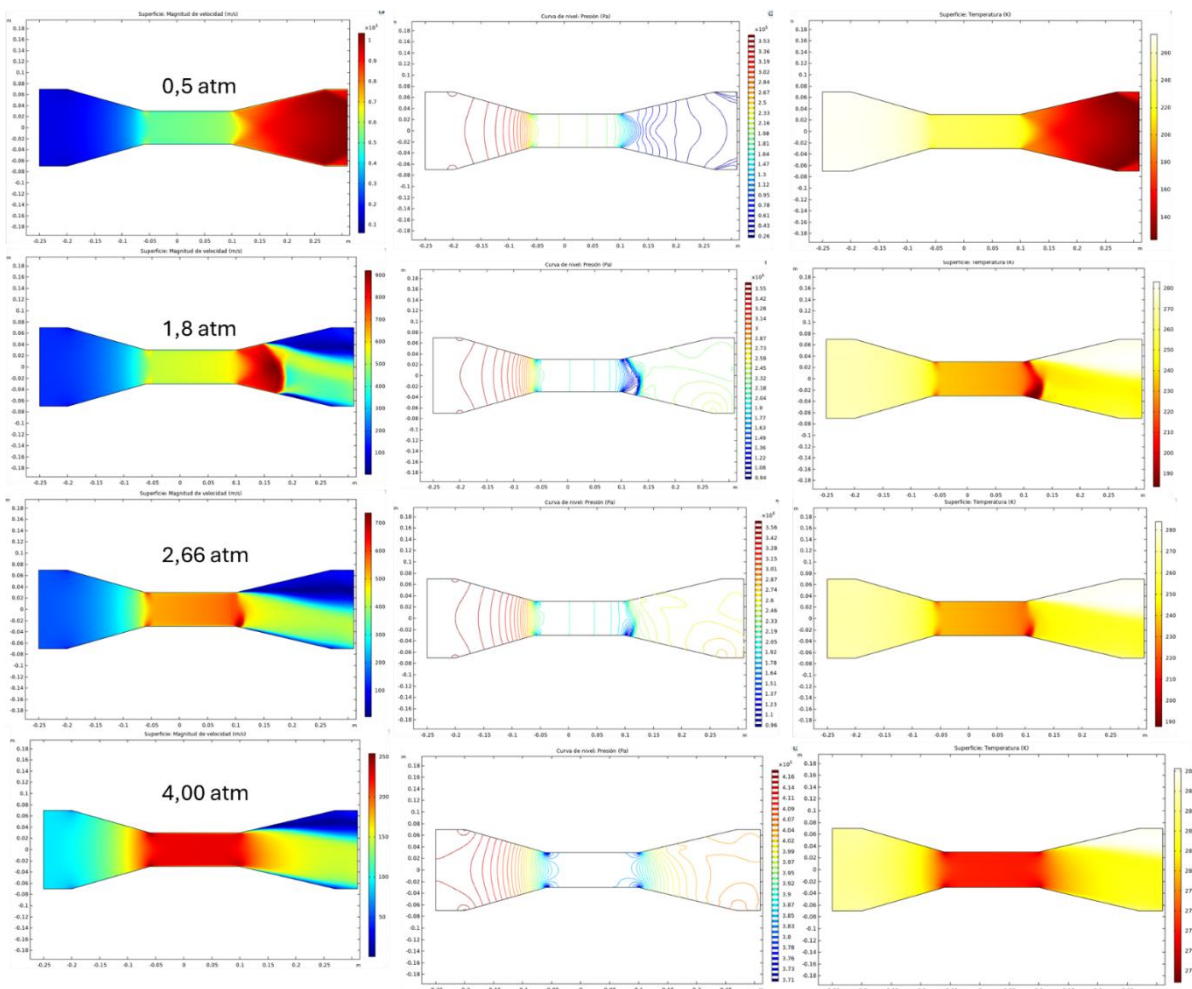


Fig.6

En este Caso Práctico 3, se empleó un modelo de flujo con número de Mach alto, $k-\epsilon$ (hmnf). La geometría 2D de la tobera convergente-divergente pretende simular la aceleración de un gas en condiciones de estancamiento hasta velocidades supersónicas a través de una tobera cuya sección de entrada es de 0,14 m, con una sección decreciente hasta una garganta de 0,06 m de diámetro y una sección creciente hasta una salida de 0,14 m de diámetro (Ver malla diseñada en la Fig 5). Como fluido compresible se escogió aire empleando para ello la biblioteca de la aplicación (air, gas:

$\gamma=1,4$, ideal gas). De manera análoga al caso 2, como valores iniciales se definieron las condiciones de contorno siguientes condiciones en la entrada (Inlet $V_0 = 0$ m/s (condiciones de estancamiento), $T_0=300K$, $P_0=5atm$), aislamiento térmico en pared, para simular modelo de flujo adiabático, proponiendo una presión de salida inicialmente de 4 atmósferas. (Outlet: $P_2=4atm$).

A partir de la primera solución, de forma análoga al segundo caso práctico, se propone a los alumnos/as la modificación de las presiones exteriores en la salida de la tobera ampliada. Como resultado, los alumnos podrán encontrar diferentes soluciones, y deberán representar mediante gráficos de superficie la velocidad, número Mach, presión, y temperatura para distintas presiones exteriores (Ver Fig. 6). De estos resultados se pide que se discutan distintos elementos, como la aparición de ondas de choque (ver $P_{ext}=1,8$ atm, Fig 6), discutir la consecución de velocidades supersónicas en la salida a presión de diseño ($Ma=2,3$ a $P_{ext}= 0,5$ atm, ver Fig. 6), discutir la transformación de entalpía en energía cinética (caída de temperatura y aumento de velocidad, Ver fig.6) en cada caso, etc. Se pide finalmente que se analice comparativamente los resultados obtenidos con el caso previo (Caso 2: Tobera convergente).

CASO 4. Simulación del flujo de calor en un cuerpo cilíndrico.

El último caso práctico preparado en este PIE, está dirigido a la asignatura de Ingeniería Térmica. En este caso se ha realizado la determinación simulada del flujo de calor de un cuerpo cilíndrico hueco mediante el programa COMSOL-MP, en su versión 5.6. El uso del simulador COMSOL fue empelado para permitir comprender y estimar la distribución de temperaturas y calor en un sólido, con el fin analizar el flujo de calor estacionario en cuerpos multidimensionales.

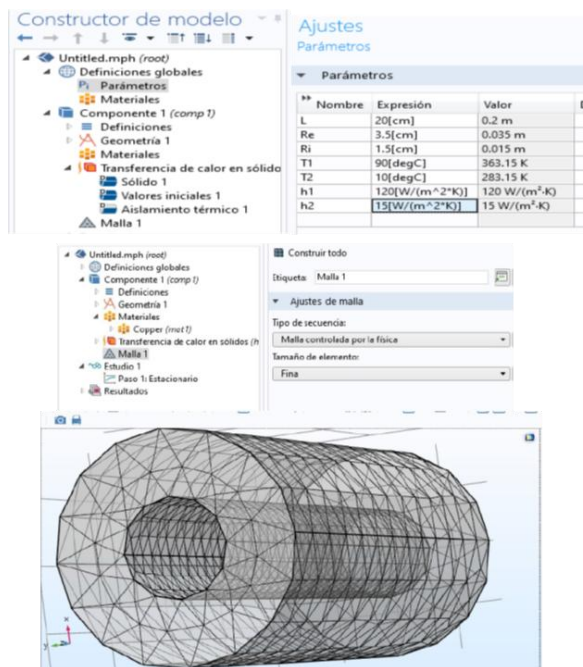
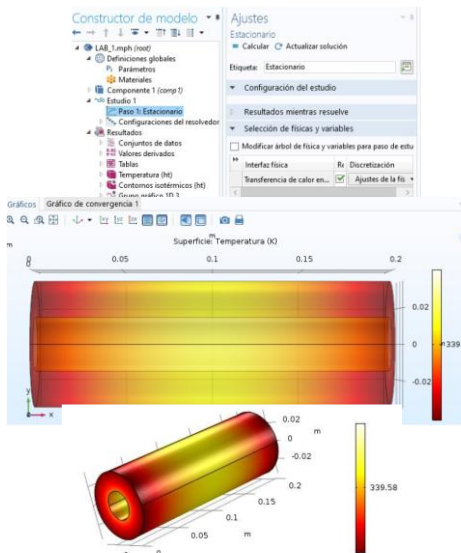


Fig.7

Inicialmente en este cuarto Caso Práctico se determinaron los parámetros de trabajo como la temperatura, el material, las dimensiones del prototipo, para finalmente obtener el perfil de temperaturas del sistema a estudiar, y utilizar las funciones del software para obtener gráficas, resultados numéricos que ayuden a interpretar los fenómenos que suceden en la simulación y analizar los cambios de temperatura en el sólido multidimensional.

En este caso, el procedimiento experimental llevado a cabo fue el siguiente: a través de la interface de Comsol-MP (v.5.6), se seleccionó el modelo (transferencia de calor en

sólidos, ht) y la dimensión en el espacio 3D de un cilindro hueco, se seleccionó el estudio "Estacionario" y se definieron los variables y dimensiones para el estudio "L,Re,Ri,T1,T2,h1,h2", como se muestra en la Figura 7 (ajuste del Mallado). Se definieron los cilindros, las diferencias en radios externo e interno y el tipo de material, en este caso cobre, en el catálogo de materiales de Comsol-MP. Con ello, se construye



la maya final. Finalmente, se realizó el cálculo de estudio llevado a cabo en la práctica cuya solución se muestran algunas imágenes en la Figura 8, donde se pueden observar el perfil de temperaturas. Este último caso práctico, el diseño buscó simular las pérdidas de calor en un cilindro hueco que simulase una tubería con una longitud de 20 cm, y unos radios interno y externo de 1,5 y 3,5 cm, respectivamente. Una vez definido el flujo de calor en el interior y exterior del cuerpo, se obtuvo un perfil de temperaturas y el flujo de calor de los puntos con mayor temperatura a los de menor temperatura. La simulación permitirá discutir y representar las pérdidas de calor en conducciones.

Fig. 8