



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Caracterización aerodinámica de un demostrador para
sistemas hyperloop mediante Dinámica de Fluidos
Computacional

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Romero Murcia, Juan Pedro

Tutor/a: Navarro García, Roberto

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Con la redacción de este documento doy por finalizada una de las etapas más importantes en mi vida, y me parece imprescindible expresar mi gratitud a todas las personas que han formado parte de ella y la han hecho posible.

En primer lugar, agradecer a mis padres, y más concretamente a mi madre, por haber sido un apoyo incondicional durante estos años, por haberme inculcado unos valores preciosos y demostrarme que con trabajo y paciencia todo llega, por haber aguantado mi frustración innumerables veces, y por transmitir unas ganas de comerse el mundo apasionantes.

Agradecer a mi hermana, Celia, por haber hecho que viera la vida en color, por la enorme paciencia que ha tenido en mis momentos de desesperación, y por los mágicos momentos que me ha hecho vivir.

Agradecer a mis padrinos, Angelita e Ignacio, por haber sido un apoyo fundamental, por ofrecerme sus manos en todo momento y por haber estado siempre pendientes de mí, para que no me faltara de nada y pudiera saborear cada día al completo.

Agradecer a mis primos, Paula y Raúl, por haberse volcado en cuerpo y alma conmigo cuando he pasado por una etapa complicada, y por contagiarme su enorme motivación e ilusión ante cualquier cosa en la vida.

Agradecer a mi ahijada, Sara, por haber traído consigo una grandiosa ilusión y motivación a la familia, por transmitir su infinita energía y ganas de vivir, y por las innumerables alegrías que nos brinda día a día.

Agradecer a todos mis amigos por los momentos inolvidables que han compartido conmigo, por las infinitas risas y por hacer que me despejara en los momentos de máxima saturación.

Agradecer a mis tutores, Roberto y Borja, por su paciencia y delicadeza a la hora de resolver mis dudas, por su dedicación y consejo, consiguiendo elevar sobremanera la calidad del presente documento.

Y por último, agradecer a mis abuelos, Pepe y Joaquina, cuyo sacrificio por la familia no está escrito en ningún lado, quienes han hecho posible que a día de hoy tengamos lo que tenemos y seamos quienes somos, quienes han sido el motor en todo momento y han hecho que vivamos momentos que permanecerán de por vida en nuestros corazones, que recordaremos con alguna lágrima en los ojos pero con una sonrisa viva, y quienes nos siguen cuidado desde arriba.

A todos ellos, gracias.

Índice general

Índice de figuras	VI
Índice de tablas	VII
Nomenclatura	IX
Resumen	XI
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Contexto histórico	1
1.2 Motivación	2
1.3 Objetivos	3
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 Introducción	5
2.2 Ecuaciones de conservación	6
2.2.1 Ecuaciones en su forma general	6
2.2.2 Volumen de control y sistemas de referencia	8
2.2.3 Ecuaciones en un sistema de referencia móvil	10
2.3 Fundamentos CFD	10
3 METODOLOGÍA	13
3.1 Introducción	13
3.2 Modelado conceptual	14
3.3 Dominio computacional y geometría	15
3.3.1 Consideraciones previas	15
3.3.2 Limpieza de geometría	19
3.3.3 Independencia de dominio	21
3.4 Mallado	24
3.4.1 Descripción de la estrategia de mallado	24
3.4.2 Estudio de independencia de malla	30
3.5 Configuración de los casos base	31
3.5.1 Propiedades del fluido y modelos físicos	31
3.5.2 Condiciones de contorno	32
3.5.3 Esquemas y algoritmos numéricos	32
3.6 Criterios de convergencia	34
4 RESULTADOS	35
4.1 Introducción	35
4.2 Análisis de la resistencia al avance y la potencia requerida	36

4.2.1	Resistencia al avance	36
4.2.2	Coefficiente adimensional de resistencia	38
4.2.3	Potencia requerida	39
4.3	Campo de presión y de velocidad	41
4.3.1	Contornos de presión	41
4.3.2	Contornos de velocidad	42
4.4	Distribución de presión sobre el vehículo	43
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	47
5.1	Conclusiones	47
5.1.1	Conclusiones generales	47
5.1.2	Conclusiones particulares del caso	48
5.2	Trabajos futuros	48
6	PLIEGO DE CONDICIONES Y PRESUPUESTO	51
6.1	Introducción	51
6.2	Pliego de condiciones	52
6.2.1	Condiciones técnicas	52
6.2.2	Condiciones del puesto de trabajo	53
6.3	Presupuesto	56
6.3.1	Introducción	56
6.3.2	Costes unitarios	56
6.3.3	Desglose de costes totales	57
	BIBLIOGRAFÍA	61

Índice de figuras

1.1	Geometría provisional del prototipo de Zeleros	2
1.2	Misión provisional del prototipo de Zeleros	2
2.1	Representación esquemática y simplificada de la geometría en estudio	8
2.2	Enfoque <i>Multiple Reference Frame</i> , MRF	9
2.3	Proceso CFD completo ([1])	11
3.1	Parte fija (estructura soporte y guía) de la geometría inicial	15
3.2	Parte móvil (pod) de la geometría inicial	16
3.3	Distribución anormal de presión en simulaciones con la geometría inicial	17
3.4	Distribución anormal de velocidad en simulaciones con la geometría inicial	17
3.5	Geometría del Caso 1: Estructura soporte extruida	18
3.6	Geometría del Caso 2: Estructura soporte tangente	18
3.7	Proceso de limpieza aplicado a la estructura soporte	19
3.8	Proceso de limpieza aplicado al cuerpo cilíndrico del pod	20
3.9	Proceso de limpieza aplicado a la plataforma vertical del pod	20
3.10	Sección anterior para el cálculo de la presión media	22
3.11	Sección inferior y superior en las que se ha calculado el gasto	22
3.12	Vista global del mallado	25
3.13	Vista ampliada del control superficial de mallado sobre la estructura	26
3.14	Vista ampliada del control superficial de mallado sobre el pod completo	27
3.15	Vista ampliada del control superficial de mallado sobre el cuerpo cilíndrico, y capa prismática	28
3.16	Refinamiento en el mallado para la estela turbulenta	28
3.17	Región del pod que presenta un valor de Y^+ correspondiente a la capa Buffer	29
3.18	Numero de Strouhal en flujo axial en función de su relación de aspecto ([2])	33
4.1	Evolución de la resistencia al avance con la velocidad	37
4.2	Evolución del CD con la velocidad de avance	38
4.3	Evolución de la potencia requerida con la velocidad de avance	40
4.4	Contorno de presión relativa en el plano de simetría geométrico para el Caso 1 (superior) y Caso 2 (inferior)	41
4.5	Contorno de velocidad en el plano de simetría geométrico para el Caso 1 (su- perior) y Caso 2 (inferior)	42
4.6	Contorno de velocidad en un plano frontal a mitad del vehículo para el Caso 1 (izquierda) y Caso 2 (derecha)	42
4.7	Curva de la superficie del pod sobre la que se obtendrá la distribución de presión	43

4.8	Distribución de presión sobre la curva de la Figura 4.7, correspondiente al tramo de la plataforma vertical	44
4.9	Distribución de presión sobre la curva de la Figura 4.7, correspondiente al tramo del cuerpo cilíndrico	45

Índice de tablas

3.1	Extensión de cada volumen de control	21
3.2	Variación de las variables monitorizadas en el estudio de sensibilidad de dominio	23
3.3	Parámetros del mallado general del dominio	25
3.4	Parámetros del control superficial sobre la estructura soporte y la guía	26
3.5	Parámetros del control superficial sobre las superficies del pod menos complejas	27
3.6	Parámetros del control superficial sobre las superficies del pod más críticas . .	27
3.7	Valores de las variables monitorizadas durante la independencia de malla . . .	30
4.1	Evolución de la resistencia con la velocidad de avance, y diferencia porcentual entre casos	37
4.2	Evolución del CD con la velocidad de avance, y diferencia porcentual entre casos	38
4.3	Valor medio del CD en cada caso	39
4.4	Evolución de la potencia con la velocidad de avance, y diferencia porcentual entre casos	39
6.1	Recursos totales requeridos para la realización del proyecto	56
6.2	Coste bruto del personal	58
6.3	Coste bruto del software	58
6.4	Coste bruto total del proyecto	59
6.5	Coste final del proyecto	59

Nomenclatura

Propiedades del fluido

ρ	—	Densidad	[kg/m^3]
μ	—	Viscosidad dinámica	[$Pa \cdot s$]
ν	—	Viscosidad cinemática	[m^2/s]
V	—	Velocidad	[m/s]
Re	—	Número de Reynolds	[-]
p	—	Presión	[Pa]
R	—	Constante específica de los gases ideales	[$J/(kg \cdot K)$]
T	—	Temperatura	[K]
St	—	Número de Strouhal	[-]
f_c	—	Frecuencia característica	[Hz]

Parámetros característicos

L_c	—	Longitud característica	[m]
A_{ref}	—	Superficie de referencia	[m^2]
d_{pod}	—	Diámetro del vehículo	[m]
u_{ref}	—	Velocidad de referencia	[m/s]
u_{est}	—	Velocidad de la estructura	[m/s]
u_{VC}	—	Velocidad del volumen de control	[m/s]
u_{pod}	—	Velocidad del vehículo	[m/s]
p_{ref}	—	Presión de referencia	[Pa]
ρ_{ref}	—	Densidad de referencia	[kg/m^3]

Fuerzas aerodinámicas

D	—	Fuerza de resistencia	[N]
P	—	Potencia	[W]
C_D	—	Coefficiente de resistencia	[-]

Siglas

<i>CFD</i>	—	Computational Fluid Dynamics
<i>DNS</i>	—	Direct Numerical Simulations
<i>LES</i>	—	Large Eddy Simulation
<i>RANS</i>	—	Reynolds Averaged Navier Stokes
<i>SELF</i>	—	Sustainable Electric Freightforwarder
<i>CAD</i>	—	Computer-Aided Design
<i>LRF</i>	—	Lab Reference Frame
<i>RMRF</i>	—	Relative Motion Reference Frame
<i>MRF</i>	—	Multiple Reference Frame

Resumen

Ante el elevado interés por aligerar y automatizar el transporte de carga en puertos y aeropuertos, así como la necesidad de que los procesos involucrados cuenten con ciertas medidas de sostenibilidad y preservación del medio ambiente, la empresa Zeleros está en desarrollo de un proyecto con el que pretende aplicar su tecnología hyperloop al transporte autónomo y eléctrico de contenedores de carga en el puerto de Sagunto.

Como consecuencia, en el presente trabajo se realizará la caracterización aerodinámica mediante CFD del prototipo mencionado, estudiándose dos versiones geométricas del mismo debido a limitaciones por coste computacional. Sin embargo, dichas variantes representan dos casos extremos de la geometría real, por lo que la solución para el caso de interés se encontrará acotada entre los resultados de cada uno de los casos.

De tal forma, el estudio abordará un análisis a distintas velocidades de desplazamiento, con el que se pretende principalmente determinar el coeficiente de arrastre del mismo y la potencia requerida, lo que permitiría realizar un primer dimensionamiento del motor eléctrico. Además, se analizará la distribución de velocidad y presión alrededor del vehículo, identificando los fenómenos que dan lugar a sus particularidades y relacionándolo con las variaciones en la geometría impuestas, permitiendo consecuentemente conocer las ventajas e inconvenientes que tendría la modificación del diseño original hacia cada uno de los casos límite.

Palabras clave: CFD, Modelado 3D, Hyperloop, Prototipo, Aerodinámica, Resistencia.

Resum

Davant l'elevat interès per alleugerir i automatitzar el transport de càrrega en ports i aeroports, així com la necessitat que els processos involucrats compten amb unes certes mesures de sostenibilitat i preservació del medi ambient, l'empresa Zeleros està en desenvolupament d'un projecte amb el qual pretén aplicar la seua tecnologia hyperloop al transport autònom i elèctric de contenidors de càrrega en el port de Sagunt.

Com a conseqüència, en el present treball es realitzarà la caracterització aerodinàmica mitjançant CFD del prototip comentat, estudiant-se dues versions geomètriques del mateix a causa de limitacions per cost computacional. No obstant això, aquestes variants representen dos casos extrems de la geometria real, per la qual cosa la solució per al cas d'interès es trobarà delimitada entre els resultats de cadascun dels casos.

De tal forma, l'estudi abordarà una anàlisi a diferents velocitats de desplaçament, amb el qual es pretén principalment determinar el coeficient d'arrossegament del mateix i la potència requerida, la qual cosa permetria realitzar un primer dimensionament del motor elèctric. A més, s'analitzarà la distribució de velocitat i pressió al voltant del vehicle, identificant els fenòmens que donen lloc a les seues particularitats i relacionant-ho amb les variacions en la geometria imposades, permetent conseqüentment conèixer els avantatges i inconvenients que tindria la modificació del disseny original cap a cadascun dels casos límit.

Paraules clau: CFD, Modelat 3D, Hyperloop, Prototip, Aerodinàmica, Resistència.

Abstract

Due to the high interest in lightening and automating the transport of cargo in ports and airports, as well as the need for the processes involved to have certain sustainability and environmental preservation measures, the company Zeleros is developing a project with which it intends to apply its hyperloop technology to the autonomous and electric transport of cargo containers in the port of Sagunto.

As a consequence, in the present work the aerodynamic characterization by means of CFD of the aforementioned prototype will be carried out, studying two geometric versions of it due to limitations due to computational cost. However, these variants represent two extreme cases of real geometry, so the solution for the case of interest will be bounded between the results of each one of the cases.

In this way, the study is going to broach an analysis at different displacement speeds, with which it is mainly intended to determine its drag coefficient and the power required, which would allow an initial sizing of the electric motor. In addition, the distribution of speed and pressure around the vehicle will be analyzed, identifying the phenomena that give rise to its particularities and relating it to the variations in the geometry imposed, consequently allowing to know the advantages and disadvantages that the modification of the original design would have towards each one of the limit cases.

Keywords: CFD, 3D Modelling, Hyperloop, Prototype, Aerodynamics, Drag.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

Índice

1.1	Contexto histórico	1
1.2	Motivación	2
1.3	Objetivos	3

1.1. Contexto histórico

Durante las últimas décadas, el medio ambiente ha experimentado un significativo impacto negativo debido a la actividad humana y los cambios globales, entre los que se pueden distinguir el calentamiento global causado principalmente por la emisión de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad, la contaminación o la escasez de recursos naturales, entre muchos otros.

Todos estos aspectos degradantes se ven potenciados e impulsados por actividades que se encuentran muy presentes en la vida humana, como la quema de combustibles fósiles, la agricultura intensiva o la industrialización. Si bien es cierto que muchos de esos procesos son necesarios para el desarrollo y conservación de la civilización, también lo es que se pueden llevar a cabo bajo diferentes condiciones que sean ecológicamente más aceptables, pero durante mucho tiempo ha sido una práctica habitual poner por delante el interés económico propio que el cuidado del medio ambiente.

Sin embargo, en los últimos años es cada vez mayor la conciencia que se tiene sobre el mal estado del planeta, entre otros motivos porque los efectos adversos empiezan a ser más notables, y son diversas las medidas que se llevan tomando para ralentizar la degradación del mismo. De tal forma, en este contexto en el que el desarrollo de una actividad no solo atiende a objetivos económicos, sino que presenta también una supervisión sobre el impacto que puede tener en el medio ambiente, es donde surge el nuevo proyecto piloto de Zeleros, la empresa europea con sede en Valencia, que pretende probar en el puerto de Sagunto la aplicabilidad de

su tecnología hyperloop al transporte autónomo y eléctrico de contenedores de carga.

1.2. Motivación

El sistema de transporte de contenedores autónomo SELF (Sustainable Electric Freight-forwarder) que pretende desarrollar Zeleros, y que ha sido introducido en la anterior sección, tiene por objetivo acelerar la transición de puertos y aeropuertos hacia la sostenibilidad y automatización. Con el objetivo de contextualizar y mejorar el entendimiento del proyecto, en las Figuras 1.1 y 1.2 se muestra el la geometría y la misión provisional del prototipo, respectivamente:

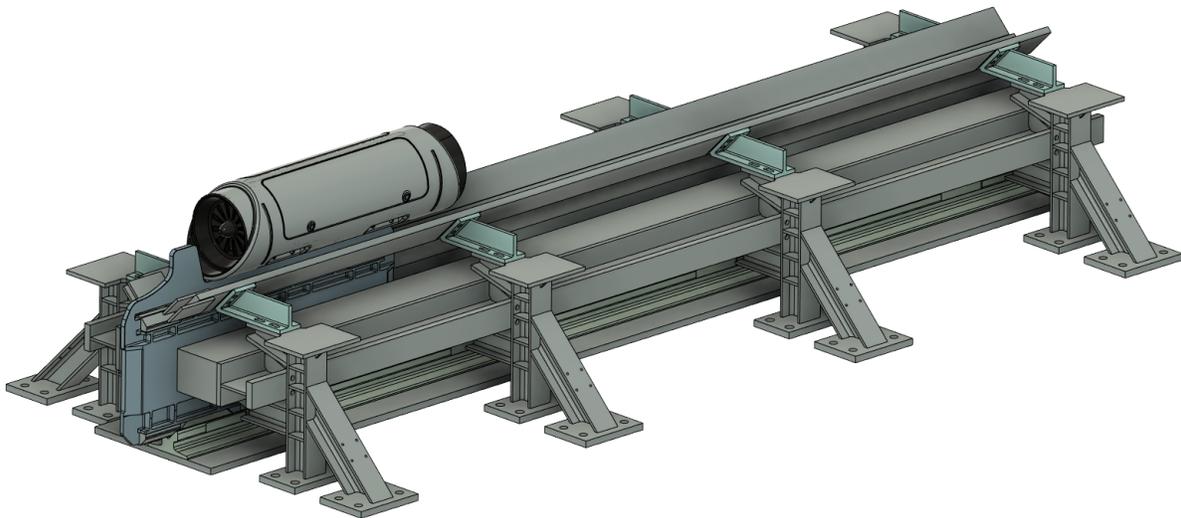


Figura 1.1: Geometría provisional del prototipo de Zeleros

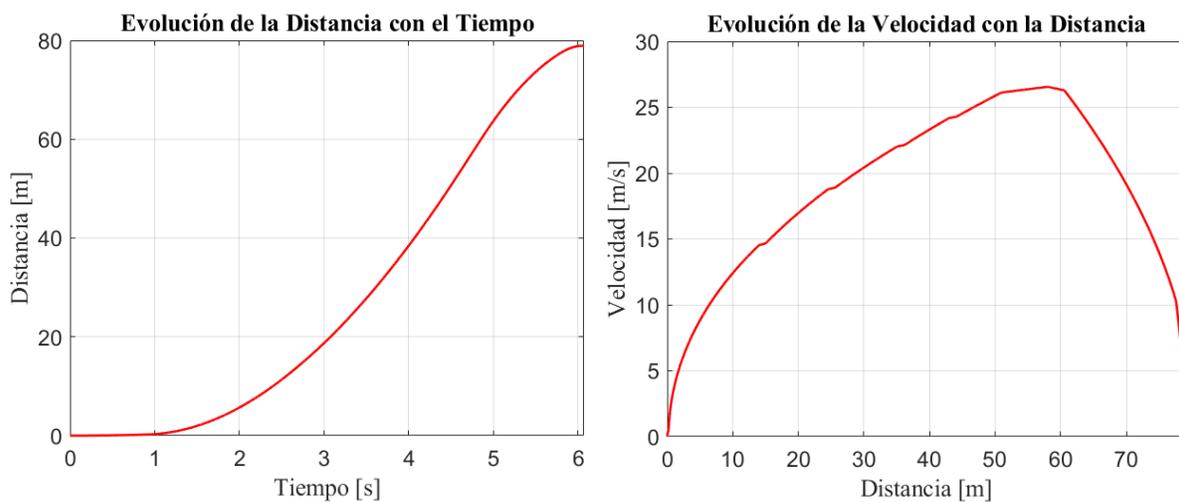


Figura 1.2: Misión provisional del prototipo de Zeleros

Como es natural, en todo proyecto de estas dimensiones es fundamental realizar numerosos estudios y simulaciones previas para asegurar el éxito una vez se lleve a cabo, y poder eliminar cualquier contratiempo que se pueda producir, o por lo menos minimizar las consecuencias del mismo. Uno de los aspectos claves que puede contribuir de forma significativa al desarrollo del proyecto es la caracterización aerodinámica mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del vehículo, siendo esto el origen del estudio que se llevará a cabo en el presente trabajo

Es primordial tener en cuenta que el análisis CFD es capaz de proporcionar varias ventajas significativas, destacando el ahorro de costes y tiempo, pues permite simular el comportamiento de fluidos en diferentes diseños y escenarios antes de realizar prototipos físicos, la predicción de comportamientos en diferentes condiciones, o la optimización de diseños, entre muchas otras. Es por ello por lo que su aplicación resulta ideal en el proyecto de Zeleros, y ante la oportunidad de llevar a cabo dicho análisis y el elevado interés del autor por la Dinámica de Fluidos computacional, emergió el estudio realizado en el presente documento.

1.3. Objetivos

Los objetivos que se persiguen con la elaboración del presente Trabajo de Final de Grado se pueden dividir en tres bloques fundamentales.

En primer lugar, objetivos de carácter puramente académicos y consistentes en la finalización de los estudios del Grado en Ingeniería Aeroespacial con especialidad de Aeronaves, en la Universitat Politècnica de València, así como la correcta aplicación de todos los conocimientos adquiridos durante los cuatros años de carrera.

En segundo lugar, objetivos de aprendizaje continuo y consolidación de conocimientos, pues se requerirán habilidades de diversa naturaleza, como el uso de programas de CAD para el tratamiento de la geometría, de CFD para el estudio aerodinámico y de otros softwares para el tratamiento de los resultados, lo cual en su conjunto consolidará e inducirá nuevos aprendizajes.

Finalmente, objetivos propios del estudio que se realizará en el presente proyecto, entre los que destacan:

- Simplificación de la geometría de estudio por medio de una solución de compromiso.
- Obtención de la resistencia que ofrece el vehículo durante su avance, entendiendo los principales factores que contribuyen a ello.
- Caracterización del vehículo por medio del coeficiente adimensional de resistencia.
- Estimación de la potencia requerida para poner en movimiento el vehículo a diferentes velocidades, y de esta forma poder hacer un primer dimensionamiento del motor necesario.

- Obtención de los contornos de presión y de velocidad alrededor del vehículo y de la estructura sobre la que avanza, entendiendo los fenómenos que den lugar a las características de los mismos.
- Obtención de la distribución de presión sobre el vehículo, identificando las causas del comportamiento observado.

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

Índice

2.1	Introducción	5
2.2	Ecuaciones de conservación	6
2.2.1	Ecuaciones en su forma general	6
2.2.2	Volumen de control y sistemas de referencia	8
2.2.3	Ecuaciones en un sistema de referencia móvil	10
2.3	Fundamentos CFD	10

2.1. Introducción

A lo largo de este capítulo se describirán los fundamentos teóricos que gobiernan el caso en estudio, basados esencialmente en los principios de la física y la mecánica de fluidos. Estos fundamentos proporcionan las bases para comprender y analizar el comportamiento del flujo de aire alrededor de objetos en movimiento, y consecuentemente determinar los esfuerzos y fenómenos que en ellos provocan.

De esta manera, se presentarán las principales ecuaciones que rigen dicho comportamiento, los sistemas de referencia que se emplearán para abordar el problema y, finalmente, se describirán las etapas que constituyen un proceso CFD completo y que servirán como hilo conductor en el presente estudio.

2.2. Ecuaciones de conservación

2.2.1. Ecuaciones en su forma general

En primer lugar, es preciso destacar que una de las hipótesis tomadas en la formulación de las ecuaciones es la del fluido como medio continuo, de forma que se considera este como una entidad continua sin contemplar su estructura interna a escala microscópica; esto es, obviando el movimiento molecular.

De tal forma, se presentan a continuación las ecuaciones de conservación en su forma general, las cuales relacionan las tasas de cambio de ciertas magnitudes físicas con los flujos de entrada y salida, así como con las fuentes y sumideros internos dentro del sistema.

Ecuación de conservación de la masa

La ecuación de conservación de la masa, también conocida como ecuación de continuidad, manifiesta el balance de masa a través de un determinado volumen de control y se expresa matemáticamente y en forma diferencial según la Ecuación 2.1

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2.1)$$

Donde ρ y \vec{v} son la densidad y la velocidad del fluido, respectivamente. Para el caso en estudio en el que el régimen es claramente incompresible y la densidad se puede asumir constante, la ecuación quedaría simplificada según se indica en la Ecuación 2.2:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (2.2)$$

Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento

La también conocida como ecuación de conservación del momento lineal es la formulación matemática de la segunda ley de Newton, y establece que la variación temporal del momento lineal dentro de un determinado volumen de control debe igualar al sumatorio de fuerzas que actúen sobre dicho volumen. De tal forma, la ecuación de la cantidad de movimiento viene dada por la Ecuación 2.3:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \times \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \tau' + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.3)$$

Donde τ' es el tensor de esfuerzos viscosos. Así, la igualdad de la Ecuación 2.3 expresa que la derivada material de la velocidad es igual a la resultante de las fuerzas másicas por unidad

de volumen más las fuerzas de superficie que actúan sobre la partícula fluida. A su vez, el tensor de esfuerzos viscosos ($\boldsymbol{\tau}'$) se relaciona con el campo de velocidades según la Ecuación 2.4, igualdad que constituye el modelo matemático más simple pero que describe con precisión el comportamiento del aire [3]:

$$\boldsymbol{\tau}' = 2\mu\mathbf{D} - \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \vec{v})\mathbf{I} \quad (2.4)$$

Siendo μ la viscosidad dinámica, \mathbf{I} la matriz identidad, y \mathbf{D} el tensor deformación, relacionado con la velocidad por medio de la Ecuación 2.5:

$$\mathbf{D} = \frac{1}{2}(\nabla\vec{v} + (\nabla\vec{v})^T) \quad (2.5)$$

Ecuación de conservación de la energía

El principio de conservación de la energía se fundamenta en la primera ley de la termodinámica, que establece que la variación de la energía interna de un sistema termodinámico debe igualar a la diferencia entre el calor transferido a un sistema y el trabajo realizado por este. De esta forma, la expresión matemática de la ecuación en cuestión se corresponde con la mostrada en la Ecuación 2.6:

$$\rho \frac{De}{Dt} = \underbrace{-p\nabla \cdot \vec{v}}_1 + \underbrace{\Phi_v}_2 + \underbrace{\nabla \cdot (\kappa\nabla T)}_3 + \underbrace{\dot{Q}}_4 \quad (2.6)$$

Donde de acuerdo con lo establecido en [4], los diferentes términos que en ella aparecen hacen referencia a la variación de la energía interna de una partícula fluida debido a:

1. El trabajo realizado por las fuerzas de presión, que actúan isotrópicamente, para cambiar su volumen
2. El trabajo de las fuerzas, que actúan anisotrópicamente, para intentar deformar su volumen
3. El calor que intercambia la partícula por conducción
4. La contribución de la radiación y reacciones químicas

Ecuación de estado

Finalmente el sistema de ecuaciones se cerrará con una ecuación de estado, la cual describe el comportamiento de un sistema físico en equilibrio termodinámico. Durante todo el documento se asumirá el aire como gas ideal, tal y como se detallará en la Sección 3.5, de forma que la

relación constitutiva en este caso será la ecuación de estado de los gases ideales reflejada en la Ecuación 2.7:

$$\rho = \frac{p}{R T} \quad (2.7)$$

Donde R es la constante específica de los gases ideales y de valor 286.9 J/(kg·K).

2.2.2. Volumen de control y sistemas de referencia

A continuación se definirán los sistemas de referencia que han sido empleados en el presente estudio, para lo cual se hará uso de ilustraciones que tratan de representar de forma sencilla la geometría real y detallada más en profundidad en la Sección 3.3. Este esquema simplificado y consistente en una vista en planta del caso es el mostrado en la Figura 2.1, donde el cuerpo gris representa el vehículo móvil que avanza hacia la izquierda, los cuerpos oscuros y esbeltos representan la estructura soporte que permanece fija con respecto al suelo y sobre la cual avanza el vehículo, y las líneas discontinuas representan los límites del volumen de control.

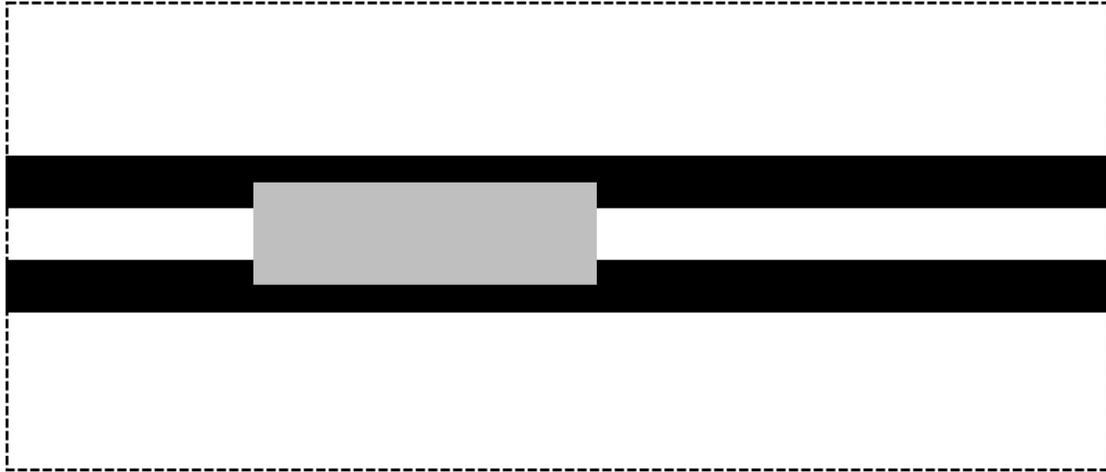


Figura 2.1: Representación esquemática y simplificada de la geometría en estudio

Una vez presentado el esquema que se empleará en la presente sección, se procede a introducir los sistemas de referencias. Por un lado, en STAR-CCM+ existe un sistema de referencia estacionario por defecto y conocido bajo el nombre de *Lab Reference Frame* (LRF), pero adicionalmente se pueden crear otros sistemas de referencia que presenten movimiento relativo con respecto al LRF, tal como aceleraciones, rotaciones... y que recibirán el nombre de *Relative Motion Reference Frame* (RMRF).

De tal forma, y debido a la existencia de superficies normales a la dirección de avance del vehículo en la estructura, el movimiento relativo entre ambos cuerpos se modelará por medio de un RMRF que presentará una velocidad relativa con respecto al LRF. El RMRF se encontrará vinculado al vehículo y el volumen de control, desplazándose solidariamente con

ellos, mientras que el resto de superficies (estructura soporte, suelo. . .) no presentarán ningún tipo de movimiento visto desde el sistema de referencia fijado en tierra; esto es, el LRF.

Así pues, al tratar con más de un sistema de referencia se estará trabajando con un enfoque conocido en la literatura como *Multiple Reference Frame* (MRF), en el cual la interpretación del movimiento no es única y dependerá desde qué sistema de referencia se lleve a cabo: si se realiza desde el sistema de referencia en tierra (LRF), se apreciará que tanto la estructura soporte como el suelo permanecen inmóviles, mientras que es el vehículo y el volumen de control el que se desplazan; en cambio, un observador situado en el RMRF advertirá que el vehículo y el volumen de control se encuentran en reposo, pero en cambio la estructura soporte y el suelo avanzan hacia él.

Este enfoque, junto con las dos posibles interpretaciones, se representa de forma gráfica en la Figura 2.2, donde en azul se ha establecido la velocidad que presenta cada entidad visto desde el RMRF (de nuevo, el sistema de referencia que presenta movimiento relativo con respecto al suelo), y en rojo los valores vistos desde el LRF:

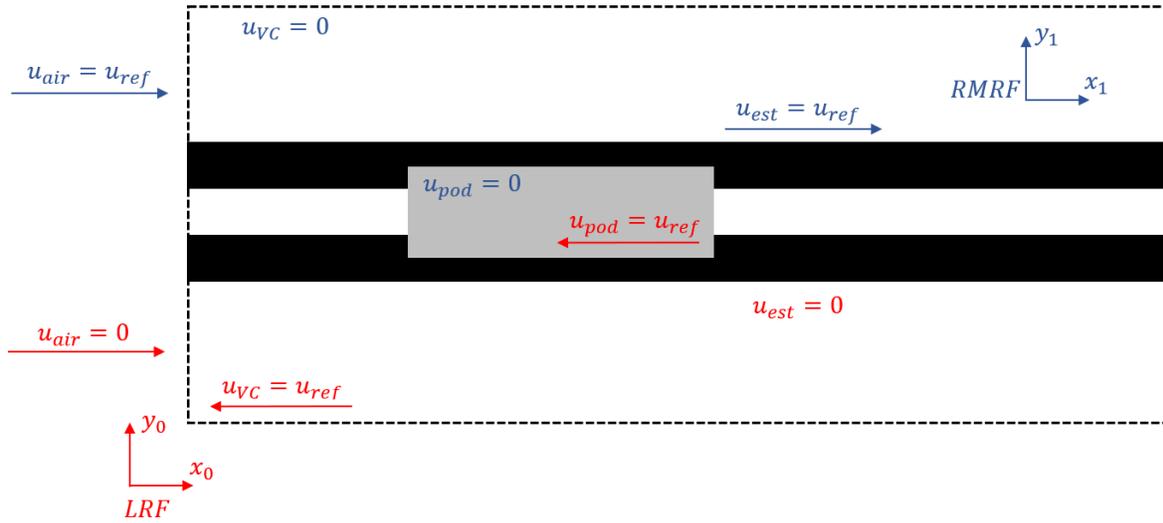


Figura 2.2: Enfoque *Multiple Reference Frame*, MRF

Por consiguiente, al trabajar con el enfoque MRF se deberán definir las siguientes variables, pues se debe tener en cuenta que la velocidad del fluido relativa al sistema de referencia ligado al volumen de control representa una variable fundamental:

- \vec{V} : Velocidad del fluido percibida por un observador estacionario en un sistema de coordenadas fijo. Su valor es $\vec{V} = 0$ en el LRF y $\vec{V} = u_{ref}$ en el RMRF.
- \vec{V}_r : Velocidad del fluido percibida por un observador que se desplaza solidariamente con el volumen de control. Su valor es $\vec{V}_r = u_{ref}$ tanto en el LRF como en el RMRF.
- \vec{V}_{VC} : velocidad del volumen de control percibida desde un sistemas de coordenadas fijo. Su valor es $\vec{V}_{VC} = -u_{ref}$ en el LRF y $\vec{V}_{VC} = 0$ en el RMRF.

Además, la relación entre ellas es la mostrada en la Ecuación 2.8:

$$\vec{V} = \vec{V}_r + \vec{V}_{VC} \quad (2.8)$$

Finalmente, la consecuencia directa de todo lo mencionado anteriormente es que a la hora de formular las Ecuaciones de Conservación 2.1, 2.3 y 2.6 se podrán distinguir dos posibilidades, según se empleen velocidades absolutas (\vec{V}) o relativas (\vec{V}_r).

2.2.3. Ecuaciones en un sistema de referencia móvil

En este apartado se formularán las ecuaciones de la conservación de masa y cantidad de movimiento vistas anteriormente, tanto con velocidades relativas como con absolutas, omitiéndose la ecuación de conservación de la energía (Ecuación 2.6) por no presentar información adicional.

Formulación con velocidad relativa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}_r) = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}_r) + \nabla \cdot (\rho \vec{V}_r \vec{V}_r) + \rho \vec{a}_0 = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \vec{F} \quad (2.10)$$

Formulación con velocidad absoluta

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\vec{V} - \vec{V}_{VC})) = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \nabla \cdot (\rho (\vec{V} - \vec{V}_{VC}) \cdot \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}' + \vec{F} \quad (2.12)$$

2.3. Fundamentos CFD

En la presente sección se presentarán los pasos fundamentales que constituyen un proceso CFD completo y se describirá el enfoque seleccionado para el estudio de la turbulencia, pero todo ello sin entrar en gran profundidad puesto que el Capítulo 3 está destinado precisamente para la metodología del proceso, y será ahí donde se detalle minuciosamente el trabajo que se

ha realizado en cada uno de los pasos, acompañado de figuras, tablas con resultados... que faciliten la comprensión de los mismos.

En primer lugar, es primordial tener en cuenta que la dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una técnica que permite estudiar y simular el comportamiento de fluidos en diferentes situaciones y entornos. De tal manera, un programa de cálculo CFD parte de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, conocidas popularmente como las ecuaciones de Navier-Stokes, buscando para ellas una solución mediante métodos numéricos debido a su gran complejidad y la de los fenómenos turbulentos, y que se intente ajustar de la forma más fiel a la realidad.

Una vez comprendido esto, se pueden diferenciar 3 etapas fundamentales en todo proceso CFD [1], las cuales se pueden apreciar de forma esquemática en la Figura 2.3 y cuya descripción se adjunta a continuación:

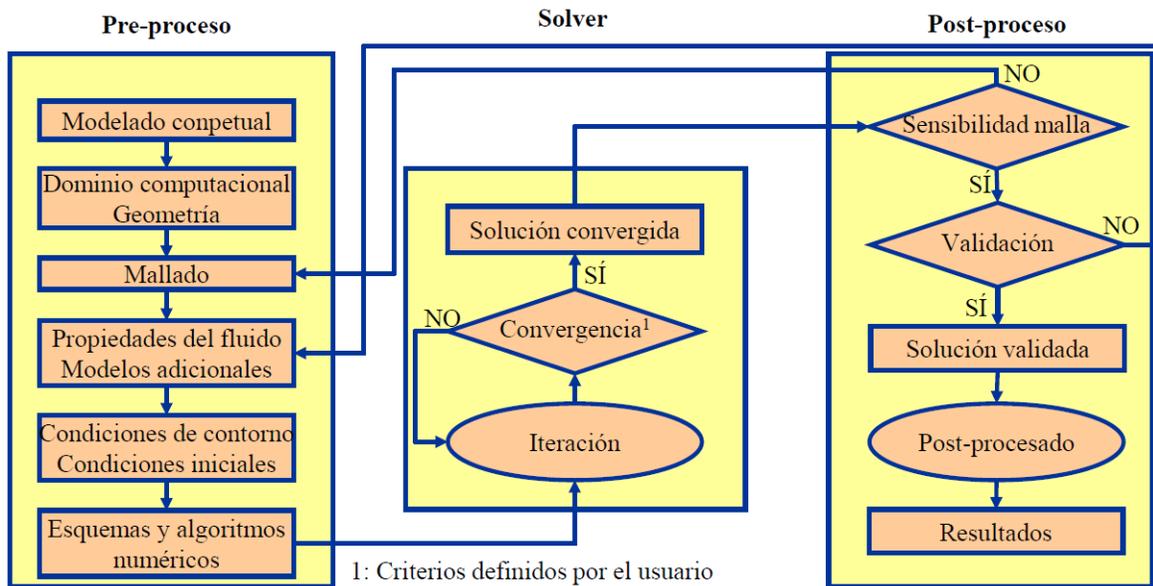


Figura 2.3: Proceso CFD completo ([1])

- Etapa de preproceso: representa la primera etapa del proceso CFD y es fundamental para garantizar la calidad y precisión de los resultados. Durante ella se modela conceptualmente el problema, se define el dominio y la geometría del mismo, se elabora el mallado, se seleccionan los modelos físicos pertinentes y se eligen las condiciones iniciales y de contorno más adecuadas para el problema en cuestión.
- Etapa de cálculo: en esta etapa se resuelven las ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento del fluido, llevándose a cabo en un proceso de resolución iterativa hasta que se satisfagan ciertos criterios de convergencia definidos por el usuario; una vez se cumplan dichos criterios, el cálculo se interrumpirá y se dará temporalmente por válido el resultado.

- Etapa de postproceso: finalmente, una vez finalizada la simulación numérica se llevará a cabo el tratado de los resultados, analizándolos y visualizándolos de manera adecuada para extraer la información más relevante del caso en estudio. Además, en esta etapa se llevan a cabo también actividades de validación y optimización, y no abarca solamente a la herramienta CFD, sino también a cualquier otro programa de tratamiento de datos.

Por último, se describirá ligeramente como se ha llevado a cabo el tratado de la turbulencia. Para ello, existen principalmente tres enfoques fundamentales: el DNS (*Direct Numerical Simulations*), el LES (*Large Eddy Scales*), y el RANS (*Reynolds Average Navier-Stokes*). En el primero de ellos se resuelven todas las escalas turbulentas, desde las más grandes hasta las más pequeñas; en el segundo, solamente son calculadas las escalas grandes de la turbulencia, mientras que las pequeñas son modeladas; y finalmente, el modelo RANS modela todas las escalas turbulentas, promediando las ecuaciones de Navier-Stokes y descomponiendo cada variable ϕ en su media y su variable fluctuante, de forma que las ecuaciones que se resuelven son muy similares a las de Navier-Stokes pero con un término adicional que es conocido como el tensor de Reynolds, y que presenta dependencia de los flujos medios.

Con todo ello, para el caso en estudio se empleará un modelo RANS, pues para el ámbito del presente trabajo y con los medios disponibles representa la mejor opción al suponer un ahorro computacional significativo.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

Índice

3.1	Introducción	13
3.2	Modelado conceptual	14
3.3	Dominio computacional y geometría	15
3.3.1	Consideraciones previas	15
3.3.2	Limpieza de geometría	19
3.3.3	Independencia de dominio	21
3.4	Mallado	24
3.4.1	Descripción de la estrategia de mallado	24
3.4.2	Estudio de independencia de malla	30
3.5	Configuración de los casos base	31
3.5.1	Propiedades del fluido y modelos físicos	31
3.5.2	Condiciones de contorno	32
3.5.3	Esquemas y algoritmos numéricos	32
3.6	Criterios de convergencia	34

3.1. Introducción

En el presente capítulo se tratarán en profundidad cada una de las etapas presentadas en la Sección 2.3, a excepción del post-procesado y análisis de resultados que será objeto del Capítulo 4, las cuales constituyen en su conjunto la metodología seguida en este proceso CFD completo.

De esta forma, inicialmente se llevará a cabo el modelado conceptual del problema, describiéndose posteriormente el dominio computacional y la geometría en estudio. En esta sección se explicará una de las grandes limitaciones que se han encontrado en este proyecto, condicionando significativamente las líneas de estudio del mismo, los objetivos y la precisión de los

resultados. Además, se realizará también dicha sección el estudio de independencia de dominio, que aunque en el proceso CFD debería situarse en la parte de postprocesado, se ha optado por presentarla en este punto por resultar más coherente y ordenado al hablarse precisamente del dominio.

En tercer lugar, se tratará el proceso de mallado junto con el correspondiente estudio de sensibilidad de malla, que se ha situado en esta sección por los mismos motivos que el estudio de sensibilidad de dominio.

Seguidamente se detallará la configuración de los casos base, con la elección de los modelos físicos, condiciones de contorno, esquemas numéricos... entre otros, y se cerrará el capítulo con los criterios de convergencia que se han seguido para poder dar por convergido cada uno de los casos.

3.2. Modelado conceptual

Dentro del modelado conceptual se pueden distinguir diferentes aspectos a los que atender, como los objetivos del proyecto en términos de precisión y resultados, las posibles simplificaciones que se pueden efectuar, estimación del coste computacional... y estas decisiones se deben ver apoyadas por la experiencia previa del usuario o por revisión bibliográfica, entre otras fuentes.

Sin embargo, el problema en estudio no presenta apenas bibliografía por ser algo relativamente novedoso, por lo que las decisiones que se tomen provendrán de la experiencia académica del usuario, y de un proceso de prueba y error que convergerá a decisiones más sólidas.

De tal manera, la precisión en los resultados no se pretende que sea muy elevada, principalmente por el elevado coste computacional con el que se va a trabajar (del orden de millones de celdas) y la limitación en los equipos de trabajo, pero se tratará en la medida de lo posible maximizarla sin que el tiempo de cálculo se desborde. Así pues, los criterios de precisión que se verán con todo detalle en el estudio de sensibilidad de dominio (3.3.3), sensibilidad de malla (3.4.2) y criterios de convergencia (3.6) habrán sido fruto de un proceso iterativo en el cual, si se imponían valores más estrictos de precisión, el incremento en el coste computacional estaría totalmente descompensado.

En cuanto a las posibles simplificaciones para el estudio del caso, a la vista de la geometría expuesta en la Figura 1.1 la posibilidad de reducir el problema a un caso 2D es completamente inexistente. Y con respecto a la imposición de planos de simetría, se ve una clara simetría geométrica en el plano que contiene al eje de la parte cilíndrica del vehículo, y es perpendicular al suelo. Sin embargo, se prevé que los desprendimientos sean significantes, por lo que imponer en dicho plano una condición de simetría implicaría forzar en exceso el comportamiento natural del flujo y de los fenómenos turbulentos, por lo que finalmente se tratará con un caso 3D sin el plano de simetría central.

3.3. Dominio computacional y geometría

3.3.1. Consideraciones previas

Como consideraciones previas a la presentación de las dos geometrías analizadas, es primordial entrar en detalle con la limitación encontrada durante el estudio del presente proyecto, pues marcó significativamente todos los aspectos relacionados con el estudio.

El punto de partida fue la geometría mostrada en la Figura 1.1, donde se pueden diferenciar 3 cuerpos principales. Por un lado, en la Figura 3.1 se aprecia la parte fija de la geometría, distinguiéndose el cuerpo número 1, que recibirá el nombre de *Guía*, y el cuerpo número 2, que se corresponde con la *Estructura soporte*.

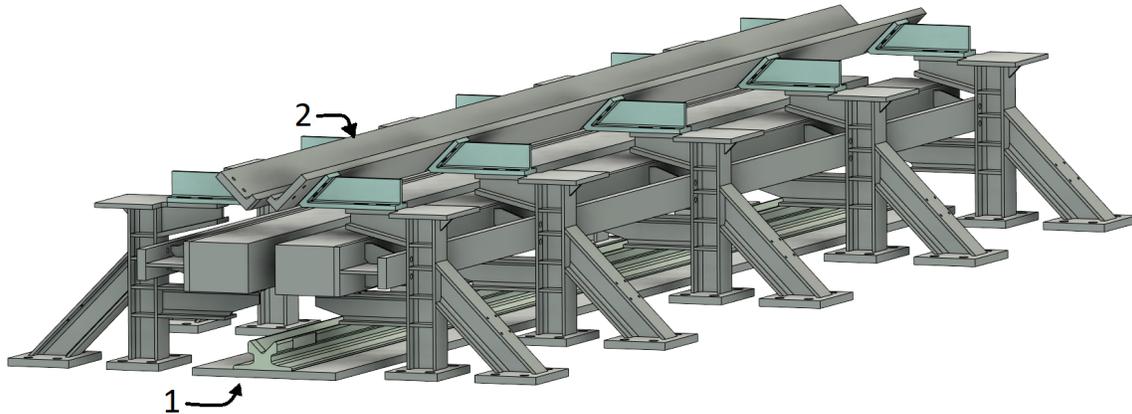


Figura 3.1: Parte fija (estructura soporte y guía) de la geometría inicial

Por consiguiente, en la Figura 3.2 se muestra la parte móvil de la geometría, que constituiría el vehículo, y que se encuentra formada a su vez por una plataforma vertical y un cuerpo cilíndrico. Estos cuerpos en su conjunto recibirán el nombre de *Pod*, y algunas de sus dimensiones características se muestran en la imagen, siendo las más importantes para el desarrollo del documento el diámetro (d_{pod}) y la longitud (L_c) del cuerpo cilíndrico, tomándose esta última como la longitud característica para el dimensionamiento del dominio computacional.

De esta forma, el vehículo se desplazaría de derecha a izquierda según las imágenes mostradas, con la plataforma vertical del pod deslizándose sobre la parte superior de la guía (la que tiene forma de *V*) y entre las dos vigas centrales de la estructura soporte, y con el cuerpo cilíndrico situado en la parte superior de dicha estructura (la que tiene forma de *W*), de acuerdo a como se muestra en la Figura 1.1.

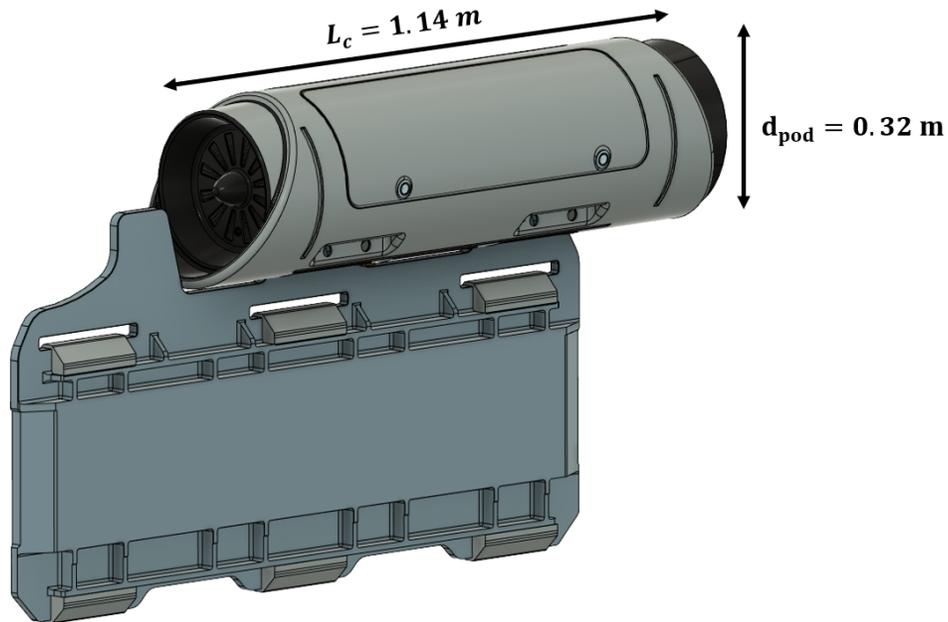


Figura 3.2: Parte móvil (pod) de la geometría inicial

Por otro lado, y como ya se comentó previamente, el movimiento relativo entre la parte móvil y la parte fija se modelará por medio de un sistema de referencia móvil (RMRF), puesto que imponer a la entrada del dominio computacional un cierto flujo de aire daría lugar a un comportamiento anormal, debido a las superficies normales que presenta la estructura soporte con la dirección de avance del vehículo (coincidente con el eje de su parte cilíndrica).

Sin embargo, es en este punto donde aparece la problemática mencionada, pues si en *STAR-CCM+* se pretende modelar un movimiento relativo de traslación (con rotaciones no existe dicha problemática) con sistemas de referencia móviles, pero existe alguna superficie normal al movimiento que debe permanecer fija, como es el caso en cuestión donde las superficies normales de la estructura soporte no presentan movimiento, el comportamiento obtenido contendrá anomalías y fenómenos espurios, pues a pesar de que se imponga explícitamente que esas superficies normales se mantengan fijas con respecto al sistema de referencia fijo en tierra (LRF), a efectos prácticos presentarán el mismo desplazamiento que el sistema de referencia con movimiento traslacional.

Esta limitación del código se advierte en la guía del propio software comercial ([3]), donde se advierte que si se emplean sistemas de referencias con movimiento lineal y hay superficies normales a dicho movimiento fijas, la solución obtenida podría contener características que no son reales, y fue efectivamente lo que se encontró al hacer simulaciones con dicha geometría.

En la Figura 3.3 se muestra la distribución de presión al emplear la geometría con superficies normales, y se puede apreciar justamente en la entrada del dominio un fenómeno claramente espurio. En la configuración del caso se impuso que la estructura soporte y la guía permanecieran fijas, y fuese el pod el que avanzase con el sistema de referencia móvil. Sin embargo,

el comportamiento obtenido es similar a un hipotético caso en el que las superficies normales de la estructura también avanzaran, y por tanto crearan esa región de sobrepresión que se aprecia en la entrada del dominio, al frenar el flujo contra ellas y crear puntos de remanso. O bien, el comportamiento también se podría asemejar a un caso en el que todas los cuerpos permanecieran fijos, y hubiera flujo soplando en la entrada del dominio a todas las superficies, lo cual no es la situación real que se pretende estudiar.

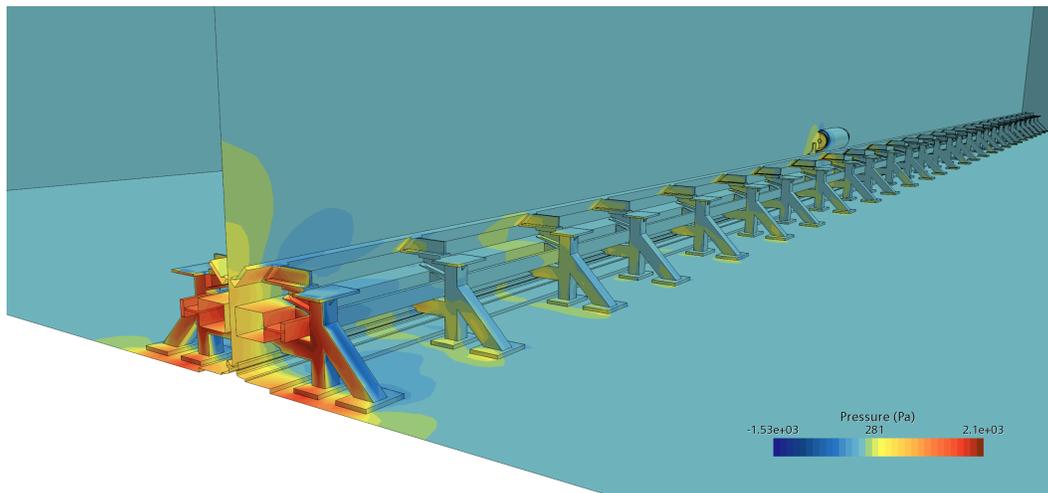


Figura 3.3: Distribución anormal de presión en simulaciones con la geometría inicial

A su vez, estas anomalías también se pueden encontrar en la distribución de velocidad (Figura 3.4), donde el flujo experimenta una aceleración en la parte interior de la estructura soporte que no debería ocurrir, y que tiene lugar como consecuencia de ese desplazamiento ficticio de las superficies normales, haciendo que a efectos prácticos el flujo se encuentre una sección convergente.

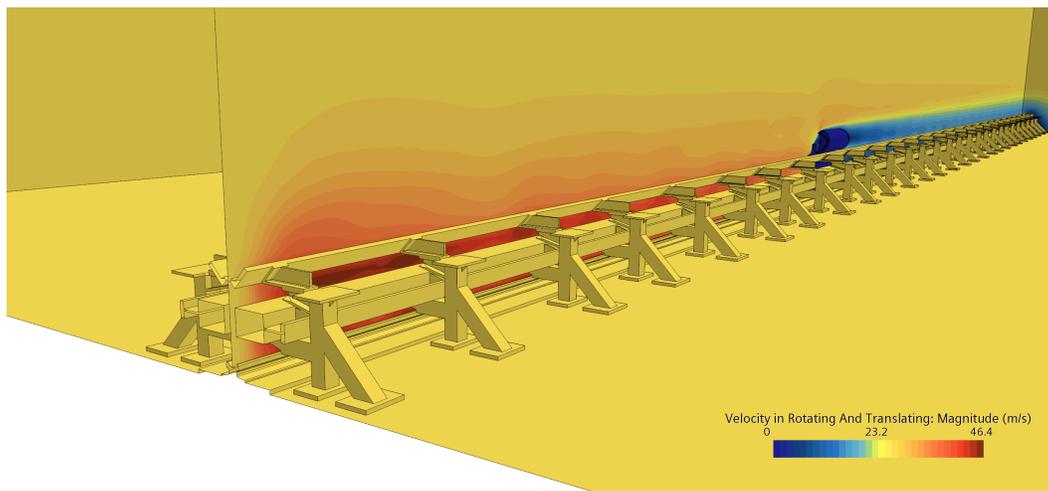


Figura 3.4: Distribución anormal de velocidad en simulaciones con la geometría inicial

En este punto fueron diversas las opciones que se barajaron para solventar el problema encontrado, siendo la más ideal emplear un mallado overset. Sin embargo, el inconveniente que traía consigo dicha alternativa era el elevado coste computacional, inabordable para los medios que se disponían. Por tanto, se decidió realizar dos versiones de la geometría inicial en las que el problema de las superficies normales no estuviera, y que representaran dos casos extremos de la situación real para que los resultados de interés se encontraran acotados entre el rango proporcionado por los resultados de ambos casos. Estos fueron los siguientes:

- **Caso 1: Geometría con la estructura soporte extruida.** En este caso, todas las superficies normales a la dirección del movimiento que debieran permanecer fijas se extruyeron desde el inicio hasta el final del dominio computacional, representando el caso en el que el avance del pod ofrecería la mayor resistencia al estar confinando y forzando el flujo más que en la geometría inicial. Una representación del mismo se muestra en la Figura 3.5:



Figura 3.5: Geometría del Caso 1: Estructura soporte extruida

- **Caso 2: Geometría con la estructura soporte tangente.** En este caso, todas las superficies normales se eliminaron, dejando solamente las que fueran tangentes al movimiento, de forma que sería el caso en el que el avance del pod ofrecería la menor resistencia al no forzar al flujo a pasar por zonas concretas de la estructura. Una representación del mismo se muestra en la Figura 3.6:



Figura 3.6: Geometría del Caso 2: Estructura soporte tangente

Con estas dos nuevas geometrías se habrían eliminado las superficies normales, a excepción de las de inicio y fin de la estructura soporte y guía, pero no supondrán ningún problema pues dichos cuerpos se extienden de principio a fin del dominio computacional. Por tanto, esas serán las geometrías objeto del análisis, y los resultados de la geometría real se esperan que se encuentren acotados entre los resultados de cada uno de los dos casos.

3.3.2. Limpieza de geometría

Como en todo proceso CFD en el que no se disponga de unos medios significativamente sofisticados, y donde se trabaje con geometrías complejas y pequeños elementos que puedan inducir un coste computacional desproporcionados a su relevancia en los resultados finales, la limpieza previa de la geometría constituye un paso crucial para poder realizar el estudio en el plazo fijado.

Es por ello por lo que antes de introducir la geometría en *STAR-CCM+*, se realizó un proceso de limpieza con un programa de CAD, concretamente *Autodesk Fusion 360*, para eliminar todos aquellos detalles que no iban a tener una relevancia importante en el estudio, y que iban a complicar de sobremanera el proceso de mallado y el coste computacional. A continuación se muestran algunas imágenes antes y después del proceso de limpieza, aplicado a la geometría inicial, es decir, antes de que se eliminaran las superficies normales de la estructura soporte que ocasionaban problemas.

En la Figura 3.7 se muestra el cambio experimentado en la estructura soporte. Como se puede apreciar, se han rellenado todos los pequeños agujeros que contenían las vigas, además de rellenarse estas por completo proporcionándole una forma mucho más compacta y sólida.

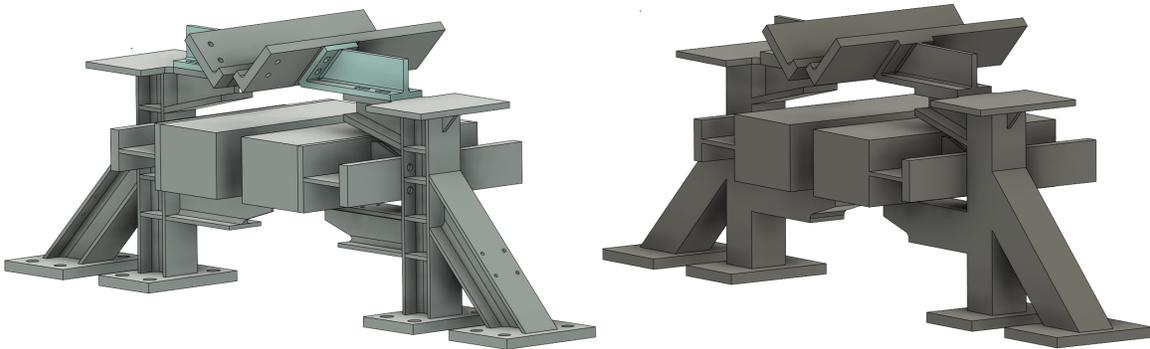


Figura 3.7: Proceso de limpieza aplicado a la estructura soporte

En segundo lugar, en la Figura 3.8 se puede apreciar el proceso de limpieza aplicado sobre el cuerpo cilíndrico del pod, donde se han rellenado todos los surcos y agujeros que presentaba la superficie lateral, y adicionalmente se ha incomunicado con el exterior al eliminar el compresor y tobera de los que disponía, sustituyéndolos por una superficie sin ningún tipo de orificio. La razón de ello reside en el incremento del coste computacional que supondría modelar también

el interior del cilindro, y en que no es el objetivo principal de este proyecto al no modificar de sobremanera el comportamiento global del vehículo.



Figura 3.8: Proceso de limpieza aplicado al cuerpo cilíndrico del pod

Finalmente, en la Figura 3.9 se muestra la limpieza efectuada sobre la plataforma vertical del pod, donde se ha seguido la misma tendencia que en los otros cuerpos; esto es, eliminar surcos y compactar más cada parte rellenándola por completo.

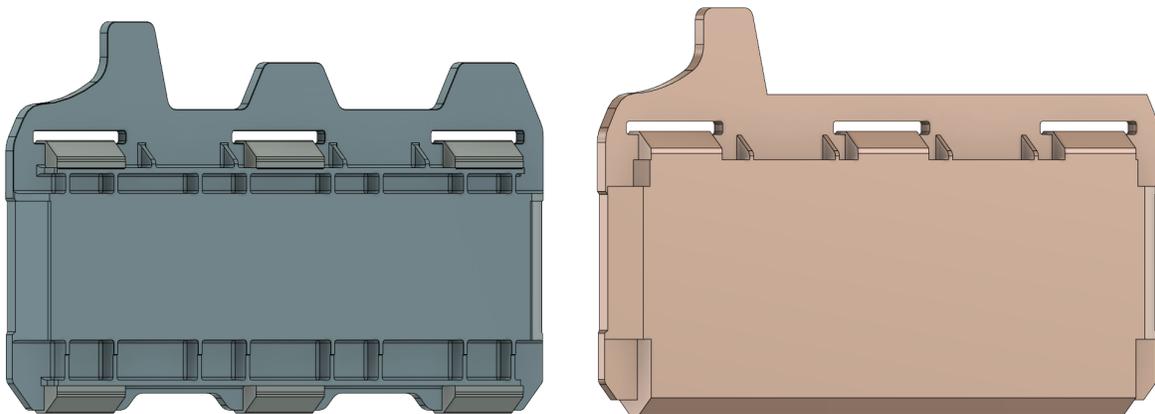


Figura 3.9: Proceso de limpieza aplicado a la plataforma vertical del pod

3.3.3. Independencia de dominio

Con el objetivo de optimizar el coste computacional en los casos base (**Caso 1** y **Caso 2**), se realizará un estudio de independencia de longitud de dominio, el cual, junto con la independencia de malla (3.4.2), permitirá reducir el número de elementos y, consecuentemente, el tiempo de cálculo.

Este estudio se realizará en el **Caso 1: Geometría con la estructura soporte extruida**, pues representa el caso en el que las condiciones serán más extremas al encontrarse el fluido mucho más confinado y forzado a circular por determinadas regiones de la estructura; en cambio, en el **Caso 2** la cantidad de material de estructura es notablemente menor, y el flujo dispone de mayor libertad y facilidad para restablecerse.

De tal forma, se parte de un dominio computacional lo suficientemente extenso como para que las condiciones impuestas en los límites del mismo no interfieran en el comportamiento del vehículo ([1]), que recibirá el nombre de VC1 (primer volumen de control), cuyas dimensiones se pueden ver en la Tabla 3.1 junto con las del resto de volumen de control simulados. Cabe mencionar que la longitud característica empleada es, como ya se comentó anteriormente, la longitud del cuerpo cilíndrico móvil, de valor $L_c = 1,14m$.

	Número de longitudes características (L_c) medidas desde el pod			
	Hacia los laterales	Por encima	Aguas arriba	Aguas abajo
VC1	8	8	8	20
VC2	7	7	7	18
VC3	6	6	6	16
VC4	5	5	5	15
VC5	5	5	5	14

Tabla 3.1: Extensión de cada volumen de control

Como se puede apreciar en la Tabla 3.1, en cada reducción del volumen de control se acorta una longitud característica por los laterales, por encima y aguas arriba, mientras que aguas abajo se reducen dos; sin embargo, posteriormente al VC4 la reducción es más paulatina y equiparada en todas direcciones. Así, el proceso se irá repitiendo hasta que la solución quede comprometida, esto es, hasta que algunas de las variables que serán monitorizadas, y que se presentarán a continuación, presente una variación superior a cierto factor de seguridad fijado en un 5%. Adicionalmente, en cada caso se cuantificará también el número de elementos de la malla para evidenciar la utilidad del proceso.

En cuanto a los variables monitorizadas para evaluar cuándo el proceso ha comprometido lo suficiente la solución, son las siguientes:

- **Drag:** Resistencia al avance ofrecida por el vehículo, tanto por el cuerpo cilíndrico como por la plataforma vertical.
- **Presión media:** Presión media del flujo ponderada con el gasto, en una sección circular

de radio igual a la longitud característica $L_c = 1,14m$, y situada en la parte anterior y posterior del vehículo. Dicha sección se muestra en la Figura 3.10, donde se ha ocultado la representación de la estructura soporte para no sobrecargar la imagen; cabe mencionar que la superficie anterior sería exactamente la misma, pero situada en la parte delantera del vehículo.

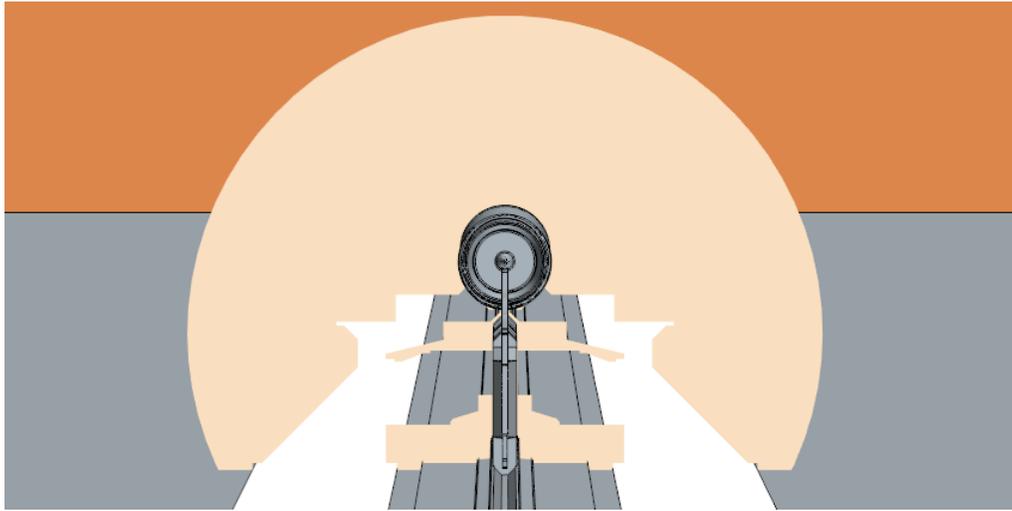


Figura 3.10: Sección anterior para el cálculo de la presión media

- **Velocidad media:** Velocidad media del flujo ponderada con el gasto, en la misma sección que la mostrada en la Figura 3.10, tanto en la parte delantera como trasera, y adicionalmente en la mitad de la extensión del vehículo.
- **Gasto de aire:** Gasto de aire que atraviesa dos determinadas secciones, representadas en la Figura 3.11, y que constituyen la parte inferior del pod y confinada dentro de la estructura soporte extruida, y la parte superior del pod.

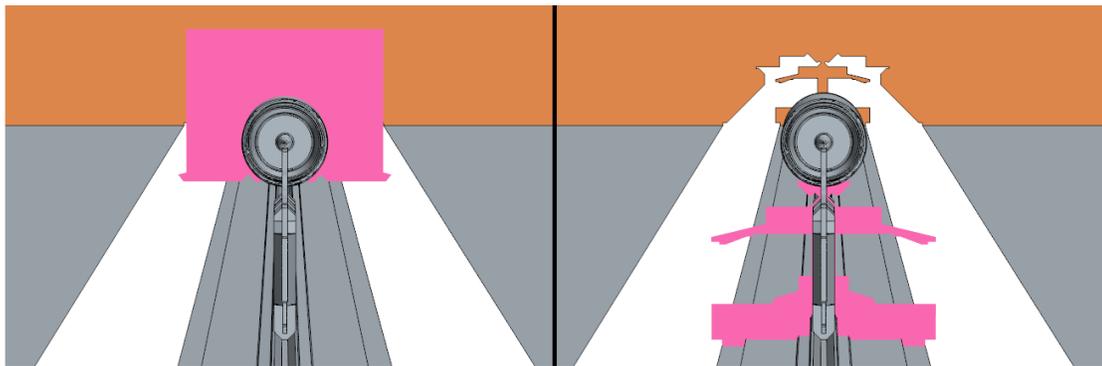


Figura 3.11: Sección inferior y superior en las que se ha calculado el gasto

- **Presión local:** Presión en un punto situado en la parte anterior del vehículo y en la parte posterior del mismo.

Finalmente, se muestra a continuación en la Tabla 3.2 el valor de las variables monitorizadas en cada uno de los dominios simulados, junto con su variación porcentual respecto a la extensión inicial (la del **VC1**). Como se puede apreciar, en el volumen de control **VC5** el gasto que atraviesa la sección inferior de la Figura 3.11 derecha presenta una variación de más del 5 % respecto a la inicial, por lo que se considerará que esa extensión de dominio compromete en exceso la solución al sobrepasar los límites impuestos, y la extensión que se escogerá como definitiva para los cálculos posteriores será la del volumen de control **VC4**.

	VC1	VC2	VC3	VC4	VC5
Elementos [-]	3092184 (-)	2668732 (-13.6943 %)	2384305 (-22.8925 %)	2183251 (-29.3945 %)	2130160 (-31.1114 %)
Drag [N]	29.0025 (-)	28.6911 (-1.0736 %)	28.9054 (-0.3347 %)	28.7249 (-0.9571 %)	29.2019 (0.6879 %)
Presión Media Anterior [Pa]	101335.4643 (-)	101335.6602 (0.0002 %)	101335.8914 (0.0004 %)	101335.7754 (0.0003 %)	101335.3830 (-0.0000 %)
Presión Media Posterior [Pa]	101312.0907 (-)	101310.8598 (-0.0012 %)	101312.3660 (0.0003 %)	101312.1247 (0.0001 %)	101311.3957 (-0.0006 %)
Velocidad Media Anterior [m/s]	26.1543 (-)	26.1540 (-0.0011 %)	26.1565 (0.0083 %)	26.1639 (0.0369 %)	26.1791 (0.0950 %)
Velocidad Media Mitad [m/s]	26.9588 (-)	26.9577 (-0.0041 %)	26.9705 (0.0434 %)	26.9793 (0.0762 %)	26.9732 (0.0533 %)
Velocidad Media Posterior [m/s]	26.5716 (-)	26.6091 (0.1412 %)	26.5724 (0.0032 %)	26.5854 (0.0522 %)	26.6017 (0.1136 %)
Gasto Inferior [kg/s]	6.5076 (-)	6.5195 (0.1830 %)	6.5477 (0.6157 %)	6.5219 (0.2203 %)	6.5172 (0.1489 %)
Gasto Superior [kg/s]	11.3388 (-)	11.1284 (-1.8556 %)	10.9641 (-3.3050 %)	10.8001 (-4.7512 %)	10.7434 (-5.2508 %)
Presión Local Anterior [Pa]	101267.8827 (-)	101262.7597 (-0.0051 %)	101277.5145 (0.0095 %)	101272.2003 (0.0042 %)	101251.4039 (-0.0162 %)
Presión Local Posterior [Pa]	101290.1435 (-)	101290.2666 (0.0001 %)	101287.7482 (-0.0024 %)	101288.8385 (-0.0012 %)	101289.2878 (-0.0008 %)

Tabla 3.2: Variación de las variables monitorizadas en el estudio de sensibilidad de dominio

Cabe mencionar que el estudio de sensibilidad de dominio se llevó a cabo de forma posterior al de independencia de malla, pero resultaba adecuado presentarlo en esta sección junto con la geometría y el dominio computacional, y es interesante remarcar como este estudio ha conseguido reducir el número de elementos en casi un 30 %, más concretamente un 29.3945 %, pasando de 3092184 elementos a 2183251, lo cual otorgará una disminución significativa en el tiempo de cálculo del resto de casos.

3.4. Mallado

Una vez definida la geometría y realizado el estudio de sensibilidad de dominio computacional, se llevará a cabo el proceso de discretización espacial; esto es, el mallado. Dicho proceso estará constituido por dos partes diferenciadas: en primer lugar, se definirá la estrategia de mallado acorde al problema y, por último, se realizará un estudio de independencia de malla para que dicha discretización suponga el menor coste computacional posible, pero siempre y cuando los resultados no se comprometan en exceso, tal y como se hizo con la sensibilidad de dominio.

3.4.1. Descripción de la estrategia de mallado

En primer lugar, cabe mencionar que el proceso de mallado se elaboró a partir del **Caso 1**, pues era el que presentaba más complejidad en la estructura soporte, y posteriormente se aplicó por igual al **Caso 2**.

Con respecto a la estrategia de mallado, puesto que la estructura soporte presenta una geometría sencilla y sin prácticamente superficies curvas, se empleará una malla estructurada tridimensional constituida por hexaedros, esto es, se partirá de una *Trimmed Cell Mesher*.

Esto podría entrar en contraposición con la complejidad geométrica de la parte móvil, pero para el presente proyecto se decidió probar con dicho tipo de malla y así poder presenciar en primera persona sus limitaciones. No obstante, la decisión también se vio impulsada por las numerosas ventajas que presenta una malla estructurada frente a una discretización desestructurada, pues se caracteriza por tener conectividad regular entre celdas, lo que permite que los elementos se encuentren alineados entre ellos y en la dirección del flujo, dando lugar a una mejoría en la convergencia y precisión de los resultados, además de reducir el tiempo de cálculo al no necesitar el software una tabla de conectividad para enlazar los elementos.

En la Figura 3.12 se muestra una visión global del mallado, el cual se encuentra constituido por un control volumétrico y cuatro controles superficiales que se detallarán a continuación. Además, cabe mencionar que los valores numéricos de los parámetros que se facilitarán se corresponden con los de la malla resultante del proceso de independencia de malla, y que la elección de algunos de estos parámetros que pueda resultar inadecuada o extraña se justificará al final de esta sección.

Las opciones seleccionadas a la hora de realizar el proceso de mallado fueron *Automated Mesh*, la cual generará de forma automática la discretización espacial óptima del dominio tridimensional, *Surface Remesher*, para incrementar la calidad general de la superficie existente y optimizarla para el mallado volumétrico posterior, y *Prism Layer Mesher*, para captar los detalles del flujo en la capa límite.

Comenzando con el mallado general del dominio, los parámetros asignados al mismo son los que se muestran en la Tabla 3.3:

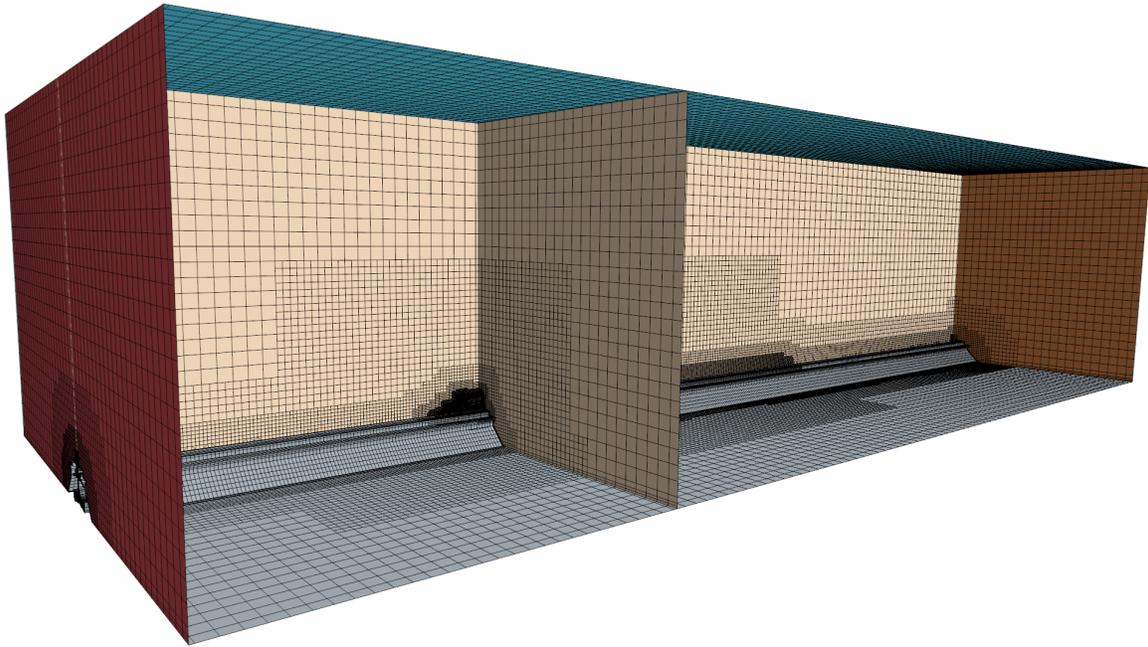


Figura 3.12: Vista global del mallado

Base Size	0.25 m
Minimum Surface Size	5 % Relative to base (0.0125 m Absolute)
Surface Curvature	Pts per circle: 36.0
Surface Growth Rate	1.15
Number of Prism Layers	2
Prism Layer Stretching	1.15
Prism Layer Total Thickness	0.085 m
Volume Growth Rate	Default Growth Rate: Slow
	Surface Growth Rate: Slow

Tabla 3.3: Parámetros del mallado general del dominio

Entrando con los controles específicos de mallado, se creó un bloque que encerraba al vehículo y cuyas dimensiones eran el 50 % de la extensión del dominio, medido desde el pod, en cada una de las direcciones, aplicándose en su interior un control volumétrico con un tamaño base correspondiente también al 50 % del tamaño base reflejado en la Tabla 3.3, lo cual se correspondería con un tamaño de elemento de 0.25 m.

El primero de los controles superficiales se destinó a eliminar las capas prismáticas de los límites del dominio computacional en los que no existe superficie física, tales como en plano de entrada (*Inlet*), los planos laterales, el plano superior y el plano de salida (*Outlet*). Posteriormente, otro control superficial se aplicó a las superficies de la estructura soporte y de la guía, con el objetivo de refinar dichas superficies respecto del grosero mallado de los controles generales, así como crear una *Prism Layer* adecuada y adaptada a los objetivos

sobre la estructura. Los valores de los parámetros de dicho control superficial se muestran en la Tabla 3.4:

Target Surface Size	25 % Relative to base (0.0625 m Absolute)
Number of Prism Layers	5
Prism Layer Total Thickness	0.035 m
Minimum Surface Size	25 % Relative to base (0.0625 m Absolute)
Surface Growth Rate	1.1

Tabla 3.4: Parámetros del control superficial sobre la estructura soporte y la guía

Una visión ampliada sobre el mallado en la estructura se muestra en la Figura 3.13:

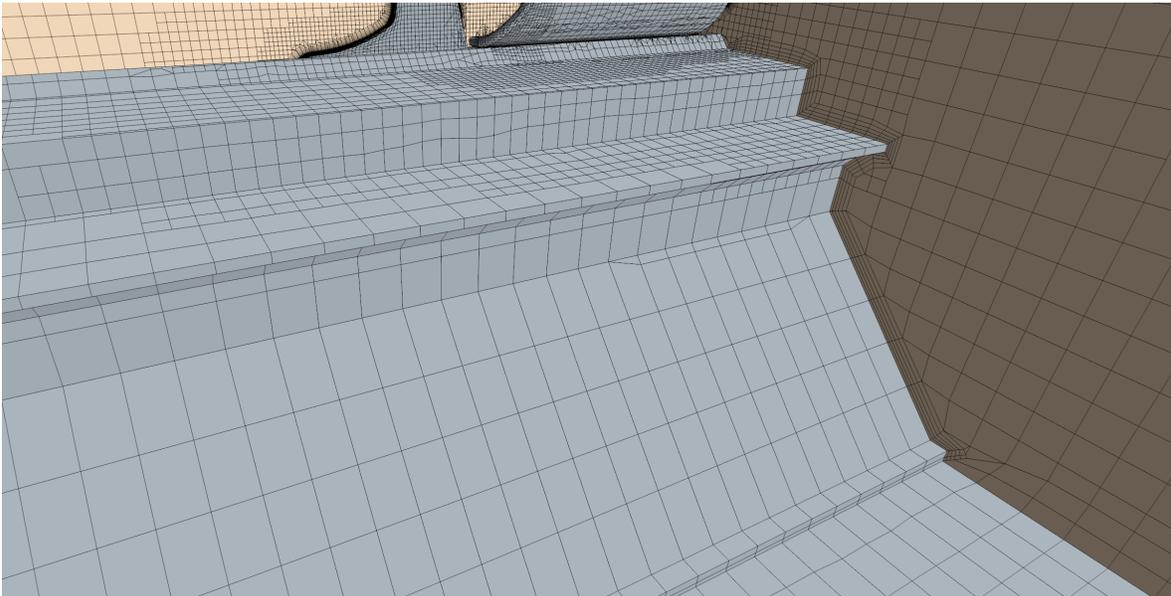


Figura 3.13: Vista ampliada del control superficial de mallado sobre la estructura

Y ya por último quedaría los dos controles superficiales realizados sobre el propio pod, uno menos refinado en aquellas regiones que no presentan elevadas curvaturas ni características geométricas complejas, y otro más elaborado y minucioso en las superficies que lo requieren. De tal forma, estos dos controles superficiales se realizaron con el objetivo de refinar y captar adecuadamente las regiones de mayores gradientes sin necesidad de incrementar el número de elementos en todo el dominio, así como crear una *Prism Layer* adecuada y adaptada a los objetivos sobre el vehículo.

Los valores de ambos controles se muestran en la Tabla 3.5 para las superficies del pod menos complejas, y en la Tabla 3.6 el de las superficies más críticas, como los labios del cuerpo cilíndrico, el cono del supuesto compresor, los bordes de la plataforma vertical... entre otras.

Target Surface Size	6.25 % Relative to base (0.0156 m Absolute)
Number of Prism Layers	28
Prism Layer Total Thickness	0.025 m
Minimum Surface Size	6.25 % Relative to base (0.0156 m Absolute)
Surface Curvature	Pts per circle: 180.0
Surface Growth Rate	1.05

Tabla 3.5: Parámetros del control superficial sobre las superficies del pod menos complejas

Target Surface Size	3.125 % Relative to base (0.0078 m Absolute)
Number of Prism Layers	28
Prism Layer Total Thickness	0.025 m Absolute
Minimum Surface Size	3.125 % Relative to base (0.0078 m Absolute)
Surface Curvature	Pts per circle: 180.0
Surface Growth Rate	1.05

Tabla 3.6: Parámetros del control superficial sobre las superficies del pod más críticas

Imágenes del mallado sobre el pod, así como de la capa prismática, se pueden ver en las Figuras 3.14 y 3.15. Cabe resaltar que en aquellas regiones donde aparecen elementos con un tamaño muy pequeño o desproporcionado al de los elementos contiguos, es debido al plano de representación que corta en una esquina de dichos elementos, no teniendo lugar un cambio tan abrupto de tamaño entre unos elementos y otros como aparentemente se aprecia.

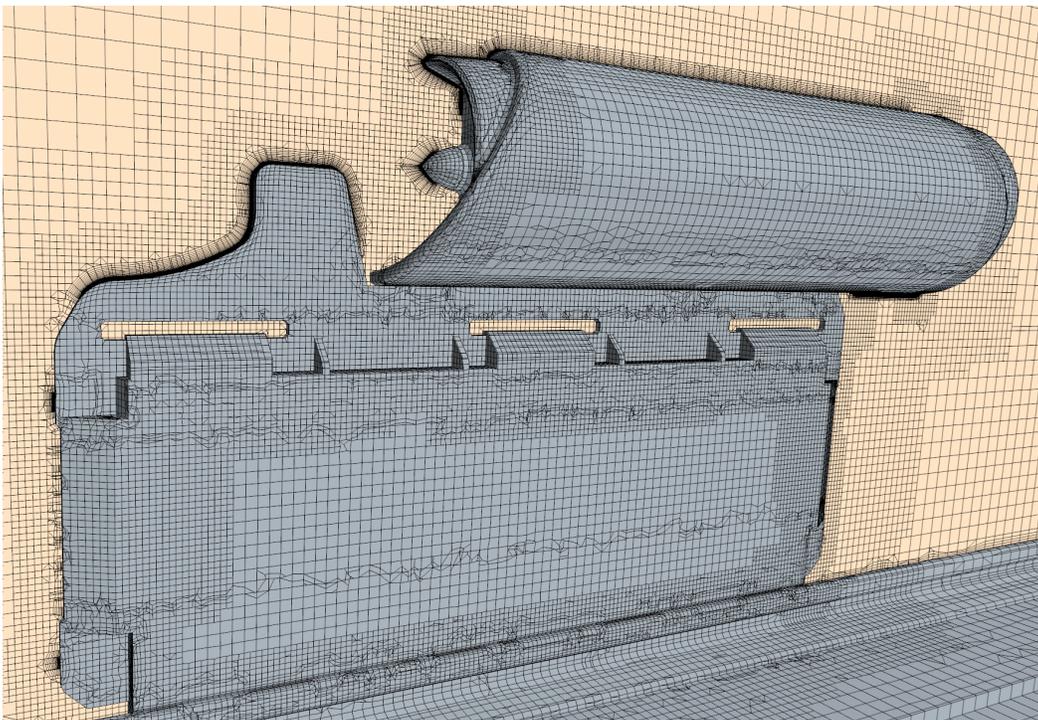


Figura 3.14: Vista ampliada del control superficial de mallado sobre el pod completo

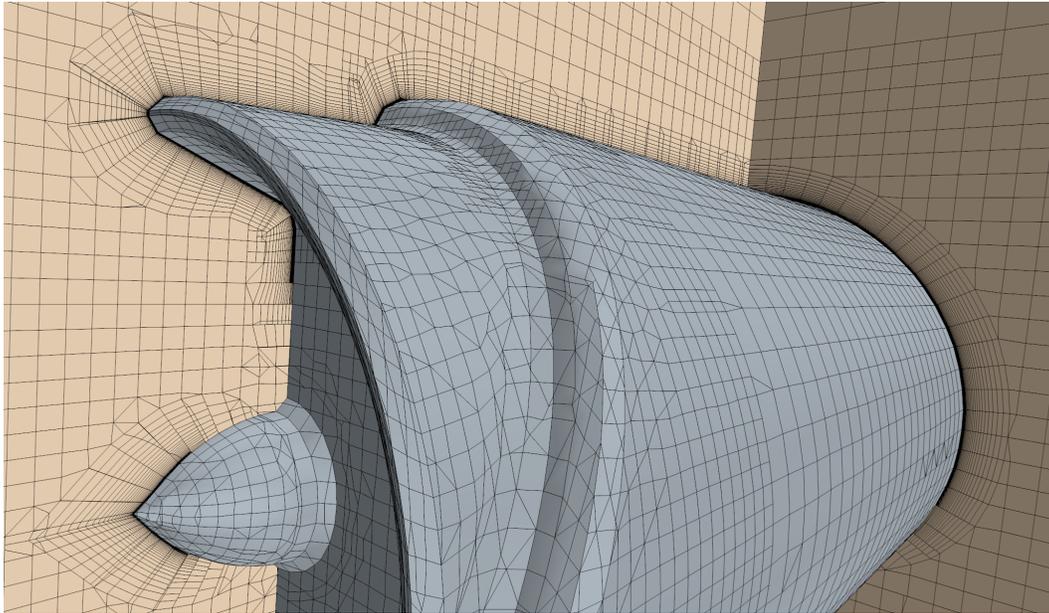


Figura 3.15: Vista ampliada del control superficial de mallado sobre el cuerpo cilíndrico, y capa prismática

Por último, también se realizó un refinamiento en la estela turbulenta, asignándole un tamaño de elemento del 12.5% el tamaño base, y extendiéndose aguas abajo un 50% de la extensión del dominio existente entre el final del pod y el límite del mismo. Una representación del refinamiento de la estela se puede ver en la Figura 3.16:

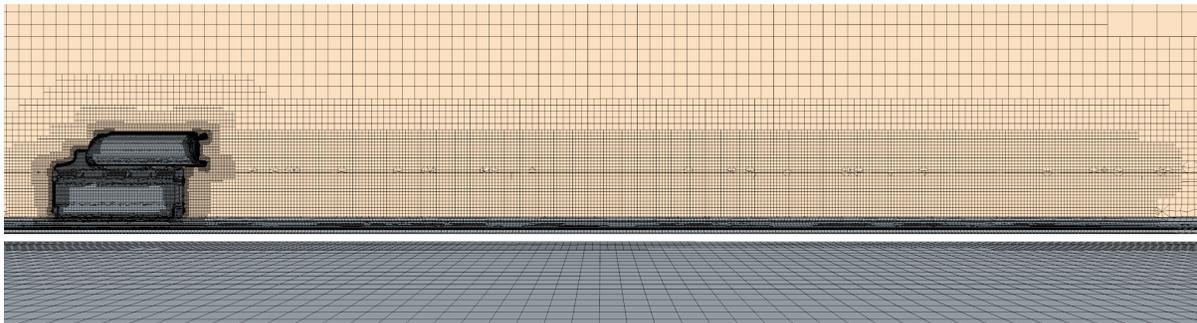


Figura 3.16: Refinamiento en el mallado para la estela turbulenta

Cabe mencionar respecto a la configuración general que el hecho de poner una capa prismática tan gruesa y un número de capas tan reducido (solamente 2) en el suelo, reside en la abrupta transición que aparecería entre la capa prismática y la celda contigua del core en el primer mallado, si se configurase una capa prismática muy fina con celdas de espesor muy pequeño, pues a pesar de que en la región del suelo cercana al pod si se tengan elementos del core pequeños, bien por el refinamiento volumétrico o superficial, y la transición en el primer mallado no sea tan abrupta, si se pusiera el foco de atención en la parte del suelo cercana a

los límites del dominio se apreciaría un cambio excesivamente radical (se obtenía en archivos antiguos del mallado). Esta estrategia, además de no ser rigurosamente muy adecuada, interfiere también con el mallado de la estructura soporte donde la capa prismática es mucho más delgada y no se cuenta con 2 capas, sino con 5, por lo que la transición entre capas prismáticas entre suelo y estructura no está en absoluto optimizada, sino todo lo contrario, pues se pasa de una capa prismática en el suelo muy gruesa con solo 2 capas a una en la estructura fina con 5 capas.

Sin embargo, el hecho de mantener dicha estrategia se justifica bajo una solución de compromiso en un escenario académico, en el que se pretende realizar una sensibilidad de malla y por tanto no sería coherente partir de un mallado muy fino y con un coste elevado, además de que los medios disponibles son limitados. Por tanto, teniendo en mente en todo momento que no es el mallado más adecuado y óptimo, que con más disponibilidad de medios se podría haber mejorado de sobremanera y más si nos encontrásemos en otro ámbito que no fuera el académico (por ejemplo un control mucho más preciso en la transición y con una primera malla más fina, que permitiese hacer capas prismáticas más delgadas y con mayor número de capas, sin importar tanto el coste computacional), y que por todo ello se está perdiendo precisión, se establece como aceptable este mallado de *compromiso* al que se ha llegado teniendo en cuenta numerosas limitaciones.

Para cerrar la sección, es menester hacer alusión a que los valores asignados a los parámetros de la capa prismática no ha sido fruto de la aleatoriedad, sino que se ha buscado en la medida de lo posible que el Y^+ se mantuviera fuera del rango $[5,30]$, puesto que de esta forma el software será capaz de resolver la capa límite de forma adecuada al encontrarse en unos valores fuera de la capa buffer, donde no existe expresión analítica que permita modelar la capa límite. En la Figura 3.17 se muestran las regiones del pod en las que no ha sido posible conseguir un valor fuera del rango mencionado, pero que representa una parte mínima del conjunto total del vehículo.

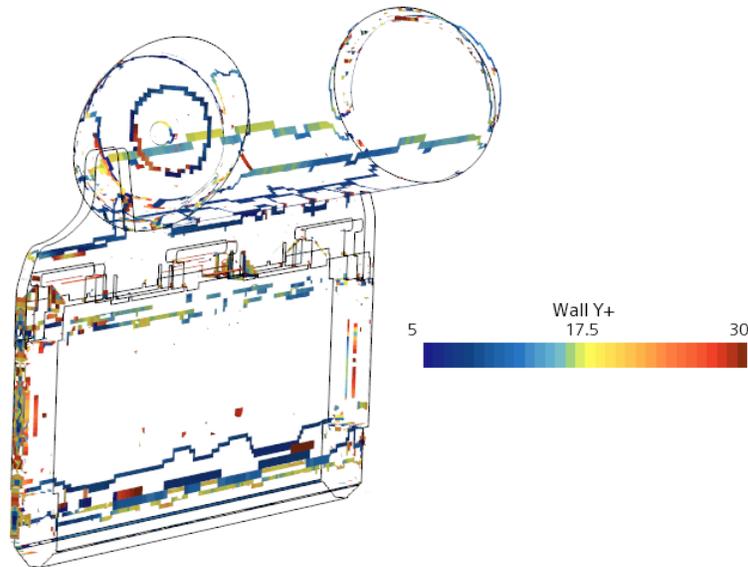


Figura 3.17: Región del pod que presenta un valor de Y^+ correspondiente a la capa Buffer

3.4.2. Estudio de independencia de malla

Una vez descrita la estrategia de mallado, resulta conveniente optimizar el tiempo de simulación, para lo cual resultará indispensable realizar un estudio de independencia de malla, en el que se deberá alcanzar un compromiso entre el error numérico por discretización espacial y el coste computacional requerido.

	Malla 1	Malla 2	Malla 3
Elementos	893726	3092184	10461280
Drag [N]	30.9326 (-)	29.0024 (-6.2398 %)	28.2597 (-2.5607 %)
Presión Media Anterior [Pa]	101335.9173 (-)	101335.4642 (-0.0004 %)	101335.2421 (-0.0002 %)
Presión Media Posterior [Pa]	101312.3021 (-)	101312.0906 (-0.0002 %)	101309.8124 (-0.0022 %)
Velocidad Media Anterior [m/s]	26.1408 (-)	26.1543 (0.0515 %)	26.1606 (0.0243 %)
Velocidad Media Mitad [m/s]	26.9626 (-)	26.9588 (-0.0141 %)	26.9508 (-0.0294 %)
Velocidad Media Posterior [m/s]	26.5342 (-)	26.5715 (0.1406 %)	26.6339 (0.2346 %)
Gasto Inferior [kg/s]	6.4777 (-)	6.5076 (0.4603 %)	6.4783 (-0.4499 %)
Gasto Superior [kg/s]	11.2173 (-)	11.3388 (1.0836 %)	11.1643 (-1.5387 %)
Presión Local Anterior [Pa]	101278.4436 (-)	101267.8826 (-0.0104 %)	101249.4096 (-0.0182 %)
Presión Local Posterior [Pa]	101297.7015 (-)	101290.1434 (-0.0074 %)	101278.2022 (-0.0117 %)

Tabla 3.7: Valores de las variables monitorizadas durante la independencia de malla

De tal forma, la manera de proceder será la siguiente: se partirá de una malla gruesa (Malla 1) y se irá reduciendo el tamaño base (Base size) hasta que la variación de las variables monitorizadas, que serán las mismas que las del estudio de sensibilidad de dominio, se encuentren en un rango de porcentaje en el que se considerará que el incremento del coste computacional asociado es superior al incremento de precisión obtenido. Este límite se fijará cuando la variación caiga por debajo de un 3%, y además, en cada iteración se deberá aumentar en un 50% el número de elementos en cada dirección ([1]), por lo que al tratarse de un problema tridimensional (3D), el número de elementos deberá aumentarse con un factor de 3.375.

En la Tabla 3.7 se muestran los valores de las variables durante el proceso de independencia de malla, donde se puede apreciar como en la Malla 3 no hay ninguna variable que sufra un cambio superior al 3%, por lo que se concluirá que la malla resultante del proceso en cuestión es la Malla 2.

3.5. Configuración de los casos base

3.5.1. Propiedades del fluido y modelos físicos

Los casos base (**Caso 1** y **Caso 2**) se realizarán con la geometría descrita en la Sección 3.3, junto con los siguientes valores de referencia correspondientes al aire a nivel del mar:

- Velocidad de referencia del vehículo, $u_{ref} = 26,5 \text{ m/s}$ ($95,4 \text{ km/h}$)
- Presión de referencia, $p_{ref} = 101325 \text{ Pa}$
- Densidad del aire, $\rho_{ref} = 1,225 \text{ kg/m}^3$
- Viscosidad dinámica del aire, $\mu_{ref} = 1,789 \cdot 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Con respecto a los modelos físicos seleccionados para la configuración de los casos base, se distinguen:

- **Space:** *Three Dimensional*. Se estudia un caso tridimensional, que de ninguna manera se podría reducir a un caso bidimensional (la geometría debe contemplar la profundidad; esto es, la distancia en eje Y ente los obstáculos y el pod).
- **Time:** *Implicit Unsteady*. Se estudia un caso no estacionario ya que en las simulaciones previas con configuración estacionaria se apreciaron fuertes oscilaciones en las variables monitorizadas provenientes de fenómenos no estacionarios; por tanto, se configurará como un caso transitorio al ser lo más adecuado. Además, otra justificación para la geometría real sería la posición de los obstáculos, ya que dependiendo del instante temporal las vigas se encontrarán en una posición diferentes respecto del obstáculo
- **Material:** *Gas*.
- **Flow:** *Segregated Flow*. Debido al reducido número de Mach en el que va a operar el vehículo.
- **Equation of State:** *Constant Density*. Las reducidas velocidades del problema permiten asumir perfectamente que la densidad permanece constante.
- **Viscous Regime:** *Turbulent*. El problema está caracterizado por fenómenos claramente turbulentos.

- **Reynolds-Averaged Turbulence: *K-Omega SST*.** Puesto que combina aspectos de dos modelos de turbulencia, el modelo $k - \epsilon$ y el modelo $k - \omega$, presentando la ventaja de que la variante en cuestión fue desarrollada para superar ciertas limitaciones presentes en cada uno de estos modelos.
- **K-Omega Wall Treatment: *All Y+ Treatment*.** A pesar de que se ha intentado alcanzar un $Y+$ por debajo de 5 en el pod, es conveniente emplear un tratamiento de pared que pueda modelar el comportamiento de la capa límite para $Y+$ superiores a 30 y, consecuentemente, pertenecientes a la capa exterior (outer layer).

3.5.2. Condiciones de contorno

En primer lugar, es importante remarcar de nuevo que el movimiento relativo entre el pod y la estructura soporte se ha modelado por medio de un sistema de referencia móvil, al cual se ha ligado la región del dominio computacional y las superficies del vehículo.

De tal forma, las condiciones de contorno impuestas en las fronteras del dominio computacional, así como en las superficies de los diferentes cuerpos, son las siguientes:

- **Entrada del dominio: *Velocity Inlet*.** Condición especificada con respecto al sistema de referencia móvil (RMRF), con un valor de velocidad realtiva de u_{ref} .
- **Límites laterales del dominio: *Symmetry Plane*.**
- **Límite superior del dominio: *Symmetry Plane*.**
- **Suelo: *Wall*.** Pared fija al sistema de referencia fijo en tierra (LRF), y por tanto sin movimiento.
- **Salida del dominio: *Pressure Outlet*.** Se impone la presión en la salida del dominio, y de valor p_{ref} .
- **Superficies de la estructura soporte: *Wall*.** Pared fija al sistema de referencia fijo en tierra (LRF), y por tanto sin movimiento.
- **Superficies de la guía: *Wall*.** Pared fija al sistema de referencia fijo en tierra (LRF), y por tanto sin movimiento.
- **Superficies del pod: *Wall*.** Pared fija al sistema de referencia móvil (RMRF), y por tanto con el mismo desplazamiento que dicho sistema; esto es, desplazamiento con velocidad u_{ref} de derecha a izquierda del dominio.

3.5.3. Esquemas y algoritmos numéricos

Finalmente, con respecto a la discretización del término temporal de las ecuaciones vistas en la Sección 2, se empleará un esquema implícito de segundo orden, según se muestra en la Ecuación 3.1:

$$\frac{3\phi^{n+1} - 4\phi^n + \phi^{n-1}}{2\Delta t} = f(\phi) \quad (3.1)$$

Siendo ϕ una magnitud escalar cualquiera cuyo valor necesitará ser conocido en el instante actual de cálculo, en el anterior y en el posterior. Además, la resolución resultará ser iterativa por medio de subiteraciones (*inner iterations*) hasta que se alcance la convergencia en cada uno de los instantes temporales.

El número de iteraciones internas se fijó en 10, por ser un valor razonable y que daba lugar a una convergencia adecuada en cada instante, y en cuanto al paso temporal, este fue calculado por medio del número de Strouhal dado por la expresión de la Ecuación 3.2, donde f_c denotaría la frecuencia característica del problema, D una longitud característica (en este caso el diámetro del cuerpo cilíndrico), y u_{ref} la velocidad del cuerpo.

$$St = \frac{f_c D}{u_{ref}} \quad (3.2)$$

De tal forma, y de acuerdo a la Figura 3.18 donde se muestra el número de Strouhal (St) en función de la relación de aspecto del cilindro, y para un número de Reynolds muy cercano al del presente estudio, para una relación L/D se obtendría aproximadamente un $St \approx 0,15$.

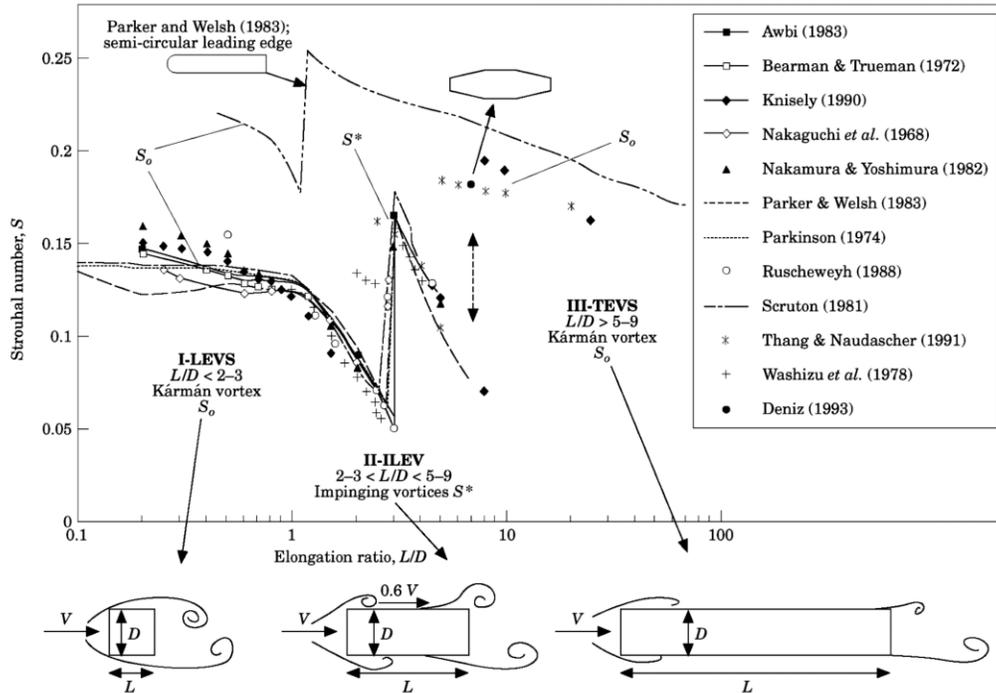


Figura 3.18: Numero de Strouhal en flujo axial en función de su relación de aspecto ([2])

Si bien es cierto que la geometría en estudio no se corresponde exactamente con un único cuerpo cilíndrico, pues también contiene una placa vertical delgada, se asumirá válido este número de Strouhal como punto de partida, pues en otras diversas fuentes como [5], [6], [7] o [8], para un rango de número de Reynolds similar y una relación de aspecto igual a la del cuerpo cilíndrico en estudio, todos convergen a unos valores de St muy similares a 0.15.

Por tanto, asumiendo válido un Strouhal de $St \approx 0,15$, a partir de su propia definición (Ecuación 3.2) se puede calcular una frecuencia característica de $f_c \approx 12,4219 \text{ Hz}$, que por medio de la Ecuación 3.3 permite obtener finalmente el paso temporal, donde se ha discretizado cada onda con 20 puntos por periodo:

$$\Delta t = \frac{1}{f_c \cdot 20} \Rightarrow \Delta t \approx 0,004 \text{ s} \quad (3.3)$$

3.6. Criterios de convergencia

Para cerrar la sección, se presentan a continuación los criterios que se han seguido en cada uno de los casos para poder darlos por convergidos:

- **Monitorización de los residuales.** Este criterio se ha relajado considerablemente al no presentar un valor reducido los residuales, dando por válidos valores del orden de 10^{-4} para las ecuaciones de momento, 10^{-3} para la de continuidad, y 10^{-5} para la TKE.
- **Cumplimiento global de las ecuaciones de conservación.** Se ha asegurado que se cumpla de forma global en todo el dominio la ecuación de continuidad y la de la cantidad de movimiento en dirección X; la de la cantidad de movimiento en dirección Y y en Z no se ha calculado por ser despreciables en este caso. Además, para la de la cantidad de movimiento en dirección X no se ha incorporado el término de acumulación en primera instancia, y tras observar el porcentaje de cumplimiento se ha podido asegurar que en el caso de que existiera ese término, sería completamente despreciable, pero el hecho de no incorporarlo no es por desconocimiento, pues se ha sido consciente de que a pesar de ser un caso incompresible, en la conservación de la cantidad de movimiento de un caso transitorio ese término no tiene por qué ser nulo (al contrario de lo que ocurre en el caso de la continuidad en un caso incompresible, donde sí que es nulo el término acumulativo por bien que sea transitorio el caso). Para dar por satisfecho este criterio se ha fijado un máximo de variación del 1 %.
- **Monitorización y estudio de la tasa de variación de las variables relevantes.** Se analiza el error entre una media móvil de periodo corto (0.2 s, equivalente a 50 muestras temporales) y una media móvil con un periodo cuya extensión es el doble (0.4 s, equivalente a 100 muestras temporales), hasta que permanezca por debajo del 2.5 %.
- **Visualización de detalles del flujo e identificación de fenómenos espurios.** Se busca algún fenómeno antinatural que pueda presentar la solución, y por tanto que la invalide a pesar de que satisfaga el resto de criterios.

Capítulo 4

RESULTADOS

Índice

4.1	Introducción	35
4.2	Análisis de la resistencia al avance y la potencia requerida	36
4.2.1	Resistencia al avance	36
4.2.2	Coefficiente adimensional de resistencia	38
4.2.3	Potencia requerida	39
4.3	Campo de presión y de velocidad	41
4.3.1	Contornos de presión	41
4.3.2	Contornos de velocidad	42
4.4	Distribución de presión sobre el vehículo	43

4.1. Introducción

En el presente capítulo se llevará a cabo la última etapa de un proceso CFD completo, esto es, el postprocesado, en el que se realizará el tratamiento y análisis de los resultados obtenidos en las simulaciones.

De tal forma, en primer lugar se estudiará la resistencia aerodinámica que ofrece el vehículo para diferentes velocidades de desplazamiento, que en vista del perfil de su misión (Figura 1.2) se han seleccionado los valores de 15, 20, 26.5 y 30 m/s . Cabe destacar que el ultimo valor de los analizados queda fuera de los que presenta el planteamiento inicial de la misión, pero se ha estudiado por la posibilidad de que se redefina el perfil de velocidades, no habiéndose simulado valores superiores por ser inadecuados para una longitud de pista de 80 m, pues las aceleraciones y deceleraciones serían significantes para un transporte de carga de estas características.

Además, se calculará el coeficiente adimensional de resistencia y la potencia que requerirá el vehículo, todo ello también para los cuatro valores de velocidad y para las dos geometrías (**Caso**

1 y **Caso 2**), permitiendo dar una estimación de todos esos parámetros para la geometría real del caso, pero acompañada de un margen de incertidumbre que se corresponderá con los límites impuestos por cada uno de los casos.

Posteriormente, se analizarán los contornos de presión y de velocidades alrededor del vehículo para ambas geometrías y para el valor de velocidad de referencia ($u_{ref} = 26,5 \text{ m/s}$), y se cerrará el capítulo con las distribuciones de presión sobre la propia superficie del pod, también comparándolas entre las dos variantes de la geometría.

4.2. Análisis de la resistencia al avance y la potencia requerida

En esta sección se analizará la evolución de la resistencia, coeficiente adimensional de resistencia y la potencia requerida con la velocidad de avance, tanto para el caso con la geometría extruida (**Caso 1**) como el de la geometría tangente (**Caso 2**).

De esta forma, se podrá comprobar el rango de valores que las variables mencionadas pueden tomar en la geometría real, encontrándose este acotado por los resultados de cada uno de los dos casos analizados, y permitiendo hacer una estimación de dichas variables junto con un grado de incertidumbre.

Por último, cabe mencionar que en vista del perfil de velocidades que presenta el pod en su misión, ya introducido en la Sección 2, se realizarán simulaciones para ambos casos con cuatro valores diferentes de velocidad: 15, 20, 26.5 y 30 m/s .

4.2.1. Resistencia al avance

Con respecto al estudio de la resistencia, en la Figura 4.1 se muestra la evolución que experimenta la resistencia aerodinámica con la velocidad de avance, apreciándose claramente una relación de proporcionalidad directa, tal y como cabría esperar, en ambos casos.

Además, es de especial interés remarcar que los valores experimentados con la geometría de la estructura soporte extruida son superiores a los de la estructura tangente, cuyo motivo reside en el grado de confinamiento que la geometría impone sobre el flujo, y cuánto lo fuerza a pasar por determinadas regiones.

En el **Caso 1**, la geometría confina casi en su totalidad toda la región de aire que se encuentra dentro de la estructura, y entre el suelo y la altura de inicio del cuerpo cilíndrico del pod, dejando como consecuencia muy poco espacio para que el flujo pueda circular alrededor del vehículo cuando este avanza. Esto ocasiona que en la parte frontal del pod se cree una pequeña acumulación de flujo y se genere una zona de sobrepresión elevada, cuyo resultado directo es un incremento en la resistencia al avance debido a la diferencia de presión entre la zona anterior y posterior del pod.

En cambio, en el **Caso 2**, al haberse eliminado tanta cantidad de material de la estructura,

el flujo dispone de mucho espacio por los laterales para fluir libremente alrededor del pod en lugar de acumularse en exceso en la sección frontal, y por tanto no ocasionando una región de sobrepresión tan marcada.

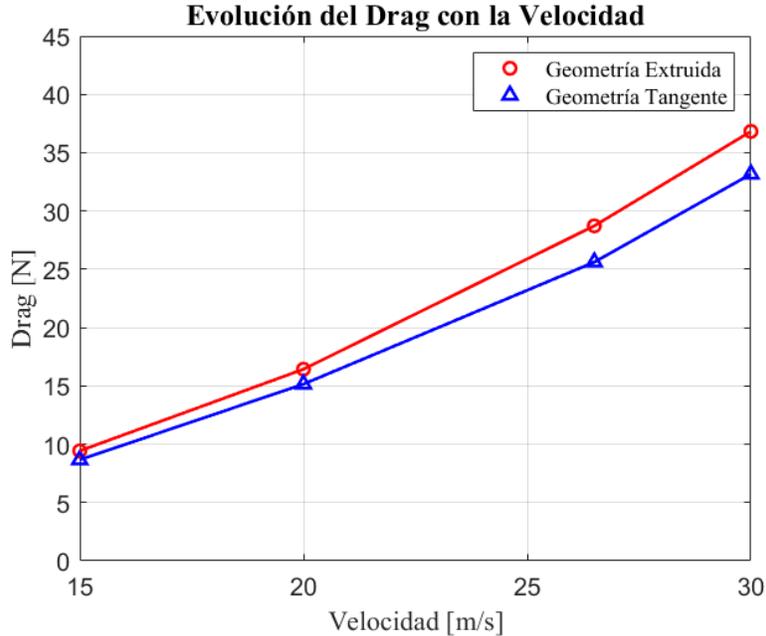


Figura 4.1: Evolución de la resistencia al avance con la velocidad

Por otro lado, también es de interés mencionar que en el régimen de velocidades estudiado, conforme la velocidad aumenta no solo lo hace la resistencia, sino también la pendiente de la curva, por lo que a velocidades superiores la variación que experimenta la resistencia con un cambio de velocidad es superior que ha velocidades inferiores.

Finalmente, en la Tabla 4.1 se recogen los valores numéricos que presenta la resistencia para cada velocidad analizada, junto con la diferencia existente entre el valor de un caso y de otro en tanto por ciento. Como se puede apreciar, se llegan a alcanzar valores elevados de incertidumbre para la resistencia de la geometría real, pues la diferencia entre el **Caso 1** y el **Caso 2** es del 12.1370 % para una velocidad de 26.5 m/s, valor nada despreciable.

Velocidad [m/s]	Drag Geometría Extruida [N]	Drag Geometría Tangente [N]	Diferencia [-]
15.0	9.4316	8.6647	8.8509 %
20.0	16.4333	15.1544	8.4391 %
26.5	28.7249	25.6159	12.1370 %
30.0	36.8231	33.1647	11.0310 %

Tabla 4.1: Evolución de la resistencia con la velocidad de avance, y diferencia porcentual entre casos

4.2.2. Coeficiente adimensional de resistencia

Se pasa a continuación a analizar el coeficiente de resistencia aerodinámica, el cual obedece a la expresión de la Ecuación 4.1, y donde el área de referencia seleccionada ha sido la superficie frontal de todo el vehículo, de valor $A_{ref} = 0,1184 \text{ m}^2$:

$$CD = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_{ref} A_{ref} V^2} \quad (4.1)$$

De esta forma, la evolución del CD con la velocidad de avance se puede apreciar en la Figura 4.2, y sus valores numéricos correspondientes en la Tabla 4.2. Cabe destacar como la diferencia porcentual entre casos es exactamente la misma que la encontrada con la resistencia, lo cual es completamente coherente si se tiene en cuenta que esta ha sido adimensionalizada con valores de referencia.

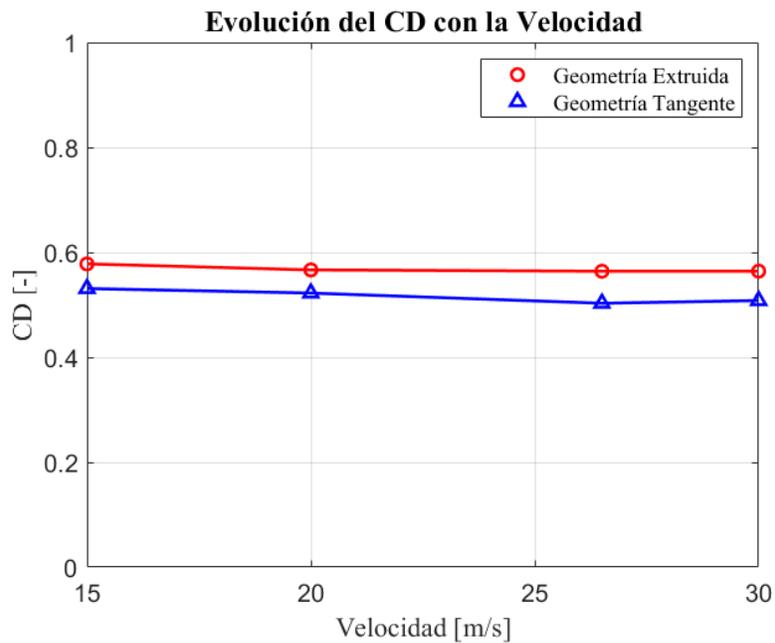


Figura 4.2: Evolución del CD con la velocidad de avance

Velocidad [m/s]	CD Geometría Extruida [-]	CD Geometría Tangente [-]	Diferencia [-]
15.0	0.5780	0.5310	8.8509 %
20.0	0.5665	0.5224	8.4391 %
26.5	0.5640	0.5030	12.1370 %
30.0	0.5642	0.5081	11.0310 %

Tabla 4.2: Evolución del CD con la velocidad de avance, y diferencia porcentual entre casos

En esta ocasión, y al contrario de la tendencia vista con la resistencia, el CD no presenta una relación directamente proporcional con la velocidad, sino que en los instantes iniciales de la misión en los que la velocidad no es elevada, este tiende a disminuir con dicha variable. Posteriormente, y a partir de los $26,5 \text{ m/s}$, se advierte un ligero aumento en el su valor, por lo que aparentemente dicha velocidad de avance puede consituir un mínimo en el coeficiente de resistencia.

Además, es de especial interés mencionar que la variación que el CD experimenta en cada una de las versiones geométricas analizadas no es elevada, siendo la diferencia entre el valor máximo y el mínimo medido del $2,4823 \%$ para el **Caso 1**, y del $5,5666 \%$ para el **Caso 2**. Esto indica que es posible establecer un valor medio de CD para el vehículo en cada uno de los escenarios sin incurrir en grandes inexactitudes, y por tanto caracterizar en cierta medida la operación del vehículo en cada uno de los entornos geométricos analizados. Estos resultados son los mostrados en la Tabla 4.3:

	Diferencia valor máximo y mínimo [-]	Valor medio [-]	Diferencia valores medios[-]
Caso 1	2.4823 %	0.5682	10.0949 %
Caso 2	5.5666 %	0.5161	

Tabla 4.3: Valor medio del CD en cada caso

4.2.3. Potencia requerida

Finalmente, se estudiará la potencia requerida por el vehículo para desplazarse a cada una de las velocidades estudiadas. Para ello, es imprescindible tener en cuenta que esta se calcula como el producto de la fuerza por la velocidad, siendo la fuerza en este caso la resistencia aerodinámica.

Su evolución gráfica se muestra en la Figura 4.3, y sus valores numéricos tabulados en la Tabla 4.4. De nuevo, la diferencia porcentual entre casos para cada velocidad es coincidente a la encontrada en la resistencia, pues todos los términos han sido multiplicados por el mismo factor (la velocidad en este caso).

Velocidad [m/s]	Potencia Geometría Extruida [W]	Potencia Geometría Tangente [W]	Diferencia [-]
15.0	141.4740	129.9705	8.8509 %
20.0	328.6660	303.0880	8.4391 %
26.5	761.2099	678.8214	12.1370 %
30.0	1104.6930	994.9410	11.0310 %

Tabla 4.4: Evolución de la potencia con la velocidad de avance, y diferencia porcentual entre casos

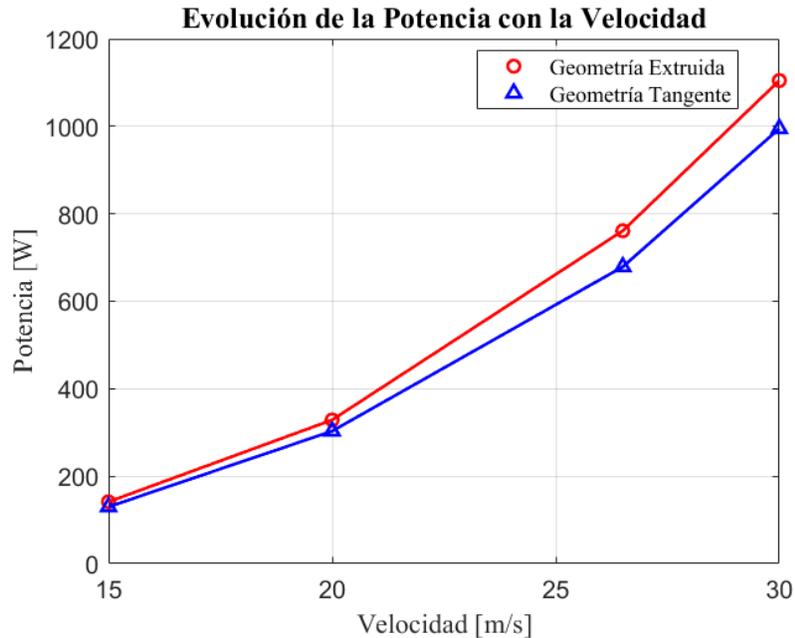


Figura 4.3: Evolución de la potencia requerida con la velocidad de avance

Como era de esperar, la tendencia que experimenta con la velocidad es coincidente con la vista en el gráfico de la resistencia, esto es, monótonamente creciente. Sin embargo, en esta ocasión es de especial interés atender a los valores numéricos de potencia que requerirá el vehículo, para de esta manera poder hacer una primera estimación del dimensionamiento del motor.

El valor máximo de potencia se alcanza con la geometría de la estructura soporte extruida, siendo este de 1104.6930 W y presentándose a los 30 m/s de velocidad de avance. Sin embargo, tal y como se puede apreciar en el perfil de velocidades del vehículo (Figura 1.2), es un valor de velocidad que no se alcanza, y que resulta en cierto modo elevado para una pista de 80 m de longitud, pues daría lugar a fuertes aceleraciones o deceleraciones.

Sin embargo, siempre resulta adecuado en estudios de esta naturaleza adoptar un carácter conservador y del lado de la seguridad. Por tanto, partir de la potencia necesaria para mantener una velocidad que es un poco superior a las alcanzadas en el perfil de la misión, no es una mala práctica, pues también se debe ser consciente de que el estudio asume unas condiciones de operación de aire en reposo, por lo que en caso de que hubiese viento soplando la resistencia experimentada sería mayor, y por tanto la potencia requerida también.

De tal forma, se podría establecer como primera aproximación una potencia requerida de entre $1250\text{-}1500 \text{ W}$, dejando un margen de seguridad para cualquiera variabilidad desfavorable en las condiciones, valores que se asemejarían al motor de una lavadora o de una moto eléctrica. No obstante, es crucial tener en mente que este estudio y estimación de potencia es exclusivamente para el desplazamiento del vehículo, y no contempla el peso de carga que se deba transportar a lo largo de la pista.

4.3. Campo de presión y de velocidad

En esta sección se representarán los contornos de presión y de velocidad alrededor del vehículo, para la velocidad de referencia $u_{ref} = 26,5 \text{ m/s}$ y en las dos variantes de la estructura soporte, identificando las diferencias y particularidades de cada una de ellas.

4.3.1. Contornos de presión

Comenzando con los contornos de presión, en la Figura 4.4 se muestra la distribución de la presión relativa con respecto a la de referencia ($p_{ref} = 101325 \text{ Pa}$), en el plano de simetría geométrico, tanto para la geometría extruida en la gráfica superior como para la geometría tangente en la inferior.

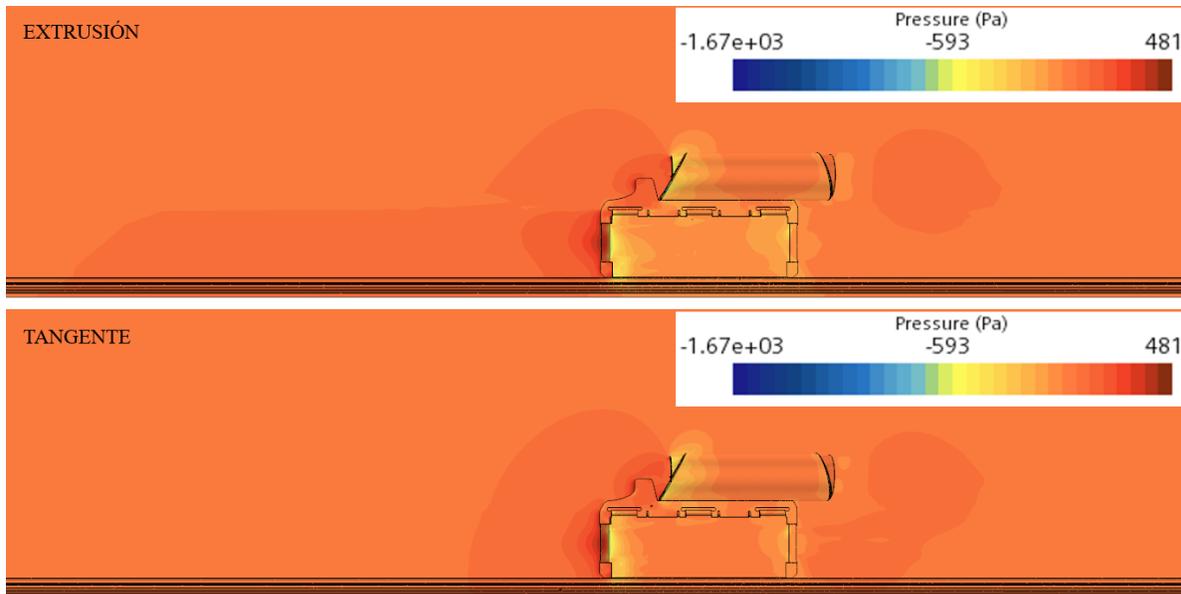


Figura 4.4: Contorno de presión relativa en el plano de simetría geométrico para el **Caso 1** (superior) y **Caso 2** (inferior)

Como se puede apreciar, en la geometría extruida se advierte una región de sobrepresión superior a la encontrada en la geometría tangente, fruto de lo mencionado con anterioridad: al extruirse todas las superficies normales de la estructura soporte (Figura 3.5), el aire no dispone de apenas espacio para rodear al pod tras su paso, ocasionando una acumulación de flujo en la sección frontal y una región de baja velocidad superior a la que se origina en la estructura tangente, donde dispone de mucho más espacio para fluir alrededor del vehículo.

4.3.2. Contornos de velocidad

En cuanto a los contornos de velocidad, en la Figura 4.5 se puede apreciar la distribución de dicha variable en el plano de simetría geométrico, mientras que en la Figura 4.6 se muestra en un plano perpendicular a la dirección de desplazamiento, y situado a una longitud intermedia del cuerpo del pod.

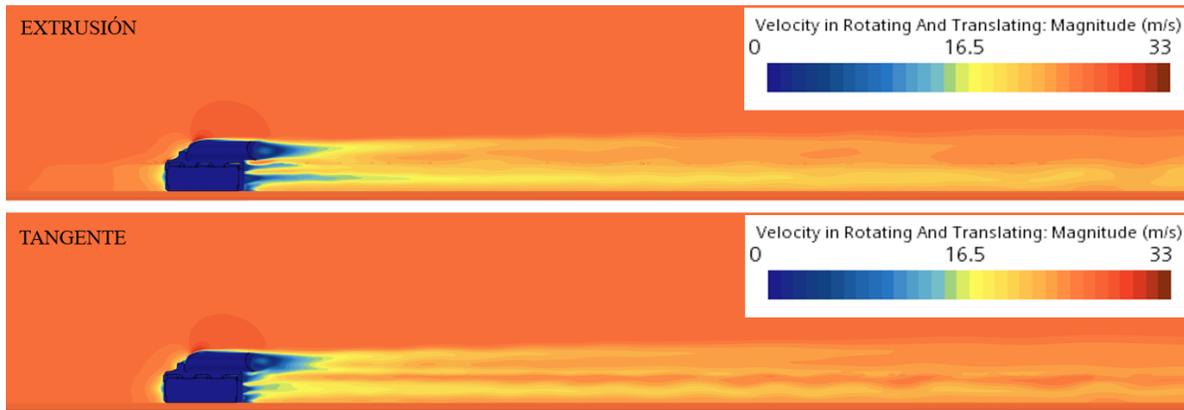


Figura 4.5: Contorno de velocidad en el plano de simetría geométrico para el **Caso 1** (superior) y **Caso 2** (inferior)

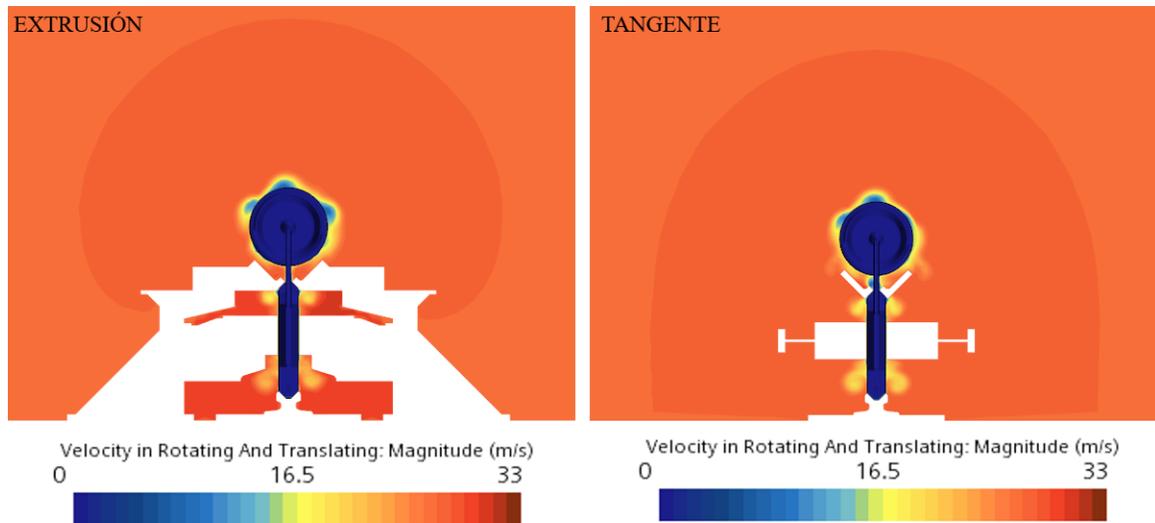


Figura 4.6: Contorno de velocidad en un plano frontal a mitad del vehículo para el **Caso 1** (izquierda) y **Caso 2** (derecha)

En la vista lateral (Figura 4.5) se puede advertir de nuevo el fenómeno comentado a lo largo de este capítulo, por el cual el flujo sufre mayor bloqueo en la parte frontal del vehículo con la estructura extruida, al disponer de menor espacio para rodearlo, dando lugar a que se genere la región de sobrepresión vista en la Figura 4.4, que es equivalente a la región de menor

velocidad que se puede apreciar en esta ocasión. En cambio, con la estructura tangente no se aprecia una región tan extensa de baja velocidad, si bien se advierte en las cercanías de la pared del pod una zona de remanso, como bien cabría esperar.

Además, cabe mencionar como con la geometría extrudida los desprendimientos son más notables y la estela turbulenta presenta mayor longitud, lo que contribuye también a que la diferencia de presión entre la parte anterior y posterior sea más acusada, y por ende el vehículo experimente mayor resistencia al avance que con la geometría tangente, resultados que ya fueron estudiados en la Sección 4.2.

Por último, si se pone el foco de atención en la vista frontal de los contorno de velocidad (Figura 4.6), se aprecia un comportamiento similar en ambas geometrías, a excepción de la zona de pasaje cercana a la plataforma vertical. El fluido sufre mayor aceleración con la geometría extrudida que con la tangente, pues en el primer escenario se encuentra confinado por las paredes laterales de la estructuras soporte y debe adquirir mayor velocidad para pasar por la sección convergente que impone el avance del vehículo; en cambio, en la estructura tangente no existen paredes laterales que confinen al flujo, por lo que el efecto de sección convergente en este escenario no es tan marcado como en el anterior.

4.4. Distribución de presión sobre el vehículo

Finalmente, para cerrar el capítulo se analizará la distribución de presión sobre la propia superficie del vehículo, distinguiéndose de forma separada la que se presenta en la plataforma vertical y en el cuerpo cilíndrico del pod. Más concretamente, la distribución se obtendrá en la curva de intersección entre el plano de simetría geométrico y los mencionados cuerpos, apreciándose una representación gráfica de dicha curva en la Figura 4.7.

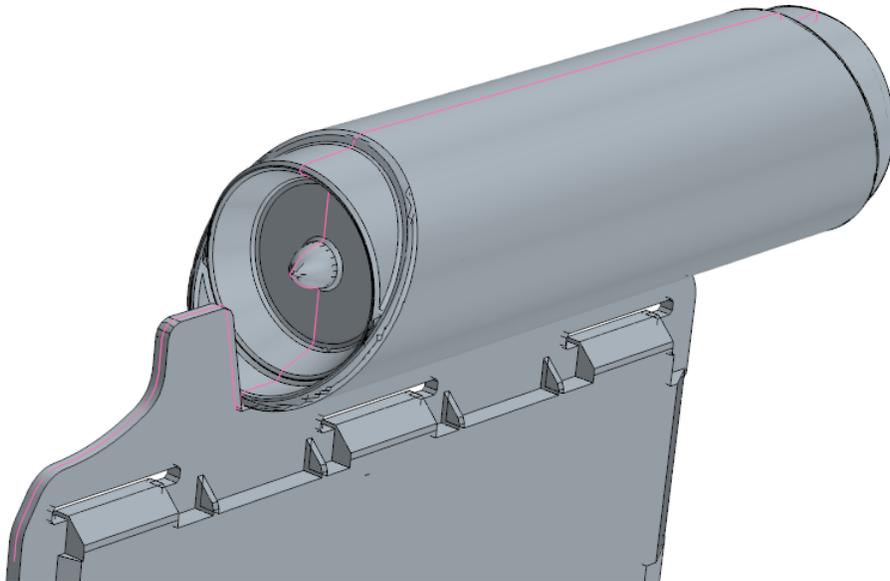


Figura 4.7: Curva de la superficie del pod sobre la que se obtendrá la distribución de presión

De tal forma, en la Figura 4.8 se muestra la distribución de presión relativa, es decir, la diferencia con la presión de referencia p_{ref} , sobre la curva mostrada, pero conteniendo solamente el rango comprendido entre el inicio de la parte frontal de la plataforma vertical, y el inicio del labio del cuerpo cilíndrico; esto es, solamente la parte de la curva que se encuentra sobre la plataforma vertical y no sobre el cuerpo cilíndrico.

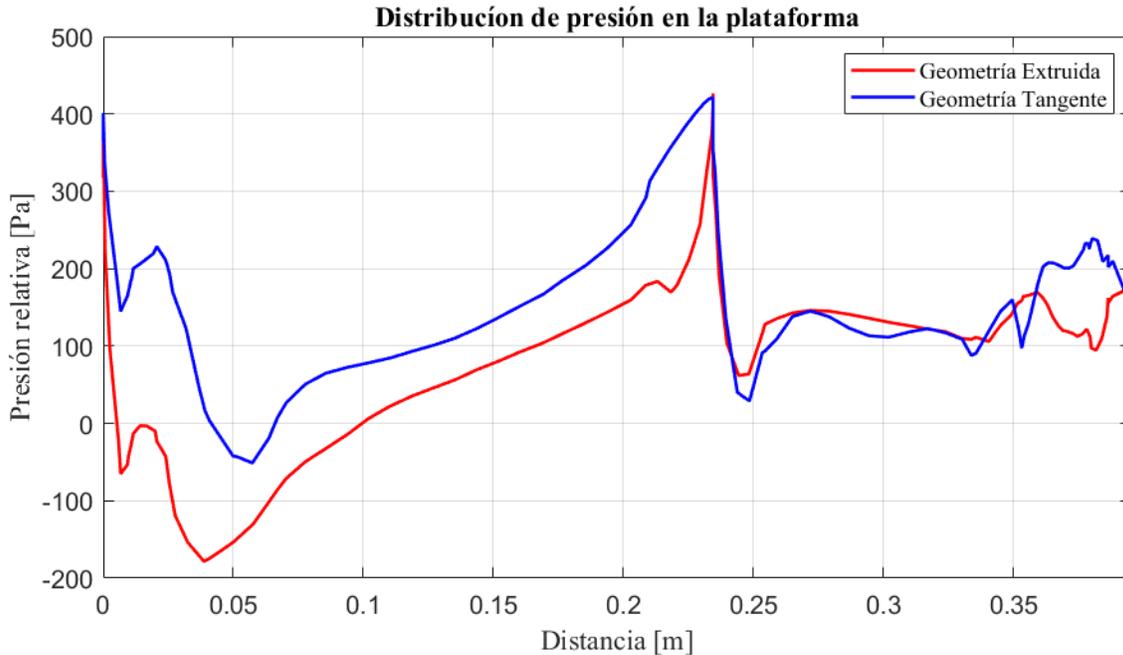


Figura 4.8: Distribución de presión sobre la curva de la Figura 4.7, correspondiente al tramo de la plataforma vertical

En las dos versiones de la geometría se aprecia un comportamiento similar, distinguiéndose una zona de elevada presión en la parte frontal de la plataforma, que se correspondería con aquella zona en la que el flujo sufre una deceleración al encontrarse con una superficie prácticamente perpendicular a la dirección de avance.

Posteriormente, si se sigue recorriendo la curva se llega a una región en la que la superficie de la plataforma comienza a aplanarse, pasando de ser perpendicular con la dirección de desplazamiento a ser tangente, dando lugar a una especie de sección convergente. Como consecuencia, el flujo experimenta una aceleración, traduciéndose en una caída de presión que se advierte en la Figura 4.8 hasta los 0,05 m.

Finalmente, desde los 0,2 m hasta el final de la gráfica se distinguiría la distribución sobre la cresta de la plataforma, alcanzándose un pico de sobrepresión significativa en la parte de la superficie perpendicular al movimiento, fruto de la deceleración del flujo, una caída de presión abrupta al transicionar a la superficie tangente que marcaría el punto de máxima altura de la cresta, y por último un pequeño incremento de presión al acabar la extensión de dicha parte superior y dar lugar a una apertura en la que el flujo volvería a decelerarse.

Si se pone el foco de atención en las diferencias que presenta la distribución en cada geometría, pues ya se ha visto que el comportamiento cualitativo es idéntico como bien cabría esperar al tratarse de la misma plataforma, se puede advertir que la presión es notablemente superior en la parte frontal de la plataforma con la geometría tangente. La razón de ello se puede encontrar si se compara la estructura de la Figura 3.5 y 3.6, advirtiéndose que en la geometría extruida, y como ya se ha comentado numerosas veces, el flujo está confinado de forma mucho más notable que con la geometría tangente, por lo que a la hora de rodear el vehículo tras su paso dispone de una menor sección para atravesar que en el otro caso, traduciéndose en una mayor velocidad y por tanto una caída de presión mayor, de acuerdo a como refleja la distribución de la Figura 4.8.

En cuanto a la distribución de presión relativa sobre el cuerpo cilíndrico, esta se puede apreciar en la Figura 4.9, donde se han diferenciado tres regiones por medio de líneas discontinuas. La primera de ellas, que abarca desde el origen hasta los $0,32\text{ m}$, se corresponde con la sección frontal del cuerpo cilíndrico, esto es, el supuesto compresor; la segunda región, desde los $0,32\text{ m}$ hasta los $1,36\text{ m}$, representa la parte superior del cilindro; y por último, la región restante se correspondería con la supuesta tobera.

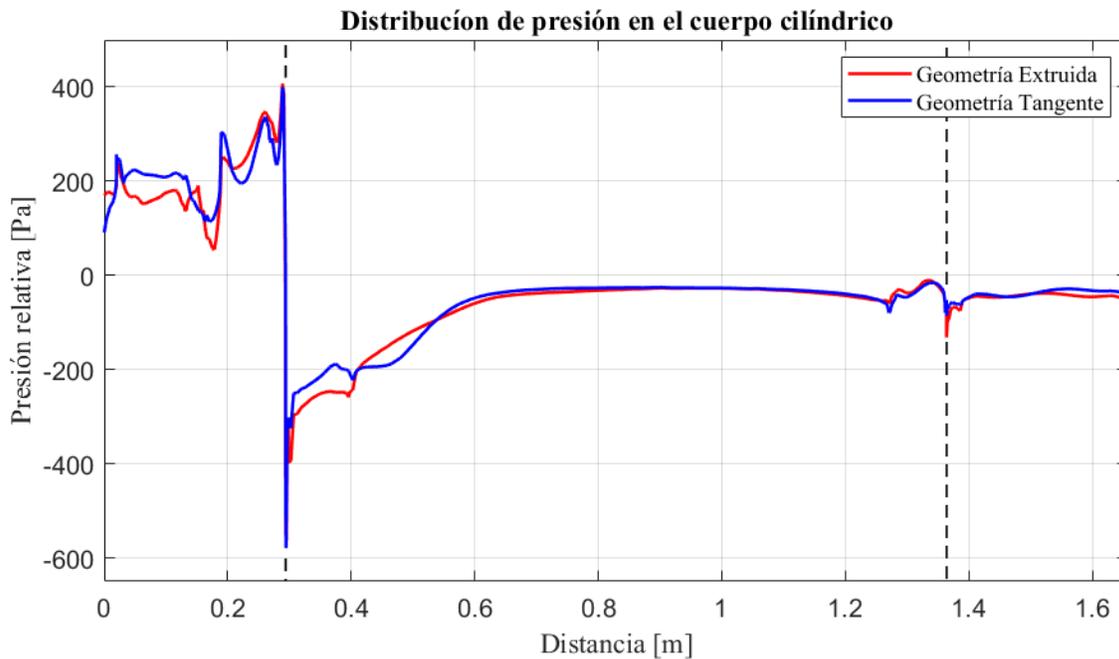


Figura 4.9: Distribución de presión sobre la curva de la Figura 4.7, correspondiente al tramo del cuerpo cilíndrico

La distribución asociada a cada una de las geometrías no presenta grandes diferencias entre sí, mostrando unos valores muy similares, pues es preciso mencionar que el cuerpo cilíndrico se encuentra por encima de la estructura soporte, de forma que los fenómenos asociados al mayor o menor confinamiento del flujo impuesto por cada estructura no son apenas notables en este caso.

Por último, con respecto a las características de ambas distribuciones se advierte un comportamiento similar al ya comentado con la plataforma vertical. En la zona del supuesto compresor se localiza una región de sobrepresión al constituir una zona de remanso y acumulación del flujo, pues se recuerda que a través de esa superficie, que es normal a la dirección de desplazamiento, no puede circular flujo, decelerándose significativamente el mismo. Por el contrario, en la superficie lateral del cilindro el flujo se ve acelerado al encontrarse con una sección convergente de paso, lo que ocasionaría la notable caída de presión que se aprecia en la distribución.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Índice

5.1	Conclusiones	47
5.1.1	Conclusiones generales	47
5.1.2	Conclusiones particulares del caso	48
5.2	Trabajos futuros	48

5.1. Conclusiones

5.1.1. Conclusiones generales

Con respecto a las conclusiones generales del presente proyecto, cabe mencionar que se ha conseguido desarrollar una metodología adecuada para realizar un proceso CFD completo, con todas las etapas que este involucra y que fueron detalladas en la Sección 2.3.

De tal forma, se ha hecho uso de un programa de CAD para conseguir optimizar la geometría, al eliminar las características menos relevantes y reducir el futuro coste computacional. Posteriormente, se llevó a cabo el análisis CFD siguiendo la metodología diseñada, y realizando numerosos estudios para poder reducir aún más el coste asociado, como se vio con el estudio de independencia de dominio, y para reducir el error de diversas fuentes, como la reducción del error por discretización espacial al llevar a cabo un estudio de independencia de malla.

Una vez obtenidos los resultados se realizó un correcto tratamiento de los mismos, para posteriormente analizarlos en detalle y extraer las conclusiones oportunas sobre cada uno de ellos, consiguiendo cumplir con todo ello el principal objetivo de este estudio: caracterizar aerodinámicamente el vehículo, obteniendo la resistencia al avance y la potencia requerida por

el mismo para su misión provisional, así como las causas que originan el campo de velocidad y presión alrededor de él, y cómo se podrían modificar.

Finalmente, es preciso mencionar cómo también se pudo hacer frente a la limitación encontrada con las superficies normales de la estructura, a pesar de no disponer de equipos altamente cualificados, y cómo se ha conseguido caracterizar el vehículo acotando los resultados para la geometría real en un margen, cuyos límites se encuentran marcados por los dos casos extremos analizados.

5.1.2. Conclusiones particulares del caso

Por consiguiente, las conclusiones particulares del caso girarían en torno a los resultados del estudio CFD realizado, y el análisis efectuado sobre los mismos, destacándose las siguientes:

- Se ha podido apreciar claramente el efecto que tiene aumentar la cantidad de material en la estructura soporte y confinar el aire, o reducirla y dejar el aire pueda fluir de manera mucho más natural. En el primero de los casos se crea una región de sobrepresión considerable en la parte frontal del vehículo, dando lugar a un incremento en la resistencia, por lo que desde un punto de vista aerodinámico lo ideal sería reducir la cantidad de material. Sin embargo, esta decisión deberá atender a otros factores, como la resistencia estructural.
- La diferencia porcentual que existe entre el **Caso 1** y el **Caso 2** para la resistencia y potencia, esto es, los límites que acotan los valores para la geometría real y no las variantes estudiadas, se eleva hasta el 12%, lo cual representa un valor nada despreciable. Sin embargo, se debe tener en cuenta que se han analizado casos extremos, y que por los medios disponibles constituía la solución de compromiso más adecuada.
- La estimación de la potencia requerida para la misión provisional del prototipo, y sin transporte de carga, es de 1250 W , valor que surge de tomar como referencia el necesario para mantener una velocidad de 30 m/s , valor que en principio no llega a alcanzar el vehículo, y dejándose adicionalmente un pequeño margen de potencia, por lo que sería una estimación que contemplaría de sobre condiciones adversas de operación, como viento en contra.

5.2. Trabajos futuros

Finalmente, para cerrar el capítulo se plantearán sugerencias para trabajos futuros, que girarán en torno a las limitaciones que han marcado este proyecto.

Como se ha mencionado numerosas veces, los equipos disponibles para la realización del estudio han sido limitados, y a su vez el coste computacional asociado al mismo elevado. Consecuentemente, se tuvieron que realizar diversas simplificaciones que de haber dispuesto

de equipos más sofisticados se podrían haber evitado. Por tanto, a continuación se listará una serie de ideas para trabajos futuros que serían factibles con una mayor capacidad de coste computacional:

- Ante la problemática de modelar el desplazamiento entre vehículo y estructura con un sistema de referencia relativo, y en presencia de superficies fijas y perpendiculares a la dirección de movimiento, se podría realizar un mallado overset que a pesar de elevar el coste computacional, otorgaría unos resultados mucho más precisos y característicos de la propia geometría real, sin necesidad de crear versiones de la misma.
- Se podría incluir en el modelado el compresor y la tobera, para de esta manera caracterizar el efecto que estos elementos tiene en el comportamiento global del vehículo, y qué porcentaje de resistencia o potencia son capaces de disminuir.
- Se podrían realizar simulaciones en las que además el vehículo transportase carga para analizar el incremento de resistencia y potencia que tiene lugar, siendo este un escenario más realista.
- En lugar de realizar simulaciones a velocidad constante, se podría analizar un trayecto completo con el perfil provisional de velocidades; esto es, con las aceleraciones y deceleraciones pertinentes.
- Se podría valorar la opción de reducir el paso temporal o relajar los criterios de independencia de malla, para de esta manera obtener un mayor detalle del flujo.

Capítulo 6

PLIEGO DE CONDICIONES Y PRESUPUESTO

Índice

6.1	Introducción	51
6.2	Pliego de condiciones	52
6.2.1	Condiciones técnicas	52
6.2.2	Condiciones del puesto de trabajo	53
6.3	Presupuesto	56
6.3.1	Introducción	56
6.3.2	Costes unitarios	56
6.3.3	Desglose de costes totales	57

6.1. Introducción

En el presente y último capítulo del documento se expondrá el pliego de condiciones y el presupuesto requerido para la realización del proyecto. De tal forma, en primer lugar se describirán los sistemas Hardware y Software utilizados, así como las disposiciones mínimas con las que deberá contar el puesto de trabajo del operario encargado de la ejecución del proyecto.

Por último, se analizarán y evaluarán los costes totales asociados a la realización del proyecto, otorgando una visión global de los recursos económicos requeridos. Para ello, se abordarán los costes relacionados con el personal docente, considerando salarios, beneficios y tiempo invertido, y se examinarán los costes de las licencias del software utilizado, teniendo presentes las horas de uso que han sido necesarias.

6.2. Pliego de condiciones

6.2.1. Condiciones técnicas

Debido a que el presente proyecto se fundamenta casi en su totalidad en el desarrollo de simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), la complejidad requerida para los equipos físicos no deberá ser sumamente elevada, pero si deberá contar con ciertos mínimos para el correcto desarrollo de los análisis y cumplimiento de objetivos.

Los materiales y equipos se puede diferenciar entre hardware y software, incluyéndose la necesidad de conexión a internet, así como de los conocimientos ingenieriles pertinentes que se espera que el autor posea con la enseñanza previa recibida y que adquiera con estudios adicionales.

Hardware

Debido al alto coste computacional asociado al proyecto, es necesario contar con un equipo de hardware lo suficientemente sofisticado para que la obtención de resultados cuente con cierto dinamismo en lugar de presentarse inabordables tiempos de espera. Sin embargo, se recuerda que se han llevado a cabo diversos procesos durante el estudio para reducir el coste y sin afectar en exceso la precisión de los resultados.

El equipo que se ha utilizado para la realización de los estudios es, junto con sus especificaciones, el siguiente:

- Modelo del sistema: HP Pavilion Gaming
- Procesador: AMD Ryzen 7 4800H (2.9Ghz, 4MB)
- Memoria RAM: 16GB (2x8GB) DDR4-3200
- Disco duro: 512GB SSD M.2 NVMe PCIe
- Tarjeta gráfica: nVidia GeForce GTX 1650Ti 4GB GDDR6
- Ratón inalámbrico HP
- Sistema Operativo Windows 10

Software

Además, para el desarrollo del trabajo también ha sido necesario el uso de diversos programas informáticos, entre los que se destacan:

- Simcenter STAR-CCM+: Software comercial de dinámica de fluidos computacional desarrollado por Siemens PLM Software, empleado para la totalidad del estudio aerodinámico del prototipo.
- MATLAB: Plataforma de programación y cálculo numérico empleada para el postprocesado de los resultados, permitiendo entre muchas otras funciones obtener valores medios de las variables de interés, realizar un correcto tratamiento de la gran cantidad de datos numéricos obtenidos, y representar de forma clara, ordenada e intuitiva los perfiles y distribuciones mostradas en el documento.
- Wolfram Mathematica: Software creado por Stephen Wolfram y orientado a la computación de problemas en las áreas científicas, de ingeniería, matemáticas y computacionales, y que ha sido empleado solamente para cálculos preliminares.
- Microsoft Office: Suite ofimática de aplicaciones para computadoras de escritorio, servidores y servicios, habiéndose hecho uso de los siguientes productos:
 - Microsoft Word: Empleado para la elaboración de versiones preliminares de la memoria final.
 - Microsoft PowerPoint: Empleado para la elaboración de la presentación.
- Overleaf: Editor de Latex online empleado para la redacción de la memoria del proyecto.

6.2.2. Condiciones del puesto de trabajo

Es de especial importancia atender a las condiciones de trabajo durante la realización de un proyecto de estas características, pues pueden afectar significativamente tanto al desarrollo del propio estudio como a la salud del trabajador.

Es por ello por lo que se incluyen a continuación las disposiciones mínimas con las que deberá contar el puesto de trabajo del operario, las cuales están incluidas en el Real Decreto 488/1997 de 14 de abril [9]. Este decreto tiene como finalidad establecer las disposiciones mínimas de seguridad y de salud para la utilización de equipos que incluyan pantallas de visualización, aplicándose las disposiciones de la Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales [10].

Consecuentemente, se procede a citar textualmente los requerimientos de aplicación contenidos en el mencionado decreto.

1. Equipo

a) Observación general.

La utilización en sí misma del equipo no debe ser una fuente de riesgo para los trabajadores.

b) Pantalla.

Los caracteres de la pantalla deberán estar bien definidos y configurados de forma

clara, y tener una dimensión suficiente, disponiendo de un espacio adecuado entre los caracteres y los renglones.

La imagen de la pantalla deberá ser estable, sin fenómenos de destellos, centelleos u otras formas de inestabilidad.

El usuario de terminales con pantalla deberá poder ajustar fácilmente la luminosidad y el contraste entre los caracteres y el fondo de la pantalla, y adaptarlos fácilmente a las condiciones del entorno.

La pantalla deberá ser orientable e inclinable a voluntad, con facilidad para adaptarse a las necesidades del usuario.

Podrá utilizarse un pedestal independiente o una mesa regulable para la pantalla.

La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

c) Teclado.

La pantalla no deberá tener reflejos ni reverberaciones que puedan molestar al usuario.

Tendrá que haber espacio suficiente delante del teclado para que el usuario pueda apoyar los brazos y las manos.

La superficie del teclado deberá ser mate para evitar los reflejos.

La disposición del teclado y las características de las teclas deberán tender a facilitar su utilización.

Los símbolos de las teclas deberán resaltar suficientemente y ser legibles desde la posición normal de trabajo.

d) Mesa o superficie de trabajo.

La mesa o superficie de trabajo deberán ser poco reflectantes, tener dimensiones suficientes y permitir una colocación flexible de la pantalla, del teclado, de los documentos y del material accesorio.

El soporte de los documentos deberá ser estable y regulable y estará colocado de tal modo que se reduzcan al mínimo los movimientos incómodos de la cabeza y los ojos.

El espacio deberá ser suficiente para permitir a los trabajadores una posición cómoda.

e) Asiento de trabajo.

El asiento de trabajo deberá ser estable, proporcionando al usuario libertad de movimiento y procurándole una postura confortable.

La altura del mismo deberá ser regulable.

El respaldo deberá ser reclinable y su altura ajustable.

Se pondrá un reposapiés a disposición de quienes lo deseen.

2. Entorno

a) Espacio.

El puesto de trabajo deberá tener una dimensión suficiente y estar acondicionado de tal manera que haya espacio suficiente para permitir los cambios de postura y movimientos de trabajo.

b) Iluminación. La iluminación general y la iluminación especial (lámparas de trabajo), cuando sea necesaria, deberán garantizar unos niveles adecuados de iluminación y

unas relaciones adecuadas de luminancias entre la pantalla y su entorno, habida cuenta del carácter del trabajo, de las necesidades visuales del usuario y del tipo de pantalla utilizado.

El acondicionamiento del lugar de trabajo y del puesto de trabajo, así como la situación y las características técnicas de las fuentes de luz artificial, deberán coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos en la pantalla u otras partes del equipo.

c) Reflejos y deslumbramientos.

Los puestos de trabajo deberán instalarse de tal forma que las fuentes de luz, tales como ventanas y otras aberturas, los tabiques transparentes o translúcidos y los equipos o tabiques de color claro no provoquen deslumbramiento directo ni produzcan reflejos molestos en la pantalla.

Las ventanas deberán ir equipadas con un dispositivo de cobertura adecuado y regulable para atenuar la luz del día que ilumine el puesto de trabajo.

d) Ruido.

El ruido producido por los equipos instalados en el puesto de trabajo deberá tenerse en cuenta al diseñar el mismo, en especial para que no se perturbe la atención ni la palabra.

e) Calor.

Los equipos instalados en el puesto de trabajo no deberán producir un calor adicional que pueda ocasionar molestias a los trabajadores.

f) Emisiones.

Toda radiación, excepción hecha de la parte visible del espectro electromagnético, deberá reducirse a niveles insignificantes desde el punto de vista de la protección de la seguridad y de la salud de los trabajadores.

g) Humedad.

Deberá crearse y mantenerse una humedad aceptable.

3. **Interconexión ordenador/persona**

Para la elaboración, la elección, la compra y la modificación de programas, así como para la definición de las tareas que requieran pantallas de visualización, el empresario tendrá en cuenta los siguientes factores:

a) El programa habrá de estar adaptado a la tarea que deba realizarse.

b) El programa habrá de ser fácil de utilizar y deberá, en su caso, poder adaptarse al nivel de conocimientos y de experiencia del usuario; no deberá utilizarse ningún dispositivo cuantitativo o cualitativo de control sin que los trabajadores hayan sido informados y previa consulta con sus representantes.

c) Los sistemas deberán proporcionar a los trabajadores indicaciones sobre su desarrollo.

d) Los sistemas deberán mostrar la información en un formato y a un ritmo adaptados a los operadores.

e) Los principios de ergonomía deberán aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

6.3. Presupuesto

6.3.1. Introducción

Finalmente se cerrará el presente proyecto realizando un análisis sobre el presupuesto, que es el documento cuya finalidad es recoger de forma detallada toda la información relacionada con los costes asociados a dicho proyecto. Estos costes incluirán tanto los salarios relacionados con el personal implicado, como las licencias del software utilizado y los equipos necesarios, reflejándose en la Tabla 6.1 la totalidad de los recursos requeridos.

RECURSOS		
Personal	Software	Equipos
Profesor Contratado Doctor	Simcenter STAR-CCM+	
Ingeniero Aeronáutico	MATLAB	Portátil personal
Ingeniero Técnico	Wolfram Mathematica	Ratón inalámbrico
	Microsoft Office	
	Overleaf	

Tabla 6.1: Recursos totales requeridos para la realización del proyecto

6.3.2. Costes unitarios

En primer lugar se definirá el coste unitario asociado a cada recurso, calculados de acuerdo a su precio por unidad de tiempo en €/hora, o bien a su precio de adquisición.

Personal

Con respecto a los salarios del personal, estos han sido determinados de acuerdo a la ley de presupuestos vigente en la actualidad, y establecida por el Servicio de Recursos Humanos de la Sección de Nóminas y Seguridad Social del Ministerio de Empleo y Seguridad Social. Como se ha visto en la Tabla, el personal involucrado en la realización del proyecto consta de un Ingeniero Técnico, un Ingeniero Aeronáutico y un Profesor Contratado Doctor, cuyos costes unitarios se han obtenido dividiendo la retribución anual entre las horas totales laborales de un año, esto es, 1820 horas.

- **Ingeniero Técnico:** Autor del proyecto, con un salario bruto anual de 21000€, y consecuentemente un coste unitario de 11.54 €/hora.

- **Ingeniero Aeronáutico:** Cotutor del proyecto, con un salario bruto anual de 30000€, y consecuentemente un coste unitario de 16.48 €/hora.
- **Profesor Contratado Doctor:** Tutor del proyecto, con un salario bruto anual de 42000€, y consecuentemente un coste unitario de 23.1 €/hora.

Software

Los costes asociados al software empleado son los siguientes:

- **Simcenter STAR-CCM:** El número total de horas que el programa ha estado en funcionamiento se sitúa en torno a las 1100 h, por lo que asumiendo un coste por hora de 1 €/h, el coste total ascendería a 1100 €.
- **MATLAB:** El coste de la licencia anual, versión estudiante, asciende a 69 €.
- **Wolfram Mathematica:** El coste de la licencia anual, versión estudiante, asciende a 148 €.
- **Microsoft Office:** El coste de la licencia anual asciende a 69 €.
- **Overleaf:** Se ha empleado la versión gratuita, por lo que su precio a sido de 0 €.

Equipos

Por último, el coste de adquisición de los equipos fue de:

- **Portátil personal:** Su coste de adquisición fue de 899.98 €.
- **Ratón inalámbrico HP:** Su coste de adquisición fue de 39.99 €.

6.3.3. Desglose de costes totales

Para dar por concluido el presente capítulo, así como el documento, se procede a calcular el coste total del proyecto teniéndose en cuenta los costes unitarios y de adquisición definidos previamente.

Coste total del personal

Con respecto al coste total del personal, en la Tabla 6.2 se detalla el desglose en cuestión:

Personal	Horas	Coste
Ingeniero Técnico	320	3 692.8 €
Ingeniero Aeronáutico	15	247.2 €
Profesor Contratado Doctor	15	346.5 €
TOTAL BRUTO		4 286.5 €

Tabla 6.2: Coste bruto del personal

El coste total bruto del personal es de:

CUATRO MIL DOSCIENTOS OCHENTA Y SEIS EUROS CON CINCUENTA CÉNTIMOS

Coste total del Software

En la Tabla 6.3 se detalla el desglose de costes correspondiente al software empleado:

Software	Coste
Simcenter STAR-CCM	1100 €
MATLAB	69 €
Wolfram Mathematica	148 €
Microsoft Office	69 €
Overleaf	0 €
TOTAL BRUTO 1 386 €	

Tabla 6.3: Coste bruto del software

El coste total bruto del software es de:

MIL TRESCIENTOS OCHENTA Y EUROS

Coste total

Por último, teniendo en cuenta todos los desgloses de costes detallados anteriormente, se procede al cálculo del coste total del proyecto. Por un lado, en la Tabla 6.4 se detalla el coste bruto final del proyecto, mientras que en la Tabla 6.5 se muestra el coste final, en el que se han incluido adicionalmente los gastos indirectos derivados, que giran en torno a un 13 %, un beneficio industrial del 5 % y el IVA.

Concepto	Coste
Personal	4 286.5 €
Software	1 386 €
Equipos	939.97 €
TOTAL BRUTO 6 612.47 €	

Tabla 6.4: Coste bruto total del proyecto

Concepto	Coste	
Coste bruto		6 612.47 €
Gastos indirectos	13 %	859.62 €
Beneficio Industrial	5 %	330.62 €
IVA	21 %	1388.62 €
COSTE TOTAL		9 191.33 €

Tabla 6.5: Coste final del proyecto

El coste total del proyecto es de:

**# NUEVE MIL CIENTO NOVENTA Y UN EUROS CON TREINTA Y TRES
CÉNTIMOS #**

Bibliografía

- [1] R. Navarro and P. Martí. *Apuntes Asignatura Ampliación de Mecánica de Fluidos.*, 2021.
- [2] Gerhard Venter Eugéne C. Joubert and Thomas M. Harms. *Computational simulation of the turbulent flow around a surface mounted rectangular prism*, 2015.
- [3] Siemens Digital Industries Software. *Simcenter STARCCM+ User Guide, version 2021.1.* Siemens, 2021.
- [4] A. J. Torregrosa and V. Dolz. *Apuntes Asignatura Mecánica de Fluidos*, 2021.
- [5] S. Deniz and Th. Staubli. *Oscillating rectangular and octagonal profiles: interaction of leading and trailing edge vortex formation*, 1997.
- [6] Atsushi Sakuda Atsushi Okajima, Donglai Yi and Tomohito Nakano. *Numerical study of blockage effects on aerodynamic characteristics of an oscillating rectangular cylinder*, 1997.
- [7] A. Shah S. Ul Islam, C. Y. Zhou and P. Xie. *Numerical simulation of flow past rectangular cylinders with different aspect ratios using the incompressible lattice Boltzmann method*, 2011.
- [8] Ahsan Kareem James Glimm Dahai Yu, Kyle Butler and Jiangang Sun. *Simulation of the Influence of Aspect Ratio on the Aerodynamics of Rectangular Prisms*, 2013.
- [9] Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (1997). Real decreto 488/1997, de 14 de abril, sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización (BOE-A-1997-8671).
- [10] Jefatura del Estado (1995). Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de riesgos laborales (BOE-A-1995-24292).