



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Integración de un modelo 1D de acción de ondas de volúmenes finitos en un gemelo digital de sistema propulsivo de un concepto Hyperloop

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Blanco Caderno, Saúl

Tutor/a: Galindo Lucas, José

Cotutor/a externo: TORRES ROYO, GERMAN

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

---

# Trabajo de Fin de Máster

INTEGRACIÓN DE UN MODELO 1D DE ACCIÓN DE ONDAS DE  
VOLÚMENES FINITOS EN UN GEMELO DIGITAL DE SISTEMA  
PROPULSIVO DE UN CONCEPTO HYPERLOOP

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Curso 2022/2023

Universitat Politècnica de València

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

**Autor:** Saúl Blanco Caderno

**Tutor:** José Galindo Lucas

**Cotutor:** Germán Torres Royo

Valencia, 3 de julio de 2023



---

## **Agradecimientos**

Me gustaría expresar mis agradecimientos a todas las personas que han estado conmigo durante la realización de este proyecto. En primer lugar, a mis tutores José Galindo Lucas y Germán Torres Royo, por toda la ayuda proporcionada, y por haber sido guías a la hora de la realización del proyecto. Además quiero agradecer también al resto de miembros del departamento, que también han colaborado en el proyecto.

Quiero agradecer también a mi familia, en especial a mis padres, por todo el apoyo y ánimo dado durante estos años de estudios.

Por último, quiero agradecer a mis amigos, por haberme estado apoyando en todo momento durante el proyecto, y haber compartido innumerables momentos durante toda esta etapa.



---

## Resumen

El sistema propulsivo del concepto Hyperloop consiste en un motor lineal que permite el desplazamiento del vehículo dentro de un tubo en condiciones de vacío relativo, donde la fricción es mucho menor que en condiciones ambiente. Además, el sistema propulsivo consta a mayores de un compresor (fan) de baja relación de compresión, arrastrado por un motor eléctrico, que permite aumentar la presión del flujo interno al vehículo y expandirlo en una tobera de salida generando empuje adicional. El trabajo consiste en la integración de un modelo 1D de acción de ondas mediante volúmenes finitos en un gemelo digital del sistema propulsivo de un concepto de Hyperloop. Para poder realizar los cálculos del modelo de acción de ondas, se discretizó un dominio 1D que consiste en un tubo de una longitud dada en el que mediante términos fuente se simula el comportamiento del vehículo obtenido mediante análisis CFD. Este modelo de un único tubo tiene limitaciones en cuanto a la longitud del tubo y duración de la misión, por lo que se presentó un modelo de dos tubos en el que se utiliza el tubo principal del anterior modelo, más un tubo de mallado más fino que simula la zona ocupada por el vehículo. De este modo, se pueden realizar simulaciones con tubos mucho más largos sin que esto presente problemas de memoria y de aumento excesivo del tiempo de computación.

Palabras clave: gemelo digital, sistema propulsivo, modelo de acción de ondas.



---

## **Abstract**

The propulsive system of the Hyperloop concept consists of a linear motor, which allows the movement of the vehicle inside a tube under relative vacuum conditions, where friction is much lower than in ambient conditions. In addition, the propulsive system consists of a low compression ratio compressor (fan) driven by an electric motor, which increases the pressure of the flow inside the vehicle and expands it at an outlet nozzle, generating additional thrust. The main objective of the project is the integration of a 1D model of wave action using finite volumes in a digital twin of the propulsion system of a Hyperloop concept. In order to be able to perform the wave action model calculations, 1D domain consisting of a tube of a given length in which by source terms the behaviour of the vehicle obtained by CFD analysis is simulated. This single tube model model has limitations in terms of tube length and mission duration, so a two-tube model was presented. This model has the same tube as the first model with the addition of a second tube with a finer mesh in the areas near the pod. With this model simulations with much longer tubes can be carried out without presenting memory problems and excessive computational time.

Key words: digital twin, propulsive system, wave action model.



---

## Resum

El sistema propulsiu del concepte Hyperloop consisteix en un motor lineal que permet el desplaçament del vehicle dins d'un tub en condicions de buit relatiu, on la fricció és molt de menor que en condicions ambiente. A més, el sistema propulsiu consta a majors d'un compressor (fan) de baixa relació de compressió, arrossegat per un motor elèctric, que permet augmentar la pressió del flux intern al vehicle i expandir-lo en una tovera d'eixida generant empenyiment addicional. El treball consisteix en la integració d'un model 1D d'acció d'ones mitjançant volums finits en un bessó digital del sistema propulsiu d'un concepte de Hyperloop. Per a poder realitzar els càlculs del model d'acció d'ones, es discretizó un domini 1D que consisteix en un tub d'una longitud donada en el qual mitjançant termes font se simula el comportament del vehicle obtingut mitjançant anàlisi CFD. Aquest model d'un únic tub té limitacions quant a la longitud del tub i duració de la missió, per la qual cosa es va presentar un model de dos tubs en el qual s'utilitza el tub principal de l'anterior model, més un tub d'emmallat més fi que simula la zona ocupada pel vehicle. D'aquesta manera, es poden realitzar simulacions amb tubs molt més llargs sense que això present problemes de memòria i d'augment excessiu del temps de computació.

Paraules clau: bessó digital, sistema propulsiu, model d'acció d'ones.



# Índice general

<b>Índice de figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de cuadros</b>	<b>xix</b>
<b>I MEMORIA</b>	<b>1</b>
<b>1. Aspectos generales del Trabajo de Fin de Máster</b>	<b>3</b>
1.1. Introducción . . . . .	3
1.2. Objetivos . . . . .	4
1.3. Motivación . . . . .	4
1.4. Organización y desarrollo del trabajo . . . . .	5
<b>2. Metodología empleada</b>	<b>7</b>
<b>3. Estado del arte</b>	<b>9</b>
3.1. Historia . . . . .	10
3.2. Estudios similares . . . . .	12
<b>4. Análisis del flujo en Hyperloop</b>	<b>13</b>
4.1. Límite de Kantrowitz . . . . .	13
4.2. Resultados CFD . . . . .	15
4.2.1. Flujo alrededor del pod . . . . .	15
<b>5. Modelo de un tubo</b>	<b>19</b>
5.1. Discretización del tubo . . . . .	19
5.2. Transmisión de los términos fuente . . . . .	20
5.3. Caso estacionario . . . . .	22
5.3.1. Estudio de convergencia de malla . . . . .	22

## ÍNDICE GENERAL

---

5.3.2. Estudio de fuerzas . . . . .	24
5.4. Caso transitorio . . . . .	29
5.4.1. Estudio de convergencia de malla . . . . .	30
5.4.2. Estudio de fuerzas . . . . .	31
5.5. Conclusiones . . . . .	34
<b>6. Modelo de 2 tubos</b>	<b>35</b>
6.1. Discretización de los tubos . . . . .	35
6.2. Transmisión de los términos fuente . . . . .	37
6.3. Caso estacionario . . . . .	39
6.3.1. Estudio de convergencia de malla . . . . .	39
6.3.2. Estudio de fuerzas . . . . .	40
6.3.3. Distribución de ondas . . . . .	44
6.4. Caso transitorio . . . . .	50
6.4.1. Estudio de Convergencia de malla . . . . .	50
6.4.2. Estudio de fuerzas . . . . .	51
6.4.3. Distribución de ondas . . . . .	55
6.4.4. Comparación entre modelos y tiempo de computación . . . . .	61
6.4.5. Conservación . . . . .	63
6.4.6. Conclusiones . . . . .	64
<b>7. Implementación del modelo en el gemelo digital</b>	<b>67</b>
<b>8. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>69</b>
8.1. Conclusiones . . . . .	69
8.2. Trabajos futuros . . . . .	70
<b>9. Bibliografía</b>	<b>71</b>
<b>II PLIEGO DE CONDICIONES</b>	<b>73</b>
<b>1. Pliego de condiciones</b>	<b>75</b>
1.1. Condiciones técnicas . . . . .	75
1.1.1. Hardware . . . . .	75
1.1.2. Software . . . . .	76
1.1.3. C++ . . . . .	76

**III PRESUPUESTO 79**

<b>1. Presupuesto</b>	<b>81</b>
1.1. Consideraciones iniciales . . . . .	81
1.1.1. Distribución de las horas de trabajo realizadas . . . . .	81
1.1.2. Horas laborables . . . . .	82
1.2. Costes de Software y Hardware . . . . .	82
1.2.1. Costes de C++ . . . . .	82
1.2.2. Costes de Matlab y Simulink . . . . .	82
1.2.3. Costes de Star CCM+ . . . . .	83
1.2.4. Costes de Microsoft Office . . . . .	83
1.2.5. Equipo informático . . . . .	83
1.3. Costes del personal . . . . .	83
1.3.1. Tutor . . . . .	84
1.3.2. Cotutor externo . . . . .	84
1.3.3. Becario . . . . .	84
1.4. Presupuesto total . . . . .	84

**IV OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES 87**

<b>1. Objetivos de desarrollo sostenibles</b>	<b>89</b>
---	-----------



# Índice de figuras

2.1. Logo de VEMOD . . . . .	7
3.1. Concepto de Hyperloop . . . . .	9
3.2. Motor de Inducción lineal . . . . .	10
3.3. Tren de vacío de Goddard . . . . .	11
4.1. Límite de Kantrowitz . . . . .	14
4.2. Malla . . . . .	15
4.3. Distribución de presión estática alrededor del pod . . . . .	15
4.4. Perfil de velocidades . . . . .	16
4.5. Distribución de gasto másico relativo . . . . .	17
4.6. Distribución de fuerza . . . . .	17
4.7. Distribución de presión CFD para el caso estacionario . . . . .	18
4.8. Distribución de presión CFD para el caso transitorio . . . . .	18
5.1. Malla de 1 tubo . . . . .	19
5.2. Modelo de 1 tubo . . . . .	20
5.3. Estudio de convergencia de malla para el modelo de 1 tubo en caso estacionario . . . . .	23
5.4. Volumen de control del pod y balance de fuerzas . . . . .	24
5.5. Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección $x = 3700$ m . . . . .	25
5.6. Presión en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	27
5.7. Distribución de temperaturas en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	28
5.8. Distribución de velocidades absolutas en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	29
5.9. Estudio de convergencia de malla para el modelo de 1 tubo en el caso transitorio . . . . .	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

5.10. Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección $x = 3700$ m en una misión transitorio . . .	32
5.11. Distribución de presión en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo	33
5.12. Distribución de temperatura en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	33
5.13. Distribución de velocidad en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo	34
6.1. Longitud de la malla quimera . . . . .	36
6.2. Mallado del modelo de 2 tubos . . . . .	37
6.3. Transmisión de términos fuente en le modelo de dos tubos . . . . .	38
6.4. Estudio de convergencia de malla para el modelo de dos tubos . . . . .	39
6.5. Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección $x = 3700$ m . . . . .	41
6.6. Presión en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	42
6.7. Temperatura en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	43
6.8. Velocidad en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo . . . . .	43
6.9. Distribución de presión en el tubo para $t = 5$ segundos . . . . .	44
6.10. Distribución de presión en el tubo para $t = 12$ segundos . . . . .	45
6.11. Distribución de presión en el tubo para $t = 20$ segundos . . . . .	46
6.12. Distribución de temperatura en el tubo para $t = 5$ s . . . . .	46
6.13. Distribución de temperatura en el tubo para $t = 20$ s . . . . .	47
6.14. Distribución de velocidad en el tubo para $t = 5$ s . . . . .	48
6.15. Distribución de velocidad en el tubo para $t = 12$ s . . . . .	49
6.16. Distribución de velocidad en el tubo $t = 20$ s . . . . .	49
6.17. Estudio de convergencia de malla para un caso transitorio en el modelo de dos tubos	51
6.18. Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección $x = 3700$ m para el modelo de dos tubos y caso transitorio . . . . .	52
6.19. Presión en la celda delantera y trasera a lo largo del tiempo para los dos casos de fuerza . . . . .	53
6.20. Temperatura en la celda delantera y trasera a lo largo del tiempo para los dos casos de fuerza . . . . .	54
6.21. Velocidad en la celda delantera y trasera a lo largo del tiempo para los dos casos de fuerza . . . . .	54
6.22. Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para $t = 5$ segundos . . . . .	55
6.23. Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para $t = 11$ segundos . . .	56

6.24. Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para t = 15 segundos . . .	57
6.25. Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para t = 22 segundos . . .	57
6.26. Distribución de temperatura en el tubo en un caso transitorio para t = 22 segundos .	58
6.27. Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para t = 5 segundos . . .	58
6.28. Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para t = 11 segundos . .	59
6.29. Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para t = 15 segundos . .	60
6.30. Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para t = 22 segundos . .	60
6.31. Comparación modelos caso estacionario . . . . .	61
6.32. Comparación modelos caso transitorio . . . . .	62
6.33. Error por cada segundo de computación y km de tubo . . . . .	63
6.34. Balance de masas . . . . .	64
7.1. Modelo de Simulink de VEMOD . . . . .	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

---

# Índice de cuadros

- 5.1. Resultados del estudio de convergencia para el caso estacionario . . . . . 23
- 5.2. Error en el cálculo de las presiones en función de la fuerza introducida con respecto al CFD . . . . . 26
- 5.3. Errores en el estudio de convergencia de malla para el caso transitorio del modelo de un tubo . . . . . 30
  
- 6.1. Resultados del estudio de convergencia para el caso estacionario en el modelo de dos tubos . . . . . 40
- 6.2. Error en el cálculo de las presiones en función de la fuerza introducida con respecto al CFD . . . . . 41
- 6.3. Resultados del estudio de convergencia para el caso transitorio en el modelo de dos tubos . . . . . 51
- 6.4. Error producido por cada modelo y tiempo de cálculo requerido . . . . . 63
  
- 1.1. Desglose de horas del proyecto . . . . . 81
- 1.2. Resumen del coste total del proyecto . . . . . 85
  
- 1.1. Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) de la agenda 2030 . . . . . 89



**Parte I**

**MEMORIA**



# Capítulo 1

## Aspectos generales del Trabajo de Fin de Máster

### 1.1. Introducción

En la actualidad, debido a las sucesivas políticas de reducción de emisiones, el sector de la ingeniería y el de transporte se están enfocando en la producción y diseño de vehículos de bajas y cero emisiones. Por un lado, el sector de la automoción está impulsando la fabricación y la venta de vehículos eléctricos e híbridos. Por otro lado, el sector de la aeronáutica lleva años trabajando en distintos conceptos de cámaras de combustión que permiten reducir las emisiones, y más recientemente se está invirtiendo mucho dinero en el diseño de un avión impulsado por hidrógeno. Además, están surgiendo distintas *startups* que apuestan por el diseño de pequeñas aeronaves totalmente eléctricas.

Dentro de este contexto de revolucionar el sector del transporte, que hace pocos años estaba totalmente asentado, se rescata también la idea del Hyperloop. El Hyperloop es un concepto de medio de transporte de cero emisiones a alta velocidad. Está pensado para conectar grandes ciudades en intervalos muy cortos de tiempo, haciendo incluso competencia al sector de la aviación. En este concepto, una cápsula, denominada pod, se mueve gracias a un motor de inducción lineal dentro de un tubo sometido a vacío relativo, de modo que la fricción que el aire genera sobre el pod es mucho más baja que en condiciones ambiente.

Otros conceptos más concretos de Hyperloop surgieron como los modelos que incluyen un compresor. El objetivo de este compresor es poder superar el límite de Kantrowitz. El límite de Kantrowitz es un valor que indica, para una relación de diámetros bypass-tubo determinada, cuándo el aire que rodea el pod alcanza velocidades supersónicas, dejando el conducto bloqueado. Una vez bloqueado el tubo, se genera una gran fricción sobre el pod limitando de manera indirecta la

velocidad a la que el Hyperloop puede desplazarse. La primera solución que se puede plantear para esta problemática, es aumentar el diámetro del tubo, de manera que el área de bypass aumente. No obstante, esto incrementa los costes de fabricación, a tal punto que, teniendo en cuenta la longitud del tubo, no es posible llevarse a cabo. La segunda solución es la de incluir un compresor que trasiegue aire a través del pod. Gracias a la inclusión del compresor, se podrían superar velocidades de 1126 km/h (700 mph).

El concepto de Hyperloop sobre el que se va a tratar es el propuesto por la empresa Zeleros, cuyo modelo de propulsión es con compresor (fan). Para poder predecir el funcionamiento del sistema, se hace uso de un gemelo digital, una representación virtual de un sistema físico, de modo que se puede calcular de forma preliminar su funcionamiento.

### 1.2. Objetivos

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Máster reside en la realización de un modelo de acción de ondas mediante volúmenes finitos para predecir la distribución de las mismas en un tubo de un concepto Hyperloop. Además, también se pretende implementar este modelo en un gemelo digital de su sistema propulsivo.

El modelo debe calcular misiones tanto en casos estacionarios como en transitorios, en los cuales se encargará de alimentar al resto de modelos del gemelo con las propiedades del fluido (presión y temperatura) que rodea al pod.

### 1.3. Motivación

Para la elección de este proyecto que ha consistido en el desarrollo de un modelo de acción de ondas para simular la distribución de ondas de presión en un tubo de Hyperloop, he tenido en cuenta diferentes motivos.

En primer lugar me motiva trabajar para proyectos de innovación como puede ser el Hyperloop. El Hyperloop es un concepto novedoso que involucra tecnologías vanguardistas, constituyendo todo un reto el diseño de su sistema propulsivo. Además, la tecnología involucrada en este sistema es un de propulsión con principios iguales a la aeronáutica, debido al uso de un fan de baja presión similar al de un motor turbofan y la generación de empuje adicional gracias a la tobera.

Por otro lado, me parece un aliciente la posibilidad de trabajar en un proyecto real. En este caso, el modelo creado tiene la finalidad de incorporarse en un gemelo digital de todo el sistema propulsivo del Hyperloop basado en el concepto propuesto por la empresa Zeleros. Además, este proyecto me permite trabajar en equipo aprendiendo de otros profesionales con mucha experiencia,

al mismo tiempo que trabajar en un ambiente dinámico.

Por último, valoro enormemente la posibilidad de aprender sobre los diferentes aspectos involucrados en el proyecto. El primero de ellos es la programación, puesto que este modelo se ha generado en el software de programación C++, el cual es uno de los más eficientes a la hora de realizar programas destinados al cálculo numérico. En segundo lugar, me motiva la posibilidad de haber trabajado con un modelo numérico de CFD, basado en el método de volúmenes finitos, además de poder aumentar mis conocimientos sobre dinámica de gases, flujos compresibles y transmisión de ondas. En definitiva, mi interés por la propulsión me ha ayudado a decantarme por elegir un proyecto de estas características.

## 1.4. Organización y desarrollo del trabajo

El proyecto se ha dividido en un total de 4 partes: memoria, pliego de condiciones, presupuesto y objetivos de desarrollo sostenibles.

### ■ Memoria.

La parte de la memoria está dividida en 8 capítulos, explicados a continuación, que son los que han permitido que este proyecto se haya llevado a cabo de la manera más óptima.

El *Capítulo 1: Aspectos generales del Trabajo de Fin de Máster*, muestra una breve introducción al lector sobre el presente proyecto, adelantando cuáles son los objetivos perseguidos con él y cuáles han sido los motivos de su elección.

El *Capítulo 2: Metodología empleada*, pone en relieve cuáles han sido los medios, instrumentos y metodologías empleadas para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Máster.

El *Capítulo 3: Estado del arte*, consiste en una breve introducción al concepto de Hyperloop, haciendo una breve descripción tanto de su funcionamiento como de sus orígenes. Además, se incluyen también algunos estudios similares al realizado con el presente proyecto.

El *Capítulo 4: Análisis del flujo en Hyperloop*, comienza con la descripción y caracterización CFD del flujo alrededor del pod. Esto permite por un lado entender cómo va a comportarse el fluido en el caso que se pretende analizar, obtener los valores de gasto y drag que alimentan a los modelos antes de ser integrados en el gemelo digital, y por último, la verificación de los resultados de los modelos de ondas.

El *Capítulo 5: Modelo de un tubo*, tras haber obtenido los parámetros que permiten alimentar al modelo, lo siguiente es la creación de un modelo unidimensional de acción de ondas para poder simular casos estacionarios de misiones del Hyperloop y su verificación con resultados CFD obtenidos. Por lo tanto en este capítulo, se explicará cómo se va a discretizar el dominio de cálculo,

las misiones que se llevarán a cabo en el mismo, y cómo se transmite a través de términos fuente la información obtenida de los cálculos CFD, que es la información equivalente que proporcionarán los otros modelos del gemelo digital al que posteriormente se acoplará este modelo de acción de ondas. Una vez verificados los resultados, se procede de manera análoga con los casos transitorios.

En el *Capítulo 6: Modelo de dos tubos*, tras haber verificado completamente el modelo, se procede a analizar sus puntos débiles y presentar una posibles versiones mejoradas. Se explicará la necesidad de unas versiones mejoradas, la cual radica en el excesivo gasto de memoria para poder hacer ensayos sobre tubos muy largos con una precisión alta del modelo de un único tubo. Además, al igual que en el capítulo anterior, se explicará cómo se va a discretizar el dominio, y cómo se realizará el nuevo intercambio de los términos fuente para poder simular la misión. Estas versiones se verifican del mismo modo.

En el *Capítulo 7: Integración del modelo en el gemelo digital*, se explicará cómo implementar el modelo de VEMOD en Simulink para acoplarlo con el resto de bloques del gemelo digital.

En el *Capítulo 8: Conclusiones y trabajos futuros*, se plasman cuáles han sido las conclusiones extraídas tras haber finalizado el proyecto, así como las posibles implementaciones o mejoras futuras que podrían realizarse.

En el *Capítulo 9: Bibliografía*, se incluyen todas las referencias bibliográficas empleadas para el desarrollo del proyecto.

### ■ **Pliego de condiciones.**

En esta parte se detallan cuáles han sido los requisitos tanto generales como técnicos que han debido ser tenidos en cuenta a lo largo de la realización del Trabajo de Fin de Máster.

### ■ **Presupuesto.**

En esta parte se presenta una recapitulación de todos los costos implicados en el desarrollo del proyecto, realizando un análisis de costes unitarios de las diferentes fuentes de gasto.

### ■ **Objetivos de desarrollo sostenibles.**

En la última parte de este documento se recogen cuáles han sido los objetivos de desarrollo sostenibles de la agenda 2023 que toman partido en el presente proyecto, haciendo una descripción de los puntos con una implicación más elevada.

# Capítulo 2

## Metodología empleada

Para la realización del proyecto se hace uso de VEMOD, un modelo de unidimensional para calcular flujo compresible e incompresible desarrollado en C++ por el CMT. De este modo, se puede utilizar los modelos de cálculos de VEMOD para calcular el flujo sobre conductos y de esta manera simular los tubos de Hyperloop.



Figura 2.1: Logo de VEMOD

El modelo de volúmenes finitos se basa en el esquema de Godunov. El esquema de Godunov es un modelo numérico conservativo para resolver ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. El método de Godunov fue desarrollado para poder calcular la dinámica de los gases en presencia de ondas de choque. El modelo de volúmenes finitos que se ha implementado resuelve las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía en 1D permitiendo incluir sobre ellas los términos fuente que, en este caso, simularán el movimiento del pod.

Por otro lado, el acoplamiento entre el modelo de ondas y el resto de modelos del sistema propulsivo se realizarán en una interfaz de simulink. Simulink permite incorporar las distintas partes del modelo siguiente un esquema de bloques, de modo que cada parte del modelo se corresponde con un subsistema dentro del sistema propulsivo.



# Capítulo 3

## Estado del arte

El Hyperloop es un modo de transporte que consiste en un tubo sometido a baja presión sobre el que se desplaza una cápsula, denominada pod, mediante levitación magnética. El pod es impulsado por un motor de inducción lineal, de modo que se reduce al mínimo la fricción a la que está sometida el vehículo. El sistema de propulsión, además de incluir el motor de inducción lineal, también podría incluir el uso de un fan. En la figura 3.1 se muestra el primer concepto de Hyperloop de la empresa Virgin Hyperloop one.

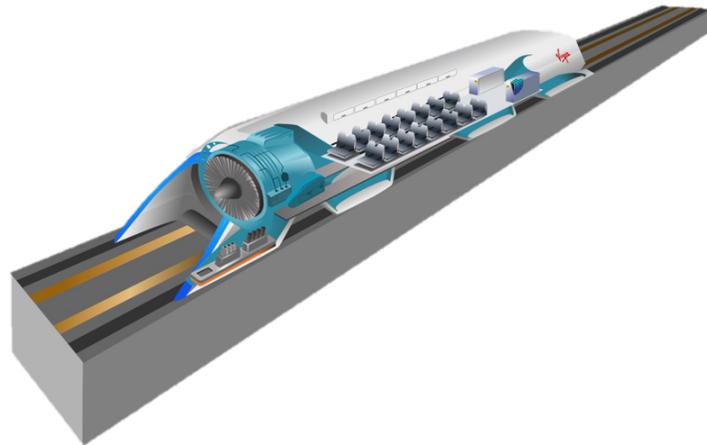


Figura 3.1: Concepto de Hyperloop

Este sistema de propulsión funciona gracias al motor de inducción. El motor de inducción, como el que se puede ver en la figura 3.2, consta de una parte primaria y una parte secundaria. Cuando se conecta la parte primaria a una corriente trifásica, se genera un campo magnético que induce corriente en los conductores de la parte secundaria. Esta corriente inducida al interactuar con el campo magnético produce un empuje. Si la parte primaria se coloca fija, entonces, la parte

secundaria será la que se desplazará.

Además, como antes se mencionaba, existe la posibilidad de incluir un fan en la parte delantera del compresor. Este fan permite trasegar más gasto de aire de la parte delantera a la trasera para poder vencer el límite de Kantrowitz, retrasando el bloqueo del flujo.

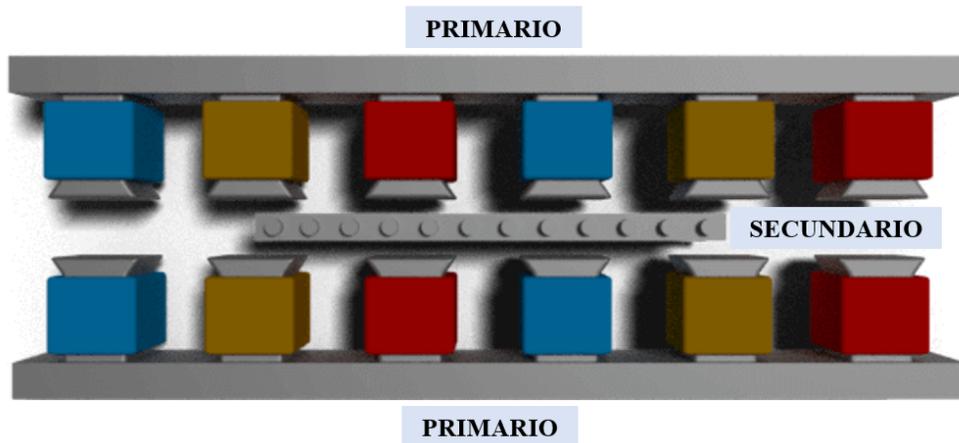


Figura 3.2: Motor de Inducción lineal

### 3.1. Historia

Antes de que surgiese el concepto de Hyperloop, existieron propuesta anteriores con funcionamientos que a día de hoy se puede ver en la propuesta actual. Estos conceptos surgen hace siglos, siendo el primero de ellos propuesto en el siglo XVIII.

En 1799, George Medhurst patentó lo que se conoce como el tren de vacío, un tren con la capacidad de transportar tanto carga como pasajeros a través de tubos presurizados. Además, en 1845 la "London and Croydon Railway", construyó una estación experimental para practicar el vacío entre el tren y los raíles, de modo que estos fuesen propulsados por la presión atmosférica.

Un siglo después, en 1904, Robert H. Goddard, la persona a la que se le atribuye la invención del cohete de propulsión líquida, planeaba un medio de transporte que le permitiese llegar de Boston a Nueva York en 12 minutos. De este modo, en 1910, propuso un nuevo concepto. Este concepto es muy similar al Hyperloop que se contempla hoy en día, puesto que consistía en un tren moviéndose por tubos presurizados mediante levitación magnética para reducir la fricción. No obstante, este diseño nunca fue construido.

El concepto de Hyperloop cobró fuerza en 2012 tras ser mencionado en un evento por Elon Musk. Posteriormente, ingenieros de las empresas de Elon Musk, Tesla Motors y SpaceX, publicaron en 2013 Hyperloop Alpha (1), un paper en el que se recogían estudios de distintas rutas que el Hyperloop

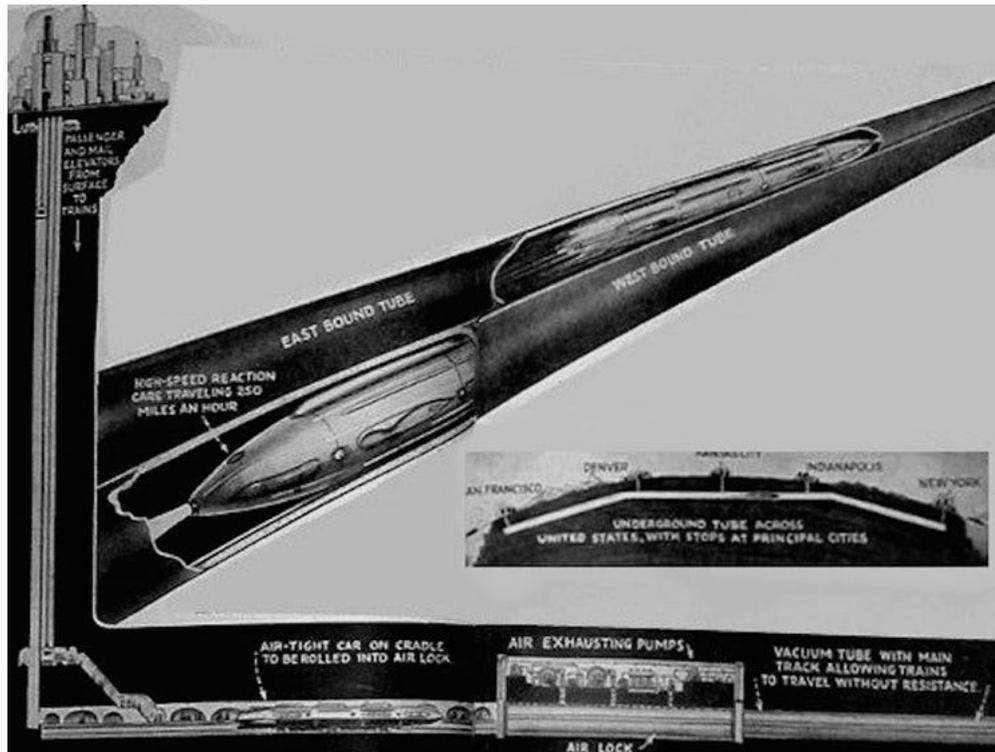


Figura 3.3: Tren de vacío de Goddard

podría recorrer, además de un esquema de su propio concepto. Dentro de este concepto de Hyperloop, realizaron un diseño conceptual del sistema de propulsión, tanto del motor de inducción, del que se estudiaron materiales, costes y la potencia necesaria, como del esquema de aire que circulará dentro del pod, teniendo en cuenta el aire que debe trasegar el fan, y los distintos sangrados de aire que se usan para el funcionamiento del pod. Además, se definieron dimensiones de lo que sería la cabina de los pasajeros, y se estimaron esfuerzos que soportarían las estructuras sobre las que se montarían los tubos. La idea de esta publicación, fue fomentar la investigación de la comunidad en esta nueva idea de transporte sin emisiones, dando una lista de trabajos futuros que era conveniente investigar, además de pedir *feedback* al resto de la comunidad de investigación.

Posteriormente, otros estudios y publicaciones fueron llevados a cabo con la idea de proponer nuevos conceptos de subsistemas del Hyperloop. En 2015 la NASA publicó un paper llamado "Open-Source Conceptual Sizing Models for the Hyperloop Passenger POD" (2). En este paper, se continuaba con la idea de Hyperloop Alpha, y se realizaban estudios mediante herramientas de código abierto de la interacción del modelo aerodinámico y del modelo térmico. En concreto, del sistema de compresión, análisis de misiones, geometrías de pod y cabina de pasajeros, limitaciones de flujo en el tubo, y las temperaturas en la pared del tubo. De este modo, se define la influencia de la relación de áreas entre tubo y pod en la máxima velocidad que el pod puede alcanzar por

el límite de bloqueo. Además, se estudia el beneficio en el bloqueo de introducir un compresor y una admisión. Por otro lado, se estudian los requerimientos energéticos para poder mover dicho compresor, y se dimensionan las baterías. Por último, se estudió la integración de un intercambiador de calor que permita reducir la temperatura a la salida del compresor. El motivo de esta reducción es la necesidad de enviar un pod a su misión cada seis minutos, lo cual, al no ser enfriado, los ciclos continuos de misiones provocarían un aumento muy grande de la temperatura del tubo.

De este artículo se sacaron dos conclusiones principales. En primer lugar, el tamaño del tubo y la velocidad de operación están ligadas, de modo que, para lograr viajar a un Mach de 0.8, el tamaño del tubo debería ser de aproximadamente el doble de la estimación inicial. Por otra parte, se encontró que los aumentos de temperatura no se deben al sistema de propulsión, sino a las interacciones con la temperatura ambiente, de modo que se eliminaron los intercambiadores de calor.

### **3.2. Estudios similares**

Actualmente, se siguen publicando multitud de artículos que estudian la viabilidad del concepto Hyperloop. Además, existen numerosos artículos que, al igual que este proyecto, estudian la implementación del sistema propulsivo.

Ejemplos de esto es el artículo “A New Hyperloop Transportation System: Design and Practical Integration“ (3). Este artículo estudia la implementación del sistema propulsivo del Hyperloop, un sistema que consta únicamente de un motor lineal, del cual diseña e integra sus componentes, además de dimensionar las baterías. De este modo, realiza análisis computacionales mediante PSIM y una interfaz realizada en C++, para estudiar el funcionamiento del conjunto, y realiza también un estudio experimental montando un modelo a escala en el laboratorio.

Otros artículos como “Aerodynamic study of a Hyperloop Pod equipped with compressor to overcome the Kantrowitz limit“ y “Numerical Investigation of Aerodynamic Drag and Pressure Waves in Hyperloop Systems “ (4) tratan sobre la parte aerodinámica del sistema propulsivo. El primero de ellos estudia como afecta el Drag a un pod con y sin compresor una vez superado el Límite de Kantrowitz. Para ello, en el estudian modelan diferentes casos CFD con STAR-CCM+, en los que se estudian geometrías de pod con y sin compresor. El segundo estudia como afecta la longitud del pod, la relación de áreas pod/tubo, la velocidad y la presión del tubo al Drag. Además, representa la transmisión de las ondas de presión mediante una malla overset implementada en Ansys Fluent.

# Capítulo 4

## Análisis del flujo en Hyperloop

En este capítulo se comentarán las principales limitaciones del flujo en Hyperloop para entender el funcionamiento y la lógica del diseño del sistema propulsivo.

Además, se presentarán resultados de simulaciones CFD que permitirán realizar simulaciones en el modelo numérico que se va a describir en los capítulos siguientes.

### 4.1. Límite de Kantrowitz

En primer lugar se comenzará describiendo una de las principales problemáticas del sistema Hyperloop, la cual además justifica el diseño de sistema propulsivo en el cual se integra un fan además del motor lineal convencional.

La principal problemática es lo que se conoce como límite de Kantrowitz. El límite de Kantrowitz es una condición en la que cuando el fluido que se mueve en el conducto experimenta una reducción de área, este se acelera de forma que su velocidad aumenta con el fin de mantener el gasto másico y satisfacer la ecuación de continuidad. Esta aceleración, lleva al fluido a condiciones sónicas, por lo que la sección se bloquea. En el caso de Hyperloop, esto ocurre debido al área de paso que existe entre el tubo y el pod. El flujo que viene en forma de corriente libre, experimenta un cambio de sección al encontrarse con el pod, por lo que a determinados números de Mach del pod el flujo llega a acelerarse hasta Mach 1 y se bloquea, produciendo un gran aumento de la resistencia aerodinámica.

El límite de Kantrowitz viene dado por la expresión 4.1.

$$\frac{A_{Bypass}}{A_{Tube}} = \frac{M_{pod}}{M_{Bypass}} \left( \frac{1 + \frac{1-\gamma}{2} M_{Bypass}^2}{1 + \frac{1-\gamma}{2} M_{pod}^2} \right)^{\frac{\gamma+1}{2(1-\gamma)}} \quad (4.1)$$

Esta expresión se refleja en la figura 4.1, donde cada una de las curvas representa un número de

Mach al que viaja el pod, el eje de abscisas muestra el número de Mach al que se mueve el flujo de bypass, y en el eje de ordenadas la relación entre el área del bypass y del tubo. De este modo, a medida que se aumenta la velocidad del pod, existe el valor de la relación de áreas necesaria aumenta, de modo que, siendo el área del pod un valor fijo, debería aumentarse el diámetro del tubo para poder aumentar la velocidad sin entrar en bloqueo.

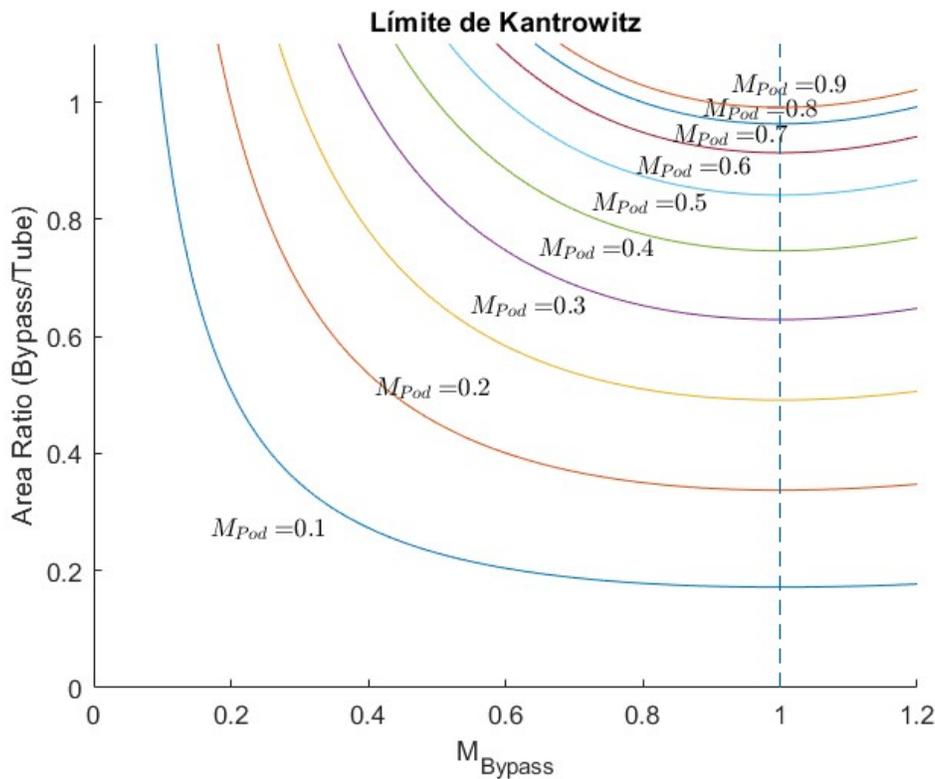


Figura 4.1: Límite de Kantrowitz

Por ejemplo, el sistema Hyperloop que se analizará posteriormente tiene un diámetro de tubo de 2.5 metros. Esto quiere decir que, para poder alcanzar el Mach 0.9, se necesita una relación de áreas superior a 0.9912, lo que equivale a un área de Bypass de 4.8655, o lo que es igual, un área de pod de 0.0432, que se obtiene con un diámetro de 0.2346 metros, lo cual es demasiado pequeño para transporta a cualquier pasajero.

Debido a esta problemática, es por lo que surge la idea de incluir el fan en el sistema propulsivo, dado que al trasegar un gasto másico por el interior, la relación de áreas se ve aumentada sin necesidad de disminuir el diámetro del pod.

## 4.2. Resultados CFD

Para poder realizar las verificaciones del modelo que se desarrollará en los capítulos siguientes se obtendrán una serie de valores de presión para poder compararlos con los resultados del modelo. Además, antes de integrar el modelo en el gemelo digital, es necesario proporcionarle los valores de gasto másico relativo y de fuerza sobre el pod para poder realizar los cálculos con el modelo.

### 4.2.1. Flujo alrededor del pod

Para poder obtener los valores de gasto másico y fuerza que se usarán en las misiones que se le impondrán al modelo numérico a desarrollar, es necesario lanzar los casos CFD. Para ello, se ha generado un dominio 2D en STAR CCM+ que consiste en un tubo de 25 metros de largo, un pod de 5.972 metros de largo y 1.2 metros de diámetro y un blockage ratio de 0.4, que es la relación entre el área de bypass y el área del tubo. Para ello, se utilizará una malla quimera como la de la figura 4.2 que permite simular el pod moviéndose a través del tubo de derecha a izquierda, modelada por Peiro Pous, Josep (5).



Figura 4.2: Malla

De este modo, lanzando los casos que se van a querer simular en el modelo 1D posteriormente, se pueden obtener los deseados. A continuación se van a mostrar en primer lugar un contorno de presiones estáticas alrededor de flujo alrededor del pod para entender el comportamiento del mismo. En la figura 4.3 se puede ver como la presión en la parte trasera del pod es baja que en la parte delantera, lo cual provoca que el gasto másico absoluto se mueva de la parte trasera a la delantera.

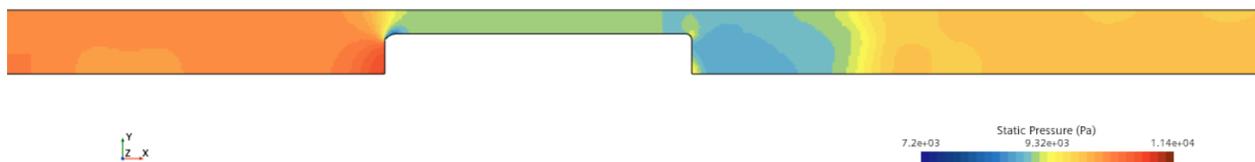


Figura 4.3: Distribución de presión estática alrededor del pod

Por otro lado, se van a obtener los valores de gasto y fuerza que se utilizarán en el capítulo 5

para lanzar las misiones del modelo. Además, también se obtendrán los valores de las presiones en la parte delantera y trasera del pod para poder realizar una verificación de resultados.

En primer lugar, se realiza una misión estacionaria en la que el pod se mueve a una velocidad constante de 125 m/s. Para este caso, se obtienen unos valores estacionarios de gasto másico y fuerza sobre el pod. Estos valores son de 66.86 kg/s y 714 N respectivamente, que se pueden ver en las siguientes figuras.

Por otro lado, se lanza también una misión transitorio que sigue un perfil de velocidades como el que se muestra en la siguiente figura 4.4.

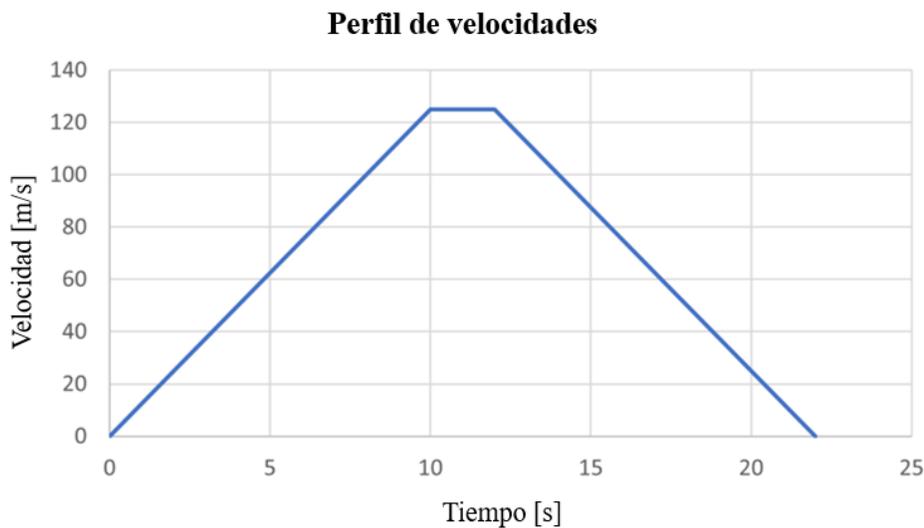


Figura 4.4: Perfil de velocidades

De este modo, se obtienen unas distribuciones de gasto y fuerza como las que se pueden ver en las figuras 4.5 y 4.6. Donde se aprecia, como era de esperar, una subida tanto del gasto másico como de la fuerza que actúa sobre el pod a medida que aumenta la velocidad, el valor se mantiene constante, y por último, se observa un descenso del valor a medida que desciende la velocidad. La diferencia entre ambas distribuciones es que el gasto másico presenta una variación lineal, mientras que la fuerza no tiene este cambio lineal. Esto puede explicarse debido a que el gasto másico depende directamente de la velocidad, mientras que en el caso de las fuerzas, los términos de fricción y de cantidad de movimiento son directamente proporcionales al cuadrado de la velocidad.

Por último, se van a mostrar en las figuras 4.7 y 4.8 la distribución de presión a lo largo del tiempo en las caras delantera y trasera del pod, tanto para el caso estacionario como para el caso transitorio.

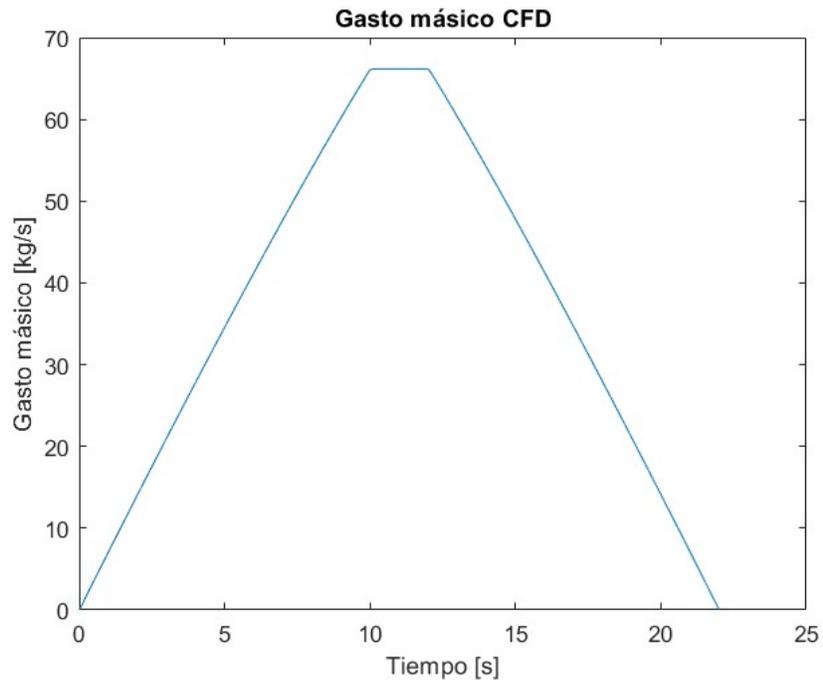


Figura 4.5: Distribución de gasto másico relativo

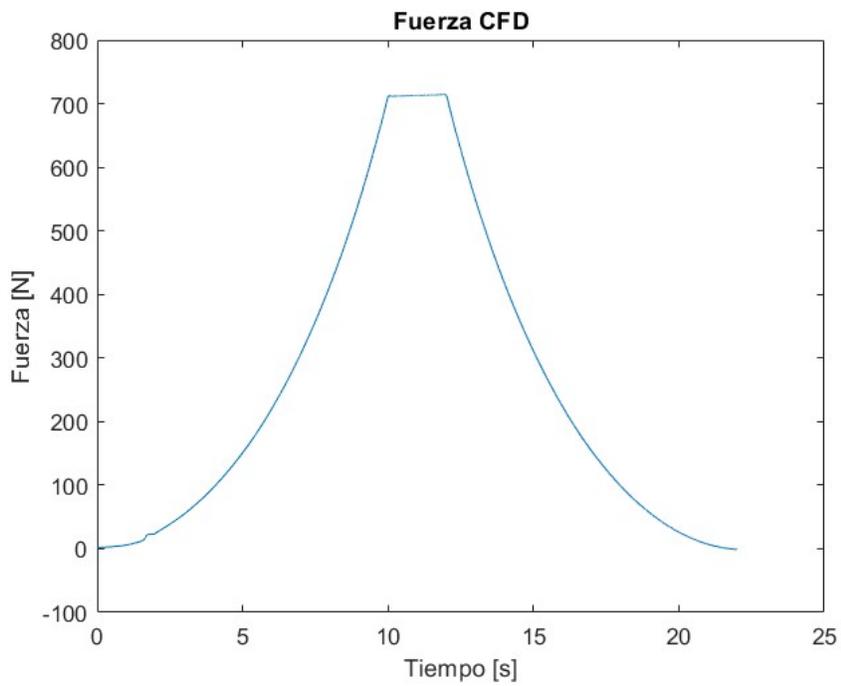


Figura 4.6: Distribución de fuerza

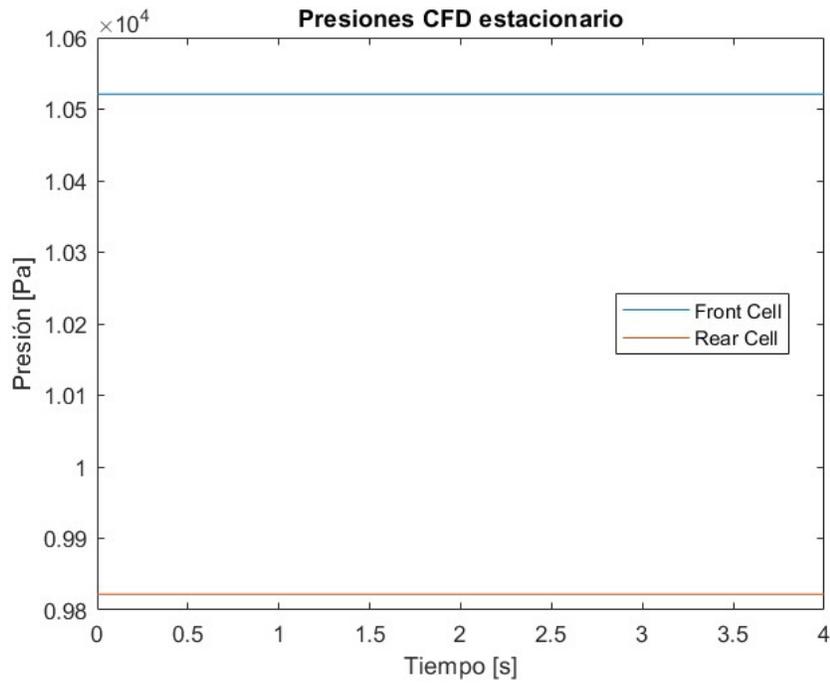


Figura 4.7: Distribución de presión CFD para el caso estacionario

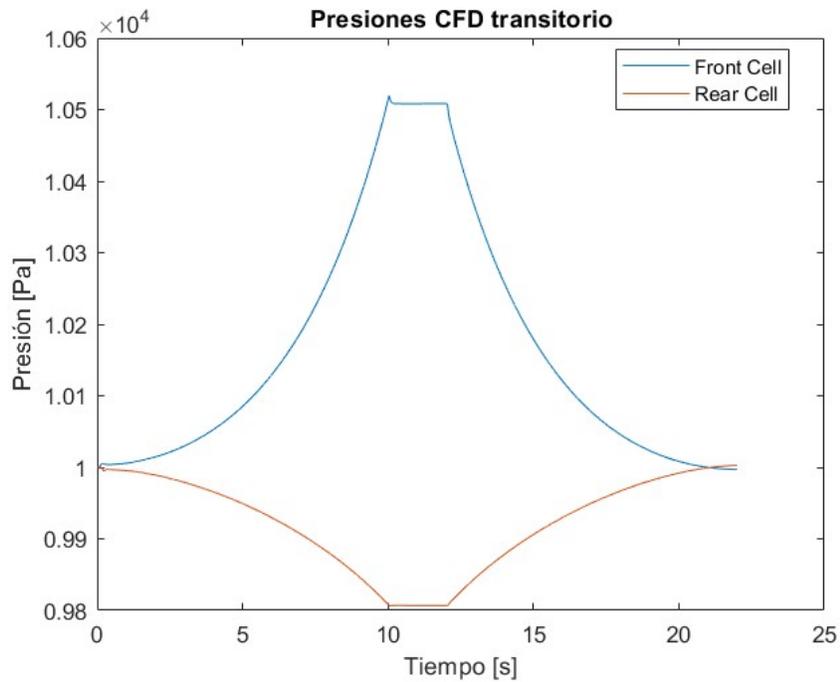


Figura 4.8: Distribución de presión CFD para el caso transitorio

# Capítulo 5

## Modelo de un tubo

Para poder simular el flujo en los tubos, se ha planteado un modelo unidimensional de volúmenes finitos del tubo, en el que la presencia del pod se simula mediante la acción de los términos fuente que se han obtenido mediante CFD en el capítulo anterior. En este tubo, se resuelven las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y energía para cada una de las celdas en las que se va a dividir el dominio.

### 5.1. Discretización del tubo

La geometría que sobre la que se va a calcular el problema, es una geometría análoga a la que se muestra en la figura 5.1.



Figura 5.1: Malla de 1 tubo

El tubo se divide en  $n$  celdas iguales, en las que se distinguen las celdas total o parcialmente ocupadas por el pod, y las celdas libres. Las celdas ocupadas por el pod tendrán sus contornos desactivados, de manera que no se permita intercambio de flujo entre ellas, aunque sí se calculará la solución en cada paso de integración. Por otro lado, dentro de las celdas libres, se nombran como Rear y Front, a las celdas que se encuentran detrás y delante del pod respectivamente. De este modo, situando el origen de coordenadas en la parte delantera del pod, se determina fácilmente cuáles son las celdas Rear y Front en cada instante de tiempo.

$$x_{Front} = Posicion_{pod} \quad (5.1)$$

$$x_{Rear} = x_{Front} - Longitud_{pod} \quad (5.2)$$

donde la posición del pod se va integrando en cada instante de tiempo.

$$Posicion_{pod_t} = Posicion_{pod_{t-1}} + C_{pod}\Delta t \quad (5.3)$$

siendo  $C_{pod}$  la velocidad del pod en cada instante.

De este modo, queda determinada la posición de la parte delantera y trasera del pod, y las celdas delantera (Front) y trasera (Rear) serán las que entre sus contornos contengas esas posiciones.

## 5.2. Transmisión de los términos fuente

Una vez definida la geometría del problema que se va a resolver, es necesario explicar el procedimiento de cálculo para la transmisión de los términos fuente que simularán el comportamiento del pod. Los términos fuente que se van a transmitir son, un término de masa, uno de cantidad de movimiento y uno de energía.



Figura 5.2: Modelo de 1 tubo

La transmisión de los términos fuente se esquematiza en la figura 5.2, donde se muestra que estos términos se introducen en la celda trasera (Rear) antes mencionada y se van repartiendo celda a celda hasta llegar a la celda delantera (Front). Estos términos fuente se pueden obtener gracias a los cálculos CFD explicados en el capítulo anterior. Para poder calcular los términos de gasto, cantidad de movimiento y energía, es necesario utilizar el gasto relativo obtenido del CFD y calcular el gasto másico absoluto.

$$\dot{m}_{abs} = -\dot{m}_{rel} + \rho_i C_{pod} A_i \quad (5.4)$$

donde  $\rho_i$  y  $A_i$  son la densidad de la celda y el área de la sección del centroide de la celda respectivamente.

De este modo, el término de gasto será directamente el gasto absoluto, y el término de cantidad de movimiento y energía serán proporcionales a este, además de que se añadirán términos de cantidad y energía extra debidos a las fuerzas y trabajos del pod y del compresor.

$$\dot{m}_{Source} = \dot{m}_{abs} \quad (5.5)$$

$$p_{Source} = \dot{m}_{abs} u_i - \frac{F_{pod}}{n} \quad (5.6)$$

$$E_{Source} = \dot{m}_{abs} C_{p_i} T_i - \frac{F_{pod} C_{pod}}{n} + \frac{\dot{W}_C}{n} \quad (5.7)$$

siendo  $u_i$ ,  $C_{p_i}$  y  $T_i$  la velocidad del flujo, el calor específico a presión constante y la temperatura estática en la celda  $i$ . Además,  $n$  es el número de celdas que hay entre la trasera y la delantera ambas incluidas,  $\dot{W}_C$  es la potencia aportada por el compresor, y  $F_{pod}$  son las fuerzas del pod (Fricción, fuerza del compresor, y pérdidas de la estela).

Por otro lado, en las celdas delantera y trasera del pod, es necesario colocar un término de momento para equilibrar dicha celda; de lo contrario, esta celda tiende a vaciarse al tener uno de sus contornos desactivado. Este problema es de carácter puramente numérico y, por ello, se ponen dos fuerzas promediadas en las celdas. Estas fuerzas están promediadas con el valor de la propia celda y la anterior en el caso de la celda trasera, y con la celda posterior en caso de la celda delantera.

$$Force_{Front} = \frac{A_{Front} P_{Front} + A_{Front+1} P_{Front+1}}{2} \quad (5.8)$$

$$Rear_{Front} = \frac{A_{Rear} P_{Rear} + A_{Rear-1} P_{Rear-1}}{2} \quad (5.9)$$

Por último, a la hora de obtener las soluciones de los valores de las variables en las celdas delantera y trasera, es necesario considerar que estas señales tendrán mucho ruido. Al ser un dominio mallado en celdas, cada vez que el pod cambie de celdas, la celda que se encontraba por delante de la trasera, será la trasera en el nuevo instante de tiempo, y o mismo ocurre con la

delantera. Para ello, se han promediado los valores de la presión con las celdas vecinas para suavizar dicha solución.

De este modo, se puede promediar la presión en la celda delantera con la siguiente expresión.

$$FrontPressure = \%FrontP_{Front} + (1 - \%Front)P_{Front+1} \quad (5.10)$$

Del mismo modo, se puede expresar la presión promediada en la celda trasera de manera análoga. Siendo  $\%Front$  y  $\%Rear$  la fracción en tanto por 1 ocupado por el pod en su parte delantera y en su parte trasera.

$$RearPressure = \%RearP_{Rear} + (1 - \%Rear)P_{Rear-1} \quad (5.11)$$

### 5.3. Caso estacionario

Una vez realizado el modelo, se realizan distintas pruebas con él para poder compararlo con CFD y verificarlo. El caso estacionario que se lanza es un perfil constante de velocidad de 125 m/s, que da una fuerza de drag constante de 714 N, y ve un gasto relativo de 66.86 kg/s. El tubo en el que se encuentra el pod tiene un longitud de 7 km y dicho pod está situado a una distancia de 3500 m en el instante  $t = 0$ .

#### 5.3.1. Estudio de convergencia de malla

Para este caso se ha realizado primero un estudio de convergencia de malla, para saber qué tamaño del dominio es el más adecuado para simular la misión. Este análisis de convergencia se realiza en una sección situada a 3700 metros al inicio del tubo, de manera que la corriente pueda estabilizarse y los resultados que se obtengan no tengan ruido. Los resultados son los que se muestran a continuación en la figura 5.3. Además, se ha utilizado un tubo de 10 km de longitud para evitar que en el tiempo simulado llegue la reflexión de alguna onda.

De este modo, se puede apreciar cómo los resultados tienden a un valor de presión a medida que el mallado se vuelve más fino. Para todos los contornos se puede apreciar una subida de presión a los 0.57 segundos. Esta subida se debe a la onda de compresión liberada cuando el pod se pone en marcha. Posteriormente, a los 1.6 segundos, se produce un descenso de presión que se corresponde al instante donde el pod pasa por la sección que se estudia. La presión en la parte trasera del pod es más baja que en las condiciones de reposo del tubo. Por ello, el flujo de aire en el tubo se desplaza para compensar esa depresión, de modo que la presión en el plano se reduce tomando el valor del pod en la celda trasera.

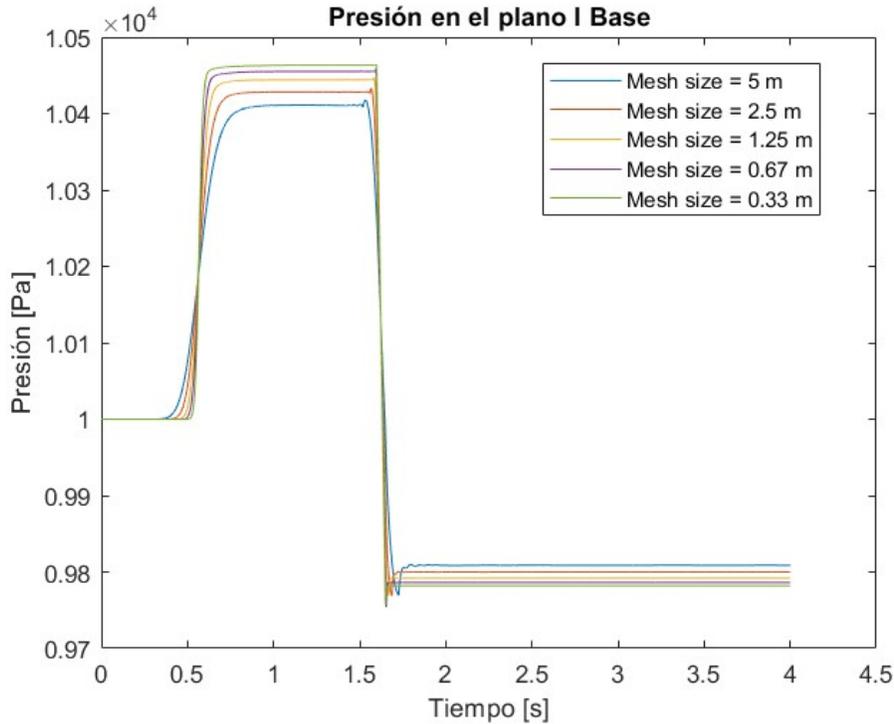


Figura 5.3: Estudio de convergencia de malla para el modelo de 1 tubo en caso estacionario

A continuación, se muestran los resultados de este análisis de convergencia de forma numérica.

Case [m]	Compresión			Expansión			$\Delta P$	Error $\Delta P$
	Pst [Pa]	Error	Error Total	Pst [Pa]	Error	Error Total		
5	10410.8			9808.57			602.23	
2	10428.2	-0.167	-0.167	9799.91	0.088	0.088	628.29	-4.327
1.25	10444.1	-0.152	-0.320	9791.79	0.083	0.171	652.31	-3.823
0.67	10455.0	-0.104	-0.425	9786.12	0.058	0.229	668.88	-2.540
0.33	10463.0	-0.077	-0.501	9781.90	0.043	0.272	681.10	-1.827
CFD	10521.0	-0.554		9822.00	-0.410		699.0	-2.6228

Cuadro 5.1: Resultados del estudio de convergencia para el caso estacionario

Se puede ver como el salto de presiones que predice el modelo es más próximo al que predice el CFD a medida que se aumenta el refinamiento. Los errores se indican en tanto por cien.

### 5.3.2. Estudio de fuerzas

Anteriormente, se ha introducido la fricción sobre el pod obtenida mediante CFD como la fuerza que actuaría de término fuente de momento y la que provoca la potencia del pod que se introduce como término de energía.

Este valor que se ha utilizado en primer lugar para los estudios de convergencia de malla y en los primeros modelos, es un valor de referencia, pero no puede utilizarse al acoplar el modelo de acción de ondas de VEMOD con el resto del gemelo digital, puesto que los datos CFD que se usan para alimentar a VEMOD, van a ser proporcionados por un modelo aerodinámico integrado en el gemelo.

Una vez planteada la necesidad de modelar una fuerza que actúe como término fuente, es necesario valorar qué términos deben introducirse en esta. Puesto que se ha necesitado introducir dos términos de cantidad de movimiento en la celda delantera y trasera por motivos numéricos, es necesario descontar estos dos términos de la fuerza que se introduce como término fuente.

De este modo, si se toma un volumen de control como el que se muestra en la figura 5.4, se puede realizar un balance de cantidad de movimiento sobre el flujo.



Figura 5.4: Volumen de control del pod y balance de fuerzas

De este modo, si se toma  $F_{100}-F_0$ , se estará incluyendo la cantidad de movimiento debida a las fuerzas del pod, la debida a la fuerza del compresor, la fricción sobre el pod y sobre el tubo y la cantidad de movimiento debida a la estela.

Por tanto, si a este término de cantidad de movimiento se le resta la cantidad de movimiento introducida para solucionar los problemas numéricos, se obtiene el término fuente que se introduce como fuerza de pod.

$$Force_{pod} = (F_{100} - F_0) - (Force_{Front} - Force_{Rear}) \quad (5.12)$$

$$F_{100} - F_0 = (p_{100} - p_0)A + \dot{m}_{rel}(v_{100} - v_0) \quad (5.13)$$

A continuación, se va a mostrar una comparativa entre los resultados obtenidos para la misión

estacionaria. Para ello, se compara un caso en que el que utiliza la definición de la fuerza del pod como la fricción de las paredes obtenidas en CFD, con otro caso en el que se calcula para cada instante de tiempo la fuerza según la ecuación 5.12. Los resultados que se van a mostrar son: la evolución de las presiones en un plano a 200 metros de la posición de inicio del pod, y la evolución de la presión, temperatura y velocidad en la celda delantera y trasera del pod.

En la figura 5.5 se aprecia como ambos modelos dan resultados similares, no obstante los valores en las zonas donde las presiones se estabilizan difieren ligeramente. Además, en el inicio de la zona de alta presión, cuando la onda de compresión pasa a través de la sección, el caso de la fuerza del pod calculada en VEMOD, tiene una oscilación mayor que en el caso del drag obtenido mediante CFD.

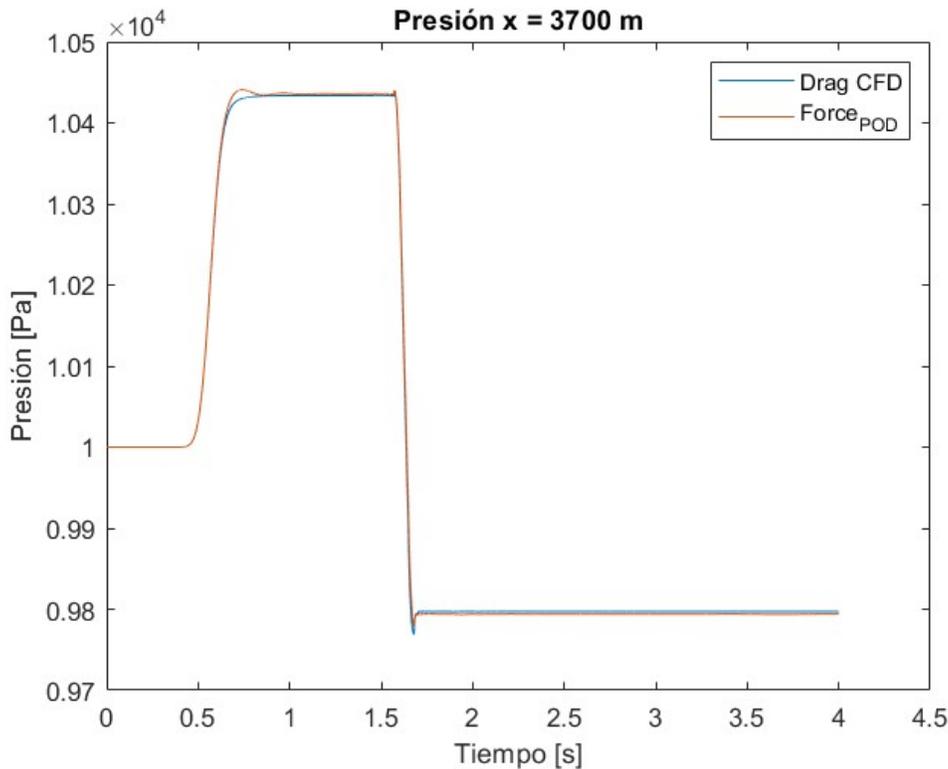


Figura 5.5: Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección  $x = 3700$  m

Haciendo un análisis más riguroso de los resultados, se procede a comparar los valores de las zonas de presión donde ha pasado la onda y donde ya ha pasado el pod, con los resultados obtenidos de CFD. Los resultados se muestran en la tabla 5.2. De este modo, se puede ver como el salto de presiones se aproxima más con el nuevo cálculo de fuerzas que se ha implementado, además de que predice mejor la presión en cuando sólo la onda a pasado por la sección, aunque sí que comete más

error cuando el pod atraviesa también dicha sección.

Caso	p [Pa] t=1 s	p [Pa] t=3 s	$\Delta p$	Error t=1 s	Error t=3 s	Error $\Delta p$
Fuerza Drag	10433.6	9797.16	636.44	0.831	0.253	8.95
Fuerza Vemod	10436.3	9793.86	642.44	0.805	0.286	8.092
CFD	10521	9822	699	-	-	-

Cuadro 5.2: Error en el cálculo de las presiones en función de la fuerza introducida con respecto al CFD

### Resultados en las celdas delantera y trasera

A continuación se va mostrar cómo es la evolución de la presión, temperatura y velocidad en las celdas delantera y trasera del pod a lo largo del tiempo, para un determinado mallado, y a su vez se van a comparar simulaciones realizadas con los dos cálculos distintos de la fuerza.

En la figura 5.6, se puede ver cómo la presión alcanza convergencia a un valor que coincide con la distribución de presión antes de que pase el pod para la celda delantera, y coincide con la distribución de presión una vez que ha pasado el pod en la celda trasera. Esto se debe a que mientras el pod acelera, el flujo se mueve de la parte trasera a la parte delantera, es decir, se desplaza en la dirección de su movimiento. Esto provoca que aumente la presión en la zona delantera del pod y, en una situación estacionaria, el valor de la presión tiende a converger al mismo que al de la parte delantera, debido a que se genera una onda de compresión, que va aumentando la presión del flujo. Una vez el pod pasa por la sección, el flujo tiende al valor de la celda trasera; esto se debe al mismo razonamiento que antes. El flujo absoluto se desplaza de la parte trasera a la parte delantera del pod. De este modo, se genera una onda de expansión hacia el extremo del tubo, que va poniendo en movimiento al flujo hacia la parte trasera del pod, de donde hay más presión hacia donde hay menos presión. Así, se va reduciendo la presión en la sección de estudio. Como se trata de un caso estacionario, al igual que sucedía con la onda de compresión, el valor de la presión en la sección de estudio una vez que el pod ha pasado, converge al valor de presión de la celda trasera del pod.

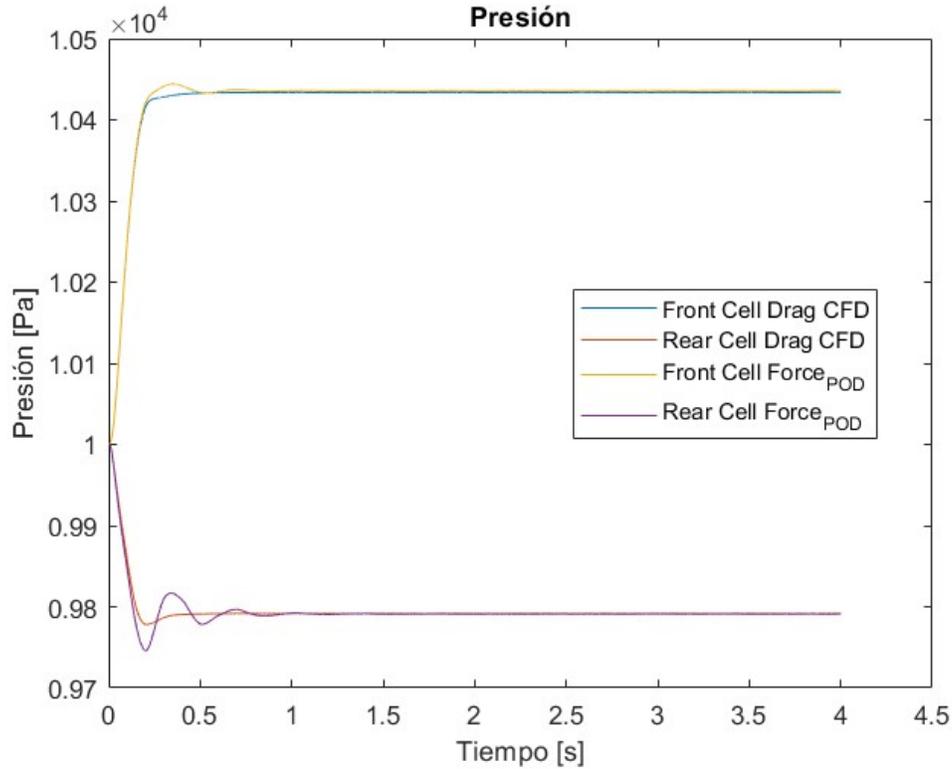


Figura 5.6: Presión en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo

Comparando los dos casos de fuerzas que se han aplicado, se puede apreciar como el caso de la fuerza aplicada por CFD es más estable al inicio del movimiento del pod. Esto tiene sentido, ya que la fuerza calculada como  $F_{100} - F_0$  es dependiente del cálculo del paso anterior, mientras que el valor de Drag obtenido por CFD es un valor constante para este caso estacionario.

En cuanto a las temperaturas, estas siguen una tendencia similar a la presión, lo cual es lógico, ya que en esta misión no existe trabajo del compresor. Por lo tanto, la presión y la temperatura están directamente relacionadas por la densidad y la constante real de los gases.

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (5.14)$$

Por tanto, la presión y la temperatura presentan distribuciones con la misma tendencia.

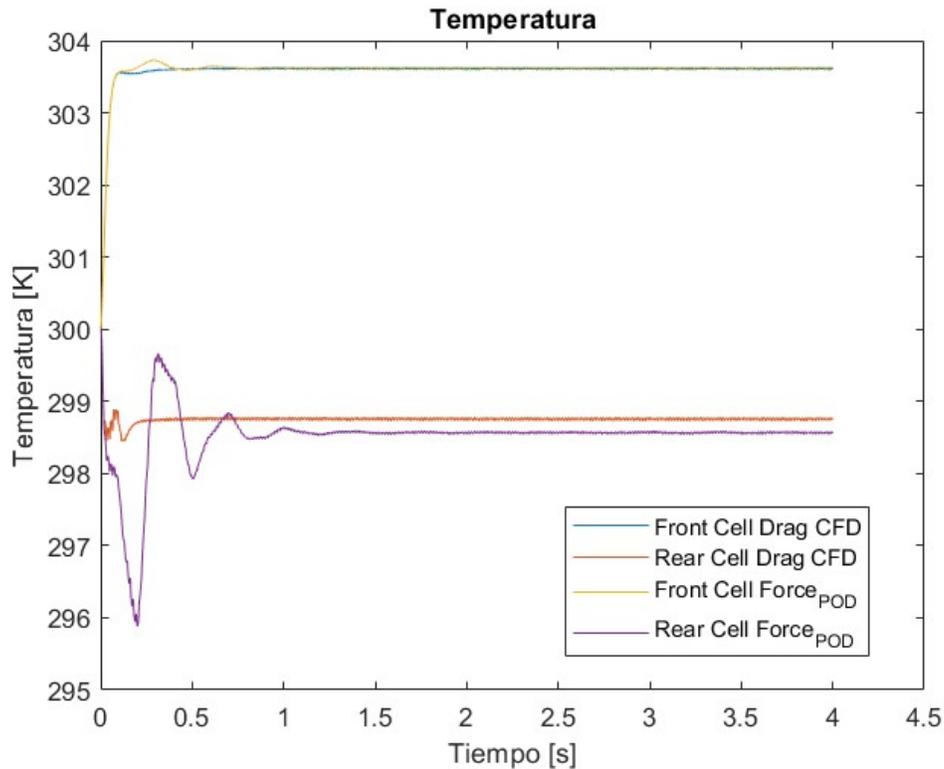


Figura 5.7: Distribución de temperaturas en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo

De la misma manera que en el caso de las presiones, la temperatura tiene también una mayor oscilación al inicio de la misión cuando se introduce como término de cantidad de movimiento la fuerza calculada con VEMOD.

Por último, la distribución de velocidades muestran una velocidad en la dirección de avance del pod tanto en la parte trasera como delantera. Esto se debe a que el flujo se mueve de la parte trasera a la delantera del pod, y que las ondas de presión generadas, tanto la de compresión como la de expansión mueven el flujo en la dirección de avance del pod. Del mismo modo que ocurre en el caso de la presión y la temperatura, la distribución de velocidades también presenta mayor oscilación en el caso en el que se introduce la fuerza calculada con Vemod como término fuente.

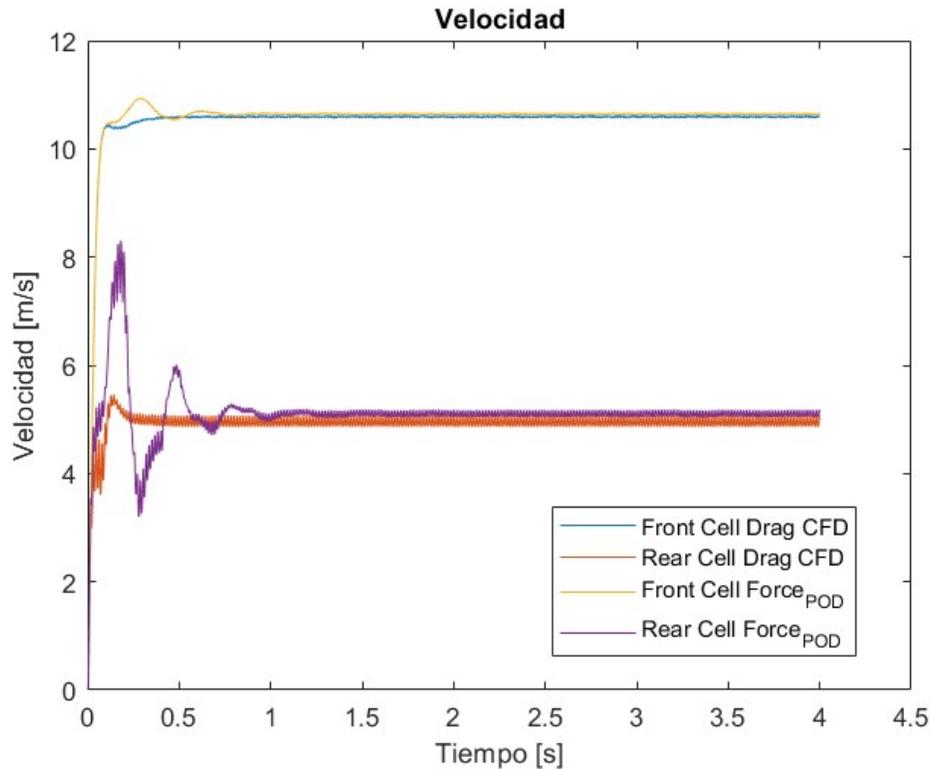


Figura 5.8: Distribución de velocidades absolutas en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo

## 5.4. Caso transitorio

Una vez realizada una comprobación para un caso estacionario, se realizan pruebas para el caso transitorio. Este, consta de un perfil en rampa en el que el pod acelera de 0 a 125 m/s en 10 segundos, se mantiene 2 segundos a velocidad constante, y posteriormente va reduciendo su velocidad a cero hasta los 22 segundos.

Haciendo uso de las simulaciones CFD, se obtiene que el gasto másico relativo sigue esta rampa lineal entre 0 y 66.86 kg/s, al mismo tiempo que las fuerzas sobre el pod toman valores entre 0 y 714 N. Además, del mismo modo que se ha hecho en el caso estacionario, se realizará el estudio de fuerzas.

### 5.4.1. Estudio de convergencia de malla

Al igual que en el caso anterior, se ha realizado un estudio de convergencia de malla para verificar cómo afecta el tamaño de las celdas a la tendencia de los resultados, en este caso transitorio. Tal y como se ha realizado antes, estos resultados se van a evaluar en un plano situado a 200 metros de la posición inicial del pod, de manera que las señales estén más estabilizadas y haya menos ruido. Además, se ha empelado un tubo de 10 km de longitud, de forma que quede asegurado que se evitan las reflexiones de las ondas, puesto que en el tiempo simulado no llegan a la sección de estudio.

En la figura 5.9 se puede apreciar para todos los casos de mallado un contorno similar, que converge a un valor de presión a medida que este mallado se vuelve más fino. El perfil de presiones obtenido es más complejo que el del caso transitorio. Se puede ver como desde 0 hasta 5.65 segundos hay un incremento de presión que llega hasta un valor superior a los 10100 Pa. Esta subida de presión se debe a la onda de compresión generada por la aceleración del pod. Al llegar a los 5.65 segundos, es el momento en el que el pod pasa por la sección, de manera que la presión comienza a bajar, tomando el valor de la presión en la parte trasera del pod en ese momento. A partir de ese momento, la velocidad del pod sigue aumentando, y se trasiega más gasto de la parte trasera a la parte delantera, de forma que la presión en la parte trasera sigue disminuyendo, hasta que cuando el tiempo llega a 12 segundos el pod alcanza una velocidad constante, y por lo tanto, la presión se estabiliza hasta que el pod comienza a decelerar a los 14 segundos. Cuando comienza la deceleración, la cantidad de gasto que se trasiega disminuye y por lo tanto vuelve a disminuir la diferencia de presiones, aumentando el valor de la parte trasera del pod, que se transmitirá a la sección como ondas de expansión.

De forma numérica los resultados se pueden ver en la tabla 5.3.

Case [m]	Pst [Pa]	Error	Error Total	Pst [Pa]	Error	Error total	$\Delta P$	Error $\Delta P$
5	10106	-	-	9785.37	-	-	<b>320.63</b>	-
2.5	10111.4	-0.053	-0.053	9773.94	0.117	0.117	337.46	-5.249
1.25	10115.3	-0.039	-0.092	9763.62	0.106	0.222	351.68	-4.214
0.667	10117.9	-0.026	-0.118	9755.21	0.086	0.308	362.69	-3.131
0.33	10119.5	-0.016	-0.134	9751.24	0.041	0.349	368.26	-1.536

Cuadro 5.3: Errores en el estudio de convergencia de malla para el caso transitorio del modelo de un tubo

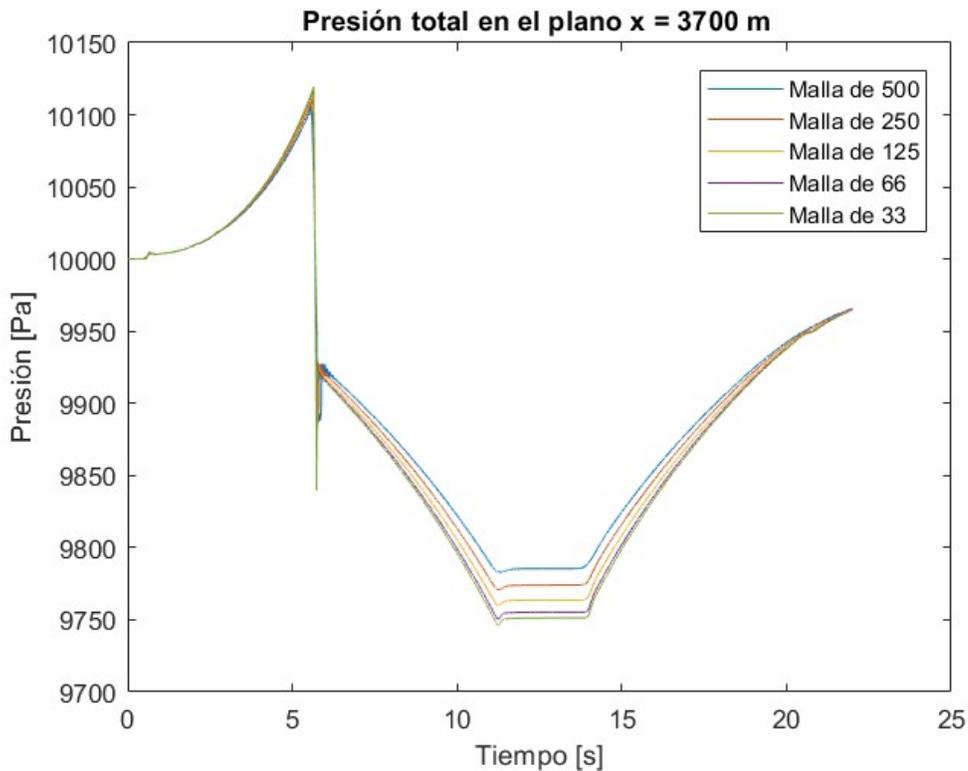


Figura 5.9: Estudio de convergencia de malla para el modelo de 1 tubo en el caso transitorio

#### 5.4.2. Estudio de fuerzas

Al igual que en el caso estacionario, se va a realizar el estudio de cómo el término fuente de fuerza que se introduzca influye en la solución. Para ello, se va a analizar al igual que en el caso estacionario, cómo ha afectado cada fuerza a la distribución de presiones en el plano situado a 200 metros del pod. Los resultados se pueden encontrar en la imagen 5.10.

En la imagen se puede apreciar cómo para los instantes donde el pod no ha llegado al plano de estudio, la solución es idéntica. Una vez el pod atraviesa la sección, los valores de presión se van separando hasta una diferencia máxima cuando el pod se pone a velocidad constante. Esta diferencia supone que el caso en el que la fuerza se calcula mediante VEMOD, es de 10 Pascales menos. Una vez que el pod empieza a decelerar, los valores de presión van convergiendo al mismo valor. Además, en el momento en el que el pod atraviesa la sección, se produce un transitorio más brusco en el caso en el que la fuerza que se introduce como término fuente es la del CFD. Este transitorio se traduce en un salto en la presión en el intervalo de tiempo que el pod cruza la sección.

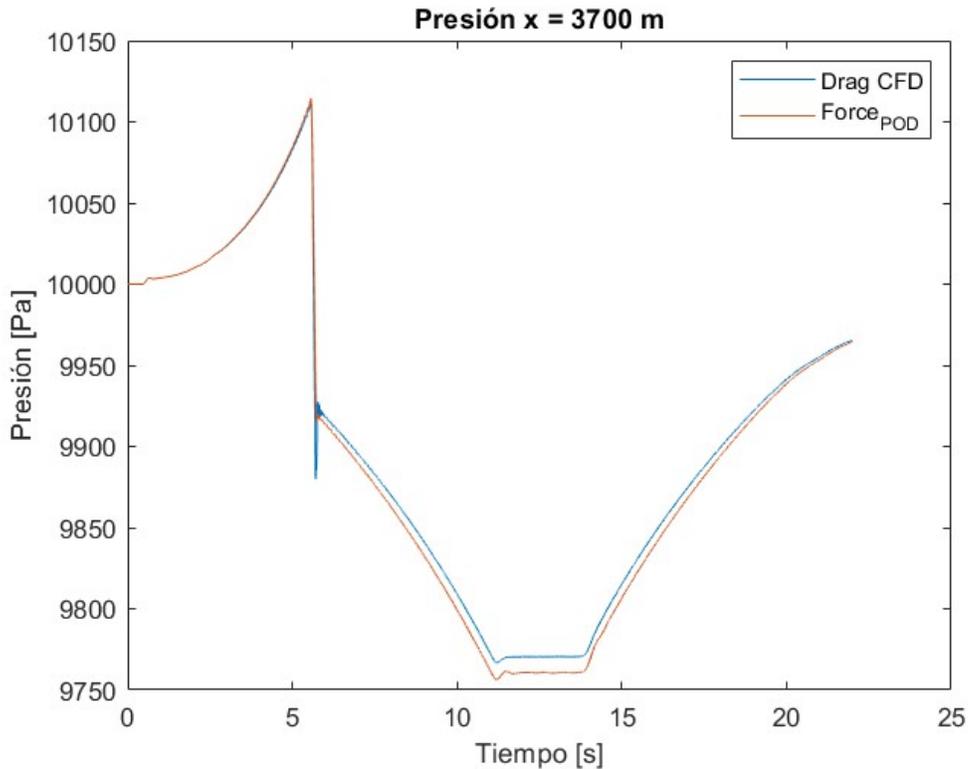


Figura 5.10: Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección  $x = 3700$  m en una misión transitorio

### Resultados en las celdas delantera y trasera

Por último, se van a mostrar los resultados en las celdas delantera y trasera del pod para los dos casos de fuerzas estudiadas.

En el caso de la presión, los resultados son prácticamente iguales en ambos casos, aunque en la celda delantera sí que se aprecia una pequeña diferencia de presiones en los dos segundos en los que el pod se desplaza a velocidad constante. Estos resultados pueden verse en la figura 5.11.

En el caso de la temperatura, los resultados se pueden ver en la figura 5.12. En esta imagen se aprecia como la distribución de temperaturas es muy similar en la celda delantera, pero llega a tener diferencias de un Kelvin en la celda trasera, donde el caso alimentado con el término fuente calculado en VEMOD presenta menor rizado en dicha señal.

En el caso de la distribución de velocidad, en la figura 5.13, se puede ver como ambas distribuciones tienen valores muy similares con la salvedad de que en la celda trasera, la distribución obtenida con la fuerza calculada con VEMOD presenta menos ruido.

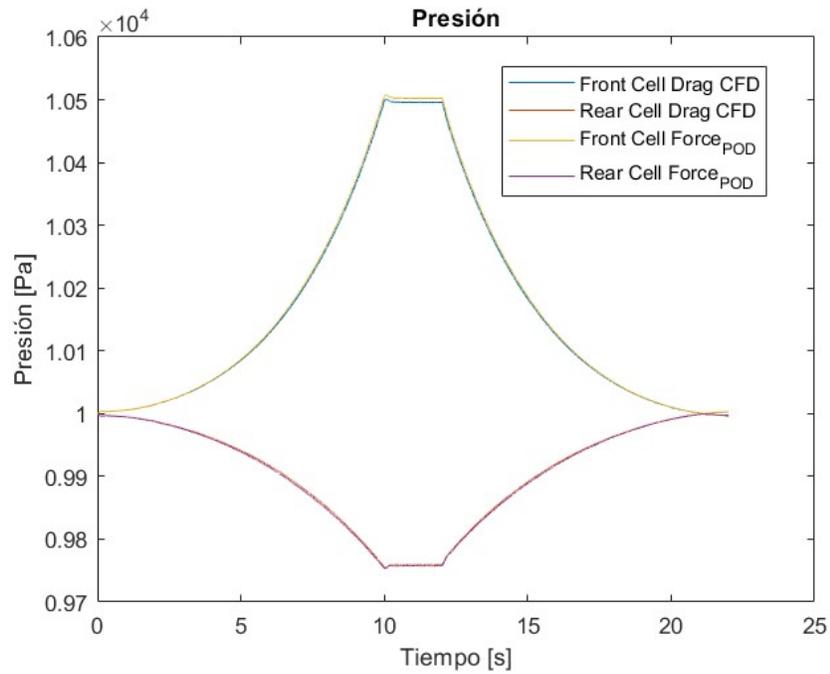


Figura 5.11: Distribución de presión en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo

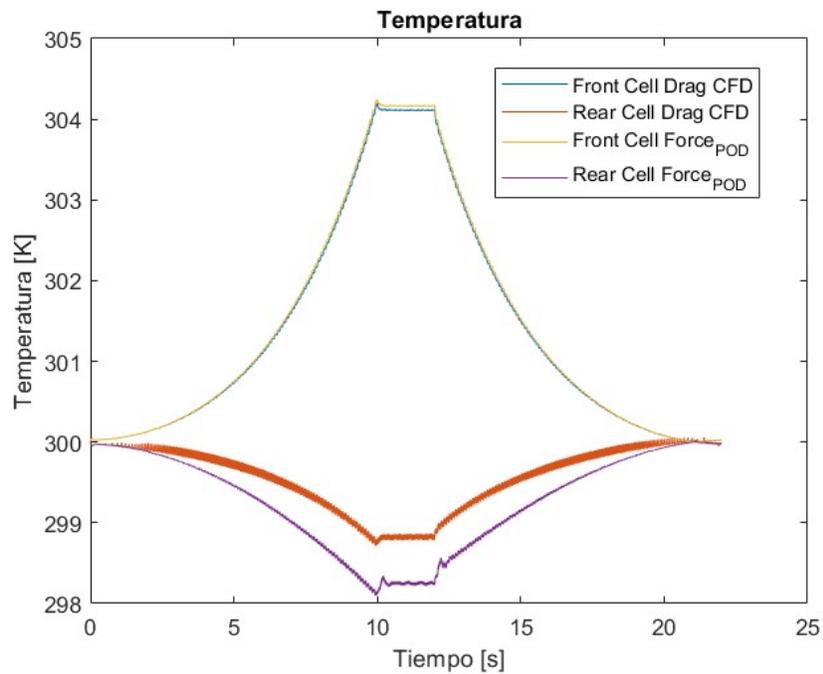


Figura 5.12: Distribución de temperatura en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo

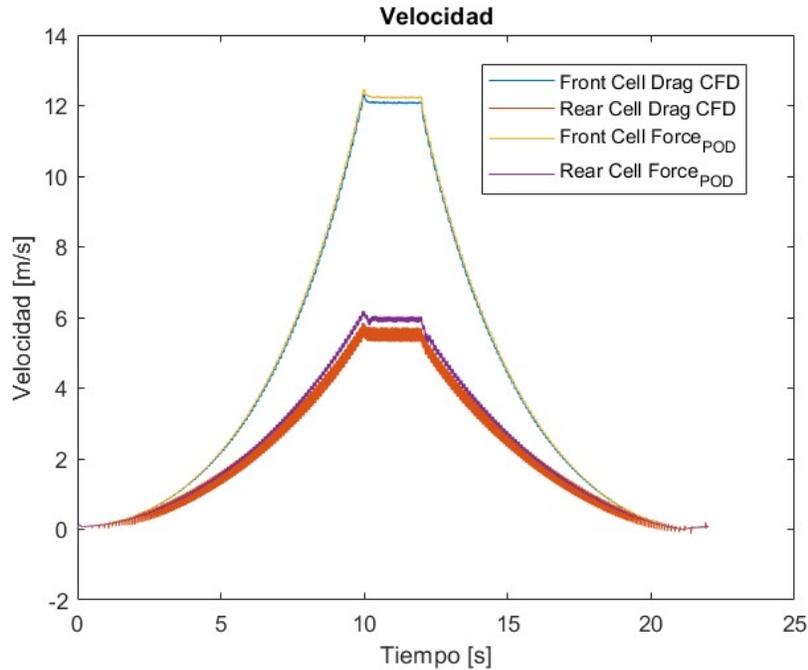


Figura 5.13: Distribución de velocidad en la celda delantera y trasera del pod en función del tiempo

## 5.5. Conclusiones

Tras haber realizado las verificaciones del modelo de acción de ondas, se puede afirmar que este modelo predice de manera correcta la distribución de las propiedades dentro del tubo, tanto para casos transitorios como para casos estacionarios. Además, se ha conseguido encontrar una fuerza independiente del CFD, que permite alimentar el término fuente de cantidad de movimiento, de forma que el modelo se puede integrar en el gemelo digital.

No obstante, tras haber realizado algunas pruebas con él, se encuentra una gran debilidad del modelo. Esta debilidad surge de la necesidad de realizar un mallado homogéneo en el tubo de modo que, para realizar misiones de gran duración donde el tubo tenga una longitud muy larga, el número de celdas aumentará considerablemente. Además, como se verificó en los estudios realizados anteriormente, es necesario reducir el tamaño de malla para obtener una convergencia en la solución. De este modo, si se combina la necesidad de realizar un mallado fino, con la necesidad de utilizar un tubo muy largo, el ordenador se queda sin memoria suficiente para poder realizar la simulación. Mientras, en los casos en los que el ordenador no llega a quedarse sin memoria, el coste computacional crece considerablemente.

# Capítulo 6

## Modelo de 2 tubos

Para poder resolver los problemas mencionados con el modelo de un único tubo, se plantea un modelo de dos tubos. El tubo principal, será idéntico al tubo del modelo anterior, y el segundo tubo consistirá en un tubo de mallado más fino que sustituirá las zonas ocupadas por el pod funcionando en conjunto a modo de malla quimera. De esta manera, se podrá transmitir los términos fuente por el segundo tubo de modo que, al tener un mallado más fino, los saltos de presión debido al cambio de una celda a otra sean más bajos, reduciendo el ruido de la señal. Así mismo, también se podrá reducir más la malla en zonas cercanas al pod, eliminando los problemas derivados de la falta de memoria para realizar las simulaciones con mallados finos.

### 6.1. Discretización de los tubos

El primer tubo será un tubo idéntico al del modelo anterior, es decir, un tubo de longitud dada dividido en  $n$  celdas iguales. Por otro lado, el segundo tubo será un tubo más fino de longitud igual al número de celdas total y parcialmente ocupadas por el pod, y dividido en  $n$  celdas de igual longitud, cumpliendo la condición de que una celda de las sustituidas del tubo 1, estará ocupada ahora por un número entero de celdas del tubo 2. Es decir, si llamamos  $\Delta X$  al tamaño de las celdas del tubo 1, y  $\Delta x$  al tamaño de las celdas del tubo 2:

$$\frac{\Delta X}{\Delta x} = m \in Z \quad (6.1)$$

siendo  $m$  el número de celdas del tubo 2 contenidas en el tubo 1.

Para poder definir el mallado es necesario en primer lugar definir la longitud del tubo 2. Esta longitud se corresponderá con la longitud del número de celdas ocupadas en la posición más restrictiva del pod. Conociendo la longitud del tubo 1 y la longitud del pod, se puede determinar cuántas celdas están totalmente ocupadas por el pod ( $n_{ocupadas_T}$ ).

$$n_{ocupadas} = (L_{pod}/\Delta X) \quad (6.2)$$

De este modo, la parte entera del resultado serán las celdas que están completas totalmente, y la parte decimal el porcentaje de celda o celdas que están ocupadas parcialmente. En este momento existen tres posibilidades: que solo exista parte entera, que solo exista parte decimal, o que existan ambas. Cuando sólo existe parte entera, podrían ocuparse únicamente tantas celdas como resultado haya dado el cociente más una, en el caso de que no estén todas totalmente ocupadas. Cuando solo existe parte decimal, podrían ocuparse como mucho dos celdas, cuando el porcentaje de ocupación de cada celda sea bajo. Por último, cuando existe tanto parte decimal como parte entera, se pueden ocupar hasta dos celdas más del valor de la parte entera del cociente. Esta situación se corresponde a cuando el centro del pod está muy cerca del centroide de una celda cuando el entero del cociente es impar, o cuando el centro del pod está muy cerca de una interfase de dos celdas si el entero es par.

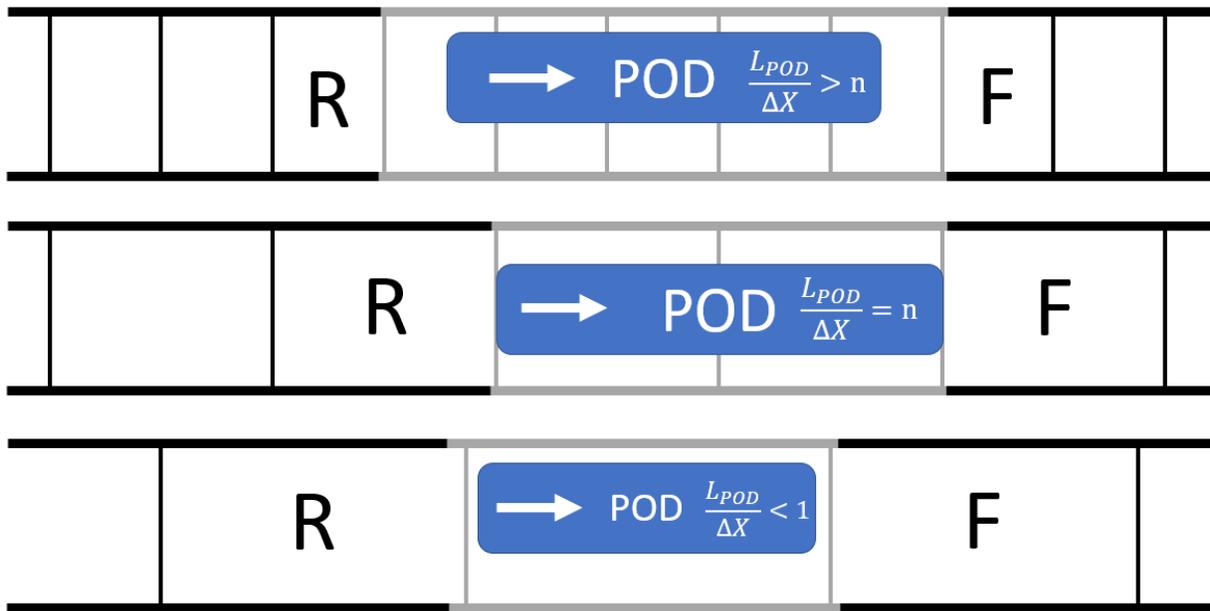


Figura 6.1: Longitud de la malla quimera

Una vez conocidas el número de celdas que se encuentran entre la trasera y la delantera al pod, se multiplican estas por el tamaño de celda del tubo 1, y se obtiene la longitud que debe tener el tubo 2.

De este modo, se realiza el cociente entre el tamaño de celda del tubo 1 y el deseado en el tubo 2. Si el cociente es un entero el tamaño es válido; si el cociente no es entero, el valor se redondea, obteniendo el número de celdas del tubo 2 que caben en una celda del tubo 1, y se divide el tamaño

de la celda del tubo 1 por el número de celdas contenidas, obteniendo así el valor del mallado más próximo al deseado.

De este modo, queda determinado la geometría del modelo de dos tubos como se puede ver en la figura 6.2.

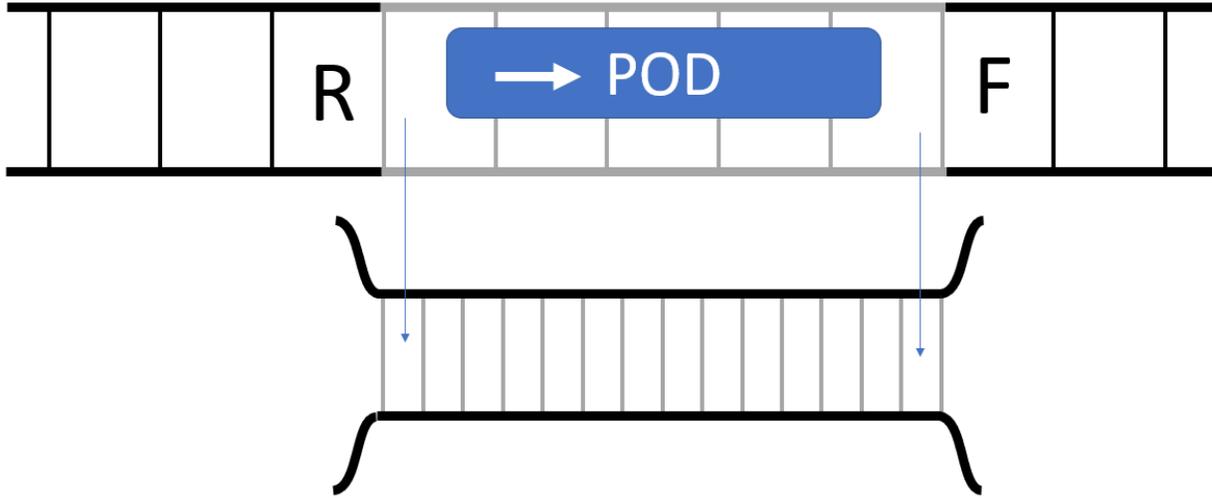


Figura 6.2: Mallado del modelo de 2 tubos

## 6.2. Transmisión de los términos fuente

El esquema numérico que se va a implementar para obtener la solución en el modelo de dos tubos es más complejo que el que se ha llevado a cabo en el modelo de un tubo.

La transmisión de términos fuente de la celda trasera a la delantera del tubo principal se mantiene, para poder obtener los resultados de las celdas contenidas en el tubo principal. La primera diferencia con el modelo anterior, es que ahora se transmitirán también términos fuente de la celda trasera a la primera celda del tubo secundario, y estas se irán transmitiendo siguiendo el mismo esquema del tubo principal hasta llevar a la celda frontal, la cual enviará su información al tubo principal.

$$\dot{m}_{Source} = \dot{m}_{abs} \quad (6.3)$$

$$p_{Source} = \dot{m}_{abs} u_i - \frac{F_{pod}}{n} \quad (6.4)$$

$$E_{Source} = \dot{m}_{abs} C_{p_i} T_i - \frac{F_{pod} C_{pod}}{n} + \frac{\dot{W}_C}{n} \quad (6.5)$$

Es importante destacar, que ya que se está transmitiendo la información por los dos tubos para tener soluciones homólogas, no se eliminarán dos veces los términos fuente en las celdas delantera y trasera del tubo principal.

Además, es necesario introducir en el tubo 1 los términos de fuerza que se introducían en el capítulo 5 para evitar problemas numéricos. No obstante, estos términos sólo se incluyen en el tubo 1, puesto que en el tubo 2 se reciben términos fuente que no permiten que la celda se vacíe.

Una vez realizada la transmisión de términos fuente, es importante tener en cuenta que, cuando el pod se pone en marcha en el tubo principal, se libera una onda de compresión que va aumentando la presión en el tubo aguas arriba del pod. Este aumento de presión no va a afectar al tubo secundario, por lo que la solución no sería realista y es necesario inicializar la primera celda del tubo secundario con la presión aguas arriba debida a la onda. Para ello, cada vez que el pod recorra una celda del tubo secundario, se moverán todos los valores del vector de estado (presión, temperatura y velocidad) una posición, desapareciendo el valor de la primera celda (celda trasera) y quedando libre el valor de la última (celda delantera), en la que se impondrán los valores del vector de estado de la celda delantera del tubo 1.

De la misma forma que se impone el valor del vector de estado en la celda frontal del tubo 2, se impone también el vector de estado de la primera celda del tubo 2 sobre el tubo 1, en su celda homóloga, la celda que se encuentra por delante de la trasera ( $Rear + 1$ ).

De este modo, el modelo numérico del esquema de 2 tubos se resumen en la figura 6.3.

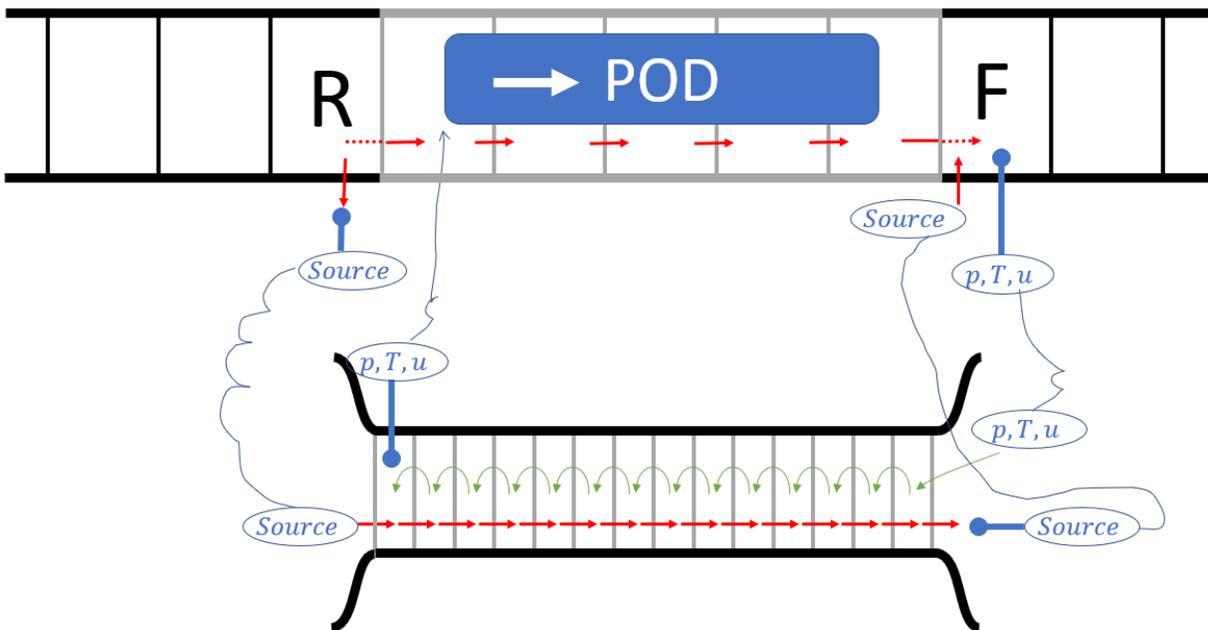


Figura 6.3: Transmisión de términos fuente en el modelo de dos tubos

### 6.3. Caso estacionario

El caso estacionario que se va a simular para probar el funcionamiento del modelo es el mismo que el en caso anterior, un perfil constante de 125 m/s de velocidad.

#### 6.3.1. Estudio de convergencia de malla

Al igual que en el capítulo anterior con el modelo de 1 tubo, en este modelo se estudiará por los mismos motivos la convergencia de malla en la sección situada a 200 metros del punto de inicio del pod (3700 metros con respecto al inicio del tubo).

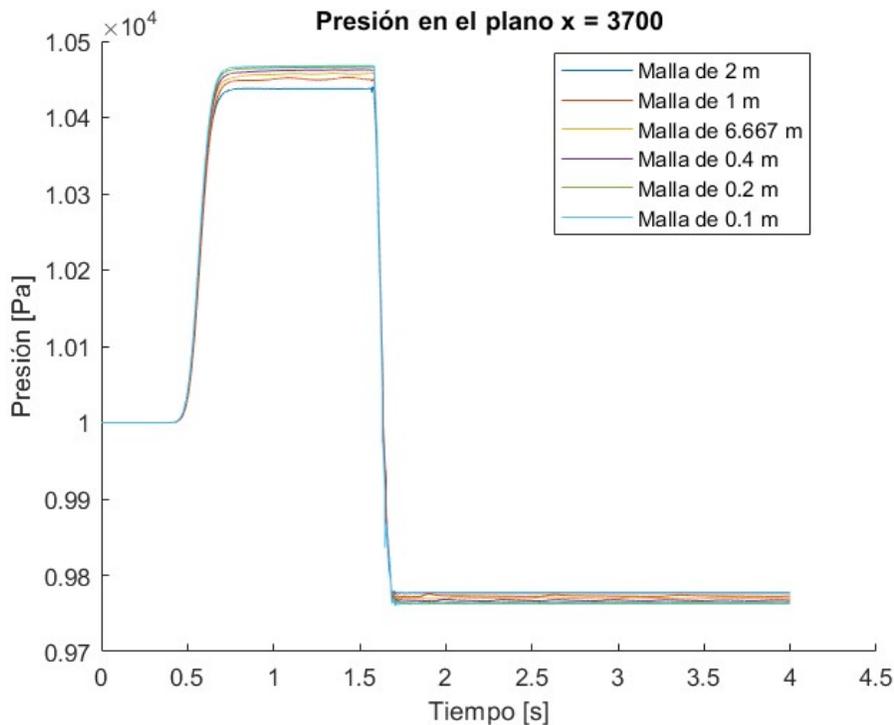


Figura 6.4: Estudio de convergencia de malla para el modelo de dos tubos

A la vista de la figura, se aprecia el mismo perfil de presiones que en el modelo de un tubo. Tanto las presiones en la parte anterior a que pase el pod por la sección de estudio, y la parte posterior, van convergiendo a un determinado valor a medida que se refina la malla. De hecho, como se puede ver en la tabla 6.1, a mayor refinamiento de malla, más se aproximan los resultados al CFD, y más próximo es también el salto de presiones. Aunque para el refinamiento de 0.1 m, se sobre estima el salto. En la tabla, los errores vienen dados en tanto por cien.

Case [m]	Compresión			Expansión			$\Delta P$	Error $\Delta P$
	Pst [Pa]	Error	Error Total	Pst [Pa]	Error	Error Total		
2	10437.50			9776.82			660.68	
1	10450.10	-0.121	-0.121	9772.60	0.043	0.043	677.50	-2.546
0.6667	10456.10	-0.057	-0.178	9769.60	0.031	0.074	686.50	-1.328
0.4	10461.20	-0.049	-0.227	9767.47	0.022	0.096	693.73	-1.053
0.2	10464.90	-0.035	-0.263	9764.26	0.033	0.128	700.64	-0.996
0.1	10467.20	-0.022	-0.285	9762.59	0.017	0.146	704.61	-0.567
CFD	10521.00		-0.800	9822.00		-0.462	699.00	0.796

Cuadro 6.1: Resultados del estudio de convergencia para el caso estacionario en el modelo de dos tubos

### 6.3.2. Estudio de fuerzas

Del mismo modo que se procedió en el capítulo 5 se va a realizar el análisis de como afecta el hecho de introducir en el término fuente de cantidad de movimiento una fuerza que descuenta los términos ya introducidos por motivos numéricos. Para ello, se va a analizar las diferencias en la distribución de presiones en la sección de 3700 metros, para el caso de alimentar el término fuente con la fuerza proveniente de CFD, o con la fuerza calculada en VEMOD.

Los resultados de este análisis se pueden ver en la figura 6.5, donde se puede apreciar una distribución de presiones en el tiempo similar en ambos casos. Además se puede apreciar que la fuerza obtenida por VEMOD valores de presión ligeramente más altos, en los instantes de tiempo donde el pod aún no ha pasado, y valores ligeramente más bajos en los instantes donde el pod ya ha pasado. Por último, se puede destacar que la fuerza obtenida mediante VEMOD produce un transitorio más suave en el momento en el que el pod atraviesa la sección de estudio.

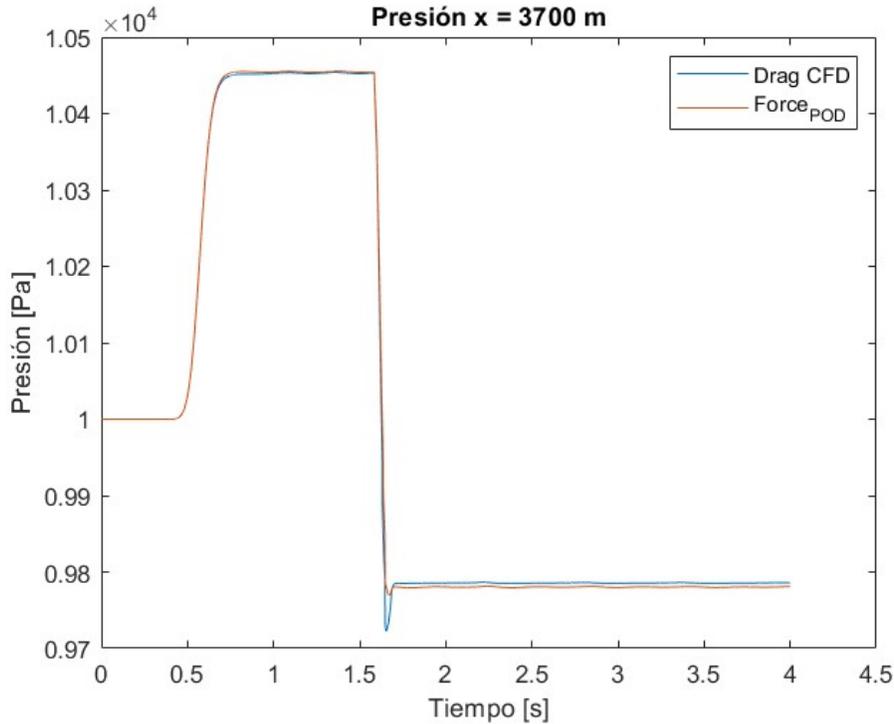


Figura 6.5: Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección  $x = 3700$  m

Las diferencias numéricas entre los dos casos se muestran en la tabla 6.2. En ella se puede ver cómo la fuerza obtenida mediante VEMOD predice mejor el salto de presiones, y la presión en la parte delantera, aunque se aleja un poco más en el cálculo de la presión en la parte trasera del pod.

Caso	$p$ [Pa] $t = 1$ s	$p$ [Pa] $t = 3$ s	$\Delta P$	Error $t = 1$ s	Error $t = 3$ s	Error $\Delta P$
Fuerza Drag	10452	9785.3	666.7	0.656	0.374	4.621
Fuerza VEMOD	10454	9779.7	674.3	0.637	0.431	3.534
CFD	10521	9822	699	-	-	-

Cuadro 6.2: Error en el cálculo de las presiones en función de la fuerza introducida con respecto al CFD

### Resultados en las celdas delantera y trasera

Por último, queda estudiar cómo es la influencia de la fuerza en las celdas delanteras y traseras del pod.

En el caso de la presión, se puede ver en la figura 6.6 cómo independientemente del caso se toman valores prácticamente iguales en las presión, con la salvedad de que, para el caso de la fuerza obtenida con CFD, el transitorio al iniciar la simulación es más suave.

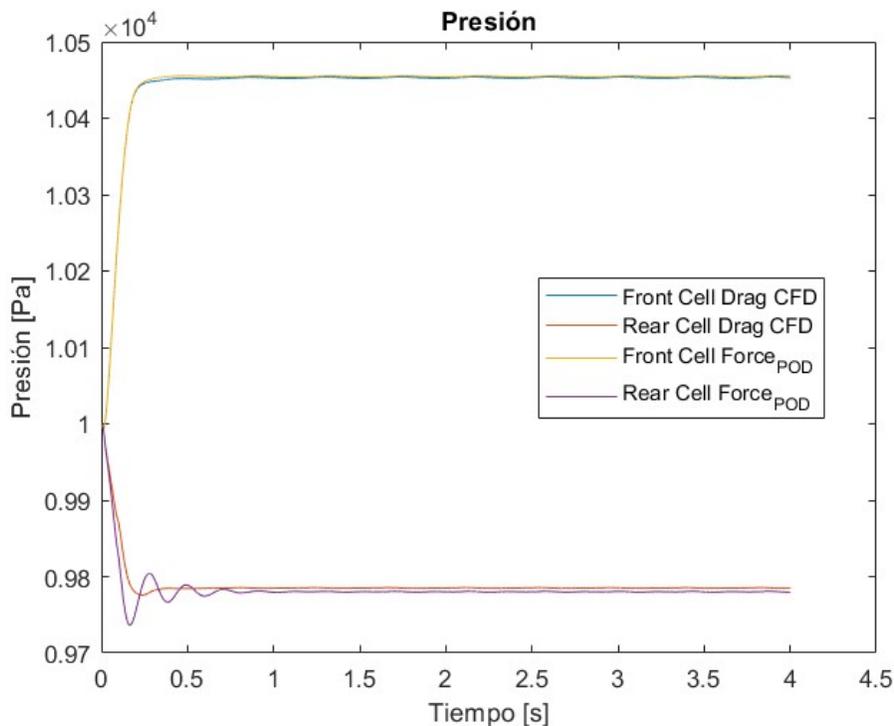


Figura 6.6: Presión en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo

En el caso de la temperatura, los resultados se pueden ver en la figura 6.7, donde se aprecia un valor idéntico en la parte delantera del pod para ambos casos y una diferencia de medio Kelvin en la parte trasera. Además, la señal calculada con VEMOD en la parte trasera tiene más ruido.

Por último, en el caso de la velocidad, se puede ver en la figura 6.8 como tanto en la parte delantera como en la trasera los dos casos convergen prácticamente al mismo valor, no obstante, al igual que con la temperatura y la presión, la señal de la parte trasera calculada con la fuerza de VEMOD presenta más ruido al inicio de la simulación.

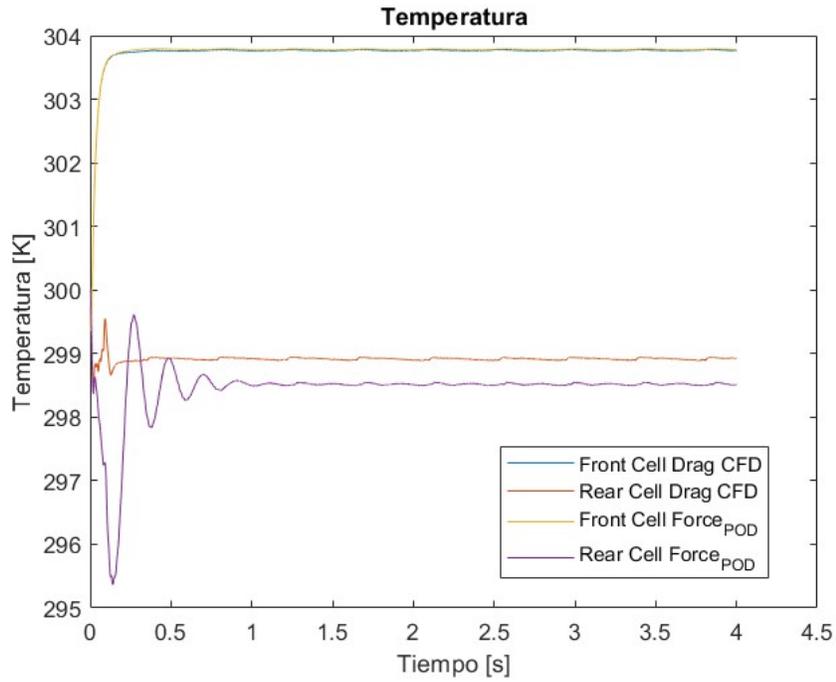


Figura 6.7: Temperatura en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo

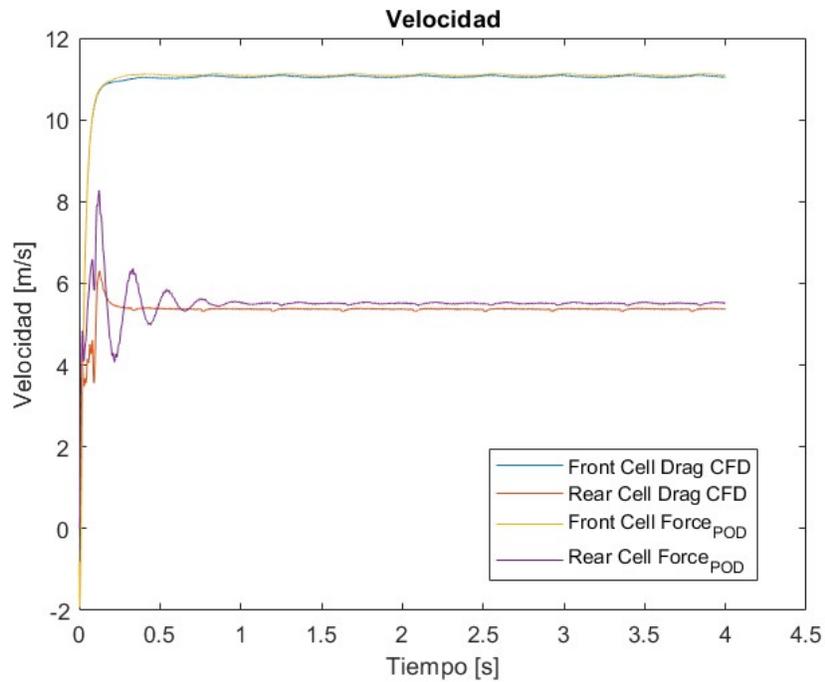


Figura 6.8: Velocidad en la parte delantera y trasera del pod en función del tiempo

### 6.3.3. Distribución de ondas

Por último, una vez determinada la fuerza con la que se va a alimentar el modelo, y habiendo verificado los resultados, se va a visualizar y a verificar la distribución de las ondas de presión y de las propiedades del fluido a lo largo del tubo y a lo largo del tiempo. Para ello, se obtendrán contornos de presión, temperatura y velocidad a lo largo del tubo, en distintos instantes de tiempo, a la vez que se graficarán la posición del pod y las ondas de expansión y compresión generadas en la puesta en marcha del vehículo.

El tubo tiene una longitud de 7000 metros, y puesto que la parte delantera del pod está situada a 3500 metros, la onda de compresión se reflejará en el extremo del tubo cuando cruce los 3500 metros que quedan hasta el final del tubo. Del mismo modo ocurrirá con la onda expansión que se genera en la parte trasera. Además, las ondas también tendrán reflexiones cuando estas choquen de vuelta con el pod. Para poder observar cómo afecta a la distribución de las propiedades dichas reflexiones, se simularán 20 segundos de movimiento del pod. Estos resultados se pueden apreciar en las imágenes mostradas a continuación. En la figura 6.9 se puede ver la distribución de presión cuando el pod lleva 5 segundos en movimiento.

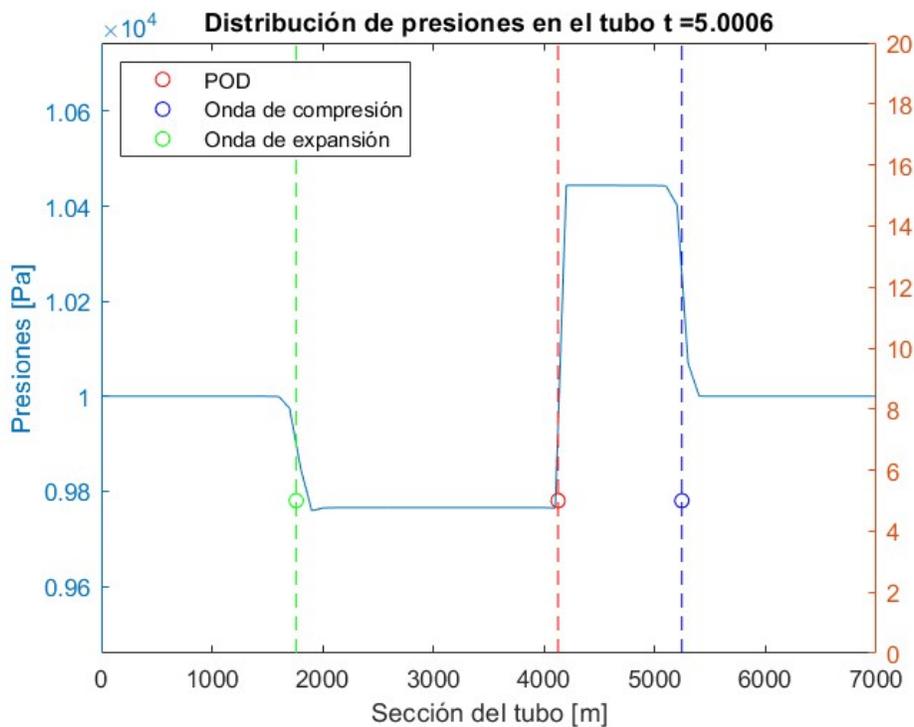


Figura 6.9: Distribución de presión en el tubo para  $t = 5$  segundos

En este instante, se puede ver cómo la onda de compresión va aumentando la presión a su paso, y ya ha avanzado 1735 metros. Al otro lado del pod, se puede ver que la onda de expansión ha avanzado la misma distancia hacia el otro extremo del tubo, reduciendo la presión a su paso. Cuando pasan 12 segundos desde que se pone en movimiento, las ondas chocan contra el extremo del tubo y se reflejan, como se puede ver en la figura 6.10. Esta reflexión provoca que la onda de compresión vuelva a aumentar las presiones en el tubo, mientras que la onda de expansión vuelva a reducir las presiones, de modo que, cuando estas ondas chocasen de nuevo con el pod, el salto de presiones delante, y detrás del pod habrá aumentado.

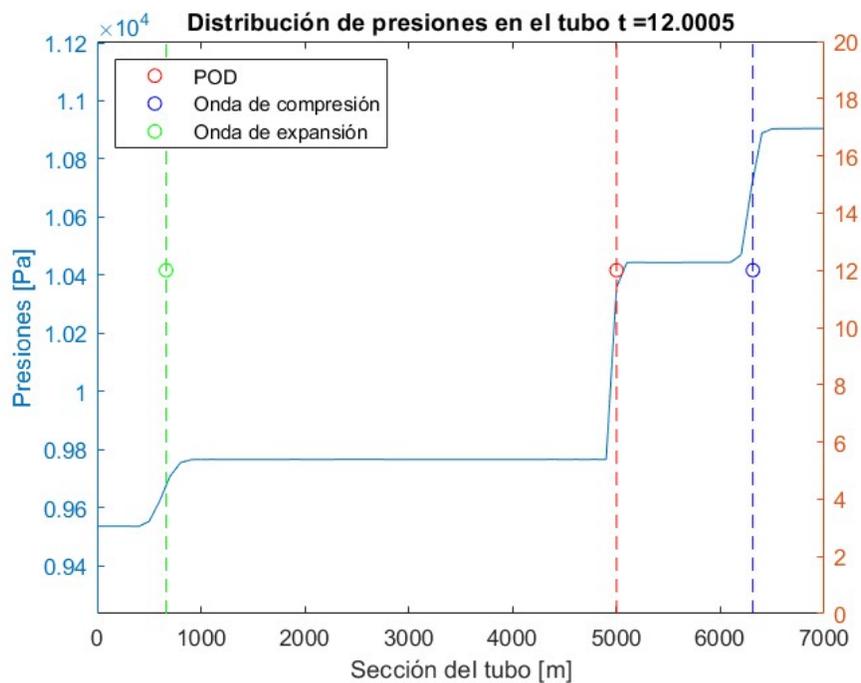


Figura 6.10: Distribución de presión en el tubo para t = 12 segundos

Por último, al llegar a los 20 segundos, la onda de compresión vuelve a reflejarse al chocar con el pod, cambiando nuevamente de dirección, y aumentando aún más las presiones a su paso, y finalmente vuelve a rebotar con la pared. Esto se puede ver en la figura 6.11.

Por otro lado, la distribución de temperaturas sigue un patrón igual a las ondas de presión. A medida que la onda de compresión avanza, va aumentando la temperatura a su paso, y a medida que lo hace la onda de expansión, va reduciendo las temperaturas. Esto se puede apreciar en la figura 6.12.

Finalmente, las distribución de temperaturas al terminar la simulación, y tras haber ocurrido todas las reflexiones de las ondas en la que se aprecia en la figura 6.13, en la que se puede ver como el perfil de temperatura se sigue correspondiendo con el de presiones.

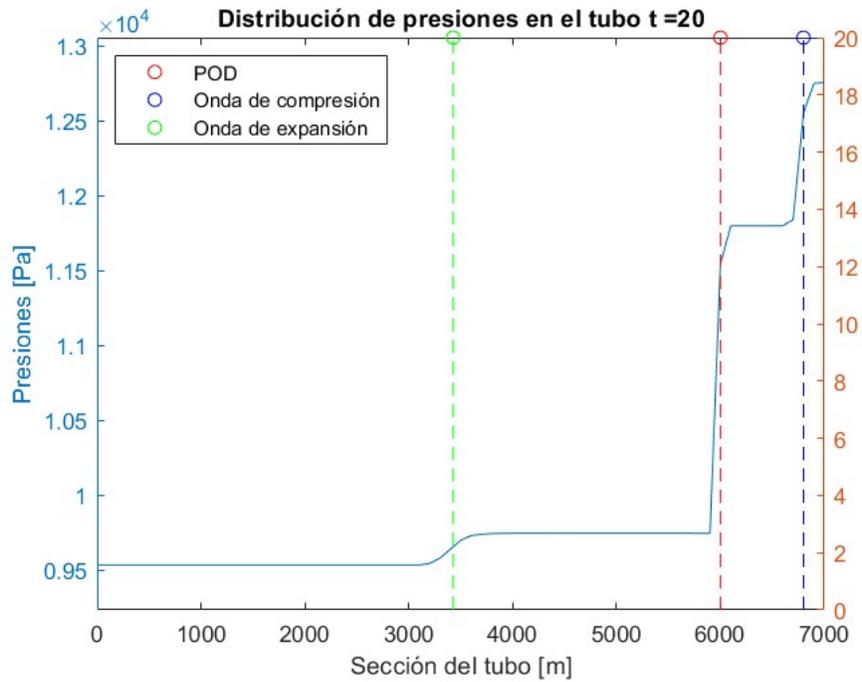


Figura 6.11: Distribución de presión en el tubo para t = 20 segundos

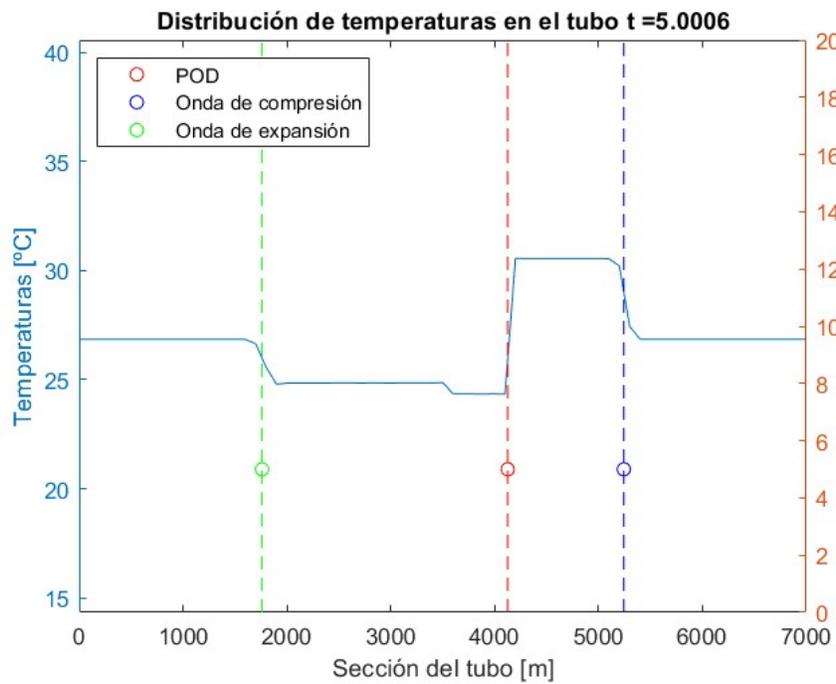


Figura 6.12: Distribución de temperatura en el tubo para t = 5 s

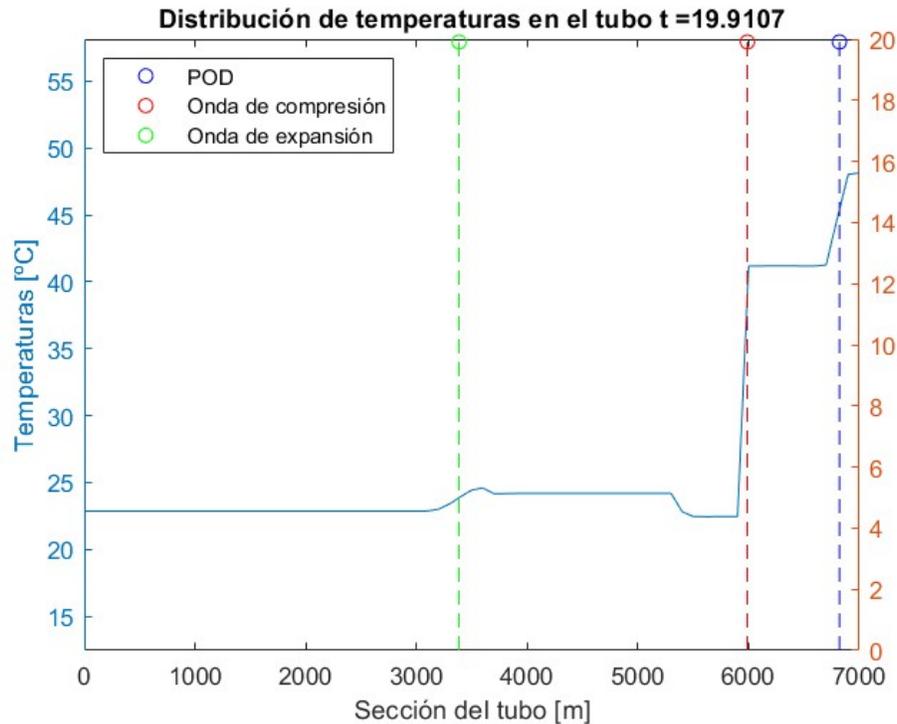


Figura 6.13: Distribución de temperatura en el tubo para  $t = 20$  s

Por último, queda por analizar el perfil de velocidades provocado por las ondas. Las ondas de presión se comportan de forma distinta para la velocidad que para la presión y la temperatura. Tanto la onda de compresión como la onda de expansión va incrementando el valor de la velocidad del fluido a medida que lo atraviesan, y lo ponen en movimiento en la dirección de avance del pod. Esto se debe a que el gasto absoluto alrededor del pod es positivo en el sentido de la dirección de avance, como se mencionó anteriormente. Esto provoca, por un lado, que la presión en la parte delantera del pod aumente y por otro lado que disminuya en la parte trasera. De este modo, la masa de aire se desplaza de la zona de menos presión a la de más, en forma de estas ondas de presión, de modo que, como se veía en las distribuciones de presión, la onda de compresión aumenta la presión a su paso, y la onda de expansión la va disminuyendo, pero el flujo se pone en movimiento para compensar el gradiente de presión generado por la onda, de este modo, la velocidad tras pasar la onda, es mayor y de signo igual al movimiento del pod. Este resultado se puede ver en la figura 6.14, donde se muestra el perfil de velocidades a los 5 segundos de haberse puesto el pod en movimiento.

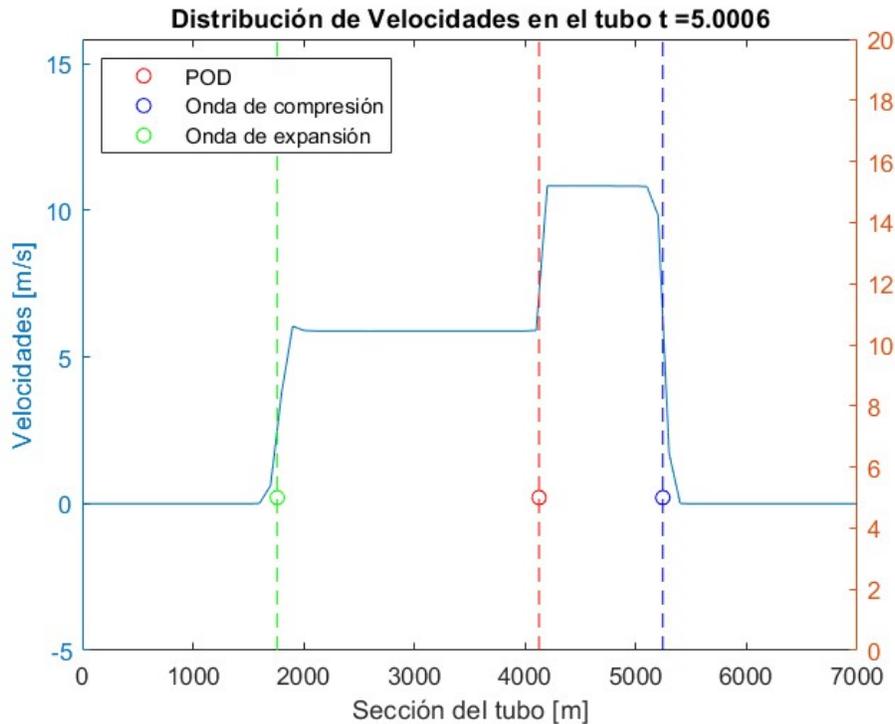


Figura 6.14: Distribución de velocidad en el tubo para  $t = 5$  s

Una vez se provocan las reflexiones, la onda cambia de sentido y, a su paso, va dejando a cero la velocidad del fluido. Esto se puede apreciar en la figura 6.15, donde se puede ver que tanto la onda de expansión, como la onda de compresión van dejando a cero la velocidad del fluido. Esto se debe a que una vez la onda reflexiona la presión detrás es más alta que delante de la onda en el caso de la onda de compresión, de este modo, el flujo tiende a moverse en sentido contrario a la misma velocidad, de modo que el movimiento se anula. En el caso de la onda de expansión, el fluido se mueve hacia el pod pero, cuando la onda reflexiona, la presión es más alta detrás de la onda que delante, por lo que al igual que en el caso anterior, la flujo tiende a cambiar su sentido y se anula.

Por último, cuando la onda choca con el pod y produce una segunda reflexión, la presión detrás de la onda vuelve a ser más alta que delante, por lo que el flujo se vuelve a desplazar de la parte trasera de la onda a la parte delantera. Además, como la presión detrás de la onda ahora es más alta que antes de las reflexiones, la velocidad del fluido es más alta. Estos se puede apreciar en la figura 6.16 cuando el pod lleva moviéndose 20 segundos.

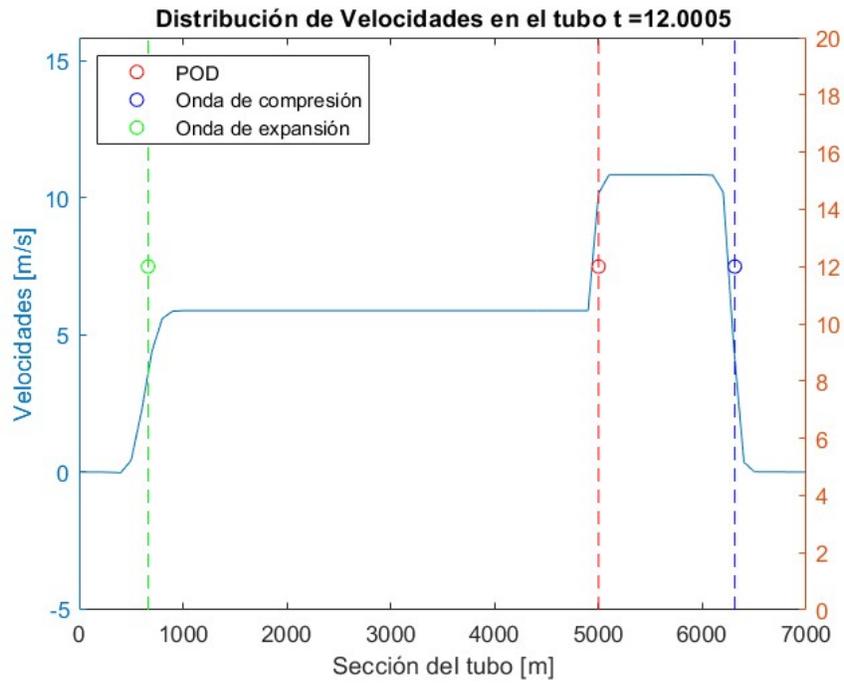


Figura 6.15: Distribución de velocidad en el tubo para  $t = 12$  s

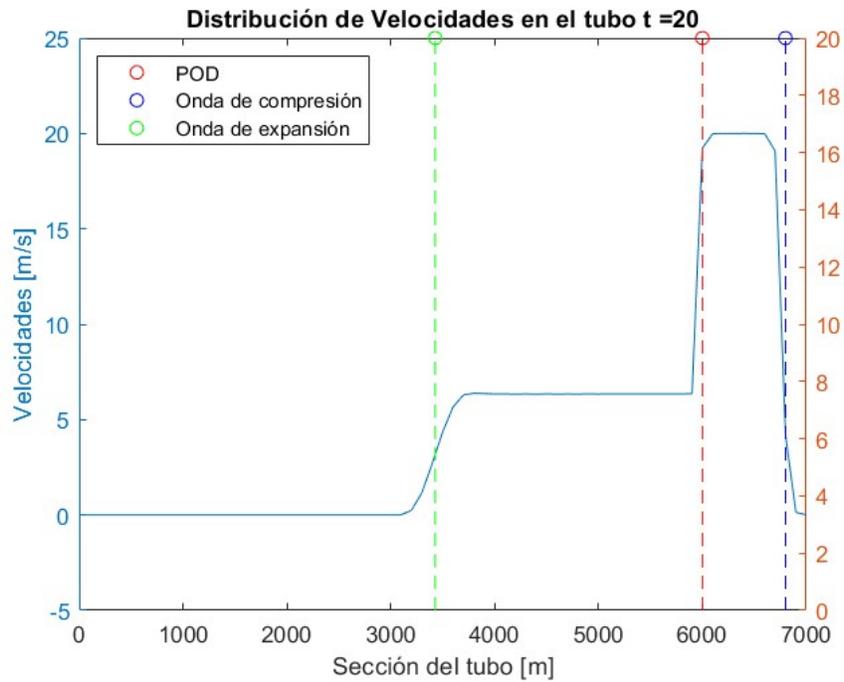


Figura 6.16: Distribución de velocidad en el tubo  $t = 20$  s

## 6.4. Caso transitorio

Del mismo modo que en el modelo anterior, el caso transitorio que se va a simular es la rampa, con aceleración lineal de 0 a 10 segundos, un movimiento de 2 segundos a velocidad constante de 125 m/s y una deceleración de 12 s a 22 s de manera lineal hasta pararse.

### 6.4.1. Estudio de Convergencia de malla

Para analizar la convergencia de malla se hará de nuevo uso de un plano situado a 3700 metros del extremo del pod. Para ello, en la figura 6.17 se muestra un perfil de presiones a lo largo del tiempo en esta sección. En este perfil se aprecia una diferente evolución de la presión. En primer lugar se aprecia a los 0.57 segundos una pequeña oscilación producida por la onda de presión liberada aguas arriba del pod, la cual aumenta la presión a su paso. En el segundo 5.6, la presión tiene una caída hasta los 9910 Pa (dependiendo del mallado), que se corresponde con el valor de presión de la celda trasera del pod en el instante en el que el pod pasa por la sección, a los 5.65 segundos. La presión sigue bajando debido a las ondas de expansión, y esta bajada cesa a los 11.22 segundos, donde toma ya el valor de la celda trasera del pod hasta que el pod vuelve a decelerar. Este retardo de 1.22 segundos entre el cese de la onda y el inicio de la velocidad constante en el pod, se debe a la distancia que la última onda de expansión tiene que recorrer. Por último, cuando el pod comienza a decelerar, la presión en la parte trasera del pod comienza a aumentar, y de ese modo, también lo hace la presión en la sección de estudio. Al igual que en el caso anterior, esta onda de compresión que se genera en la parte trasera, tarda 1.84 s en afectar a la sección, que es la distancia que la onda tarda en viajar.

Los resultados del estudio de convergencia de malla se pueden ver en la figura 6.17, en ellos se puede ver que el modelo alcanza convergencia ya que los valores de presión van cayendo a un valor a medida que la malla se hace más fina. Además, el ruido de la señal también se ve reducido.

Numéricamente, los resultados se pueden ver en la tabla 6.3, donde se verifica que efectivamente el refinamiento produce convergencia de resultado, disminuyendo el error a la vez que lo hacen el tamaño de las celdas.

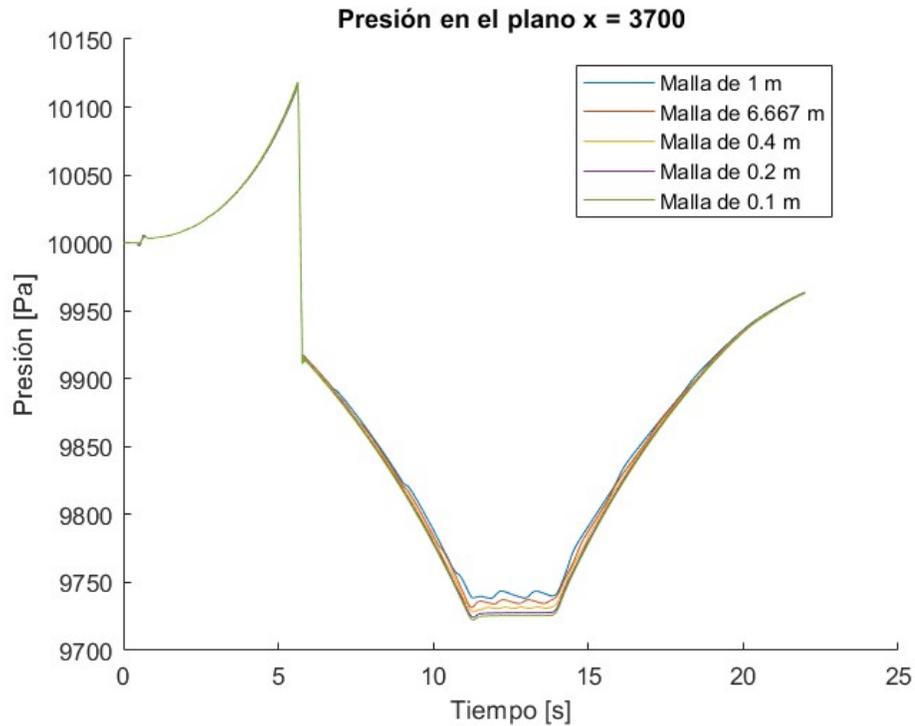


Figura 6.17: Estudio de convergencia de malla para un caso transitorio en el modelo de dos tubos

Case [m]	Compresión			Expansión			$\Delta P$	Error $\Delta P$
	Pst [Pa]	Error	Error Total	Pst [Pa]	Error	Error Total		
1	10115.50			9741.54			373.96	
0.6667	10116.70	-0.012	-0.0119	9735.88	0.0581	0.058	380.82	-1.834
0.4	10117.40	-0.007	-0.0188	9731.12	0.0489	0.107	386.28	-1.434
0.2	10118.20	-0.008	-0.0267	9727.70	0.0351	0.142	390.5	-1.092
0.1	10118.50	-0.003	-0.0297	9725.68	0.0208	0.163	392.82	-0.594

Cuadro 6.3: Resultados del estudio de convergencia para el caso transitorio en el modelo de dos tubos

### 6.4.2. Estudio de fuerzas

Al igual que en el caso anterior, se va a analizar como afecta la selección del término de fuerza pero esta vez para la misión transitoria.

En el caso transitorio se puede ver como los resultados son prácticamente idénticos con ambas fuerzas hasta el momento en el que el pod cruza la sección. A partir de ese momento, la fuerza calculada con VEMOD predice un presión más baja. Esta diferencia se hace más grande cuando el pod alcanza una velocidad estacionaria y se va reduciendo en el momento en que comienza el transitorio de deceleración. Además, al igual que ocurría en el caso estacionario, se produce un transitorio más suave cuando el pod atraviesa la sección para el caso en el que se utiliza la fuerza calculada con VEMOD . Estos resultados se puede ver en la figura 6.18.

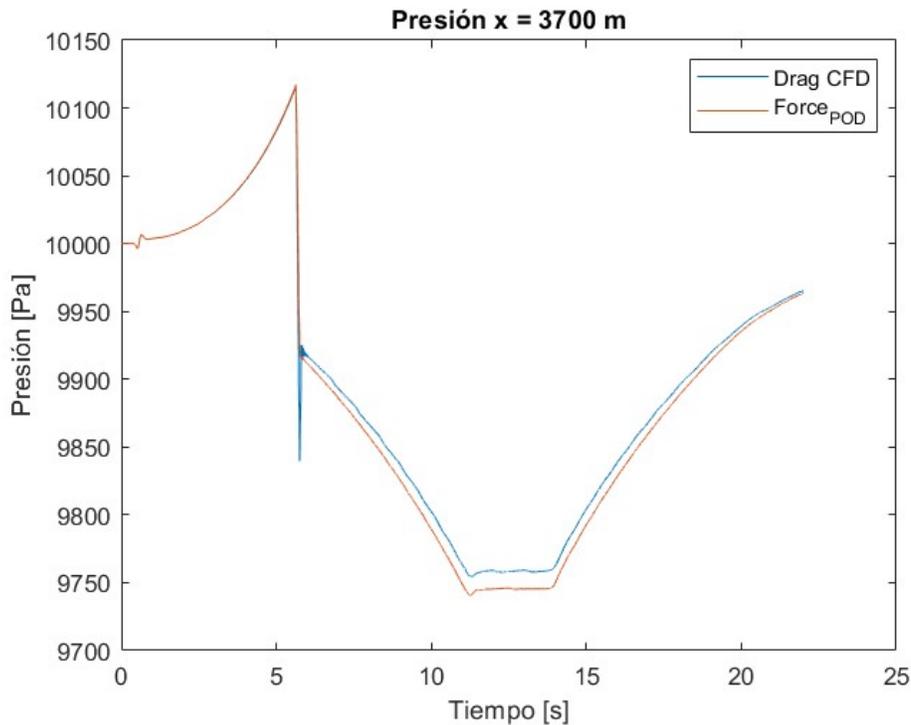


Figura 6.18: Comparación de los resultados de presión estática en función del término fuente de cantidad de movimiento para un sección  $x = 3700$  m para el modelo de dos tubos y caso transitorio

### Resultados en las celdas delantera y trasera

Al igual que para el caso estacionario se van a mostrar los resultados de presión, temperatura y velocidad en las celdas delantera y trasera del pod a lo largo del tiempo.

En el caso de la presión se puede apreciar que en los intervalos de tiempo donde el pod acelera y decelera los valores de presión son muy similares en ambos modelos. La diferencia entre los casos surge en las zonas de velocidad de pod constante, donde el modelo de la fuerza calculada en VEMOD presenta un salto de presiones ligeramente superior. Estos resultados se pueden apreciar en la figura 6.19.

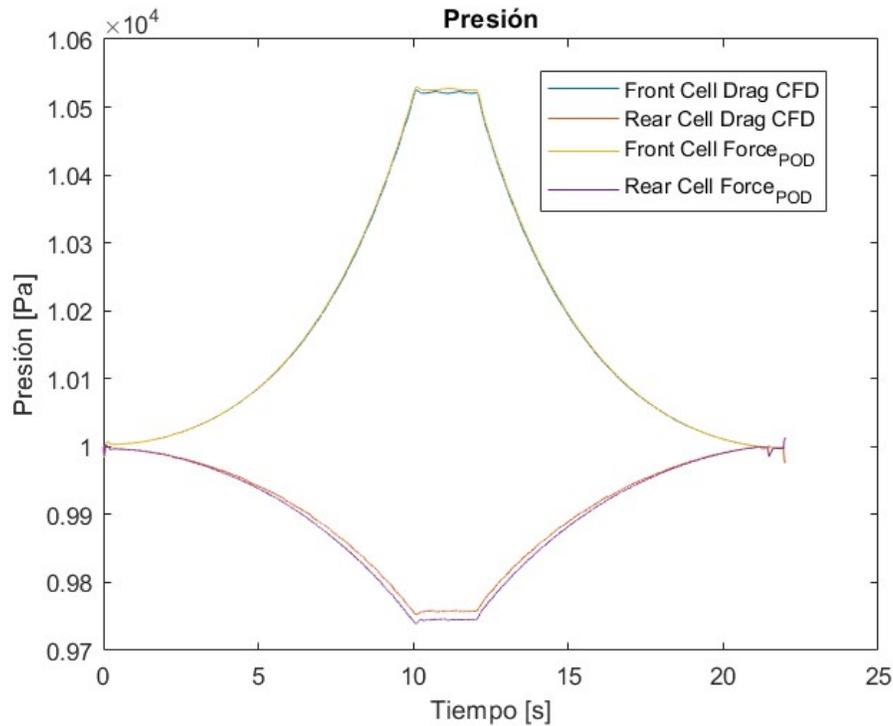


Figura 6.19: Presión en la celda delantera y trasera a lo largo del tiempo para los dos casos de fuerza

En el caso de la temperatura, los resultados se pueden ver en la figura 6.20, en la que se aprecia como en la celda delantera la temperatura toma valores idénticos para todos los instantes temporales, mientras que para la celda trasera, los resultados difieren para todo el intervalo temporal entorno a un 1.5 Kelvin. Además, la señal producida por el caso de la fuerza obtenida de CFD tiene más ruido que la señal generada por la fuerza obtenida mediante VEMOD.

Por último, para el caso de la velocidad, los resultados tanto en la celda delantera como trasera son muy parecidos, produciendo más ruido en la señal el caso de la fuerza obtenida mediante CFD en los instantes en los que el pod acelera o decelera. Dichos resultados se pueden encontrar en la figura 6.21.

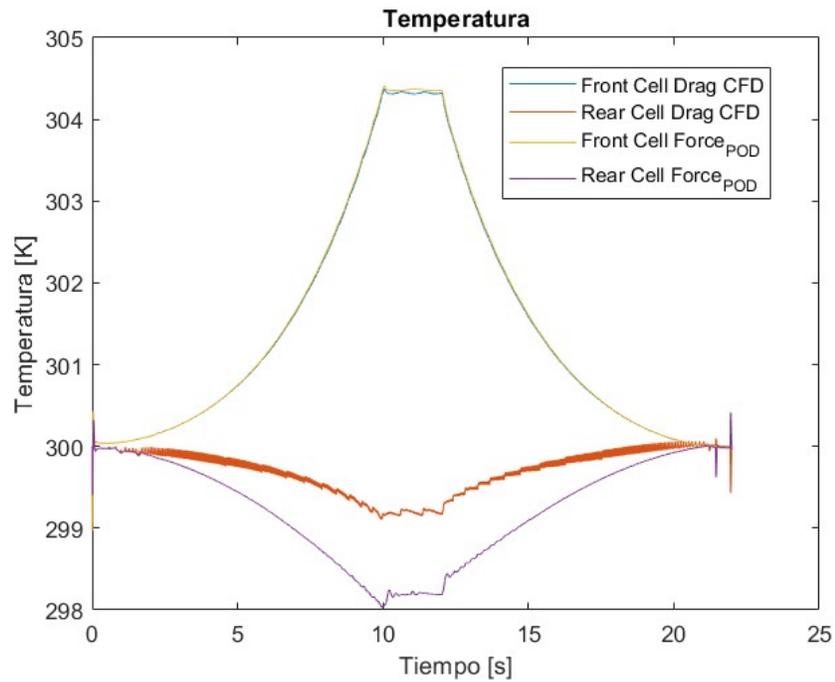


Figura 6.20: Temperatura en la celda delantera y trasera a lo largo del tiempo para los dos casos de fuerza

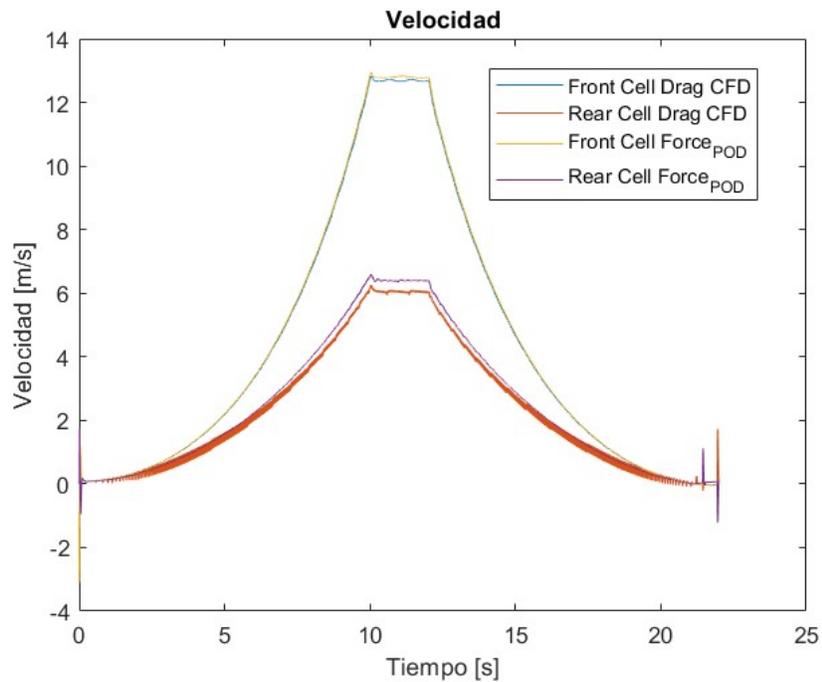


Figura 6.21: Velocidad en la celda delantera y trasera a lo largo del tiempo para los dos casos de fuerza

### 6.4.3. Distribución de ondas

Al igual que en el caso estacionario, se van a representar la distribución de presión, temperatura y velocidad a lo largo del tubo para los distintos instantes temporales. Al contrario que en el caso anterior, aquí se mostrará solo la posición del pod y no la de las ondas, puesto que, ya no existe una única onda de compresión y expansión, sino que se van liberando ondas en los diferentes instantes de tiempo. Estas ondas, son de diferente intensidad, la cual va aumentando a medida que lo hace el el salto de presiones.

En primer lugar, se puede ver en la figura 6.22, como al igual que en el caso estacionario, las ondas de presión liberadas van incrementando la presión a medida que el pod va acelerando. Este cambio de presión es gradual, puesto que el gasto que se trasiega por tener el pod en movimiento va aumentando a medida que lo hace la velocidad, por lo que la presión en la parte delantera del pod no es tan alta en los primeros instantes y solo se iguala al caso estacionario al llegar al segundo 10.

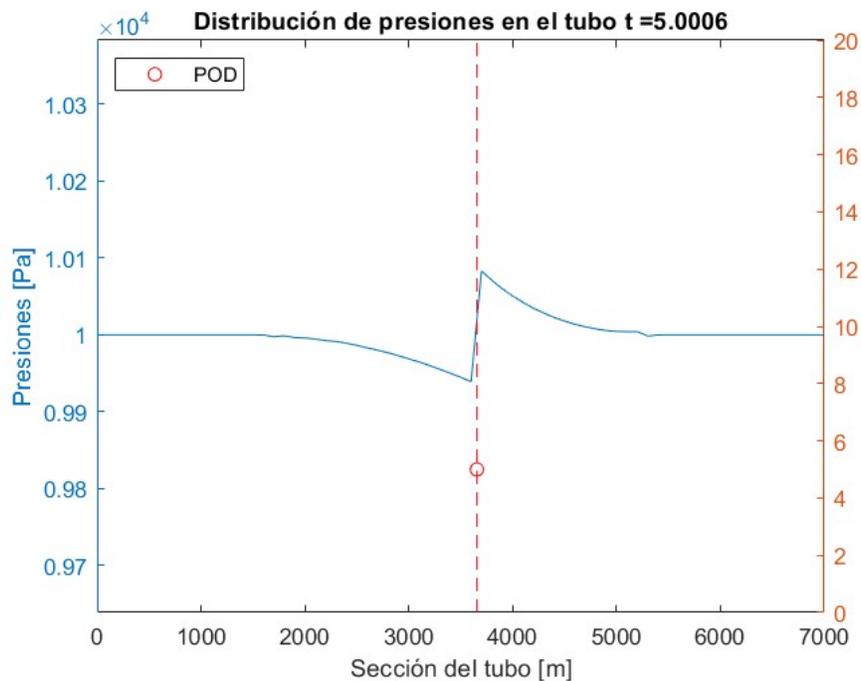


Figura 6.22: Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para  $t = 5$  segundos

Una vez alcanzados el pod se ha puesto a velocidad constante, se puede ver en la figura 6.23 como la presión comienza a tomar el valor que se tenía en el caso estacionario, y la última onda de presión generada va propagándolo a lo largo del tubo.

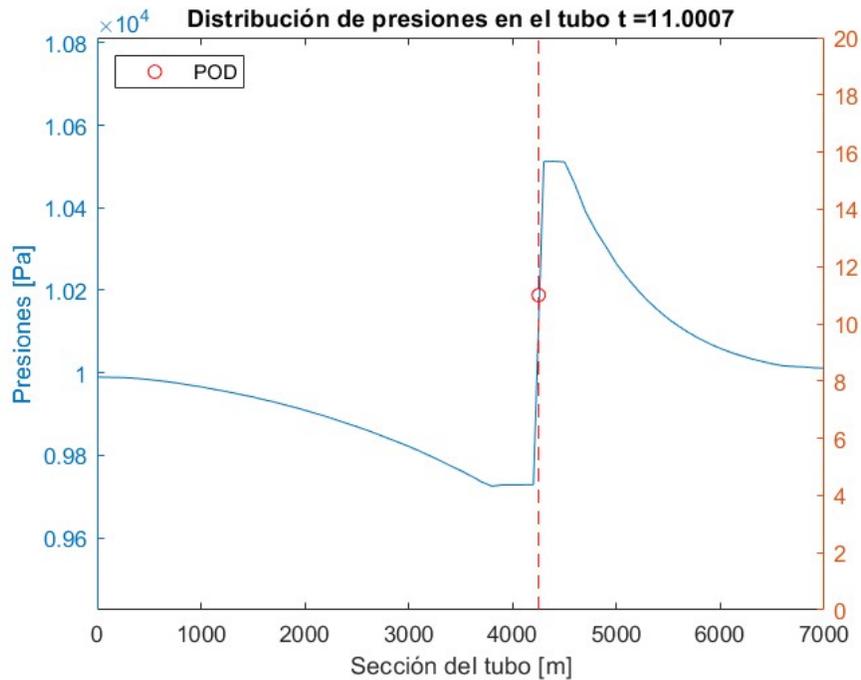


Figura 6.23: Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para  $t = 11$  segundos

Una vez pasados los 12 segundos, el pod comienza a decelerar. De este modo, el gasto másico que atraviesa la sección comienza a reducirse y por lo tanto también se reduce el salto de presiones, puesto que la presión en la parte delantera del pod disminuye y en la parte trasera aumenta. De este modo, se puede ver como la presión que la onda va aumentando, en las zonas cercanas a la parte delantera del pod va bajando, puesto que el flujo tiende a equilibrar las presiones. Al mismo tiempo, en la parte trasera del pod sucede exactamente lo contrario, la bajada de presión que había provocado la onda de expansión, se va equilibrando con el tiempo con el aumento de presión que se ha producido en la parte trasera del pod. Esto se puede ver en la figura 6.24

Por último, una vez que se produce la reflexión de la onda de compresión liberada en el último instante, va aumentando la presión a su paso. No obstante, al contrario que en el caso estacionario, esta onda presenta una depresión detrás, puesto que al haber rebotado, se ha generado una onda igual a la que avanzaba hacia la izquierda. Esto se puede ver en la 6.25.

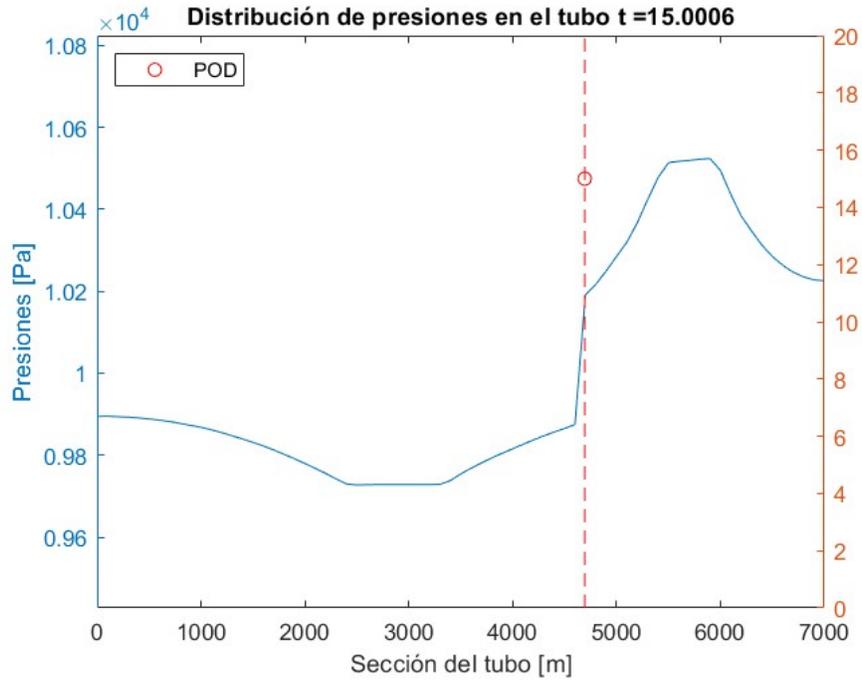


Figura 6.24: Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para t = 15 segundos

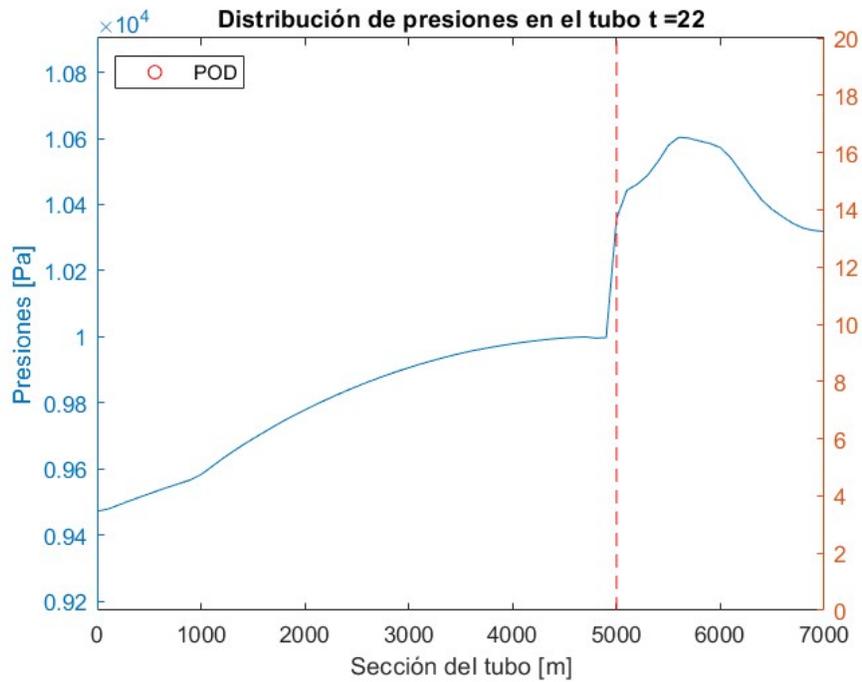


Figura 6.25: Distribución de presión en el tubo en un caso transitorio para t = 22 segundos

## CAPÍTULO 6. MODELO DE 2 TUBOS

---

En el caso de la temperatura, la distribución de esta variable tiene un comportamiento igual a la presión. Esto puede corroborarse en el último instante de la simulación mostrado en la figura 6.26, donde se puede ver una distribución, igual, pero con saltos más bajos.

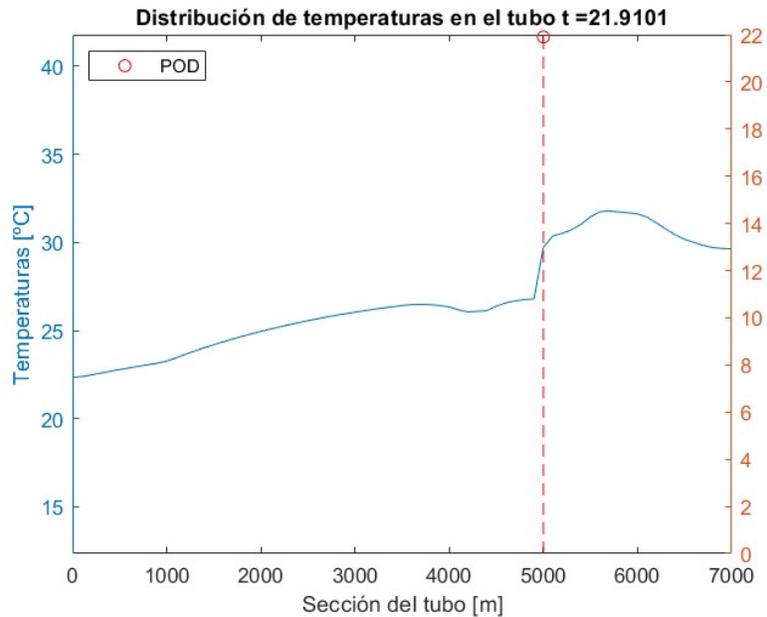


Figura 6.26: Distribución de temperatura en el tubo en un caso transitorio para t = 22 segundos

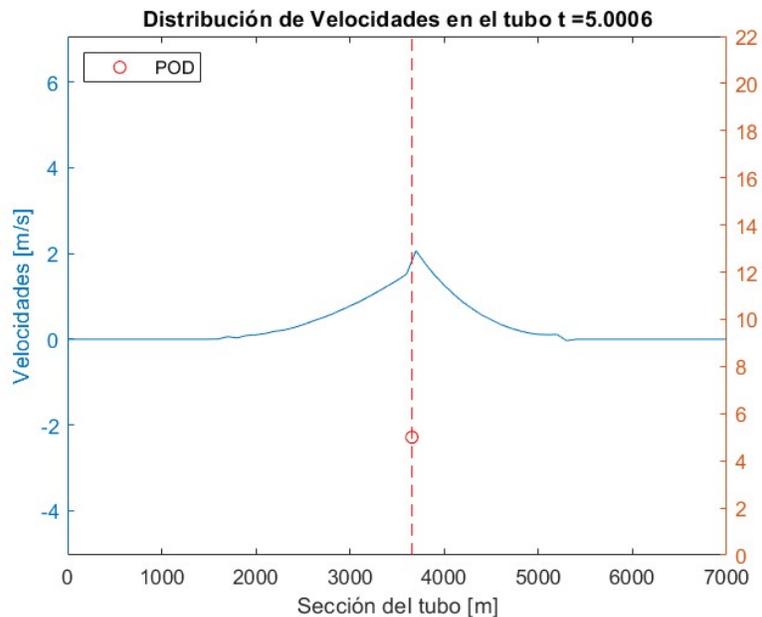


Figura 6.27: Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para t = 5 segundos

Por último, el caso de la velocidad es distinto a los casos anteriores. Cuando el pod se pone en movimiento y aumenta la presión en la celda delantera, el flujo aumenta su velocidad en el sentido de movimiento del pod para compensar este gradiente. En el caso de la parte trasera, ocurre lo contrario, como la presión es más baja, el flujo se pone en movimiento en la misma dirección para compensar que la presión en la parte trasera del pod se está reduciendo. Esto puede verse en la figura 6.27.

Una vez que la velocidad del pod se vuelve constante, se comienza a propagar como en el caso estacionario como se puede ver en la figura 6.28.

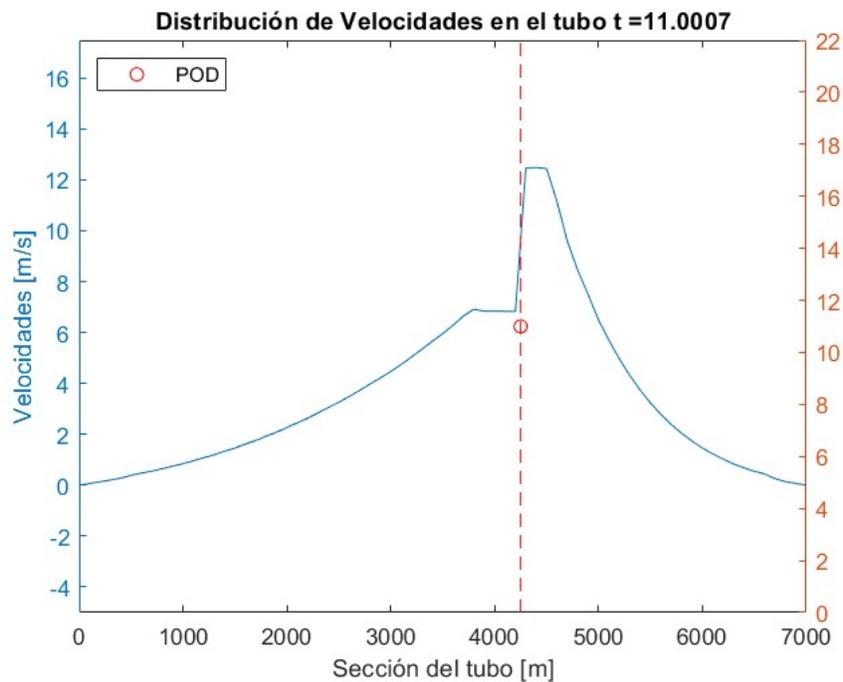


Figura 6.28: Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para  $t = 11$  segundos

A partir del segundo 12, el pod comienza a decelerar por lo que al reducirse el gasto másico, se reduce la presión en la celda delantera, provocando que la velocidad del flujo entre la onda que está avanzando y el pod se vaya reduciendo. Por otro lado, en la parte trasera del pod la presión vuelve a subir, de este modo, la velocidad del flujo sigue yendo en el sentido de avance del pod, pero va reduciendo su magnitud puesto que la diferencia de presiones con la onda es ahora menor.

Una vez la onda de compresión reflexiona, la presión aumenta, y como ahora la presión es más alta en todas las zonas delante del pod, el flujo de aire va en dirección de la onda, por lo que toma más valores negativos. El mínimo de esta distribución de presiones se corresponde con el punto de máxima presión.

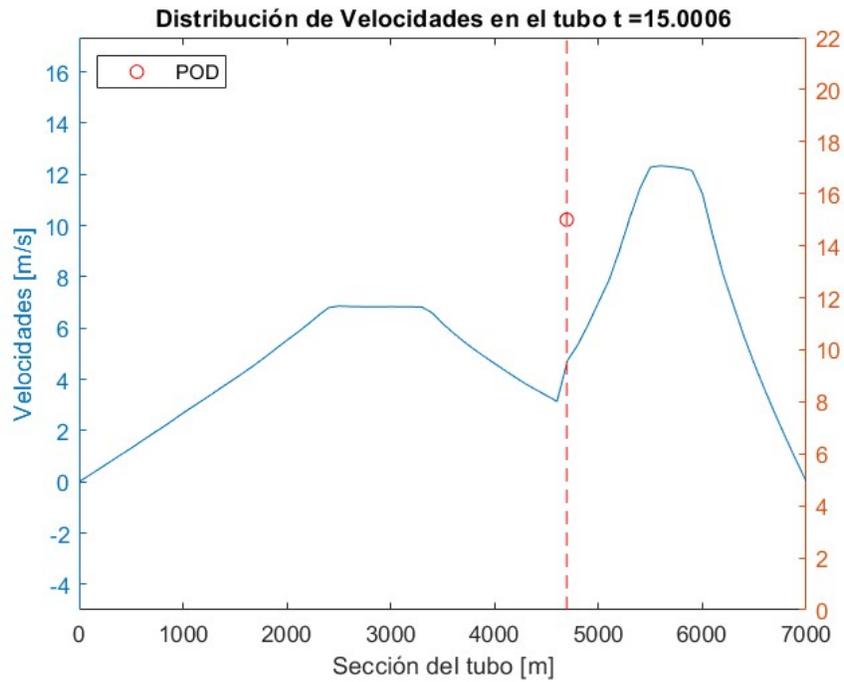


Figura 6.29: Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para  $t = 15$  segundos

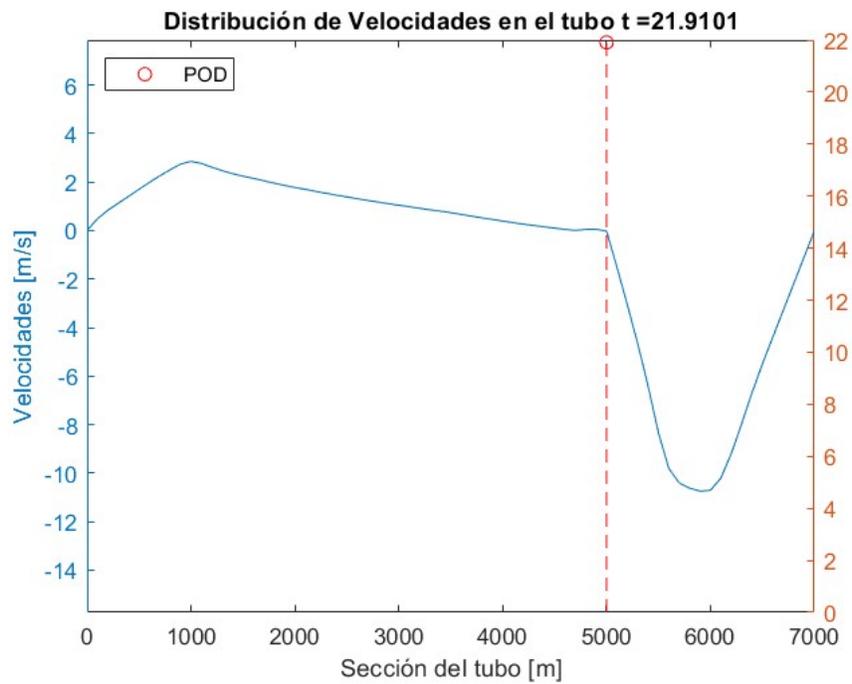


Figura 6.30: Distribución de velocidad en el tubo en un caso transitorio para  $t = 22$  segundos

#### 6.4.4. Comparación entre modelos y tiempo de computación

Una vez terminados ambos modelos, se va a comparar las diferencias en resultados entre ambos, y se va a cuantificar la diferencia entre tiempos de cálculo de cada uno.

En primer lugar se van a mostrar las comparaciones de presión para el caso estacionario y transitorio entre los dos modelos.

En la figura 6.31 se ve que el modelo de dos tubos tiene menos ruido en la señal que el modelo de un tubo. Además el modelo de dos tubos predice un salto de presiones más grande.

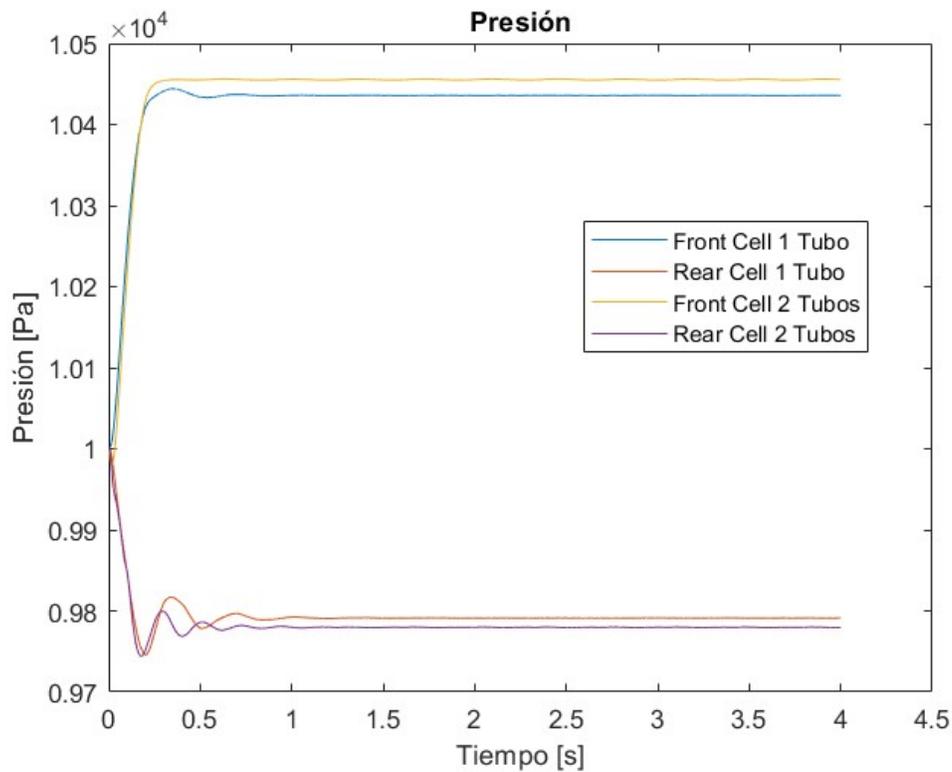


Figura 6.31: Comparación modelos caso estacionario

En la figura 6.32, se aprecia que al igual que en el caso estacionario, el modelo de dos tubos predice un salto de presiones mayor.

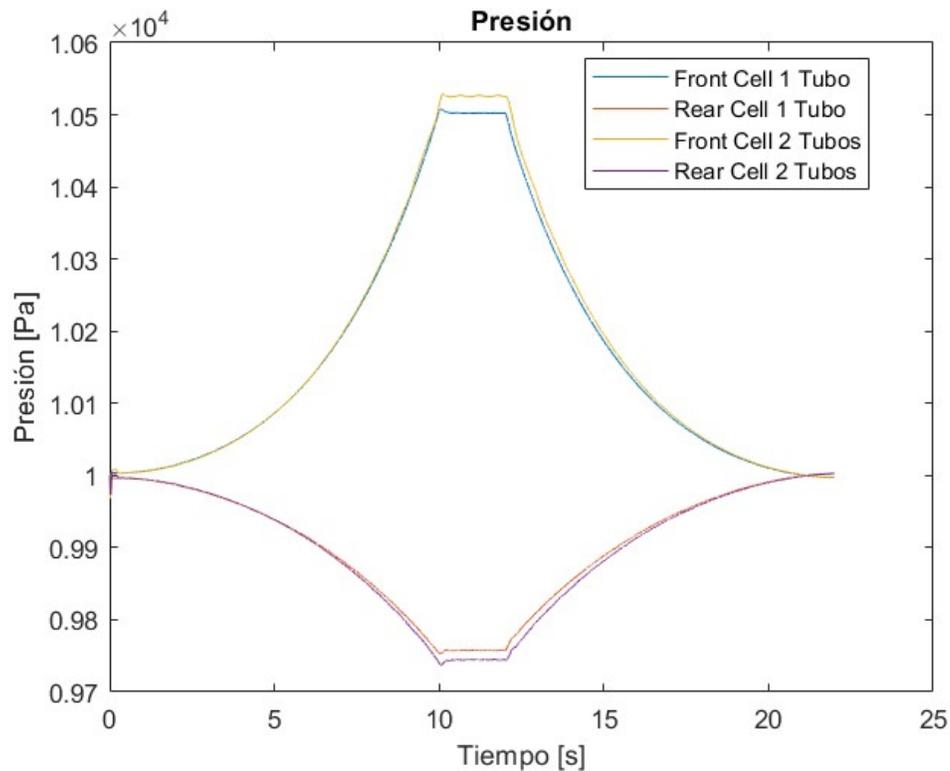


Figura 6.32: Comparación modelos caso transitorio

En el caso del coste computacional, se ha hecho una comparación en la misión estacionaria para distintos tipos de malla, para comprobar como varía el error y el tiempo de cálculo entre ambos modelos.

Los resultados se pueden ver en la tabla 6.4, donde se puede ver que el modelo de dos tubos converge de manera más rápida, además de necesitar un menor tiempo de cálculo. Es importante mencionar que, para la malla de 0.1 metros, el modelo de un tubo no es capaz de calcular por los problemas de memoria computacional ya mencionados, cosa que no ocurre con el modelo de dos tubos, en el que se ha solventado ese problema.

Mallado	Malla 1 tubo	Malla 2 tubos	Error 1 tubo	Error 2 tubos
1	56' 43'''	48'' 76 '''	0	0
0.6667	2' 02'' 95'''	55'' 68'''	-1.443	-1.159
0.5	3' 16'' 22'''	1' 3'' 67'''	-2.256	-2.012
0.4	6' 18'' 49'''	1' 10'' 46'''	-2.768	-2.448
0.333	9' 22'' 66'''	1' 19'' 57 '''	-3.128	-2.687
0.1	-	2' 53'' 06'''	-	-3.888

Cuadro 6.4: Error producido por cada modelo y tiempo de cálculo requerido

Por último, para entender más gráficamente estos resultados, se muestra en la figura 6.33 el error producido por segundo de cálculo para cada modelo.

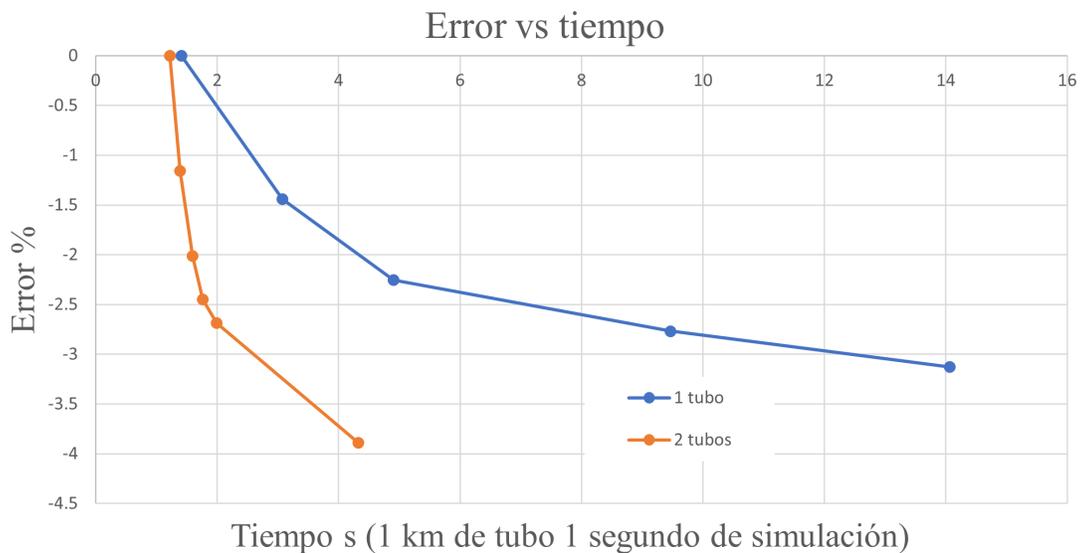


Figura 6.33: Error por cada segundo de computación y km de tubo

### 6.4.5. Conservación

Por último, se va a comentar una problemática del modelo de dos tubos. Debido a la necesidad de imponer los valores de presión, temperatura y velocidad en las celdas delantera y trasera del pod, se produce un cambio en el valor de la densidad de la celda. Este cambio en el valor de la densidad provoca una pérdida de masa, de forma que la masa no se conserva. Esta falta de conservación se traduce en que el tubo uno se pierde masa con el tiempo, y en el tubo dos se gana masa con el tiempo.

No obstante, esta pérdida no es determinante, ya que como se muestra 6.34, se puede ver que la cantidad de masa total pérdida es muy baja. Además, esta pérdida de masa se reparte por todo el tubo, y no queda localizado en ninguna celda. Además, cuanto más fino es el mallado, menos cantidad de masa se pierde. Esto se debe a que cuanto más fino es el mallado, menos volumen ocupan las celdas en las que se impone el vector de estado y por lo tanto menos varía la masa.

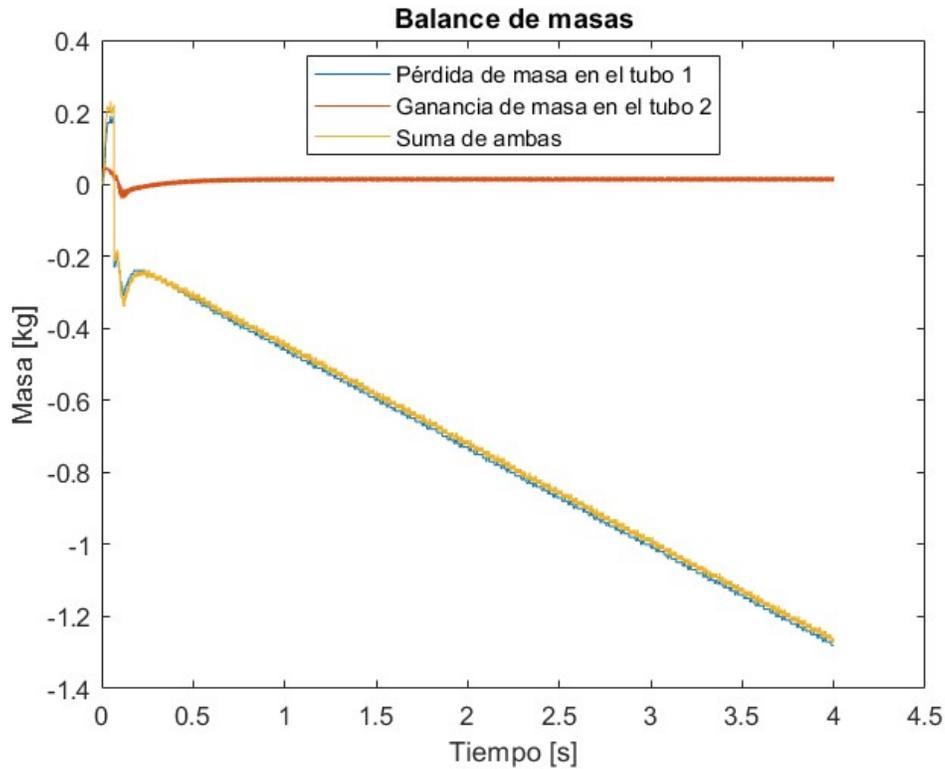


Figura 6.34: Balance de masas

De este modo, sabiendo que la masa total del tubo son 3990 kg, y que se han perdido 1.2 kg en el sistema, se afirma que no es una pérdida importante puesto que se ha perdido un 0,03 % de masa repartida en un tubo de 7 km.

### 6.4.6. Conclusiones

El modelado del modelo de dos tubos ha permitido por un lado la realización de simulaciones de tubos más largos. Si se hace una comparativa rápida, un tubo de 7 km mallado con celdas de 0.1 metros, genera una malla de 70000 celdas, mientras que un tubo de 7 km mallado a 2 metros de celda, más otro tubo de 8 metros mallado a 0.1 metros genera únicamente 3580 celdas. Además, en las simulaciones de tubos no tan largos, el coste computacional se ha reducido al poder mallar el

tubo principal más grueso.

Por otro lado, se han verificado los resultados del modelo mediante contornos en el tiempo de las celdas próximas al pod y de la distribución de las propiedades en el tubo. Además, al igual que en el capítulo anterior, se ha conseguido definir una fuerza para alimentar al término fuente de cantidad de movimiento, de modo que VEMOD puede ser independizado de simulaciones CFD y puede ser implementado en Simulink para acoplarse con el resto de bloques del gemelo digital.

Por último, cabe destacar un aspecto a mejorar de este modelo, que es la selección de pasos temporales distintos entre tubos. El paso temporal que usa VEMOD es el mínimo de los pasos temporales de sus cálculos, es decir, al tener un tubo de mallado 0.1, el paso temporal tendrá que ser más reducido que para un mallado de mayor tamaño, no obstante, el modelo de VEMOD obligará a ambos tubos a calcularse con el paso temporal más pequeño, lo cual aumenta el coste computacional.



# Capítulo 7

## Implementación del modelo en el gemelo digital

Una vez finalizado el modelo de acción de ondas del capítulo 6, se va a proceder a implementarlo en el gemelo digital.

Para ello, es necesario acoplarlo primero a Simulink. De este modo, el modelo de VEMOD se acoplará a un bloque al que mediante un multiplexor introducirá la información necesaria a los sensores. La información que se va a transmitir a estos sensores es el perfil de velocidades, a partir del cual el modelo puede integrar la posición, el gasto másico y la potencia del compresor provenientes de un modelo aerodinámico y la potencia del pod. La salida de señal del bloque se separará mediante un demultiplexor en distintas señales que sirven de resultados. De entre estos resultados, la presiones en las celdas delantera y trasera al pod se enviarán para alimentar de vuelta al modelo aerodinámico del gemelo. Por otro lado, se obtendrá la fuerza que el pod ejerce de modo que se realimenta a la entrada para multiplicarla con la velocidad y obtener la potencia del pod.

En la figura 7.1 se puede ver el modelo listo para ser acoplado en con el resto del gemelo. El bloque que se sitúa a la izquierda es el que obtiene los datos del CFD, el cual se sustituirá por entradas del gemelo. La primera entrada es la entrada del perfil de velocidades del modelo, la segunda entrada es la que se encarga de leer la potencia del compresor, la tercera entrada recibe el valor del gasto másico, y las últimas entradas, son entradas de verificación del modelo con resultados de comparación CFD, las cuales no son necesarias para el modelo. Una vez leído el bloque de entrada, se recircula el valor de la fuerza obtenido en VEMOD y se multiplica por la velocidad para obtener la potencia consumida por el pod, y esta se suma con la potencia consumida por el compresor para poder introducirlas en el multiplexor como potencia total consumida. Una vez todas las señales entran al multiplexor el modelo de VEMOD realiza los cálculos del instante temporal en concreto, y se descomponen los resultados mediante el demultiplexor. De las señales



# Capítulo 8

## Conclusiones y trabajos futuros

### 8.1. Conclusiones

En este proyecto se ha realizado un modelo de acción de ondas para la simulación de la distribución de ondas de presión en los tubos de Hyperloop. La idea de este proyecto era poder incluir este modelo en un gemelo digital de la empresa Zeleros.

En primer lugar se ha realizado una explicación sobre el flujo en el Hyperloop, comenzando por la descripción de sus limitaciones como es el límite de Kantrowtiz, y por otro lado, obteniendo valores del flujo mediante CFD para poder lanzar las simulaciones en VEMOD antes de integrarlo en el gemelo digital.

Posteriormente, se ha continuado con la descripción de un modelo numérico en el que el pod se mueve en un tubo de longitud dada, y se simula el comportamiento del mismo, mediante términos fuente introducidos. Estos términos fuente proceden de un modelo aerodinámico que está incluido en el gemelo digital, pero que, antes de su integración, se obtendrán de los cálculos CFD del capítulo 4. Una vez terminado el modelo y las verificaciones, se obtuvieron resultados bastante similares a los que se habían obtenido con CFD pero se encontraron limitaciones en el modelo. Este modelo no permitía el mallado con celdas de distintos tamaños, lo que impedía la realización de misiones que necesitases tubos de mucha longitud porque la cantidad de celdas que se formaban al dividir el tubo dejaban al ordenador sin memoria suficiente. Además, las simulaciones de tubos más pequeños con mallas lo suficientemente finas, incrementaban considerablemente el coste computacional.

De este modo, lo siguiente ha sido proponer la elaboración de un modelo de dos tubos que se conectan mediante sensores. Estos tubos permiten el uso de mallados diferentes de modo que solo las zonas próximas tendrán un mallado fino, mientras que el resto de zonas del tubo que se encuentren lo suficientemente lejos del pod serán malladas de manera más gruesa. La implementación de este modelo permitió solucionar la problemática de la escasez de memoria de cálculo por tener

demasiadas celdas, además de reducir el tiempo de computación en comparación con un modelo de un tubo que su mallado del tubo principal coincida con el mallado del tubo secundario de este nuevo modelo.

Para finalizar, se ha explicado cómo se adapta el modelo a Simulink para ser acoplado al resto de bloques del gemelo digital.

### **8.2. Trabajos futuros**

Tras haber realizado el proyecto se puede analizar que puntos débiles pueden seguir mejorándose en proyectos futuros.

En primer lugar, en el capítulo 6 se mencionó la posibilidad de separar los pasos temporales de los dos tubos del modelo para reducir el coste computacional.

En segundo lugar, se puede estudiar la posibilidad de modificar el modelo de dos tubos de forma que el segundo tubo tenga una longitud algo mayor para poder realizar un mejor tratamiento de la estela.

Otra una posible mejora del proyecto sería a nivel de programación la posibilidad de generar un objeto que contenga directamente los dos tubos. Esto permitiría eliminar los sensores necesarios para transmitir los términos fuente y de este modo el coste computacional también se reduciría.

Por último, una vez creado un modelo de dos tubos, se podría generar más sensores conectados a otros tubos, de modo que se pudiese generar una red de tubos y pod, de manera que se simulase la distribución de presiones de la red completa.

# Capítulo 9

## Bibliografía

- [1] E. Musk, “Hyperloop alpha,” 2013.
- [2] J. S. . J. S. M. . B. J. J. Chin, Jeffrey C. Gray, “Open-source conceptual sizing models for the hyperloop passenger pod,” 2015.
- [3] M. Bhuiya, M. M. Aziz, F. Mursheda, R. Lum, N. Brar, and M. Youssef, “A new hyperloop transportation system: Design and practical integration,” *Robotics*, vol. 11, no. 1, 2022. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2218-6581/11/1/23>
- [4] T. T. G. Le, K. S. Jang, K.-S. Lee, and J. Ryu, “Numerical investigation of aerodynamic drag and pressure waves in hyperloop systems,” *Mathematics*, vol. 8, no. 11, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2227-7390/8/11/1973>
- [5] J. Peiro Pous, “Caracterización de la dinámica de ondas provocada por un vehículo hyperloop mediante dinámica de fluidos computacional,” Bachelor’s Thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño, UPV, 2022.



## **Parte II**

# **PLIEGO DE CONDICIONES**



# Capítulo 1

## Pliego de condiciones

El objetivo del pliego de condiciones es detallar cuáles han sido los requisitos base sobre los que se ha fundamentado el proyecto. Esto incluye aspectos técnicos, administrativos, laborables o normativos si procediese, entre otros.

### 1.1. Condiciones técnicas

Esta sección tiene como objetivo mostrar cuáles son los requerimientos mínimos de los distintos software empleados durante la elaboración del proyecto (C++, Matlab, Simulink y Star CCM+), así como las características técnicas del equipo informático empleado.

#### 1.1.1. Hardware

Para el empleo de los software de cálculo, tanto C++, Matlab y Simulink se ha hecho uso de un ordenador portátil, un HP Omen, que cuenta con las siguientes características.

- Sistema operativo: Windows 10.
- Procesador: Intel Core i7 7th Gen.
- Memoria: 16 GB de RAM.
- Tarjeta gráfica: NVIDIA GEFORCE GTX.
- Almacenamiento: 1407 GB de espacio disponible entre dos memorias SSD.

### 1.1.2. Software

#### Matlab y Simulink

MATLAB es un lenguaje de cálculo técnico desarrollado por MathWorks compatible con otros lenguajes (Python, C/C++, Fortran, Java,...) y sirve como entorno de programación en el que se puede desarrollar algoritmos, realizar cálculo numérico, tratamiento de señales, representación de superficies...

Simulink es un entorno de diagramas de bloque que se utiliza para diseñar sistemas con modelos multidominio, simular antes de implementar en hardware y desplegar sin necesidad de escribir código.

La versión de Matlab y Simulink necesarias para poder utilizar el modelo del gemelo digital es MATLAB R2022b Versión 9.13. Matlab se ha utilizado para la el postprocesado de los resultados obtenidos del modelo de VEMOD realizado en c++, mientras que Simulink se ha utilizado para acoplar el modelo de VEMOD en el gemoelo digital.

Para poder trabajar con la versión R2020b de MATLAB, que ha sido la empleada en el proyecto, se requiere un sistema que cumpla con estos requisitos. Requisitos del sistema:

1. Windows Server 2019, Windows server 2022, Windows 10, windows 11.
2. Cualquier procesador Intel o AMD x86 o x64.
3. Se necesitan 4 GB de espacio en el disco duro solo para MATLAB, o entre 5 y 8 GB para una instalación típica, y 31.5 GB recomendados para una instalación típica, además se recomienda el uso de una memoria SSD.
4. Se necesitan 4 GB mínimo de RAM, 8 GB recomendados.
5. No se requiere una tarjeta gráfica específica, pero se recomienda la tarjeta gráfica acelerada por hardware compatible con OpenGL 3.3, con 1 GB de memoria GPU.

Para poder trabajar con Simulink se requiere de una versión de Matlab un sistema Windows compatible con esa versión de Matlab, y para alguna funciones se requieren de compiladores de C.

### 1.1.3. C++

La mayor parte del proyecto ha sido realizada en C++. Este programa es un lenguaje compilado que se creó como una extensión de C orientada a objetos.

Los requerimientos mínimos del sistema para lanzar este programa son:

- Microsoft Windows 95, 98, NT 4, 2000, XP.
- 8 MB de RAM con un archivo de intercambio grande.
- Procesador compatible Intel a 100 Mhz
- 30 MB de espacio libre en el disco duro

.



**Parte III**

**PRESUPUESTO**



# Capítulo 1

## Presupuesto

### 1.1. Consideraciones iniciales

En esta sección se muestran una serie de consideraciones necesarias para el posterior cálculo de los costes unitarios y el coste total del proyecto.

#### 1.1.1. Distribución de las horas de trabajo realizadas

En primer lugar se tendrán en cuenta las horas de trabajo realizadas. El desarrollo del proyecto se ha llevado a cabo durante mi estancia de prácticas en el CMT. Esta estancia ha durado 387.5 horas, repartidas en 4 meses con 24 horas semanales, desde el 1 de marzo de 2023 al 30 de junio de 2023. Estas horas son las horas remuneradas que se tendrán en cuenta para el coste del proyecto, las cuales se han distribuido como se indica en la tabla 1.1, donde se han tenido en cuenta las tutorías con el tutor del proyecto, el trabajo que se ha realizado de manera autónoma en el proyecto, las horas de redacción de la memoria y por último las reuniones con la empresa.

<b>Actividades</b>	<b>Horas</b>
Trabajo Autónomo: C++, Matlab y Simulink	247.5
Simulación Star CCM+	25
Tutorías	60
Redacción del proyecto	35
Reuniones	20
Total	387.5

Cuadro 1.1: Desglose de horas del proyecto

### 1.1.2. Horas laborables

Por una parte, se definen el número de horas laborables presentes en un año. Tomando una jornada laboral de 8 horas diarias, y omitiendo fines de semana, días festivos, y asumiendo 22 días laborables destinados a vacaciones, las horas laborables anuales son:

$$223 \text{ dias} \cdot 8 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 1784 \text{ horas} \quad (1.1)$$

Por otra parte, serán necesarias definir las horas laborables existentes en un mes. Así, aplicando los mismos criterios que antes, se obtienen una media de 22 días laborables al mes, dado lugar al siguiente número de horas laborables:

$$22 \text{ dias} \cdot 8 \frac{\text{horas}}{\text{dia}} = 176 \text{ horas} \quad (1.2)$$

## 1.2. Costes de Software y Hardware

En la realización del proyecto se ha hecho uso de distintos programas para realizar los cálculos pertinentes, de los cuales, alguno necesita de una licencia informática que tiene un coste determinado. Además, el uso de todos estos programas requiere del uso de un equipo informático.

### 1.2.1. Costes de C++

El principal software que se ha utilizado ha sido C++, junto a una interfaz de visual estudio, para la realización del modelo de acción de ondas. Los costes de estos programas son nulos puesto que ambos programas son de uso libre y cualquier usuario puede descargarlos de manera gratuita.

### 1.2.2. Costes de Matlab y Simulink

Simulink es el software donde se ha adaptado la versión de Vemod para acoplarse al gemelo digital del sistema propulsivo. Matlab por su lado, se emplea para ejecutar determinadas funciones que Simulink necesita, además de ser utilizado para el post-procesado de los resultados de Vemod.

La licencia de Matlab que se está utilizando es una licencia académica con un precio de 262 euros/año y lo mismo se aplica a la licencia de Simulink, la cual también cuesta 262 euros/año.

De este modo, el coste unitario de ambos es el siguiente.

$$\text{Coste} = \frac{262 \text{ €/año}}{1784 \text{ h/año}} = 0,147 \text{ €/hora} \quad (1.3)$$

Por lo tanto, el coste total según las horas de uso es de 72.76 € entre los dos programas.

### 1.2.3. Costes de Star CCM+

Los costes asociados al software de simulación Star CCM+ son de 24 €/h. Por lo tanto, el coste total según las horas de uso es de 600 €.

### 1.2.4. Costes de Microsoft Office

Las distintas aplicaciones de Microsoft Office se utilizaron para diferentes partes del proyecto. Power Point se utilizó para realizar presentaciones dentro de las reuniones y Excel se utiliza para proporcionar los datos de la misión del POD al código de Vemod.

Por tanto, el coste unitario de Microsoft Office, teniendo en cuenta que una licencia básica de Office es de 5,6 €/mes es el siguiente.

$$Coste = \frac{5,6 \text{ €/mes}}{176 \text{ h/mes}} = 0,032 \text{ €/hora} \quad (1.4)$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta que las horas totales empleadas en las distintas aplicaciones son 30, el coste total según las horas de uso es de 0.96 €.

### 1.2.5. Equipo informático

El equipo informático utilizado en el proyecto es un Hp Omen del año 2017, que costó 1600 euros. Dado que no ha sido un equipo adquirido recientemente, lo lógico sería calcular la devaluación que ha sufrido el portátil durante estos seis años. Sin embargo, los modelos de devaluación existentes contemplan únicamente cuatro años de vida útil para este tipo de dispositivos, lo cual hace imposible el cálculo de la devaluación para el caso que corresponde. Por ello, para el cálculo del presupuesto se tendrá en cuenta el precio de compra del equipo.

## 1.3. Costes del personal

Otro factor a tener en cuenta a la hora de realizar el presupuesto total es considerar todo aquel personal cualificado que se ha visto implicado en la realización del presente Trabajo de Fin de Máster. Para ello se ha hecho una estimación de los salarios aproximados de ambos tutores del proyecto.

### 1.3.1. Tutor

El cargo del tutor de este proyecto es de catedrático universitario. Atendiendo a la resolución del 16 de octubre de 2019 de la Dirección General de Trabajo, donde se registran y se publican las tablas salariales en el décimo tercer convenio colectivo nacional de centros universitarios e investigación, el salario mensual para un profesor catedrático de universidad es de 2519.82 €/mes. De este modo, el coste unitario viene dado según se muestra a continuación:

$$\frac{2519,82 \text{ €/mes}}{176 \text{ h/mes}} = 14,32 \text{ €/hora} \quad (1.5)$$

Siendo el coste total de 859.2 €.

### 1.3.2. Cotutor externo

Para el cálculo de los costes unitarios relacionados con el cotutor externo, se ha consultado cuál es el salario medio de un ingeniero superior en ingeniería aeronáutica en la Comunidad Valenciana, al ser esta la titulación del cotutor externo, siendo 40100 € anuales, siendo 3341.67 € mensuales distribuidos en doce pagas. Así, los costes unitarios son:

$$Coste = \frac{3341,67 \text{ €/mes}}{176 \text{ h/mes}} = 18,99 \text{ €/h} \quad (1.6)$$

Siendo el coste total de 379.8 €.

### 1.3.3. Becario

Teniendo en cuenta que el salario mensual de un alumno en prácticas en el Centro de Motores Térmicos es de 450 €/mes, se puede obtener el siguiente coste unitario:

$$Coste = \frac{450 \text{ €/mes}}{105,6 \text{ h/mes}} = 4,26 \text{ €/h} \quad (1.7)$$

Siendo el coste total de los 4 meses igual a 1800 €.

## 1.4. Presupuesto total

Por último, se incluye la tabla 1.2 que recoge todos los costes implicados en la realización del proyecto, desglosados por categorías.

		<b>Tiempo</b>	<b>Tasa Horaria</b>	<b>Importe Bruto</b>	<b>IVA 21 %</b>	<b>Importe</b>
		<b>[h]</b>	<b>[€/h]</b>	<b>[€]</b>	<b>[€]</b>	<b>[€]</b>
<b>Software</b>	<b>C++</b>	272.5	0	0	-	0
	<b>Matlab &amp; Simulink</b>	272.5	0.147	40.06	-	40.06
	<b>Microsoft Office</b>	30	0.032	0.96	-	0.96
	<b>Star CCM+</b>	25	24	600	-	600
	<b>Subtotal</b>					641.02
<b>Equipo Informático</b>				1600	Incluido	1600
<b>Personal</b>	<b>Tutor</b>	60	14.32	859.2	-	859.2
	<b>Cotutor</b>	20	18.99	379.8	-	379.8
	<b>Becario</b>	387.5	4.26	1800	-	1764
	<b>Subtotal</b>					3003
<b>TOTAL</b>						<b>5244,02</b>

Cuadro 1.2: Resumen del coste total del proyecto

Por lo tanto, el presupuesto total del proyecto asciende a la cantidad de:  
**CINCO MIL DOSCIENTOS CUARENTA Y CUATRO EUROS CON DOS CÉNTIMOS**



## **Parte IV**

# **OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES**



# Capítulo 1

## Objetivos de desarrollo sostenibles

A continuación, en la tabla 1.1 se muestran los objetivos de desarrollo sostenibles de la agenda 2023, indicando aquellos cumplidos por el presente proyecto.

Objetivos de Desarrollo Sostenibles		Alto	Medio	Bajo	No Procede
ODS 1.	<b>Fin de la pobreza.</b>				X
ODS 2.	<b>Hambre cero.</b>				X
ODS 3.	<b>Salud y bienestar.</b>				X
ODS 4.	<b>Educación de calidad.</b>				X
ODS 5.	<b>Igualdad de género.</b>				X
ODS 6.	<b>Agua limpia y saneamiento.</b>				X
ODS 7.	<b>Energía asequible y no contaminante.</b>				X
ODS 8.	<b>Trabajo decente y crecimiento económico.</b>				X
ODS 9.	<b>Industria, innovación e infraestructuras.</b>	X			
ODS 10.	<b>Reducción de las desigualdades.</b>				X
ODS 11.	<b>Ciudades y comunidades sostenibles.</b>				X
ODS 12.	<b>Producción y consumo responsables.</b>				X
ODS 13.	<b>Acción por el clima.</b>	X			
ODS 14.	<b>Vida submarina.</b>				X
ODS 15.	<b>Vida de ecosistemas terrestres.</b>				X
ODS 16.	<b>Paz, justicia e instituciones sólidas.</b>				X
ODS 17.	<b>Alianzas para lograr objetivos.</b>				X

Cuadro 1.1: Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) de la agenda 2030

## CAPÍTULO 1. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLES

---

El primero de los objetivos de desarrollo sostenible en los que se ve involucrado este proyecto es el ODS 9. El sistema Hyperloop es concepto totalmente nuevo e innovador en el mundo del transporte, un sistema que si bien puede asemejarse a los sistemas ferroviarios su principio de funcionamiento es muy diferente, incluyendo la levitación magnética y, en este caso, un sistema de propulsión aerodinámica gracias a un fan y una tobera que se asemeja al sector aeronáutico. Además, el establecimiento del sistema requiere de una gran inversión en infraestructura, por la necesidad del montaje de las redes de tubos presurizados entre ciudades, sumados a la instalación eléctrica para alimentar a los motores de inducción, y el sistema de soporte de hormigón necesario para la sujeción y el apoyo de los tubos en los que se moverá el POD.

Por otro lado, este proyecto también involucra el ODS 13. El sistema Hyperloop es un sistema libre de emisiones, en el que se obtiene la propulsión del POD utilizando una fuente energética totalmente eléctrica. Por lo tanto, se evita el uso de combustibles fósiles que si se usan en otro medios de transporte, reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>.