



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Diseño de generadores de capa límite atmosférica para el
túnel de viento WT5

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

AUTOR/A: Demetrio Sanz, Eduardo José

Tutor/a: García-Cuevas González, Luis Miguel

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA AERONÁUTICA

2022-2023

TRABAJO FIN DE MÁSTER



Diseño de generadores de capa límite atmosférica para el túnel de viento WT5

Eduardo José Demetrio Sanz

Tutor. Luis Miguel García-Cuevas González

Valencia, 12 de julio de 2023

Resumen

A lo largo del presente estudio se trata de, partiendo un de un modelo bibliográfico inicial desarrollado por Irwin, obtener un nuevo modelo capaz de describir con mayor precisión la capa límite planetaria. El objetivo de este ajuste es poder, en instancias posteriores, validarlo en el túnel de viento WT5 de la UPV.

Para ello, se comienza el estudio con una introducción en la que se plantea el modelo de Irwin. Dicho ajuste está basado en el uso de una ley potencial con tres parámetros a determinar α , δ y U_δ .

Posteriormente, se plantea la configuración CFD empleada para simular los diferentes casos. Se parte desde el planteamiento inicial y se finaliza el apartado con la configuración final empleada.

Los siguientes pasos del estudio consisten en el planteamiento de un caso inicial que trata de reproducir una capa límite de referencia. A partir de ese caso inicial, se realizan diferentes estudios modificando variables de interés del problema. Finalmente, se decide emplear modelos lineales obtenidos a partir de la modificación de la relación b/h de las espiras, el tamaño de los bloques simuladores de la rugosidad del terreno y la distancia entre dichos elementos.

Por último, se plantea la validación del modelo empleado a la vez que se muestran escenas significativas de los estudios CFD realizados.

Palabras clave: aerodinámica, CFD, capa límite planetaria, túnel de viento, espiras, rugosidad del terreno

Abstract

Throughout the present study, starting from an initial bibliographic model developed by Irwin, we try to obtain a new model capable of describing the planetary boundary layer more accurately. The objective of this adjustment is to be able, in later instances, to validate it in the WT5 wind tunnel of the UPV.

For this purpose, the study begins with an introduction in which the Irwin model is presented. This setting is based on the use of a potential law with three parameters to determine α , δ and U_δ .

Subsequently, the CFD configuration used to simulate the different cases is presented. We start from the initial approach and end the section with the final configuration used.

The next steps of the study consist of the approach of an initial case that tries to reproduce a reference boundary layer. From this initial case, different studies are carried out modifying variables of interest of the problem. Finally, it is decided to use linear models obtained by modifying the ratio b/h of the spires, the size of the blocks simulating the roughness of the floor and the distance between these elements.

Finally, the validation of the model used is proposed while showing significant scenes of the CFD studies carried out.

Key words: aerodynamics, CFD, planetary boundary layer, wind tunnel, spires, terrain roughness

Resum

Al llarg del present estudi es tracta de, partint un d'un model bibliogràfic inicial desenvolupat per Irwin, obtenir un nou model capaç de descriure amb major precisió la capa límit planetària. L'objectiu d'aquest ajust és poder, en instàncies posteriors, validar-lo en el túnel de vent WT5 de la UPV.

Per a això, es comença l'estudi amb una introducció en la qual es planteja el model d'Irwin. Aquest ajust està basat en l'ús d'una llei potencial amb tres paràmetres a determinar α , δ i U_δ .

Posteriorment, es planteja la configuració CFD empleada per a simular els diferents casos. Es parteix des del plantejament inicial i es finalitza l'apartat amb la configuració final empleada.

Els següents passos de l'estudi consisteixen en el plantejament d'un cas inicial que tracta de reproduir una capa límit de referència. A partir d'aqueix cas inicial, es realitzen diferents estudis modificant variables d'interès del problema. Finalment, es decideix emprar models lineals obtinguts a partir de la modificació de la relació b/h de les espires, la grandària dels blocs simuladors de la rugositat del terreny i la distància entre aquests elements.

Finalment, es planteja la validació del model emprat alhora que es mostren escenes significatives dels estudis CFD realitzats.

Paraules clau: aerodinàmica, CFD, capa límit planetària, túnel de vent, espires, rugositat del terreny

Índice

Índice de figuras	9
Índice de tablas	10
Tabla de nomenclatura	11
I Memoria	13
1. Introducción	14
1.1. Estado del arte	14
1.2. Definición de objetivos	17
2. Modelado CFD	19
2.1. Introducción al CFD	19
2.1.1. Historia del CFD	20
2.1.2. Ecuaciones de gobierno	21
2.2. Estructura de un estudio CFD	22
2.2.1. Preproceso	24
2.2.2. Solver	30
2.2.3. Post-proceso	31
2.3. Configuración CFD aplicada en este estudio	33
2.3.1. Creación de la geometría: <i>spires</i> y rugosidad del terreno	33
2.3.2. Dominio computacional	36
2.3.3. Mallado	36
2.3.4. Condiciones de contorno	37
2.3.5. Modelos seleccionados	37
2.3.6. Criterio de convergencia	38
2.3.7. Estudio de independencia de malla	38
2.3.8. Resultados y configuración final empleada	39
3. Planteamiento del estudio	43
4. Planteamiento de casos: estudios y análisis	47
4.1. Estudios iniciales: Influencia del número de espiras, filas de bloques y columnas de bloques	47
4.1.1. Análisis de resultados iniciales	48
4.1.2. Ajuste de las variables del problema	49

4.2. Primer estudio avanzado: tamaño de rugosidad y distancia entre dichos elementos . . .	51
4.2.1. Análisis de resultados de primer estudio avanzados	52
4.3. Segundo estudio avanzado: Variación de b/h	53
4.3.1. Análisis de resultados iniciales	54
4.3.2. Ajuste de las variables dependientes	54
4.4. Discusión	56
4.4.1. Recopilación de resultados	56
4.4.2. Modelo final propuesto	56
5. Resultados	59
5.1. Validación del modelo	59
5.2. Resultados CFD	60
6. Conclusión	64
6.1. Trabajo futuro	65
7. Referencias	67
A. Anexo	71
B. Anexo: Plano	72
II Pliego de condiciones	73
C. Pliego de condiciones	74
C.1. Definición y alcance del pliego	74
C.2. Condiciones y norma de carácter general	74
C.3. Condiciones particulares	74
C.3.1. Especificaciones técnicas	75
C.3.2. Especificaciones facultativas	75
C.3.3. Especificaciones económicas	75
III Objetivos de desarrollo sostenible y Huella de carbono	76
D. Objetivos de desarrollo sostenible	77
E. Huella de carbono	79

IV Presupuesto

80

F. Presupuesto

81

Índice de figuras

1.	Geometría de las <i>spires</i> definida por Irwin [1]	14
2.	Disposición de <i>spires</i> junto con rugosidad del terreno para determinar la capa límite planetaria [1]	15
3.	Diagrama de flujo de un proceso CFD	23
4.	Dominio computacional para un avión	25
5.	Malla estructurada (a) y no estructurada (b) [2]	25
6.	Posibles geometrías de las celdas	26
7.	Ejemplo de un ala mallada [3]	27
8.	Alcance de los modelos de turbulencia	29
9.	Convergencia por residuales	31
10.	Visualización de una simulación CFD	33
11.	<i>Sketch</i> base de las espiras parametrizado	34
12.	Extrusión base del <i>spire</i>	34
13.	Proceso final para la creación de las espiras	35
14.	Generadores de rugosidad del terreno	35
15.	Dominio computacional del estudio: túnel de viento WT5	36
16.	Geometrías situadas sobre el suelo del túnel	36
17.	Resultado estudio diferente número de celdas	39
18.	Configuración CFD final utilizada	40
19.	Efecto sobre la velocidad de los chaflanes sobre la capa límite	41
20.	Efecto sobre la intensidad de los chaflanes sobre la capa límite	41
21.	Comparativa inicial entre la Ley de Richard-Hoxey y la Ley de Irwin	44
22.	Post-proceso casos iniciales	48
23.	Post-proceso primer estudio casos avanzados	52
24.	Post-proceso segundo estudio casos avanzados	53
25.	Validación modelo lineal final	60
26.	Resultados CFD obtenidos	61
27.	Comparativa casos con uniformidad en la geometría de las espiras vs relación b/h de las espiras laterales modificada	71
28.	Plano túnel de viento WT5	72

Índice de tablas

1.	Tabla de nomenclatura	11
2.	Valores impuestos en la Ley de Richard y Hoxey	43
3.	Barrido de inicial parámetros de la Ley de Irwin	43
4.	Barrido de final parámetros de la Ley de Irwin	44
5.	Parámetros geometría de espiras y rugosidad del terreno	45
6.	Casos configurados para su estudio	47
7.	Ajuste coeficientes casos iniciales	48
8.	Error entre ajuste de los casos iniciales y ley de Irwin base establecida	49
9.	Ajuste U_δ	50
10.	Ajuste α	50
11.	Ajuste δ	50
12.	Estudios avanzados planteados	51
13.	Ajuste coeficientes casos avanzados	52
14.	Ajuste teórico casos avanzados	52
15.	Casos segundo estudio avanzado	53
16.	Ajuste coeficientes segundo estudio avanzado	54
17.	Ajuste teórico segundos casos avanzados	54
18.	Ajuste U_δ	55
19.	Ajuste α	55
20.	Ajuste δ	56
21.	<i>Offset</i> para el caso de referencia escogido	57
22.	Ajuste teórico seleccionado para la validación del modelo	59
23.	Ajuste de α y δ proporcionado por el modelo	59
24.	Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible	78
25.	Conceptos presupuesto	81
26.	Costes de recursos humanos	81
27.	Costes de recursos materiales	82
28.	Costes de licencia de software	82
29.	Otros costes	82
30.	Desglose presupuesto	82
31.	Coste total final	83

Tabla de nomenclatura

Símbolo	Significado	Unidades
U	Velocidad a la altura z	m/s
U_δ	Velocidad a delta $\gg z$	m/s
α	Exponente de la ley potencial	-
δ	Espesor de la capa límite	m
z	Distancia desde el suelo de la sección de estudio	m
h	Altura de las espiras	m
b	Base de las espiras	m
ψ	Coefficiente modelo de Irwin	-
β	Coefficiente modelo de Irwin	-
C_D	Resistencia rugosidad del terreno	N
C_f	Coefficiente de fricción	-
κ	Altura de los elementos simuladores de rugosidad	m
D	Distancia entre los elementos simuladores de rugosidad	m
U_*	Velocidad de fricción	m/s
u_h	Velocidad a altura de referencia h	m/s
$b_{traseira}$	Longitud base trasera espiras	m
Δ_x	Distancia desde $6h$ aguas abajo hasta punto de medida de la capa límite	m
F	Parámetro ecuaciones de Irwin	-
$\Delta\delta$	Incremento del espesor de la capa límite	m
z_0	Longitud de la rugosidad del terreno	m
H	Altura de la sección de estudio	m
κ_{hoxy}	Energía cinética turbulenta	N

Tabla 1: Tabla de nomenclatura

Parte I

Memoria

1. Introducción

La reciente adquisición de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) de un nuevo túnel del viento, el WT5, ha favorecido la posibilidad de desarrollar nuevos estudios. Enmarcado en este contexto, se ha decidido realizar este trabajo con el fin de desarrollar capas límites de perfiles similares al de una capa límite atmosférica a escala.

Con el propósito de crear este tipo de capas límites que requieren de mucha altura, se ha de utilizar elementos geométricos tales como espiras y bloques que permitan forzarla. En este sentido, la mayor parte de las investigaciones comienzan con un enfoque basado en la teoría de Irwin [1] (ver Subsección 1.1), ya que la sensación es que proporciona un buen punto de partida general. A partir de este paso, los científicos concuerdan en que la solución no suele ser perfecta y se ha de iterar hasta obtener la mejor posible.

Este estudio tratará, por tanto, de obtener un método que permita (de la forma más precisa posible), definir esas geometrías en función del perfil de velocidades deseado.

1.1. Estado del arte

Tal y como ha sido comentado, el enfoque principal del presente estudio toma como referencia el enfoque clásico de Irwin [1]. Este describe una técnica, cuyo fin principal radica en la utilización de diversas geometrías tales como espiras (*spires*) y elementos simuladores de la rugosidad del terreno para determinar el comportamiento de la capa límite planetaria.

En base a los diferentes estudios realizados y a la experiencia propia del autor, este decide utilizar unos *spires* cuya geometría está compuesta de una cara frontal triangular normal a la dirección del viento y una placa divisoria aguas debajo de la cara frontal y paralela a la dirección del viento, tal y como se muestra en la Figura 1. Irwin destaca que las principales ventajas del uso de este tipo de geometría son: su simpleza frente a otro tipo de disposiciones, la capacidad para proporcionar un *drag* adecuado y la poca sensibilidad que muestran el perfil medio de velocidades y las propiedades de la turbulencia ante la forma de dichas espiras.

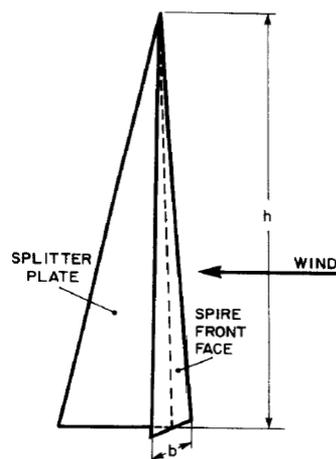


Figura 1: Geometría de las *spires* definida por Irwin [1]

Por otra parte, con el fin de obtener la capa límite deseada, es necesario añadir a las espiras unos elementos que simulan la rugosidad del terreno. Estos ayudan a mejorar las características de la misma, especialmente cerca del terreno. La disposición final de los *spires* junto con los elementos utilizados para simular la rugosidad del terreno se muestra en la Figura 2.

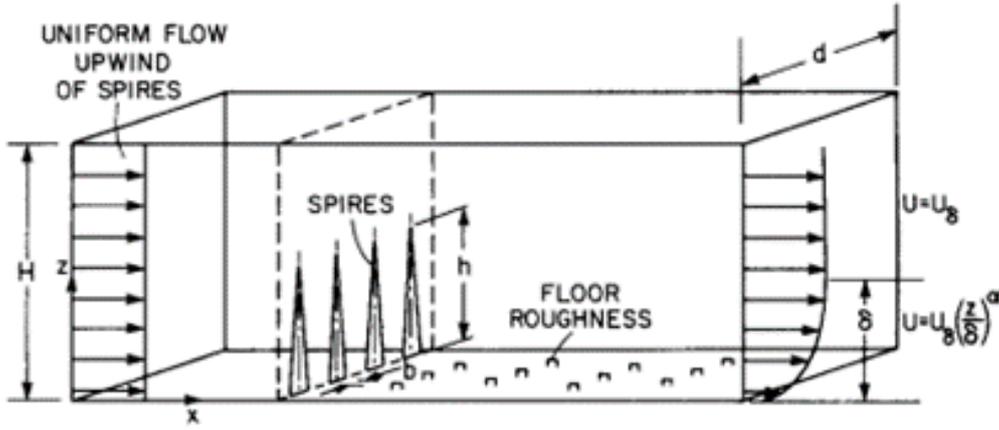


Figura 2: Disposición de *spires* junto con rugosidad del terreno para determinar la capa límite planetaria [1]

Tal y como se muestra en la Figura 2, el modelo impone un perfil de velocidad uniforme a la entrada de la sección de estudio que, con la contribución de las geometrías mencionadas, da lugar a la capa límite atmosférica buscada a una determinada distancia.

Con el fin de obtener una serie de expresiones que permitan realizar el diseño de dichas geometrías el autor estudia, en primer lugar, el balance de momento en la sección rectangular de estudio (ver Figura 2). Dicho balance se hace asumiendo flujo uniforme aguas arriba de las *spires* y que aguas abajo de las mismas se forma una capa límite que sigue la ley potencial de la Ecuación 1.

$$\frac{U}{U_\delta} = \left(\frac{z}{\delta}\right)^\alpha \quad (1)$$

Siendo:

- δ el espesor de la capa límite
- U la velocidad a la altura z
- U_δ la velocidad a $z \gg \delta$
- α el exponente de la potencia

Una vez elegidos los valores de δ y α , se puede determinar la altura de las espiras a través de la expresión mostrada en la Ecuación 2. Por otra parte, la relación entre la base y la altura de las espiras se muestra en la Ecuación 3 (teniendo en cuenta una separación lateral entre el centro de las espiras de $h/2$).

$$h = 1,39 \cdot \frac{\delta}{1 + \alpha/2} \quad (2)$$

$$\frac{b}{h} = 0,5 \cdot [\psi \cdot (H/\delta)/(1 + \psi)] \cdot (1 + \alpha/2) \quad (3)$$

Donde H representa la altura de la sección de estudio, y los parámetros ψ y β siguen las expresiones de la Ecuación 4 y Ecuación 5.

$$\psi = \beta \cdot \{[2/(1 + 2\alpha)] + \beta - [1,13\alpha/(1 + \alpha)(1 + \alpha/2)]\} / (1 - \beta)^2 \quad (4)$$

$$\beta = (\delta/H) \cdot \alpha / (1 + \alpha) \quad (5)$$

Resulta relevante destacar que la Ecuación 3 tiene incorporado el coeficiente de resistencia de las espiras referido al área frontal de las mismas. El autor destaca que el valor del mismo se suele situar en torno a 1,45 para rangos de $0,06 < b/h < 0,2$. Este coeficiente ya tiene incorporado la resistencia aportada por la cara trasera, cuyo impacto ha demostrado ser residual.

En base a diferentes estudios, se ha demostrado que para este enfoque, la capa límite atmosférica está en equilibrio a distancias de entorno a $6h$ aguas abajo de la sección de entrada. En este punto, el impacto de los elementos generadores de rugosidad del terreno no es el máximo, pero tampoco se puede considerar despreciable. En este sentido, el coeficiente de resistencia de la rugosidad del terreno sigue la expresión mostrada en la Ecuación 6 y depende de un coeficiente de fricción que sigue la Ecuación 7.

$$C_D = \frac{1}{2} \rho U_\delta^2 C_f \quad (6)$$

$$C_f = 0,136 \cdot [\alpha / (1 + \alpha)]^2 \quad (7)$$

Para que los elementos generadores de rugosidad produzcan el coeficiente de fricción necesario, han de tener unas determinadas dimensiones. Wooding [1] aporta una expresión para determinar la altura (κ) de los elementos en función de δ . Esta relación se muestra en la Ecuación 8.

$$\frac{\kappa}{\delta} = \exp \left\{ (2/3) \ln(D/8) - 0,1161 [(2/C_f) + 2,05]^{1/2} \right\} \quad (8)$$

Donde D es la separación entre dichos elementos.

En la etapa final de su estudio, Irwin menciona que el modelo establecido por la Ecuación 2 y la Ecuación 3 debía ser validado con la realización de estudios experimentales. El resultado de esta validación fue que, de manera general, el modelo cumplía con lo buscado. Además, la rugosidad del terreno fue ajustada en la mayoría de los casos por prueba y error antes que siguiendo el modelo propuesto por Wooding (ver Ecuación 8). De esta manera, se pudo corroborar que introducirla supone un factor importante pero no dominante, aportando alrededor de un 15 % de reducción en el parámetro b/h en el caso de $\alpha = 0,25$.

Por último, los estudios mostraron una capa límite desarrollada a una distancia $6h$ aguas abajo de las espiras. Dicha capa límite además se espera que crezca en espesor (δ) a distancias mayores debido a la contribución de la rugosidad del terreno.

A modo de pequeña conclusión se puede afirmar:

- El modelo propuesto por Irwin establece un buen punto de partida para el estudio de capa límite atmosférica. Para ello se ha de utilizar espiras y elementos generadores de rugosidad del terreno.
- Para determinar las dimensiones de estas geometrías se ha de seguir el modelo planteado en la Ecuación 2 y la Ecuación 3
- El modelo ha sido validado, obteniendo en general buenos resultados
- Se puede esperar una capa límite desarrollada a distancias de en torno a $6h$ aguas abajo de la sección de entrada
- Pese a que existen modelos para determinar el tamaño de los elementos generadores de la rugosidad del terreno, los estudios realizados han mostrado que no son perfectos y que su ajuste mediante prueba y error aporta mejores resultados

1.2. Definición de objetivos

Una vez presentado el conocimiento actual sobre la generación de capas límites atmosféricas, se procede a la definición de los objetivos de este estudio:

- El principal objetivo del mismo es determinar un método que permita, de la forma más precisa posible, definir las geometrías en función del perfil de velocidades buscado
- Desarrollar y validar el método a través de estudios de Mecánica de Fluidos Computacional (*CFD*)
- Como trabajo futuro, se propone validar el método con estudios experimentales desarrollados en el túnel WT5

2. Modelado CFD

A lo largo de este apartado se desarrolla la configuración CFD aplicada. Para ello, se realiza en primer lugar una introducción a la mecánica de fluidos computacional y, posteriormente, se desarrolla el trabajo realizado para plantear los diferentes casos estudiados. Cabe destacar que el estudio se ha realizado mediante el software Star CCM+.

Antes de continuar, se resalta que tanto la Subsección 2.1 como la Subsección 2.2 son extraídas del Trabajo Final de Grado realizado por el autor del presente estudio, Eduardo José Demetrio Sanz [4].

2.1. Introducción al CFD

Las siglas CFD se corresponden con *Computational fluid dynamics* o, en castellano, mecánica de fluidos computacional. Esta herramienta permite modelar de forma matemática fenómenos físicos en los que está involucrado un fluido y resolverlos numéricamente usando procesos computacionales [5].

Pese a que a partir de la propia definición de CFD, ya se puede tener una pequeña idea de lo útil que puede llegar a ser esta herramienta, a continuación, se enumeran algunas de las ventajas que ofrece [6][7]:

1. Coste: realizar simulaciones CFD suele ser más económico que un proceso experimental donde, entre otras cosas, se necesitan materiales, fabricación de la geometría deseada y tener una estación de trabajo. Sin embargo, para realizar una simulación CFD “solo” hace falta una licencia.
2. Tiempo: una simulación CFD permite realizar simulaciones en periodos de tiempo relativamente cortos.
3. Dimensiones: mientras que en una simulación CFD se puede plantear casos en cualquier tipo de escala, de tal forma que se puede ir modificando las dimensiones de cualquier geometría, en un proceso experimental esto no se puede realizar.
4. Repetitividad: un proceso CFD siempre que simule el mismo caso (misma malla, condiciones de vuelo etc.), tendrá una repetitividad total. Por el contrario, en un proceso experimental es más complicado encontrar esta cualidad.
5. Información: las simulaciones CFD permiten la obtención de una cantidad de información mucho más detallada que cualquier proceso experimental.

Además, un proceso CFD permite realizar simulaciones cuyo resultado sea mucho más aproximado que prácticamente cualquier solución analítica que se plantee, las cuales en muchas ocasiones se ven limitadas por las hipótesis que se necesitan tomar para ser desarrolladas.

Pese a tener todas estas ventajas, la mecánica de fluidos computacional también tiene una serie de factores negativos tales como [8]:

1. Debido a su gran complejidad, la mecánica de fluidos resulta difícil de dominar: es necesario tener conocimientos de una gran cantidad de ramas diferentes tales como la dinámica de fluidos, métodos numéricos y CAD. La experiencia en su uso resulta un parámetro fundamental para su mejor comprensión.
2. Potencia requerida para realizar el cálculo: en función de la complejidad del caso CFD, este puede requerir de una gran potencia de cálculo para ser resuelto.
3. Existe la posibilidad de realizar simulaciones y obtener resultados muy llamativos (por ejemplo, en las escenas de visualización) que hagan creer que son correctos. Sin embargo, eso no siempre es así y hay que asegurar que el caso está ofreciendo los resultados buscados.

2.1.1. Historia del CFD

Resulta de utilidad realizar un breve repaso a la evolución que ha sufrido la mecánica de fluidos computacional desde sus orígenes hasta la actualidad. Los orígenes de la mecánica de fluidos computacional se sitúan a principios del siglo XX. En ese momento, la mayor parte de los científicos (Richardson, Courant, von Neumann, entre otros) se centraban en tratar de resolver los fenómenos de discontinuidad que se producen en un fluido en un espacio discreto [9].

A partir de los años 40, debido a los grandes avances informáticos, se produce una transición y se comienzan a realizar los primeros cálculos a ordenador cuando ENIAC (acrónimo que da nombre a una de las primeras computadoras capaces de resolver un gran número de problemas numéricos [10]) fue instalada en Aberdeen. Además, en *Los Alamos National Laboratory* se implementaron los primeros métodos de elementos finitos para resolver ecuaciones diferenciales por ordenador. En ese mismo laboratorio Harlow propuso el método denominado como *particle in cell* en el año 1957 [9], el cual sentaría la base para el futuro desarrollo del CFD. El método propuesto consistía en que, mediante una combinación de la descripción Lagrangiana y Euleriana de los fluidos, resolver las ecuaciones dividiendo el dominio del fluido en celdas Eulerianas. El cálculo se realizaba a través de una secuencia temporal finita de pasos.

A partir de estos primeros avances, la mecánica de fluidos computacional no ha parado de evolucionar. Destacan, entre otros, los siguientes acontecimientos [9]:

1. El estudio realizado por Lees L (*Supersonic separated and reattaching laminar flows*), el cual se tiene como la primera investigación que resolvía problemas aerodinámicos complejos tales como la interacción entre la capa límite y ondas de choque.
2. Davis resolvió la ecuación de la capa límite multi-dimensional para flujo compresible, obteniendo una solución robusta y precisa.
3. La primera estructura organizada y dedicada en exclusiva al CFD fue idea de Dean Chapman quien por aquel entonces era el Director del departamento de Ciencias Aeronáuticas de la NASA. Juntó a los mejores científicos del momento y, posteriormente, otro gran número de ellos formaron parte del proyecto. En el *Ames Research Center* (de la NASA) no sólo se implementó el estándar para la investigación científica en CFD, sino que también ha establecido el espíritu colaborativo que existe en la comunidad de científicos que trabajan con CFD.
4. La comercialización de programas CFD comienza en la década de los 80 [5].

Como se puede deducir de los diferentes acontecimientos históricos, el CFD ha sufrido (y continúa) una constante evolución. En la actualidad, es una herramienta cada vez más extendida dentro de la investigación científica en cualquier campo de la ingeniería. A modo de ejemplo, en la industria aeroespacial, la mecánica de fluidos computacional es utilizada para predecir de forma prácticamente completa el comportamiento aerodinámico del avión incluyendo factores tales como la sustentación, resistencia, acústica y comportamiento estructural entre otros. Además, los softwares de CFD son capaces incluso de abarcar el proceso de diseño de los diferentes elementos.

Por otra parte, de cara al futuro y, debido a que cada vez existe un mayor número de usuarios que trabajan con CFD, se plantean una serie de desafíos que se han de lograr resolver [11]:

1. “Democratización”: hacer el producto más sencillo de entender, de tal forma que no sólo las personas altamente cualificadas sean capaz de comprender el proceso CFD.
2. Automatización del trabajo: aún en la actualidad, CFD requiere de una gran parte de trabajo de la persona que está haciendo uso del programa: crear el modelo en CAD, crear la malla, correr la simulación etc. De cara al futuro el objetivo es que CFD se pueda llegar a convertir en algo similar a una calculadora, es decir, que, sólo introduciendo una serie de parámetros, el programa realice los cálculos oportunos y proporcione un resultado.

3. Integración del código: otro de los objetivos es que CFD sea capaz de integrar su código con otros códigos CAE de tal forma que se puedan combinar entre ellos.
4. Optimización: que el programa proporcione resultados de forma más sencilla.
5. Computación en la nube: evolucionar hacia realizar los cálculos en la nube.
6. Tiempo: el objetivo es que CFD sea lo más rápido posible en dar una solución.
7. Softwares de código libre: hoy en día, para la mayor parte de los códigos CFD, es necesario pagar por una licencia. Pese a que existen softwares de código libre en CFD (como OpenFOAM), la aparición de nuevos códigos libres es necesario para hacer la mecánica de fluidos más accesible a todos los usuarios.

2.1.2. Ecuaciones de gobierno

Las ecuaciones que gobiernan los procesos CFD son las conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. Estas fueron desarrolladas de forma independiente por G.G. Stokes en Inglaterra y M. Navier en Francia a principios del siglo XIX y describen cómo están relacionadas la velocidad, temperatura, presión y densidad de un fluido en movimiento [12]. De forma teórica, estas ecuaciones forman un sistema acoplado de ecuaciones diferenciales, el cual podría llegar a ser resuelto para un determinado fluido utilizando diversos métodos de cálculo. Sin embargo, en la práctica, son demasiado complejas como para ser resueltas de forma analítica. Es por esto por lo que se usan métodos computacionales como el CFD para resolver de forma aproximada estas ecuaciones.

El mencionado sistema consta de 5 ecuaciones de conservación, 4 variables independientes y 6 variables dependientes [12]:

1. Ecuaciones de conservación:
 - Conservación de la masa
 - Conservación del momento (3 componentes)
 - Conservación de la energía
2. Variables independientes:
 - Las coordenadas espaciales (x, y, z)
 - El tiempo (t)
3. Variables dependientes:
 - Presión (p)
 - Temperatura (T)
 - Densidad (ρ)
 - Velocidad $(\vec{U}(x, y, z))$

A continuación, se muestra la forma que tienen las ecuaciones de conservación. También se desarrolla el significado que tiene cada uno de los términos que forman parte de estas.

- Ecuación de conservación de la masa: también es conocida como ecuación de continuidad. Como se puede deducir de su propio nombre, dice que la masa se conserva. Viene descrita por la expresión mostrada en la Ecuación 9 [7]:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

- Ecuación de conservación del momento (3 componentes): esta ecuación está basada en la segunda Ley de Newton ($\vec{F} = m \cdot \vec{a}$) [13]. Su expresión se muestra en la Ecuación 10:

$$\underbrace{\rho \frac{\partial U_j}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho U_i \frac{\partial U_j}{\partial x_i}}_{II} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_j}}_{III} - \underbrace{\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}}_{IV} + \underbrace{\rho g_j}_V \quad (10)$$

Donde cada uno de los términos representa:

- I. Término transitorio
- II. Término convectivo
- III. Fuerzas de presión
- IV. Término difusivo
- V. Fuerzas másicas

- Ecuación de conservación de la energía: está basada en el principio de conservación de la energía. En termodinámica, es lo que se conoce como Primera Ley de la Termodinámica [13]. Se rige por la expresión de la Ecuación 11:

$$\underbrace{\rho c_\mu \frac{\partial T}{\partial t}}_I + \underbrace{\rho c_\mu U_i \frac{\partial T}{\partial x_i}}_{II} = - \underbrace{P \frac{\partial U_i}{\partial x_i}}_{III} + \underbrace{\lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2}}_{IV} - \underbrace{\tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_i}}_V \quad (11)$$

Donde cada uno de los términos representa:

- I. Término transitorio
- II. Término convectivo
- III. Trabajo de presión
- IV. Término difusivo
- V. Transferencia de energía mecánica a calor

2.2. Estructura de un estudio CFD

Toda simulación CFD, se ha de realizar siguiendo un determinado orden. Dentro de los procesos de simulación, existen tres grandes apartados:

1. Pre-proceso
2. Solver
3. Post-proceso

Sin embargo, antes de comenzar cualquier proceso CFD, el primer paso a realizar es trazar una estrategia y planificación en la que se definan [6][14]:

- Objetivos del estudio: se ha definir claramente cual es el objetivo del estudio realizado. Esto abarca factores tales como precisión, tipo de resultados que se esperan obtener (cuantitativos o cualitativos), tipo de estudio realizado (paramétrico o una única simulación) entre otros. Estos objetivos se han de marcar teniendo en cuenta las limitaciones que se tienen a la hora de realizar la simulación. Factores tales como la capacidad computacional de la que se disponga, el tiempo disponible y la experiencia previa son ejemplos de las limitaciones de un estudio CFD.

- Condiciones físicas del estudio: se ha de plantear bajo que condiciones físicas (presión, velocidad, densidad etc.) se pretende realizar el estudio. Además, se ha de tener en cuenta los fenómenos físicos que se producen bajo esas condiciones: caso estacionario o no estacionario, flujo compresible o incompresible, laminar o turbulento etc.
- Geometría: se ha de tener una idea clara de la geometría que se pretende estudiar.

Muchas de las cuestiones que se plantean en el proceso comentado se pueden definir de “manera libre” por el usuario encargado de realizar la simulación (geometría, tipo de simulación, condiciones de vuelo etc). Sin embargo, para definir otros factores tales como los fenómenos físicos que se puedan producir, es fundamental hacer uso de bibliografía y documentación previa acerca de estudios similares al que se pretende realizar, de tal forma que se pueda comprender de una forma completa el problema a estudiar.

Una vez los objetivos del estudio están definidos, se puede comenzar con el proceso CFD. Antes de continuar con la explicación de cada uno de los pasos de forma independiente, se muestra en la Figura 3 un diagrama de flujo que recoge todos los pasos que se han de seguir (estos pasos se corresponden con los desarrollados por P. Martí en los apuntes de *Ampliación de Mecánica de Fluidos*[15]).

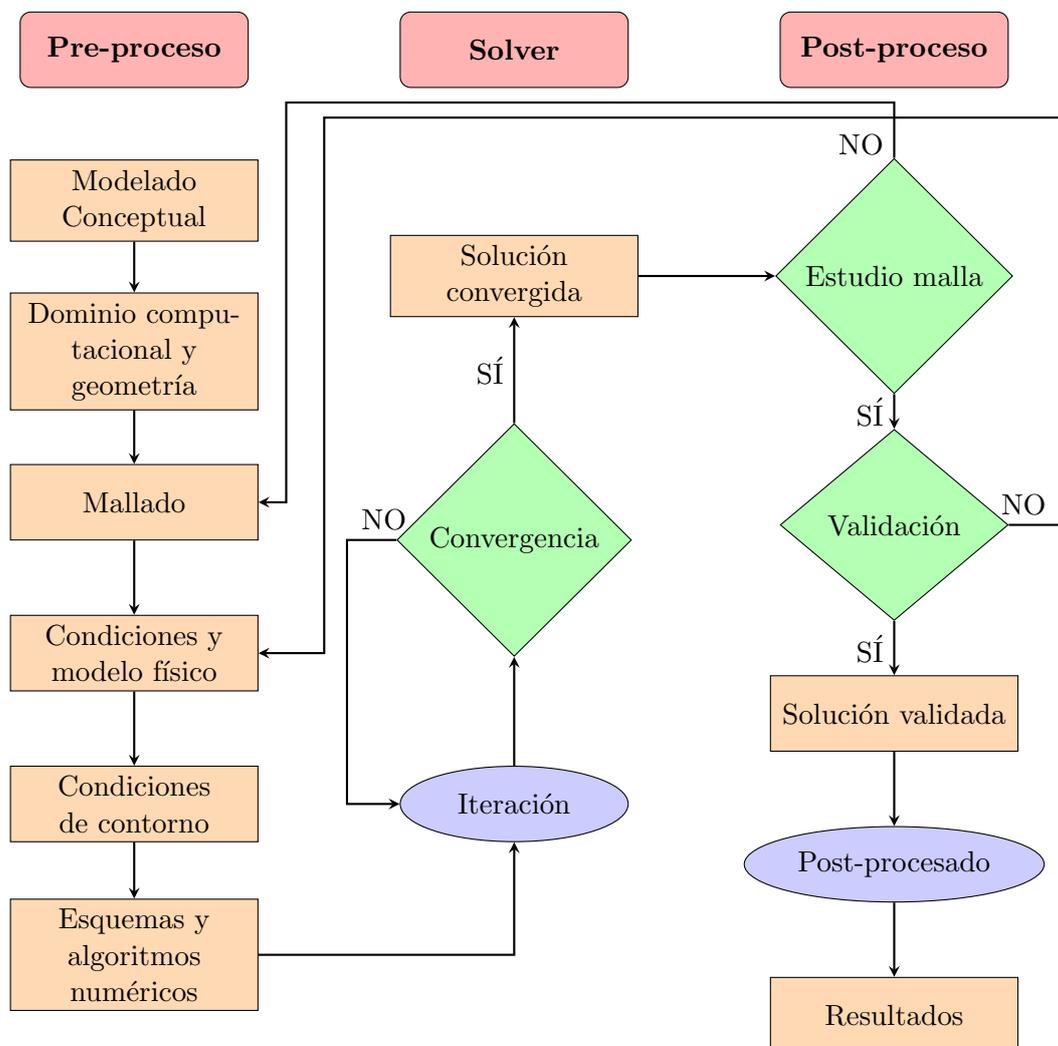


Figura 3: Diagrama de flujo de un proceso CFD

2.2.1. Preproceso

Tal y como se ha comentado, este es el primer bloque de pasos a realizar una vez se inicia la preparación de una simulación. Además, la calidad de un análisis en CFD viene determinada (en su gran mayoría) por la calidad de la configuración del caso. O lo que es lo mismo, el pre-proceso resulta fundamental en los resultados que se obtenga, ya que cuanto mejor sea la configuración del mismo, mayor precisión tendrán los resultados obtenidos. Por otra parte, una correcta planificación del caso juega un rol fundamental en este bloque de pasos, ya que, si se ha comprendido el problema físico del caso, se podrá realizar una configuración de calidad del mismo.

Dentro del pre-proceso, los pasos a realizar son:

2.2.1.1 Geometría y dominio computacional

En primer lugar, se ha de definir la geometría de estudio en CAD (*Computer-Aided Design and Drafting*). Es decir, mediante algún software de diseño asistido por ordenador. Un buen modelo de la geometría es fundamental para que no se produzcan problemas en pasos posteriores (como el mallado) de la simulación. Se ha de procurar que sea un cuerpo (*body*) totalmente cerrado, en el que no falte ninguna cara o existan huecos.

El siguiente paso a realizar es definir el dominio computacional. Esto es, definir la porción del espacio donde se pretende realizar la simulación CFD [16]. A este dominio se le asignan condiciones de contorno en cada una de sus paredes y, posteriormente, se discretiza en una malla.

Mientras que en flujo interno es la propia geometría la que define el tamaño del mismo, en flujo externo es necesario asignarle unas determinadas dimensiones. Por lo general, la norma que se ha de seguir es que “el dominio se encuentre lo suficientemente lejos de la región de interés” [15]. Esto se hace con el fin de que el flujo se pueda desarrollar totalmente y que ni el dominio ni las condiciones de contorno asignadas interfieran en la solución que se obtiene (que no alteren el desarrollo del flujo).

Como en todo proceso CFD, la experiencia es de gran ayuda para determinar de forma correcta el dominio que se ha de establecer. A su vez, existen una serie de pautas de referencia para dimensionar el dominio computacional (en flujo externo) [15][16]:

- Al menos, 5 cuerdas aguas arriba del perfil
- Entre 5 y 20 cuerdas aguas abajo del perfil
- Al menos, 5 cuerdas a las paredes superiores e inferiores al perfil
- Al menos, 2 veces la envergadura a cada lado del perfil

En la Figura 4 se muestra un ejemplo de cómo quedaría el dominio computacional definido para un avión [17]:

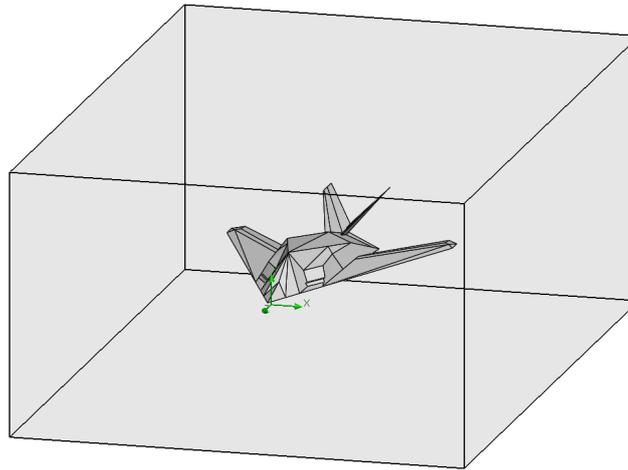


Figura 4: Dominio computacional para un avión

2.2.1.2 Mallado

El proceso de mallado consiste en realizar una discretización del dominio computacional, es decir, se divide el volumen de control en elementos de un tamaño menor (ver Figura 7). De esta forma, se logra dividir el dominio principal en un conjunto de subdominios de un tamaño menor sobre los cuales se resolverán las ecuaciones de gobierno.

Existen diferentes tipos de mallado. Principalmente, estas pueden ser [18]:

1. Estructuradas: se caracteriza por que las celdas están conectadas entre ellas de forma regular. Además, todos los puntos de la malla son identificables de forma inequívoca a través de los índices i, j, k [19]. La forman cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.
2. No estructuradas: se caracteriza por una conexión irregular entre celdas, de tal forma que estas no son identificables de forma sencilla a través de los índices i, j, k . El programa necesita guardar la conexión entre celdas para cada una de ellas, lo que supone que necesita un mayor espacio de almacenamiento de datos.
3. Híbridas: contienen partes de malla estructurada y partes no estructuradas.

De forma habitual, una malla estructurada requiere un tiempo de usuario de mallado mayor, pero el tiempo de cálculo (coste computacional) se reduce. Por el contrario, una malla no estructurada requiere un menor tiempo de mallado, pero el coste computacional aumenta [15].

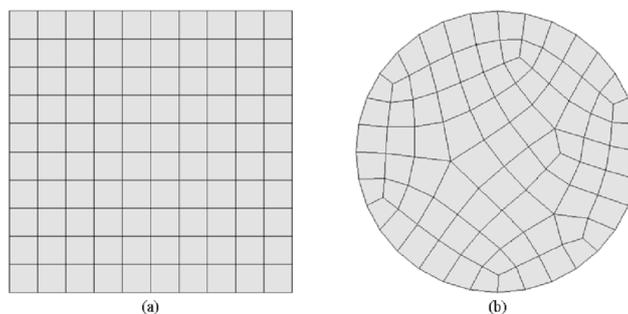


Figura 5: Malla estructurada (a) y no estructurada (b) [2]

A su vez, las celdas podrán tener diferentes configuraciones geométricas (ver Figura 6). En función de cual sea la configuración de las mismas, se necesitará un mayor o menor número de elementos. Por

ejemplo, los tetraedros necesitarán de 5 a 8 veces más celdas que una malla formada por poliedros para conseguir la misma precisión. Sin embargo, un menor número de elementos también supone menor precisión en el cálculo por lo que se ha de buscar un equilibrio en función de las necesidades del estudio realizado [20].

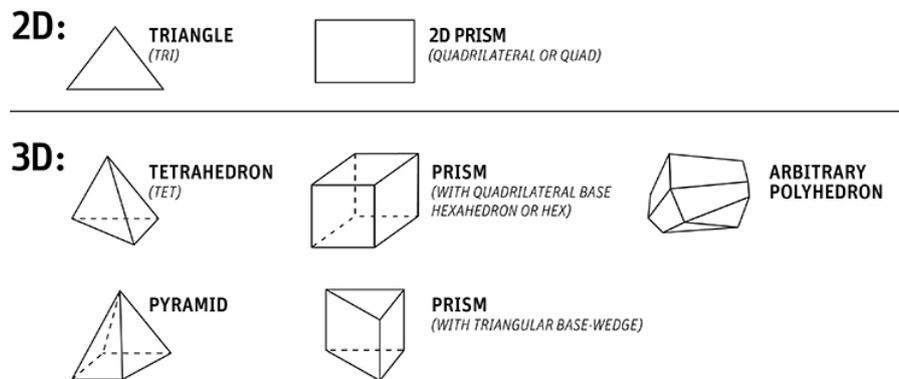


Figura 6: Posibles geometrías de las celdas

Como se puede deducir de lo comentado en el apartado, el mallado constituye una parte fundamental de un estudio CFD. Además, determina aspectos fundamentales para la solución final tales como [15]:

1. Coste computacional: cuanto mayor sea el número de celdas de la malla, mayor será este parámetro.
2. Precisión: una malla de mayor calidad, la solución obtenida en el post-proceso será más óptima, se parecerá más al caso real que está siendo simulado.
3. Tasa de convergencia: asociado a los otros dos puntos se encuentra la tasa de convergencia. Una malla de mayor calidad conseguirá obtener una convergencia del caso mejor.

Resulta importante tener en cuenta estos parámetros a la hora de definir la malla con la que se va a trabajar. En función del objetivo final del trabajo realizado y de los medios de los que se disponga, se trabajará con una malla de mayor o menor calidad. Esto es debido a que, a medida que se trabaja con mallados de mayor exigencia, el coste computacional aumentará, los cálculos llevarán un mayor tiempo y, si se ha procedido de manera adecuada, los resultados serán más precisos.

A continuación, se muestra en la Figura 7 como quedaría un ala una vez se ha mallado:

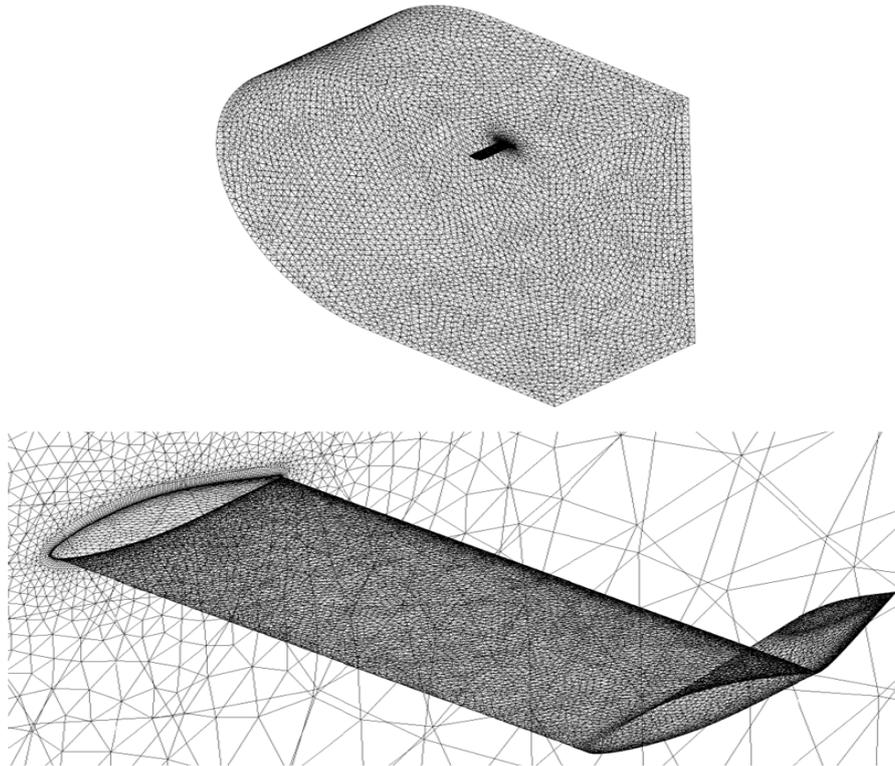


Figura 7: Ejemplo de un ala mallada [3]

2.2.1.3 Condiciones y modelo físico

Otro de los aspectos fundamentales a la hora de configurar una simulación de mecánica de fluidos computacional son los diversos fenómenos físicos que se puedan producir y las propiedades del fluido. Para especificar estos parámetros en el programa se ha de entrar en el apartado de *Select models*.

En primer lugar, se ha de definir el material con el que se trabaja, ya que este puede ser un líquido, gas o sólido. Además, se ha de especificar si se trabaja en un caso bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Posteriormente, los otros dos modelos relevantes a seleccionar son la ecuación de estado y el modelo de turbulencia:

- Compresibilidad [15]: para $M < 0,3$ se suele asumir que el flujo es incompresible ($\rho = cte$), por tanto, el modelo a seleccionar sería *constant density*. Para números de Mach superiores, se ha de definir una ecuación de estado:

- Gas ideal: modelo exclusivamente para gases. Sigue la ley de gases ideales para expresar la densidad como una función de la temperatura y la presión (Ecuación 12).

$$\rho = \frac{p}{RT} \quad (12)$$

Donde R es la constante universal de los gases ideales.

- Gas real: permite tener en cuenta comportamientos no ideales tales como efectos de compresibilidad, calor específico variable y fuerzas de van der Waals entre otros [21]. Esto no se tiene en cuenta en el modelo de gas ideal.
- Modelo de turbulencia: a día de hoy, los conocimientos que se tienen de la turbulencia aún son bastante escasos. En muchas ocasiones la elección del modelo de turbulencia está supeditada a bibliografía o a estudios de independencia del modelo de turbulencia.

Como ha sido comentado, los conocimientos que se tienen acerca de la turbulencia en la actualidad son insuficientes y no existe un modelo universal de turbulencia. Con el fin de tratar de

resolver este problema, se han diseñado modelos computacionales que resuelven la turbulencia haciendo uso de ciertas simplificaciones [6][22][23]:

- *Direct Numerical Simulation* (DNS): es el más completo en cuanto a los resultados que ofrece ya que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes de forma directa, utilizando únicamente las discretizaciones numéricas como simplificación. El principal problema que tiene es que requiere de una malla demasiado exigente (número de celdas muy elevado).
- *Large Eddy Simulations* (LES): filtra las ecuaciones de Navier-Stokes y resuelve las grandes escalas (grandes torbellinos) mientras que para las escalas más pequeñas utiliza modelos aproximados.
- *Reynolds Averaged Navier Stokes* (RANS): modela todas las escalas de turbulencia haciendo un promediado de las ecuaciones del fluido. Al realizar este promediado, se obtienen una serie de términos adicionales los cuales necesitan de la adición de otras ecuaciones que permitan el cierre del problema. La mayor dificultad para el cierre del problema se encuentra en determinar las ecuaciones que se utilizan para resolver el tensor de tensiones (τ_{ij}), el cual dependerá de el coeficiente de viscosidad dinámica (μ_t) a través de la expresión de la Ecuación 13:

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \bar{u}) \right) \quad (13)$$

Existen diferentes modelos RANS cuyo objetivo radica en obtener el coeficiente de viscosidad dinámica de tal forma que se pueda cerrar el problema. Dentro de los más populares destacan:

- Spalart-Allmaras [24]: modelo de una única ecuación. Este modelo ha sido desarrollado enfocándose en flujos aerodinámicos, sobre todo en flujos subsónicos alrededor de alas. Obtiene buenos resultados en la estela donde domina la vorticidad.
- Modelo $k - \epsilon$ [25]: modelo de dos ecuaciones. Incluye dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades turbulentas del flujo. La primera variable transportada es la energía cinética (k) y la segunda es la disipación turbulenta (ϵ). Su mejor aplicación es en casos de flujos de capa límite con gradientes de presión adversos pequeños.
- Modelo $k - \omega$ [6][26]: modelo de dos ecuaciones. Al igual que en el caso anterior, incluye dos ecuaciones adicionales de transporte. La primera variable transportada es la energía cinética (k) y la segunda es la disipación turbulenta específica (ω). Al contrario que el modelo $k - \epsilon$, este sí que funciona de manera correcta ante grandes gradientes de presión adversos. Por el contrario, su mayor contra es que el modelo tiene una gran sensibilidad al valor de ω en flujo libre.

El uso de este modelo (RANS) es relativamente común en ingeniería debido a que obtiene resultados aceptables y requiere de un menor coste computacional en términos de hardware, tiempo computacional y recursos que necesita con respecto a cualquiera de los otros dos modelos.

En la Figura 8 se muestra una comparación del alcance que tienen cada uno de los modelos de turbulencia.

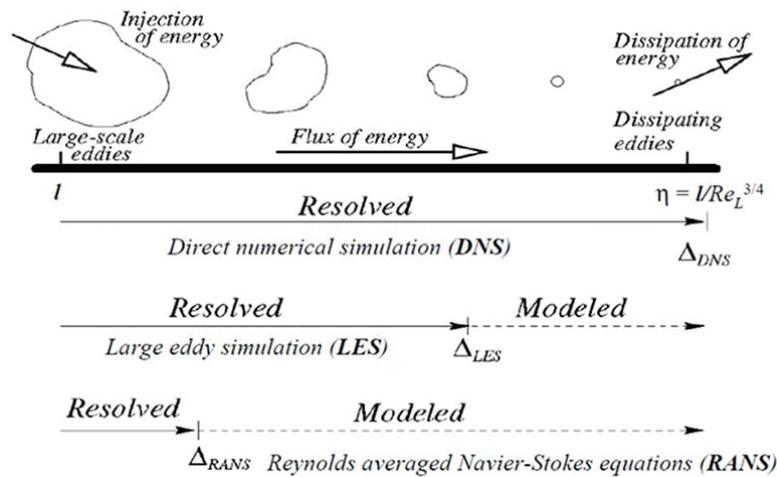


Figura 8: Alcance de los modelos de turbulencia

2.2.1.4 Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno definen cómo un sistema interactúa con su entorno [27]. Al final, la función de las condiciones de contorno es llevar la influencia del “mundo externo” al dominio de la simulación. Tal y como comenta Babak Gholami en su blog [28], a nivel teórico, se pueden ver las condiciones de contorno como restricciones aplicadas a las ecuaciones de gobierno del sistema.

En primera instancia, se pueden clasificar las condiciones de contorno en:

1. Condición de Dirichlet: también es conocida como condición fija. Es utilizada para imponer el valor de una variable sobre ese contorno. Por ejemplo, si se utiliza una condición de no-slip (no deslizamiento) se está imponiendo que la velocidad es nula, por lo que es una condición de Dirichlet.
2. Condición de Neumann: en este caso, no se impone el valor de la variable, sino que se impone el valor de la derivada sobre el contorno. Se utilizan cuando se necesita establecer una determinada tasa de variación de una variable. A modo de ejemplo, si se establece la condición de flujo completamente desarrollado en un *outlet* (salida) se está estableciendo que el gradiente de las variables flujo ha de ser nulo.
3. Condición de Robin: esta condición es una combinación de las dos anteriores, por tanto, especifica una combinación del valor de la variable y su derivada en el contorno. Su complejidad es notablemente superior a las otras dos opciones mencionadas.

A cada una de las paredes del dominio se le ha de aplicar la condición de contorno que mejor se adapte al problema estudiado. Dentro de las diferentes opciones que suelen permitir los códigos de mecánica de fluidos computacional destacan las siguientes condiciones de contorno[27]:

- *Velocity inlet/outlet*: esta condición de contorno fija el gradiente de presiones a 0 y establece el valor de la velocidad del flujo a la entrada o salida del dominio. En flujo incompresible no es necesario incluir la temperatura mientras que para flujo compresible sí que hay que especificar su valor.
- *Pressure inlet/outlet*: fija el valor de la presión en el *inlet* o *outlet* (entrada o salida). Normalmente se combina con una condición de *velocity inlet* o *outlet*. De tal forma que, si en el *inlet* se establece la condición de *velocity inlet*, en la salida se establece *pressure outlet* y viceversa.

- *Wall*: condición de contorno de pared. Su principal característica es que el fluido no puede atravesar la pared. Si la pared no es porosa, la velocidad normal será nula. Por otra parte, si el flujo es viscoso, la velocidad tangencial será nula (pared de no deslizamiento) [15]. Otro tipo de paredes que se pueden establecer son *moving wall* en la cual se tiene una superficie en movimiento (se deberá establecer el valor de la velocidad tangencial) o pared con deslizamiento (*slip*) lo cual simula pared sin fricción.
- Simetría: es utilizada cuando la geometría de estudio y el desarrollo del flujo tienen una simetría tipo “espejo”. La componente normal de todas las variables se establece nula. Normalmente se utilizan debido a que permiten reducir el dominio a la mitad lo que supone tener un menor número de celdas.
- *Free-Stream*: la definición aportada en el *user guide* de Star CCM+ [21] para esta condición es que representa el contorno de una burbuja de fluido alrededor de un cuerpo sólido. Normalmente, esta condición se aplica en fronteras lejanas al cuerpo (*far field*). Solo es compatible con modelos en los que se haya seleccionado gas ideal.
- Otras condiciones de contorno que se utilizan con menor frecuencia son: *Mass flow inlet*, *stagnation inlet* y *flow split outlet*.

2.2.2. Solver

Una vez el caso está plenamente configurado, se puede proceder a su resolución. Tal y como ha sido comentado anteriormente (en la Subsubsección 2.1.2) las ecuaciones que se resuelven de forma numérica en un proceso CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes. El primer paso que se realiza es discretizar las ecuaciones de transporte.

Existen diversos métodos que realizan la discretización de las ecuaciones de transporte. Dentro de estos, uno de los más utilizados es el *Finite Volume Method* (FVM). Su gran uso dentro de la comunidad CFD es debido a que presenta diversas ventajas con respecto a otros métodos de discretización (como el *Finite Difference Method* (FDM)) tales como que puede ser utilizado para cualquier tipo de malla (independientemente de si esta es estructurada o no estructurada) o en casos en los que exista discontinuidad en el flujo [13]. El FVM se basa en dividir el dominio computacional en un número determinado de volúmenes de control que son cada una de las celdas de la malla. En el centro de cada uno de estos (centro de las celdas) se aplican las ecuaciones de conservación. Para cada uno de los volúmenes de control se obtiene una ecuación algebraica y, por tanto, se tendrá un sistema cuyo número de ecuaciones algebraicas será igual al número de celdas. Finalmente, el sistema de ecuaciones algebraicas se ha de resolver utilizando métodos numéricos, en este caso iterando.

Una vez comentado el proceso que se utiliza para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, se prosigue con la explicación de este apartado (Solver). El siguiente paso es, por tanto, realizar el cálculo. Este proceso está dividido en dos partes:

1. Inicialización de la solución: este proceso consiste en dar un valor inicial a todas las magnitudes del estudio de tal forma que el modelo CFD pueda establecer una estimación inicial del valor final que estas puedan tener. En otras palabras, consiste en aplicar las condiciones iniciales a la simulación.
2. Proceso iterativo: en este momento se comienza la resolución del sistema de ecuaciones. Esta se hace mediante métodos iterativos.

La única cuestión que queda por resolver es cuándo se ha de detener el proceso iterativo. Para determinarlo se ha de establecer un criterio de convergencia.

2.2.2.1 Criterio de convergencia

Los criterios de convergencia sirven para determinar cuándo la solución ha convergido, es decir, cuando se puede asumir que la solución proporcionada por el programa es suficientemente precisa y, por tanto, se puede detener la simulación. De esta manera, el criterio de convergencia ha de estar ligado a un determinado nivel de precisión, el cual se establece en función de las necesidades de cada caso particular [29].

Como se ha comentado, los criterios de convergencia varían en función de cada caso. Existen diversos métodos para establecerlos, algunos ejemplos son [30]:

- Valor de los residuales: los residuales cuantifican el error que existe en la solución del sistema de ecuaciones. Pese a que nunca serán nulos, cuanto menor sea su valor, la solución tendrá una mayor precisión. Habitualmente, se suele buscar valores de los residuales del orden de $1E-5 \sim 1E-6$ para afirmar que la solución puede haber convergido. En la Figura 9 se muestra un ejemplo de la gráfica de residuales de un caso CFD convergido.

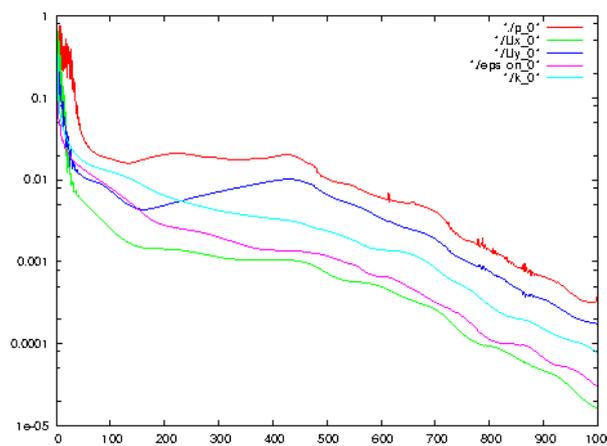


Figura 9: Convergencia por residuales

Este criterio es muy utilizado, pero no es de gran seguridad. Por esto, lo más aconsejable es, si se utiliza este método como criterio de convergencia, complementarlo con cualquier otro método [31].

- Valor de variables de interés: a lo largo del proceso iterativo, las variables de interés del problema tienden a su valor final. Se puede realizar una monitorización de los valores que se obtienen tras cada iteración y determinar la variación máxima que se pueda producir entre iteraciones para establecer la convergencia. Si se produce una oscilación $< 0,1\%$ entre oscilaciones, el caso suele haber convergido [31] (este criterio se puede hacer más o menos flexible en función de la precisión buscada).
- Imbalances de la solución: se trata de asegurar que efectivamente la solución que se ha obtenido cumple las ecuaciones de conservación. Para ello, se calculan los imbalances de las ecuaciones de conservación en el volumen de control del dominio fluido. Este valor nunca llegará a ser nulo, pero sí que se busca que su valor sea el menor posible.

2.2.3. Post-proceso

El post-proceso abarca el último bloque de pasos de una simulación CFD (Figura 3). Dentro de los pasos a realizar, el primero es estudiar la sensibilidad de la malla.

Tal y como se ha ido comentando, la malla es uno de los elementos fundamentales de un estudio CFD y su objetivo fundamental radica en tener un compromiso entre [32]:

- Bajo coste computacional
- Bajo error de discretización

Pese a que en este punto se puede haber obtenido una solución que cumpla los criterios de convergencia (solución convergida), es necesario asegurar que el resultado obtenido es independiente de la resolución de la malla [33]. Para determinarlo, se realiza lo que se conoce como estudio de independencia de malla. Este estudio consiste en, a partir del mallado inicial, aumentar (al menos) 1.5 veces el número de elementos (celdas) y volver a calcular el caso. Una vez se ha realizado esto, se ha de comparar el resultado obtenido para las variables de interés del problema. Si el resultado obtenido cumple con una cierta tolerancia, la cual ha de estar establecida por el usuario, entonces se puede afirmar que se ha alcanzado la independencia de malla. De forma habitual, se suele buscar un error inferior al 1 %.

Por otra parte, otro aspecto que se ha de tener en cuenta es que, debido a las decisiones tomadas en el proceso de configuración de la simulación, el resultado obtenido tiene una cierta incertidumbre. Un ejemplo claro de esto puede ser el tamaño del dominio escogido o las condiciones de contorno establecidas. Si se desea eliminar o determinar el grado de incertidumbre de la solución, se pueden realizar análisis de sensibilidad. Estos estudios consisten en variar alguno de los parámetros sobre los que se pueda sospechar que existe cierta incertidumbre y observar la evolución de la solución obtenida ante la variación de dicho parámetro.

Finalmente, el último paso a realizar en un proceso a realizar es obtener los resultados que se desean. Debido a que se estudia todo el campo fluido, el abanico de soluciones que se pueden obtener es muy elevado.

Entre las diversas formas posibles que existen para la representación de las soluciones destacan [6]:

- Escenas de visualización: tanto de variables escalares (Figura 10a) como de variables vectoriales (Figura 10b).
- Valor escalar de variables
- Gráficos X-Y de variables escalares, tales como el coeficiente de presión o el y^+ (Figura 10c).
- Visualización de líneas de corriente (Figura 10d).

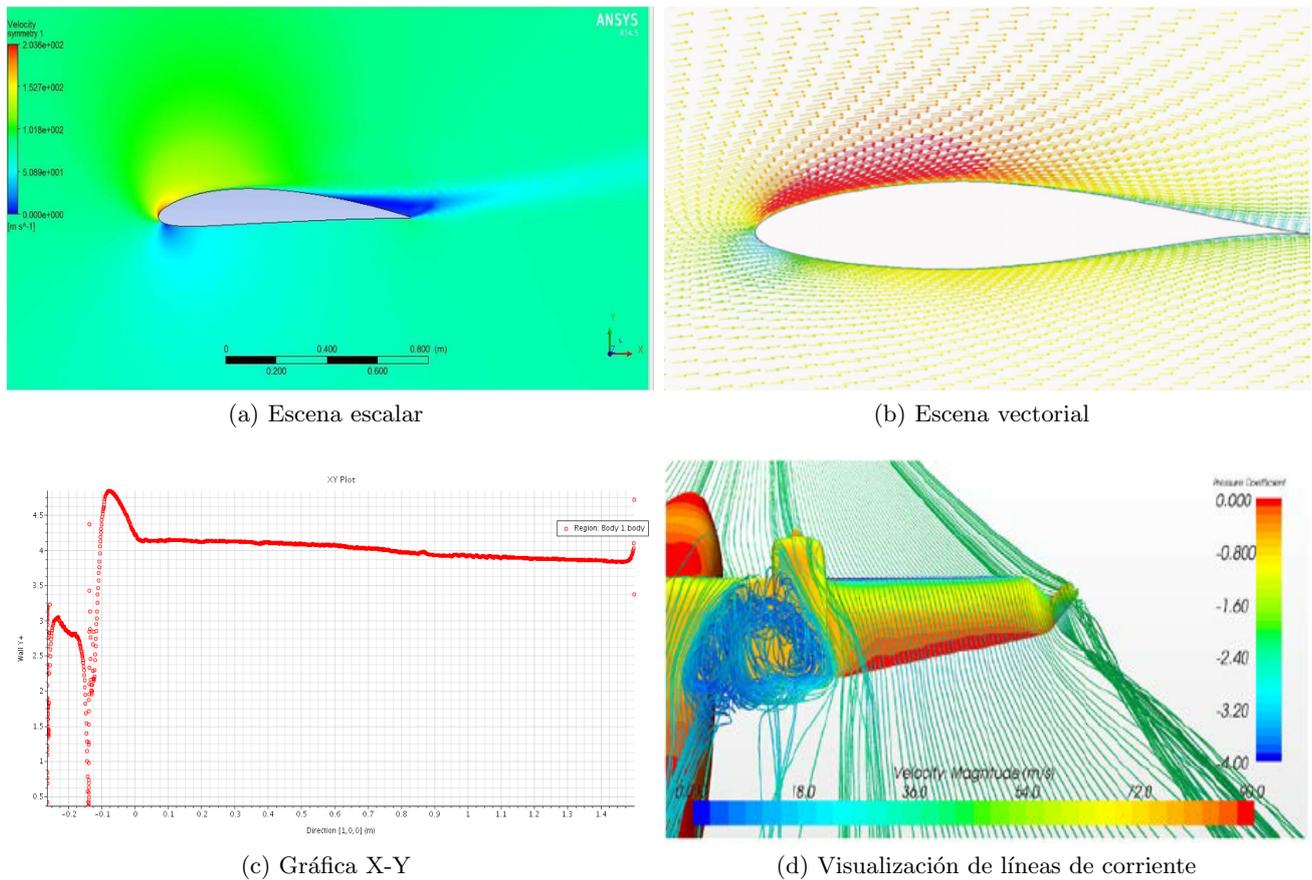


Figura 10: Visualización de una simulación CFD

2.3. Configuración CFD aplicada en este estudio

Una vez desarrollado el marco teórico en el que se encuentra la mecánica de fluidos computacional, se procede a desarrollar el proceso seguido para la configuración de los casos de interés en este estudio.

2.3.1. Creación de la geometría: *spires* y rugosidad del terreno

A continuación, en el Párrafo 2.3.1.1 y el Párrafo 2.3.1.2 se expone el procedimiento seguido para la creación de las geometrías encargadas de forzar la capa límite: los *spires* y de la rugosidad del terreno respectivamente.

2.3.1.1 Generación de las espiras

Tal y como ha sido comentado en la Subsección 1.1, con el fin de poder realizar el estudio de capa límite se ha de construir los elementos generadores de la misma, los *spires*. Dicha geometría ha sido creada siguiendo el enfoque clásico de la literatura [1], la cual consta de una cara triangular (*Front Face*) normal a la dirección del viento y otra placa divisora triangular (*Splitter Plate*) paralela a la dirección del viento. Cabe resaltar, que la geometría ha sido generada de manera paramétrica. El fin de esta parametrización es que proporciona una gran flexibilidad para realizar estudios con diferentes tamaños y disposiciones de los *spires*.

El proceso seguido para la construcción de la geometría comienza con la realización de un *sketch* (ver Figura 11) situado sobre el suelo del túnel de viento y que contiene la base de lo que posteriormente será la geometría final. En la Figura 11 se puede apreciar como las dimensiones de la base de la cara

triangular *Front Face* ha sido parametrizada mediante el parámetro b . De la misma manera, se ha parametrizado la base de la cara trasera (*Downwind*) mediante el parámetro $b_{downwind}$.

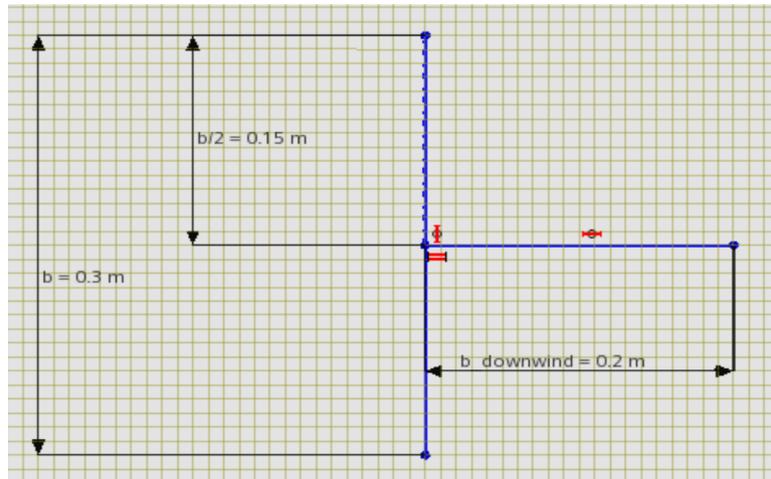


Figura 11: *Sketch* base de las espiras parametrizado

Posteriormente, se proporciona la altura deseada del *spire*. Esto se hace a través de una operación de extrusión (ver Figura 12). Al igual que para la base, se ha parametrizado esta operación mediante la variable $h_{geometry}$.

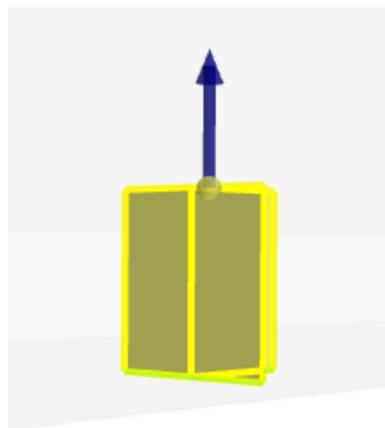


Figura 12: Extrusión base del *spire*

El siguiente paso consiste en generar la cara triangular de la espira. Para ello se crea un nuevo *sketch* sobre la cara frontal, tal y como se muestra en la Figura 13a. Finalmente, se realiza una operación de *Sheets from Sketch* sobre este último *sketch* para aislar la cara triangular deseada. Este proceso se sigue de manera análoga para la placa divisora trasera y, por último, se muestra en la Figura 13b la geometría completa del *spire*.

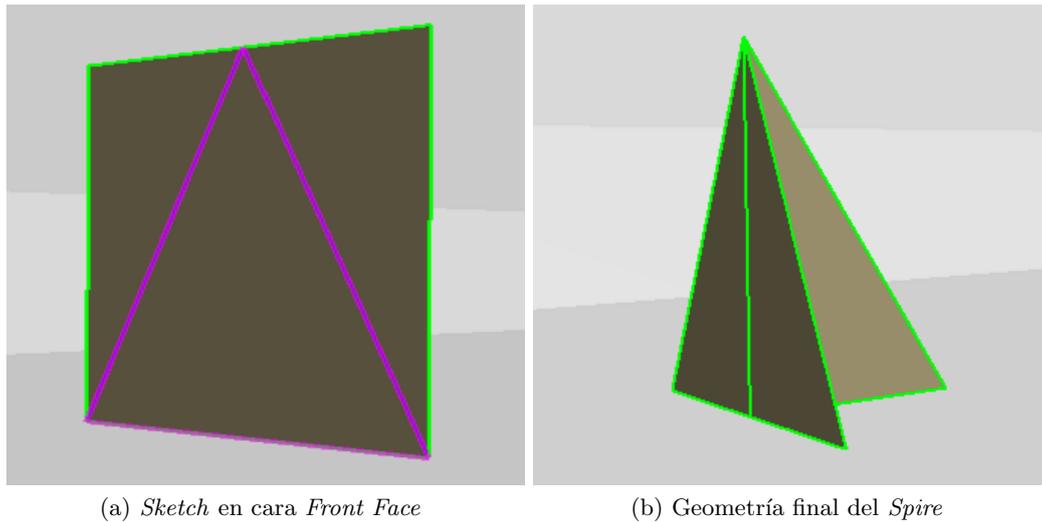


Figura 13: Proceso final para la creación de las espiras

Para finalizar, se aplica la operación de *Linear Pattern* tanto a las espiras como a los elementos de generación de la rugosidad (ver Párrafo 2.3.1.2) para realizar estudios con diferente número y disposición de las geometrías.

Antes de pasar al diseño de los elementos generadores de rugosidad, se resalta que, en un primer momento se realiza un diseño de geometrías planas, tal y como se puede observar en la Figura 13 y la Figura 14. Posteriormente, con el fin de ajustar el caso lo máximo posible a la realidad, se le proporciona un cierto volumen a ambas geometrías tal y como se comenta en la Subsubsección 2.3.8. El resultado final usado en los estudios con las espiras y cubos se muestra en la Figura 18.

2.3.1.2 Generación de la rugosidad del terreno

El proceso para la generación de estos elementos es análogo al seguido para la creación de las espiras (ver Párrafo 2.3.1.1), es decir, se crea un primer *sketch* con la base de la geometría, se aplica una operación de extrusión para proporcionarle la altura y realiza un *Sheets from Sketch* para obtener la geometría final. En primera instancia, se ha decidido que estos elementos sean una placa plana. El resultado final se muestra en la Figura 14.

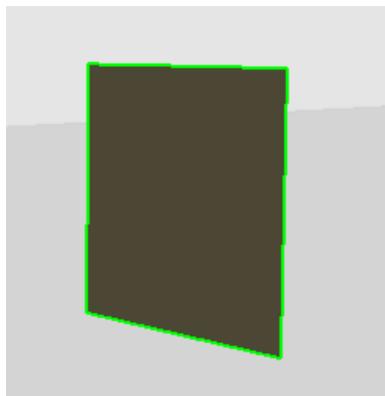


Figura 14: Generadores de rugosidad del terreno

2.3.2. Dominio computacional

Tal y como ha sido comentado en la Introducción (ver Sección 1), el estudio surge como consecuencia del túnel de viento adquirido por la UPV, el WT5, ya que este es lo suficientemente largo como para desarrollar capas límites de perfiles similares al que tendría una capa límite atmosférica. Además, el objetivo es que los resultados obtenidos en CFD puedan ser corroborados de forma experimental en el túnel. Todo esto hace que el dominio computacional replique el túnel de viento WT5. Más concretamente, debido a la condición de simetría del mismo, el dominio computacional es la mitad del WT5, tal y como se puede apreciar en la Figura 15.

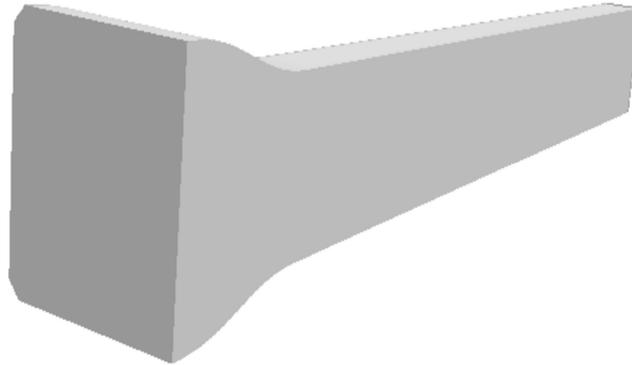


Figura 15: Dominio computacional del estudio: túnel de viento WT5

Como es evidente, las geometrías generadas se sitúan sobre el suelo del túnel a una determinada distancia (también parametrizada) de la sección de entrada rectangular. Esto se muestra en la Figura 16.

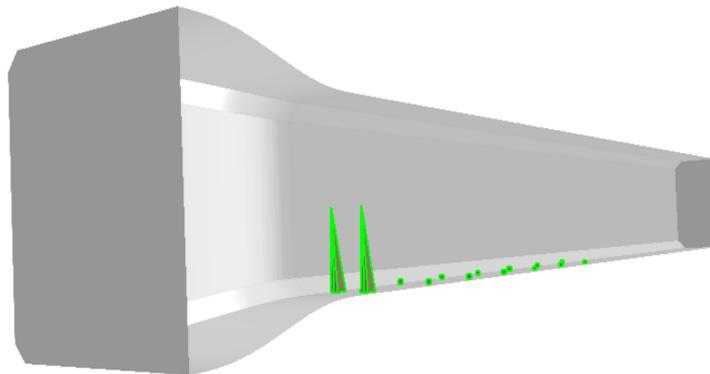


Figura 16: Geometrías situadas sobre el suelo del túnel

2.3.3. Mallado

Una vez creada la geometría con la disposición deseada, el siguiente paso consiste en el mallado de la misma. Para ello, el primer paso que se realiza es una operación de *Surface Preparation* \rightarrow *Extract Volume*. Una vez realizado esto, se obtiene el volumen final sobre el que se quiere mallar.

El tipo de malla escogida es un *Automated Mesh*, sobre el volumen final obtenido con la operación previa. Las opciones escogidas para la malla son [34][21]:

- *Surface Remesher*: retriangula la superficie con el fin de mejorar la calidad de la misma, optimizar

y facilitar el mallado.

- *Automatic Surface Repair*: este modelo es utilizado para corregir de manera automática problemas geométricos que puedan existir en la superficie una vez el proceso de *surface remesher* se ha finalizado.
- *Polyhedral Mesher*: utiliza celdas poliédricas con el fin de obtener una solución para resolver problemas de mallados complejos.
- *Prism Layer Mesher*: se conoce como mallado de capa límite y genera celdas ortogonales cerca de la superficie y es necesario para mejorar la precisión de la solución.

Dentro de los controles establecidos por defecto de la malla (*Default Controls*) se ha parametrizado los siguientes: *Base Size* (dx), *Number of Prism Layers* (bl_layers), *Prism Layer Near Wall Thickness* ($first_cell_size$) y *Prism Layer Total Thickness* (bl_size).

Además, se ha añadido una serie de controles customizados (*Custom Controls*) con el fin de obtener una malla más refinada en las zonas donde se sitúan las espiras, la rugosidad del terreno y su estela. El tipo de operación utilizada es un *Surface Control* en el que se selecciona la opción de especificar las opciones de refinamiento de la estela (*Wake Refinement* \rightarrow *Specify wake refinement options*). Dentro de estas, se establece una longitud de la estela parametrizada mediante el parámetro $wake_length$ y una tasa de crecimiento de 1,05.

2.3.4. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno establecidas en el caso son:

- Sección de entrada del túnel \rightarrow *Velocity inlet*
 - *Flow Direction Specification* \rightarrow *Components*
 - *Flow Direction* \rightarrow *Constant* \rightarrow $[1, 0, 0]$
 - *Velocity magnitude* \rightarrow *Constant* \rightarrow U_0 (siendo U_0 un parámetro a determinar para cada caso)
- Sección de salida \rightarrow *Pressure outlet*
- Paredes externas y suelo del túnel \rightarrow *Wall*
- Pared de simetría del túnel \rightarrow *Symmetry*
- Las geometrías creadas, tanto las espiras como la rugosidad del terreno \rightarrow *Wall*
 - Resulta importante destacar que estos elementos han sido establecidos como *Baffle Interfaces*, ya que esto les proporciona un espesor infinitesimal y hace más sencilla la generación de la malla sobre ellas. [21]

2.3.5. Modelos seleccionados

En cuanto a los posibles modelos dentro de la opción de *Physics 1* se han seleccionado los siguientes:

- *Three Dimensional*
- *Gas*
- *Constant Density*

- *Segregated Flow*
- *K-Omega Turbulence*
- *Solution Interpolation*
- *Steady*
- *Gradients*
- *All $y+$ Wall Treatment*
- *Turbulent*
- *Reynolds-Averaged Navier-Stokes*
- *Wall Distance*
- *SST (Menter) K-Omega*

2.3.6. Criterio de convergencia

En el caso del presente estudio, se ha decidido tomar factores habituales en los estudios CFD para determinar la convergencia del caso (ver Párrafo 2.2.2.1):

1. Residuales: los residuales han de converger, es decir, que decrezcan cada iteración o se mantengan constantes en valores inferiores a 10^{-3} y, preferiblemente, inferiores a 10^{-6} .
2. Variación de las variables de interés del estudio: en este caso, se considera que debe existir una oscilación menor al 0,5 % en el valor de las variables de interés en las últimas 20 iteraciones para considerar que han convergido.

2.3.7. Estudio de independencia de malla

Pese a que no se ha realizado un estudio de independencia de malla al uso, sí que se ha probado, a través del tamaño base (*Base Size*), varias configuraciones con diferente número de celdas del mallado. En total, se estudian cuatro configuraciones (ver Figura 17):

- ≈ 7 millones de celdas
- ≈ 12 millones de celdas
- ≈ 21 millones de celdas
- ≈ 36 millones de celdas

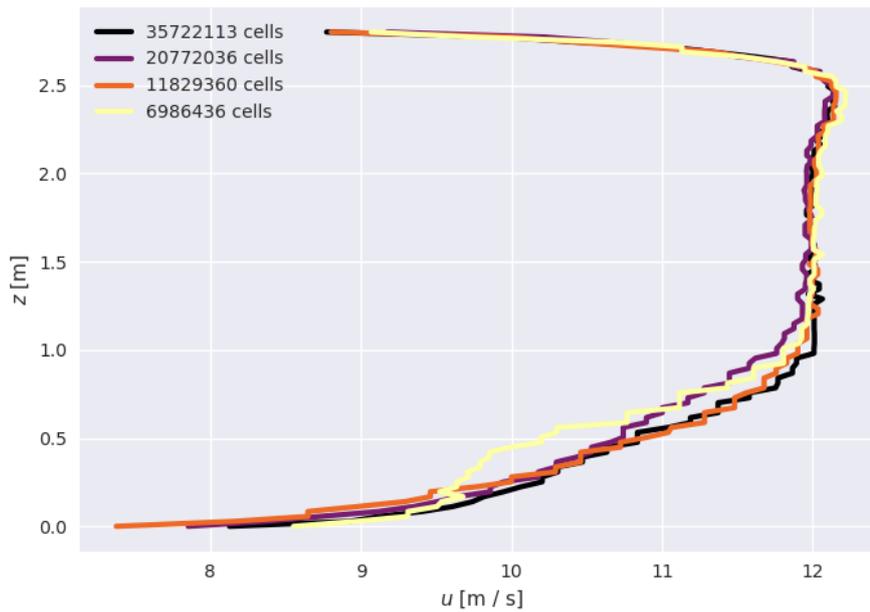


Figura 17: Resultado estudio diferente número de celdas

Dado que uno de los objetivos del estudio es tratar de reproducir, con la mayor precisión posible, como se desarrolla la capa límite en la zona de baja velocidad -la más cercana al suelo-, se propone hacer uso de la malla más fina propuesta, es decir, estudiar casos con ≈ 40 millones de celdas.

2.3.8. Resultados y configuración final empleada

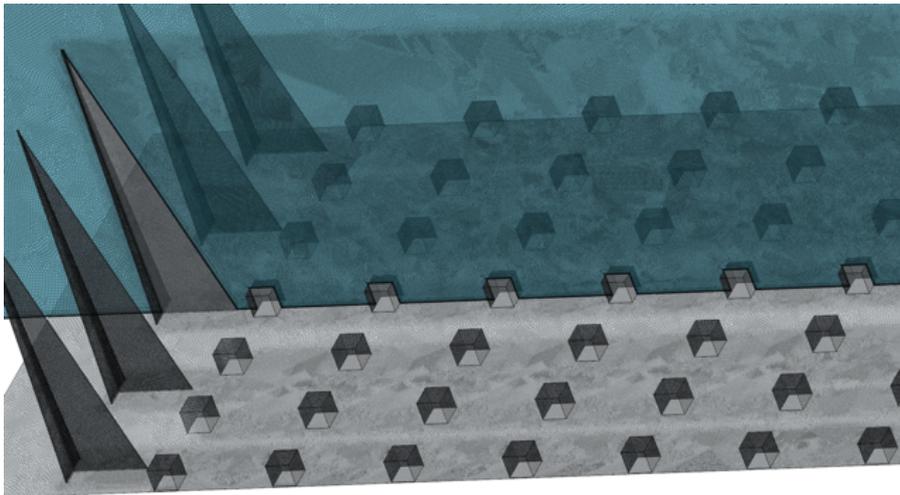
Una vez comentando el proceso seguido para la configuración inicial, se desarrolla a lo largo de esta Subsubsección 2.3.8 algunas modificaciones realizadas y la configuración final empleada para la realización de los estudios posteriores.

Como principal modificación destaca que se ha decidido proporcionar un cierto volumen tanto a las espiras como a los elementos simuladores de las rugosidad:

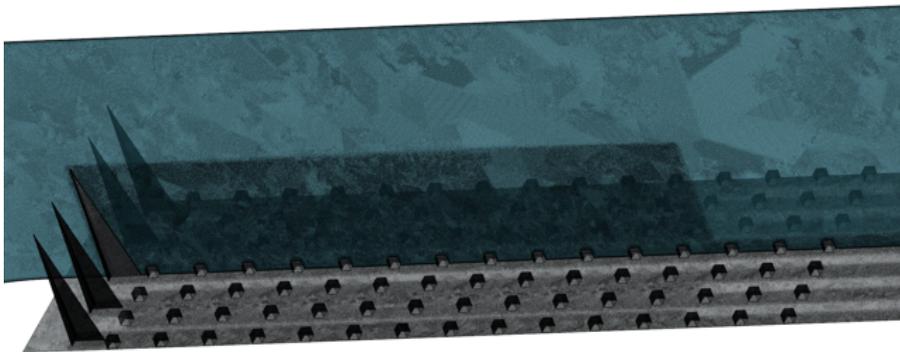
- Se ha decidido dar 5 mm de espesor a las espiras
- Los elementos simuladores de rugosidad se convierten en bloques cuyo largo será el mismo que el ancho

Además, tal y como ha sido comentado en la Subsubsección 2.3.3 se ha añadido un refinamiento de la malla en la zona posterior a las espiras, donde se sitúan los bloques para permitir obtener en mayor detalle el desarrollo de la capa límite.

El resultado final tanto de la modificación de la geometría (Figura 18a) como del resultado del mallado final (Figura 18b) se muestra en la Figura 18.



(a) Resultado modificación geometría



(b) Mallado y refinamiento de malla aguas abajo de las espiras

Figura 18: Configuración CFD final utilizada

Una vez aplicada esta configuración final, se observa un comportamiento particular debido a las características de la geometría de la sección de estudio (se recuerda que esta geometría representa al túnel de viento WT5). El efecto que se aprecia es que, debido a los chaffanes que existen en las esquinas de la sección, no existe una uniformidad total de la capa límite a lo largo de toda la sección lateral estudiada. Este efecto se muestra en la Figura 19.

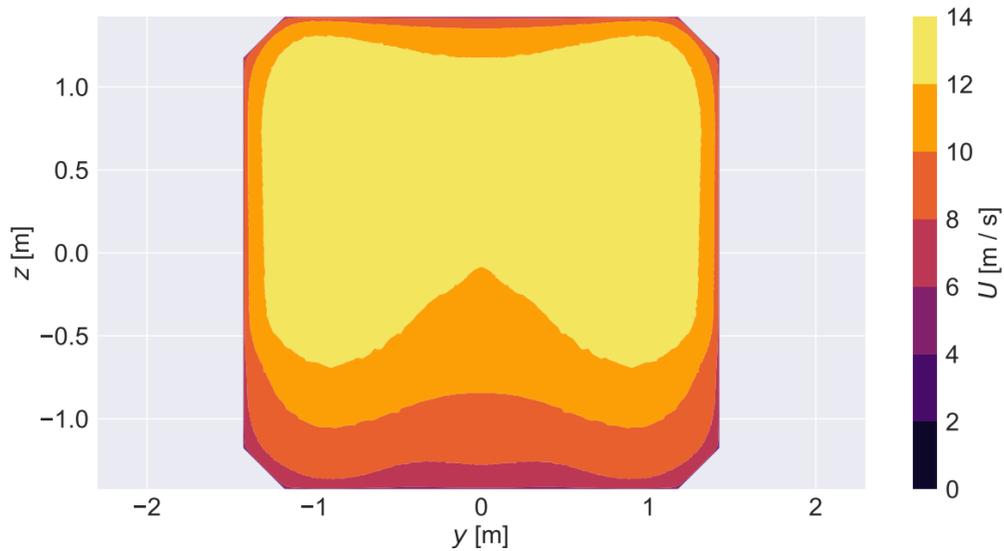


Figura 19: Efecto sobre la velocidad de los chaflanes sobre la capa límite

Para tratar de comprender algo mejor el efecto de los chaflanes se estudia como afectan los mismos a la intensidad turbulenta. Tal y como se puede apreciar en la Figura 20, en este caso se observa como la uniformidad es mayor que para la velocidad.

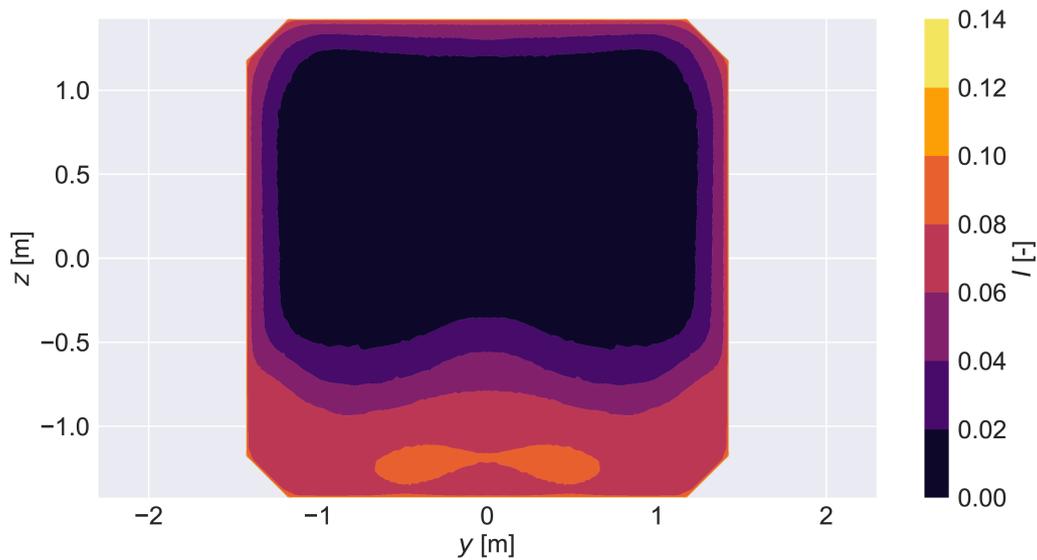


Figura 20: Efecto sobre la intensidad de los chaflanes sobre la capa límite

Este efecto, se considera despreciable para el alcance de este estudio, sin embargo, se propone como hipótesis la necesidad de implementar nuevas espiras en las zonas más cercanas a los chaflanes o modificar la geometría de las más cercanas a esa zona para aliviar el comportamiento observado. Un pequeño avance de esta hipótesis se presenta en el Apéndice A.

3. Planteamiento del estudio

Una vez comentado el proceso de configuración del caso (ver Subsección 2.3), se procede a realizar una explicación del procedimiento seguido para la realización del estudio. En primer lugar, se toma como referencia un perfil de velocidades objetivo. Esto se hace con el fin de obtener una primera aproximación de las dimensiones de las geometrías y poder corroborar las modificaciones necesarias para el refinamiento del estudio.

De esta manera, el perfil de velocidades impuesto como objetivo es una expresión logarítmica conocida como la Ley de Richard y Hoxey que tiene la forma de la Ecuación 14 [21]. Dicha Ley depende de la velocidad de fricción U_* (ver Ecuación 15), la energía cinética turbulenta κ_{hoxey} , la longitud de la rugosidad del terreno z_0 y la distancia a la pared más cercana z .

$$U = \frac{U_*}{\kappa_{hoxey}} \cdot \ln \left(\frac{z_0 + z}{z_0} \right) \quad (14)$$

$$U_* = \frac{\kappa u_h}{\ln \left(\frac{h+z_0}{z_0} \right)} \quad (15)$$

En la Ecuación 15, u_h es la velocidad a una altura de referencia h .

Para poder establecer dicha comparativa, se ha impuesto el valor de los parámetros constantes de la Ley. Los valores utilizados se muestran en la Tabla 2.

Parámetro	Valor
z_0 [m]	0.01
h [m]	1
u_h [m/s]	10

Tabla 2: Valores impuestos en la Ley de Richard y Hoxey

Tal y como ha sido comentado en la Subsección 1.1, el modelo propuesto como base de este estudio genera, a partir de una velocidad uniforme en la sección de entrada, un perfil potencial que sigue la Ecuación 1. Dado que la ley de referencia tiene una expresión diferente a la potencial, el primer paso consiste en tratar de obtener la Ley de Irwin que minimice el error con respecto a la de Hoxey. Para ello, se realiza un primer barrido para los parámetros constantes de la Ley de Irwin (U_δ , δ y α). Las condiciones del barrido y la solución inicial elegida se muestran en la Tabla 3.

Parámetro	Condición	Valor escogido
α [-]	Valores entre 0.1 y 0.6 cada 0.05	0.2
U_δ [m/s]	Valores entre 1 y 10 cada 1	10
δ [m]	Valores entre 0 y 5 cada 0.1	1.05

Tabla 3: Barrido de inicial parámetros de la Ley de Irwin

Una vez obtenida esta primera solución, se refina la misma siguiendo un procedimiento análogo al anterior pero enfocando el barrido en torno al valor seleccionado. De esta manera, el punto final escogido se muestra en la Tabla 4.

Parámetro	Condición	Valor escogido
α [-]	Valores entre 0.15 y 0.25 cada 0.01	0.19
U_δ [m/s]	Valores entre 1 y 15 cada 1	10
δ [m]	Valores entre 0.9 y 1.1 cada 0.01	1

Tabla 4: Barrido de final parámetros de la Ley de Irwin

La comparativa entre la Ley de Hoxey y la Ley de Irwin aplicando los parámetros mostrados en la Tabla 2 y la Tabla 4 se muestra en la Figura 21. En la misma se puede apreciar como ambas leyes guardan una gran similitud, por lo que se comprueba que el objetivo del barrido realizado se ha cumplido.

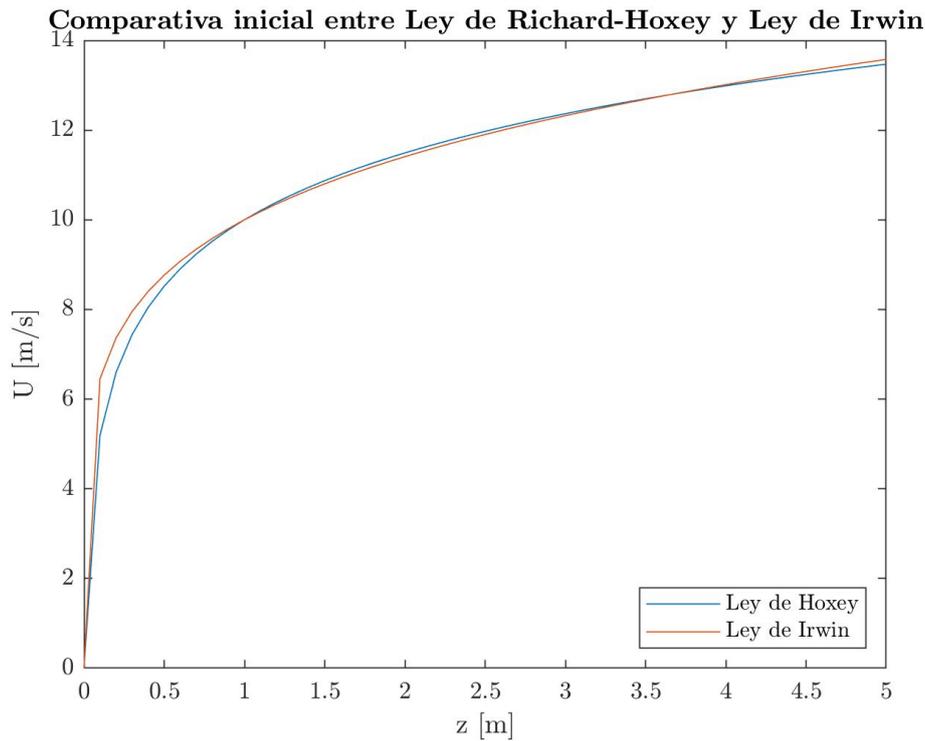


Figura 21: Comparativa inicial entre la Ley de Richard-Hoxey y la Ley de Irwin

Una vez definidos los parámetros de la Ley de Irwin, se puede determinar de manera sencilla las dimensiones de la geometría de las espiras. En primer lugar, la altura de las espiras h se obtiene sustituyendo los valores de α y δ en la Ecuación 2. Posteriormente, se obtiene el valor de β y ψ respectivamente (ver la Ecuación 5 y la Ecuación 4). Por último, se calcula el valor de las dimensiones de la base b de la geometría siguiendo la Ecuación 3.

Por otra parte, se calcula el valor de la altura de los elementos simuladores de la rugosidad del terreno. Para ello, se obtiene el coeficiente de fricción C_f sustituyendo el valor de α en la Ecuación 7. Una vez solucionado este parámetro, se calcula la altura de dichos elementos sustituyendo en la Ecuación 8.

Finalmente, se define el valor de la longitud de la cara trasera de las espiras como $h/4$ y la distancia entre el centro de las espiras a $h/2$. El resultado de todos estos parámetros descritos se muestra en la Tabla 5.

Parámetro	Valor
h [m]	1.27
b [m]	0.15
β [-]	0.06
ψ [-]	0.08
κ [m]	0.08
b_{trasea} [m]	0.32
Distancia entre centros [m]	0.63

Tabla 5: Parámetros geometría de espiras y rugosidad del terreno

El objetivo una vez realizado el planteamiento inicial es tratar de, a partir de diferentes estudios y variaciones, obtener un modelo que proporcione un mejor ajuste que el de Irwin. Esto se desarrolla a lo largo de la Sección 4.

4. Planteamiento de casos: estudios y análisis

El objetivo de esta sección es presentar diferentes estudios a través de los cuales se pueda obtener un modelo que se ajuste de una manera más realista al caso estudiado. Para ello, se comienza en la Subsección 4.1 analizando el efecto del número de espiras, filas de bloques y filas de columnas sobre el modelo. Posteriormente, se analiza el efecto de variar la relación b/h , el tamaño de la rugosidad y la distancia entre dichos elementos (ver Subsección 4.2 y Subsección 4.3). Por último, se realiza una discusión en la Subsección 4.4 en la que se presenta las principales conclusiones de los estudios así como el modelo final escogido.

4.1. Estudios iniciales: Influencia del número de espiras, filas de bloques y columnas de bloques

Una vez seleccionado el modelo a reproducir y el valor de los parámetros del estudio, se configuran diferentes casos con el fin de comprobar si efectivamente se obtiene la capa límite deseada. Para ello, se plantean diferentes modelos variando, en primer lugar, el número de espiras, las filas de bloques y las columnas de bloques tal y como se muestra en la Tabla 6.

Número de espiras	Filas de Bloques	Columnas de Bloques
7	9	7
7	9	5
7	6	7
7	6	5
5	9	7
5	9	5
5	6	7
5	6	5

Tabla 6: Casos configurados para su estudio

El resultado obtenido una vez lanzados los casos en CFD se muestra en la Figura 22. Las principales conclusiones de esta primera aproximación son:

- Una vez desarrollada la capa límite, se aprecia como los casos con mayor número de espiras (7) alcanzan una velocidad máxima superior
- En esa misma zona, el efecto de los bloques es prácticamente despreciable
- A simple vista, resulta complicado obtener conclusiones acerca del efecto de los bloques en la zona cercana al suelo

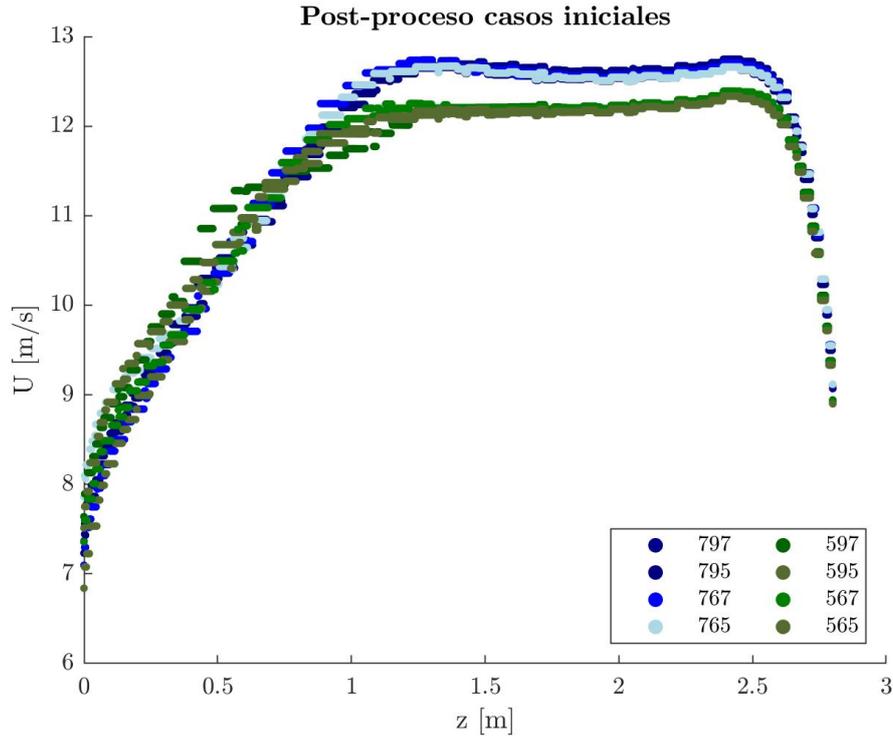


Figura 22: Post-proceso casos iniciales

A partir del post-proceso mostrado en la Figura 22, se trata de ajustar cada uno de los casos a una ley exponencial tipo la de Irwin [1]. El proceso seguido para ajustar dichas leyes es análogo al utilizado para ajustar la ley base (ver Tabla 4) y se ha realizado un barrido de las variables en torno a dicha ley. El ajuste final para cada uno de los casos se muestra en la Tabla 7.

Caso	U_δ [m/s]	α [-]	δ [m]
797	11.74	0.13	1.105
795	11.71	0.13	1.065
767	11.89	0.14	1.185
765	11.49	0.11	0.9
597	11.71	0.1	1.075
595	11.54	0.11	1.165
567	11.41	0.12	0.995
565	11.48	0.1	1

Tabla 7: Ajuste coeficientes casos iniciales

4.1.1. Análisis de resultados iniciales

Una vez realizado dicho ajuste, se compara la diferencia entre el valor teórico de los coeficientes (ver Tabla 4) y los obtenidos para los casos iniciales (ver Tabla 7). Como paso previo a dicha comparación, es necesario tener en cuenta el aumento del espesor de la capa límite a distancias desde $6h$ hasta $6h + \Delta x$ aguas abajo de las espiras. Dicho incremento viene dado por la expresión de la Ecuación 16 [1]:

$$\Delta\delta = 0,068 \cdot \alpha[(1 + 2\alpha)/(1 + \alpha)] \cdot \Delta x \cdot F \quad (16)$$

Donde F sigue la expresión de la Ecuación 17[1]:

$$F \approx \{1 + (\delta/H)[\alpha(3 + 2\alpha)/(1 + \alpha(1 - \delta/H))]\}^{-1} \quad (17)$$

Sustituyendo los valores de α y δ por los de la Tabla 4, $H = 2,858$ m y $\Delta x = 9,88$ m se obtiene que el incremento de espesor de la capa límite es 123 mm. Esto significa que el valor de δ buscado será en torno a 1,12 m.

Finalmente, el error entre cada uno de los casos con el caso inicial planteado se presenta en la Tabla 8:

Caso	U_δ [m/s]	α [-]	δ [m]
797	17 %	32 %	2 %
795	17 %	32 %	5 %
767	19 %	26 %	6 %
765	15 %	42 %	20 %
597	17 %	47 %	4 %
595	15 %	42 %	4 %
567	14 %	37 %	11 %
565	15 %	47 %	11 %

Tabla 8: Error entre ajuste de los casos iniciales y ley de Irwin base establecida

Tal y como se puede apreciar en la Tabla 8, existe una discrepancia relativamente elevada entre los casos planteados y el ajuste base. Para determinar a qué es debido esto, se estudia la influencia de las variables independientes (número de espiras, filas de bloques y columnas de bloques) en el problema.

4.1.2. Ajuste de las variables del problema

Con el fin de encontrar la razón de la discrepancia entre el caso planteado y los resultados obtenidos, se decide plantear un modelo que siga una regresión lineal y, además, se realiza un estudio estadístico que permita obtener conclusiones acerca de la calidad del mismo.

Dicho estudio se plantea siguiendo las siguientes hipótesis:

- Variables independientes: Número de espiras, Filas de Bloques y Columnas de Bloques
- Variables dependientes u observadas: U_δ , α y δ

Los resultados de dicho ajuste (realizado mediante el software *STATGRAPHICS*) se desarrollan a lo largo del Párrafo 4.1.2.1, el Párrafo 4.1.2.2 y el Párrafo 4.1.2.3.

4.1.2.1 Ajuste de U_δ

El ajuste lineal obtenido sigue la expresión mostrada en la Ecuación 18.

$$U_\delta = 10,4375 + 0,08625 \cdot \text{NúmeroEspiras} + 0,0358333 \cdot \text{FilasBloques} + 0,06625 \cdot \text{ColumnasBloques} \quad (18)$$

En cuanto al ajuste estadístico, se ha obtenido los resultados mostrados en la Tabla 9. Tal y como se aprecia en la misma, se puede observar como el parámetro más influyente en U_δ es el número de espiras, ya que tiene un p-valor relativamente pequeño. Por otra parte, tanto el número de filas como de columnas de bloques no muestran una gran influencia. Pese a ello, el número de columnas resulta algo más importante debido a que su p-valor es menor.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	10.4375	0.472014	22.1127	0.0000
Número Espiras	0.08625	0.0476806	1.80891	0.1447
Filas Bloques	0.0358333	0.0317871	1.12729	0.3227
Columnas Bloques	0.06625	0.0476806	1.38945	0.2370

Tabla 9: Ajuste U_δ

4.1.2.2 Ajuste de α

En cuanto al parámetro α , el ajuste lineal obtenido se muestra en la Ecuación 19.

$$\alpha = 0,0275 + 0,01 \cdot \text{NúmeroEspiras} + 0,0 \cdot \text{FilasBloques} + 0,005 \cdot \text{ColumnasBloques} \quad (19)$$

El resultado estadístico proporcionado al realizar el ajuste se aporta en la Tabla 10.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0,0275	0,0410411	0,670059	0,5395
Número Espiras	0,01	0,00414578	2,41209	0,0734
Filas Bloques	0	0,00276385	0	1,0000
Columnas Bloques	0,005	0,00414578	1,20605	0,2943

Tabla 10: Ajuste α

De nuevo, se puede observar como el parámetro más influyente es el número de espiras. Por otra parte, el número de filas de bloques no tiene ninguna relación con α y el número de columnas de bloques mantiene una cierta influencia en el coeficiente.

4.1.2.3 Ajuste de δ

Por último, la Ecuación 20 representa el ajuste lineal para δ . A su vez, el resultado del ajuste estadístico se muestra en la Tabla 11.

$$\delta = 0,6675 + 0,0025 \cdot \text{NúmeroEspiras} + 0,0275 \cdot \text{FilasBloques} + 0,02875 \cdot \text{ColumnasBloques} \quad (20)$$

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0,6675	0,35891	1,8598	0,1364
Espiras	0,0025	0,0362554	0,0689553	0,9483
Filas Bloques	0,0275	0,0241703	1,13776	0,3187
Columnas Bloques	0,02875	0,0362554	0,792986	0,4722

Tabla 11: Ajuste δ

En este caso se puede concluir que, a partir de los primeros casos estudiados, la variable δ no tiene un buen modelo lineal con las variables independientes. Esto es debido a que todas ellas tienen un p-valor elevado. Además se observa como la variable con menor relación a δ es el número de espiras.

A modo de pequeña reflexión sobre el ajuste realizado se puede concluir:

- El número de espiras es la variable que muestra una mayor influencia tanto en U_δ como en α
- En cuanto a los bloques, su efecto siempre es inferior en U_δ y α pudiéndose incluso considerar despreciable el efecto del número de filas
- El parámetro δ se ajusta de forma muy pobre a la regresión lineal, siendo el número de espiras el parámetro con menor influencia

Como consecuencia de dichas conclusiones, se amplía el número de estudios con el fin de poder corroborar las conclusiones obtenidas y mejorar las relaciones lineales planteadas.

4.2. Primer estudio avanzado: tamaño de rugosidad y distancia entre dichos elementos

Como siguiente paso se propone una variación del tamaño de los elementos simuladores de la rugosidad y la distancia entre ellos. Los casos planteados se muestran en la Tabla 12.

Caso	b [cm]	κ [cm]	D [m]
1	15	5	0.508
2	15	5	1.270
3	15	10	0.508
4	15	10	1.270

Tabla 12: Estudios avanzados planteados

Una vez lanzadas las simulaciones, se realiza el estudio de la influencia de la variación de cada uno de estos parámetros sobre las variables dependientes del problema. En primer lugar, se grafica la evolución de la velocidad, tal y como se puede apreciar en la Figura 23.

En la misma, se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- No existe una gran diferencia, al menos a simple vista, en la velocidad máxima alcanzada en cada uno de los casos. Además el caso ha sido planteado con 5 espiras y la velocidad máxima cuadra con la obtenida en el estudio inicial
- Al haber estudiado casos en los que se ha variado parámetros relacionados con la rugosidad del terreno, la zona en la que la influencia de dichos elementos es más notoria (parte inicial de la capa límite), sí que se ha visto afectada
- Relacionado con el punto anterior, parece que para bloques del mismo tamaño, el hecho de aumentar la distancia, produce mayores velocidades en la zona más cercana al suelo

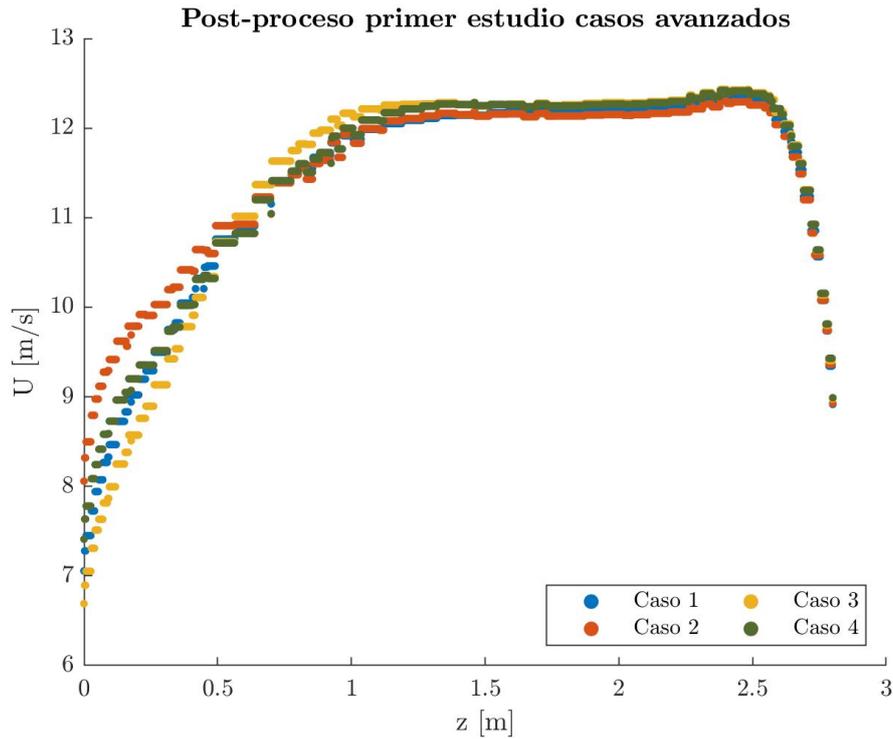


Figura 23: Post-proceso primer estudio casos avanzados

De manera análoga a los estudios iniciales, una vez realizado el post-procesado de cada uno de los casos estudiados (ver Figura 23), se trata de ajustarlos a leyes potenciales a la Irwin. El resultado de dicho ajuste se aporta en la Tabla 13.

Caso	U_δ [m/s]	α [-]	δ [m]
1	11.53	0.1	1.09
2	11.54	0.1	1.03
3	11.56	0.11	1.095
4	11.57	0.1	1.105

Tabla 13: Ajuste coeficientes casos avanzados

4.2.1. Análisis de resultados de primer estudio avanzados

Una vez ajustados los casos a leyes tipo la de Irwin, se realiza el ajuste teórico de cada uno de los casos. Dicho ajuste se realiza con el fin de identificar las diferencias entre el resultado obtenido en CFD y el esperado de manera teórica. De esta manera, se espera que junto con las conclusiones obtenidas de los casos iniciales se pueda obtener un modelo de mayor precisión que el proporcionado por Irwin.

El ajuste teórico varía para cada uno de los casos ya que las variables estudiadas influyen en el modelo de referencia. El resultado de dicho ajuste se aporta en la Tabla 14.

Caso	α	δ	$\delta + \Delta\delta$	κ [m]
1	0.1819	0.9968	1.1148	0.0351
2	0.1819	0.9968	1.1148	0.0646
3	0.1819	0.9968	1.1148	0.0351
4	0.1819	0.9968	1.1148	0.0646

Tabla 14: Ajuste teórico casos avanzados

Comparando los resultados de la Tabla 13 y de la Tabla 14 se puede observar como el parámetro δ se ajusta relativamente bien con respecto al valor esperado de manera teórica. Por otra parte, α sí que muestra una mayor diferencia entre el ajuste experimental y teórico. Con el fin de determinar a qué es debido esto y poder realizar un análisis estadístico se calculan en la Subsección 4.3 nuevas configuraciones en las que se introduce también una variación en la relación b/h .

4.3. Segundo estudio avanzado: Variación de b/h

El objetivo de esta Subsección 4.3 es introducir casos en los que se varíe, junto con el tamaño de los elementos de rugosidad y la distancia entre los elementos, la relación b/h .

Los casos planteados se muestran en la Tabla 15.

Caso	b [cm]	κ [cm]	D [m]
1	13	5	0.508
2	13	5	1.270
3	13	10	0.508
4	13	10	1.270
5	17	5	0.508
6	17	5	1.270
7	17	10	0.508
8	17	10	1.270

Tabla 15: Casos segundo estudio avanzado

Una vez lanzados los casos, se realiza un primer post-procesado de los resultados obtenidos. Esto se muestra en la Figura 24. A primera vista, este post-procesado permite observar que existe una ligera influencia en la velocidad máxima alcanzada con la variación de los parámetros variados. Concretamente, parece ser debido a la variación del tamaño de la base.

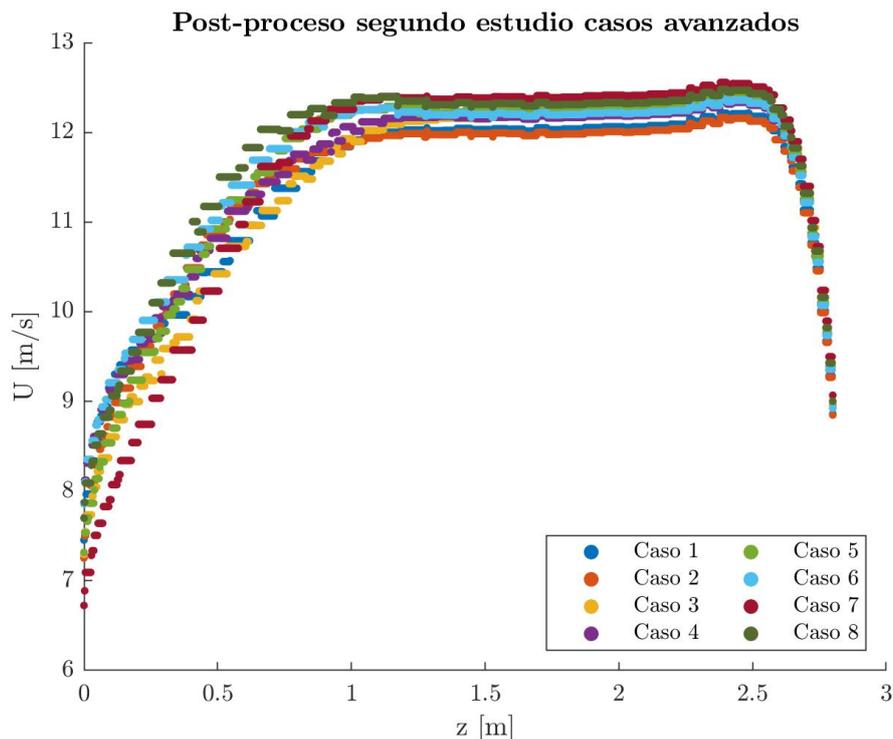


Figura 24: Post-proceso segundo estudio casos avanzados

Siguiendo el mismo procedimiento que en los apartados anteriores, se ajusta cada uno de los 8 casos lanzados a leyes potenciales a la Irwin. El resultado de dicho ajuste se muestra en la Tabla 16.

Caso	U_δ [m/s]	δ [m]	α [-]
1	11.42	1.075	0.09
2	11.52	1.075	0.07
3	11.46	1.075	0.11
4	11.63	1.075	0.08
5	11.73	1.16	0.09
6	11.8	1.16	0.07
7	11.69	1.116	0.12
8	11.91	1.16	0.07

Tabla 16: Ajuste coeficientes segundo estudio avanzado

Comparando ambas tablas se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- El valor de δ muestra un ajuste muy razonable frente a $\delta_{esperada}$
- Por otra parte, α sí que muestra una mayor discrepancia en el ajuste y habrá que determinar a qué es debido

4.3.1. Análisis de resultados iniciales

Antes de proceder con el ajuste del modelo lineal, se realiza un primer análisis de los resultados obtenidos en el segundo caso avanzado. Para ello, se compara los resultados obtenidos del ajuste de los coeficientes (ver Tabla 16) con el resultado teórico esperado (ver Tabla 17).

Caso	α [-]	δ [m]	$\Delta\delta$ [m]	$\delta_{esperada}$ [m]	k [m]
1	0.1469	0.9808	0.0964	1.0772	0.0195
2	0.1469	0.9808	0.0964	1.0772	0.0359
3	0.1469	0.9808	0.0964	1.0772	0.0195
4	0.1469	0.9808	0.0964	1.0772	0.0359
5	0.2226	1.0154	0.1422	1.1576	0.0552
6	0.2226	1.0154	0.1422	1.1576	0.1016
7	0.2226	1.0154	0.1422	1.1576	0.0552
8	0.2226	1.0154	0.1422	1.1576	0.1016

Tabla 17: Ajuste teórico segundos casos avanzados

4.3.2. Ajuste de las variables dependientes

Con el fin de obtener una visión más completa de la influencia de los parámetros, se realiza un análisis estadístico de cada uno de ellos en el Párrafo 4.3.2.1, el Párrafo 4.3.2.2 y el Párrafo 4.3.2.3.

4.3.2.1 Ajuste de U_δ

En el caso de la variable U_δ se ha obtenido una regresión lineal que es capaz de describir en gran medida las razones de la variabilidad del parámetro ya que tiene una $r - cuadrada = 96\%$. El parámetro con el que muestra mayor relación es la base, ya que el $p - valor = 0,0009$. Por otra parte, también muestra una gran influencia de la distancia entre los elementos simuladores de rugosidad (ver Tabla 18).

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	10,3677	0,131367	78,9218	0,0000
b/h	8,73016	0,984895	8,86405	0,0009
κ	1,1	0,620484	1,77281	0,1509
D	0,183727	0,0407142	4,51261	0,0107

Tabla 18: Ajuste U_δ

Como consecuencia de los resultados descritos, se podría concluir que la variación del tamaño de la base de las espiras y la distancia entre los elementos simuladores de rugosidad tienen una influencia directa en el parámetro U_δ . Finalmente, la ecuación de la regresión lineal obtenida se muestra en la Ecuación 21.

$$U_\delta = 10,3677 + 8,73016 \cdot b/h + 1,1 \cdot \kappa + 0,183727 \cdot D \quad (21)$$

4.3.2.2 Ajuste de α

Esta variable ha sido la que ha obtenido una relación de “peor calidad estadística” de los tres casos estudiados, ya que su $r - cuadrada = 88\%$. El resultado del ajuste estadístico se muestra en la Tabla 19.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0,1	0,0259299	3,85655	0,0182
b/h	0	0,194404	0	1,0000
κ	0,3	0,122474	2,44949	0,0705
D	-0,0393701	0,00803638	-4,89898	0,0080

Tabla 19: Ajuste α

Contrariamente a lo que sucedía para U_δ , α muestra mayor influencia de los parámetros de rugosidad que del tamaño de la base, cuyo impacto es prácticamente nulo. El ajuste lineal obtenido se muestra en la Ecuación 22.

$$\alpha = 0,1 + 4,37068E - 17 \cdot b/h + 0,3 \cdot \kappa - 0,0393701 \cdot D \quad (22)$$

A modo de pequeña conclusión, la variación de α parece estar relacionado con la variación elementos simuladores de la rugosidad.

4.3.2.3 Ajuste de δ

Por último, se presenta el ajuste realizado para δ . Dicho ajuste es capaz de explicar la mayor parte de la variabilidad del parámetro estudiado dado que la $r - cuadrada = 100\%$. En la Tabla 20, se observa como el único factor con el que mantiene una relación es b/h . Este resultado es coherente con el ajuste mostrado en la Tabla 16.

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	0,798683	0		
b/h	2,69841	0		
κ	0	0		
D	0	0		

Tabla 20: Ajuste δ

Por último, la regresión lineal obtenida para δ se muestra en la Ecuación 23.

$$\delta = 0,798683 + 2,69841 \cdot b/h + 8,32667E - 17 \cdot \kappa + 0 \cdot D \quad (23)$$

4.4. Discusión

Los objetivos de esta Subsección 4.4 son:

- Realizar una primera recopilación de los resultados obtenidos para los estudios iniciales (Subsección 4.1), primer estudio avanzado (Subsección 4.2) y segundo estudio avanzado (Subsección 4.3)
- A partir de dicha recopilación, obtener un modelo que permita ajustar las leyes de Irwin de una forma más precisa que el modelo teórico

4.4.1. Recopilación de resultados

El estudio inicial planteado muestra una clara relación entre la velocidad máxima alcanzada (ver Figura 22) y el número de espiras del estudio. Por otra parte, pese a que la variación del número de filas y columnas de bloques muestra cierta influencia en el desarrollo inicial de la capa límite, no se puede determinar un efecto claro de la variación de este parámetro.

En cuanto al primer estudio avanzado, este muestra que, si se varía únicamente el tamaño de los elementos simuladores de la rugosidad y la distancia entre ellos, la velocidad máxima no se ve alterada y se mantiene acorde con la velocidad máxima alcanzada por los casos que tienen el mismo número de espiras del estudio inicial. Como era de esperar, el mayor efecto se muestra en la zona cercana al suelo donde se comienza a desarrollar la capa límite. Por último, se determina que δ se ajusta relativamente bien con respecto al valor teórico esperado mientras que α sí que muestra una mayor discrepancia.

Por último, se analiza el resultado obtenido en el segundo caso avanzado. En este caso, se observa que al añadir una variación de la relación b/h sí que se produce una variación en la velocidad máxima alcanzada. En general, este estudio es el que obtiene un mejor ajuste estadístico, y es por ello por lo que se utiliza para desarrollar el modelo final.

4.4.2. Modelo final propuesto

A lo largo de esta Subsubsección 4.4.2 se desarrolla el modelo final escogido para ajustar las ecuaciones propuestas por Irwin [1]. Dicho ajuste sigue una expresión del tipo de la Ecuación 24.

$$\alpha = \alpha_{teórico} + offset + (\alpha_{modelo} - \alpha_{referencia}) \quad (24)$$

Para el caso de δ la expresión es análoga a la Ecuación 24.

Donde:

1. Se escoge un caso de referencia de las 8 configuraciones estudiadas en el segundo estudio avanzado (ver Tabla 15). De esta manera se obtiene $\alpha_{referencia}$ y $\delta_{referencia}$
2. $\alpha_{teórico}$: valor teórico del parámetro α obtenido haciendo uso de las expresiones de Irwin
3. *offset*: la diferencia entre el valor de $\alpha_{referencia}$ o $\delta_{referencia}$ obtenidos por el modelo lineal y el ajuste teórico (ecuaciones de Irwin) para el caso de referencia escogido
4. $\alpha_{modelo} - \alpha_{referencia}$: diferencia entre el valor de α obtenido según el modelo lineal y el valor de α del modelo utilizado como referencia

En este caso, se ha escogido como caso de referencia el número 1 (ver Tabla 15). Una vez seleccionado, se calcula el *offset* a partir del ajuste teórico y del proporcionado por el modelo (ver la Ecuación 22 y la Ecuación 23). Este paso se muestra en la Tabla 21.

$\alpha_{teórico}$ [-]	$\delta_{teórico}$ [m]	$\alpha_{referencia}$ [-]	$\delta_{referencia}$ [m]	<i>Offset</i> α [-]	<i>Offset</i> δ [m]
0.1469	1.0772	0.0950	1.0749	-0.0519	-0.0023

Tabla 21: *Offset* para el caso de referencia escogido

Una vez obtenido los valores de referencia y calculado el *offset* el modelo final sigue la Ecuación 25 y la Ecuación 26.

$$\alpha = \alpha_{teórico} - 0,0519 + (\alpha_{modelo} - 0,095) \quad (25)$$

$$\delta = \delta_{teórico} - 0,0023 + (\delta_{modelo} - 1,0749) \quad (26)$$

5. Resultados

A lo largo de esta sección se trata de, por una parte, realizar una validación del modelo final escogido y, por la otra, mostrar escenas y conclusiones que pueden ser obtenidas del estudio CFD realizado.

5.1. Validación del modelo

Dado que el modelo escogido ha sido ajustado para casos que han sido calculados con el mismo número de espiras (5) que los estudios iniciales, se toma estos como referencia para la validación del ajuste. En primer lugar, recordando la Sección 3 se muestra en la Tabla 22 los valores teóricos del caso.

$\alpha_{teórica}$ [-]	0.19
$\delta_{teórica}$ [m]	1

Tabla 22: Ajuste teórico seleccionado para la validación del modelo

Por otra parte, a través de la Ecuación 22 y la Ecuación 23 y utilizando los datos de la Tabla 5, se obtienen los valores proporcionados por el modelo lineal: $\alpha_{modelo} = 0,0992$ y $\delta_{modelo} = 1,1174$ m. Sustituyendo estos valores y los de la Tabla 22 en las ecuaciones del modelo final (ver Ecuación 25 y Ecuación 26) se obtienen los valores de α y δ finales. Estos valores se muestran en la Tabla 23.

α [-]	0.1423
δ [m]	1.0402

Tabla 23: Ajuste de α y δ proporcionado por el modelo

Además, en primera aproximación, se calcula el valor de U_δ aplicando directamente la corrección lineal obtenida en el segundo estudio avanzado, la Ecuación 21. El valor obtenido para este parámetro es $U_\delta = 11,6$ m/s.

Finalmente, se muestra en la Figura 25 una gráfica que compara los resultados CFD obtenidos de los estudios iniciales, el ajuste teórico inicial realizado y el obtenido mediante el modelo final.

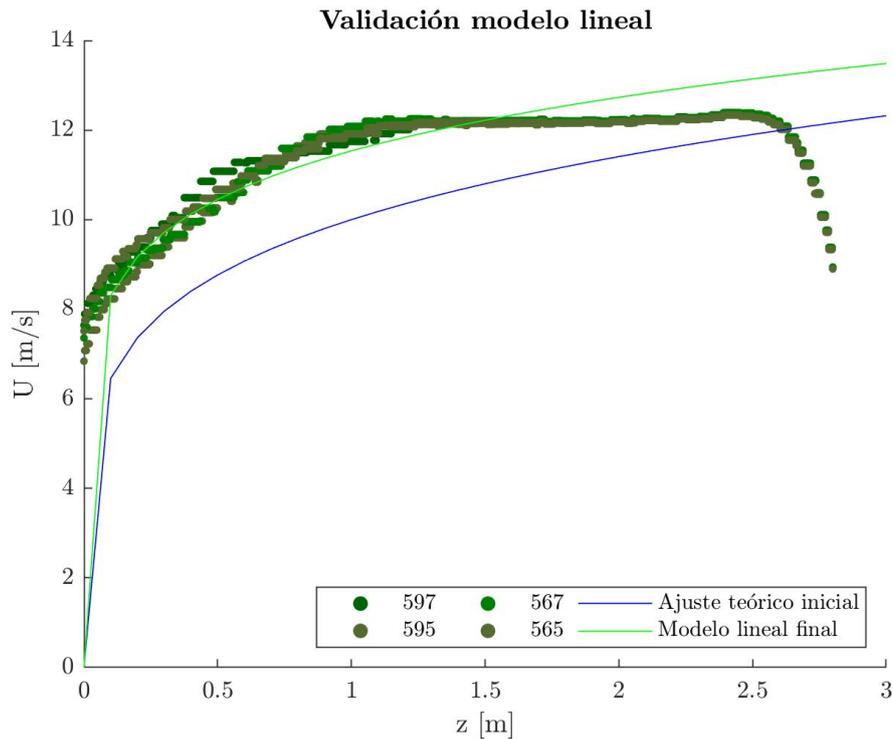


Figura 25: Validación modelo lineal final

Tal y como se puede apreciar en la Figura 25, el ajuste obtenido mediante el modelo lineal consta de una precisión mucho mayor con respecto al ajuste inicial teórico realizado. Se puede apreciar como el modelo lineal se ajusta relativamente bien a como se desarrolla la capa límite.

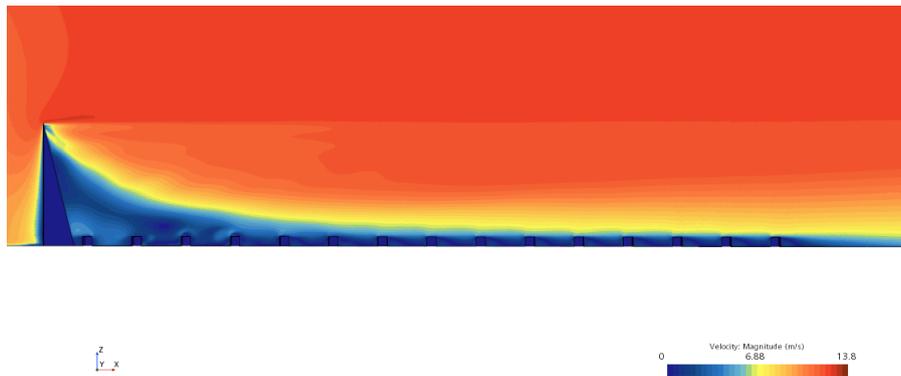
Con el fin de introducir el efecto del número de espiras en el modelo, se ha tratado de obtener para el parámetro U_δ un ajuste similar al realizado para los parámetros α y δ a partir del modelo lineal de la Ecuación 21 y de la Ecuación 18. Sin embargo, dicho ajuste no resultaba fiable, probablemente por la concatenación de error que supone el ajustar el modelo mediante esas dos regresiones lineales. Es por esto por lo que el parámetro U_δ se deberá ajustar, en primer lugar, mediante la regresión lineal de la Ecuación 21 y, posteriormente, de manera manual si se varía el número de espiras.

A través de esta validación, se puede concluir que el modelo final obtenido es válido y ajusta de forma más precisa la capa límite planetaria en comparación con la bibliografía.

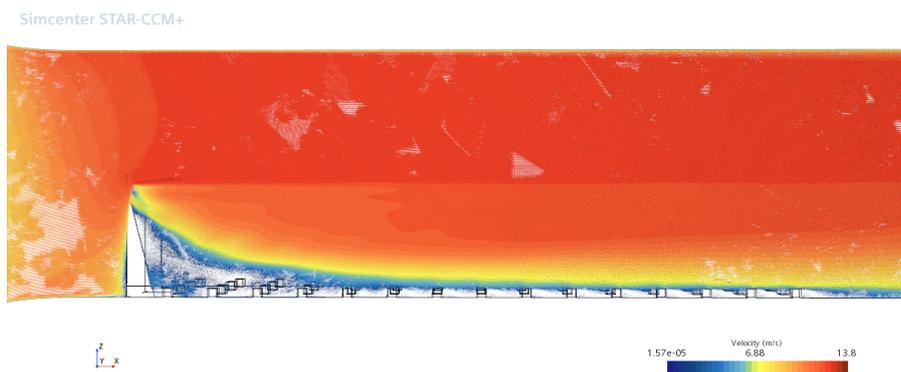
Para finalizar, se resalta que, pese a que lo ideal hubiese sido obtener un modelo que permitiese a través de los valores de U_δ , δ y α obtener las dimensiones de la geometría deseada, esto no es posible debido a la no-linealidad de la ecuación de Irwin. De esta manera, se debe seguir un proceso iterativo para, a partir del modelo lineal obtenido, obtener la geometría deseada.

5.2. Resultados CFD

El objetivo de esta sección es mostrar escenas y figuras que puedan ser representativas del estudio CFD realizado. Estas escenas se muestran en la Figura 26.



(a) Escena escalar



(b) Escena vectorial

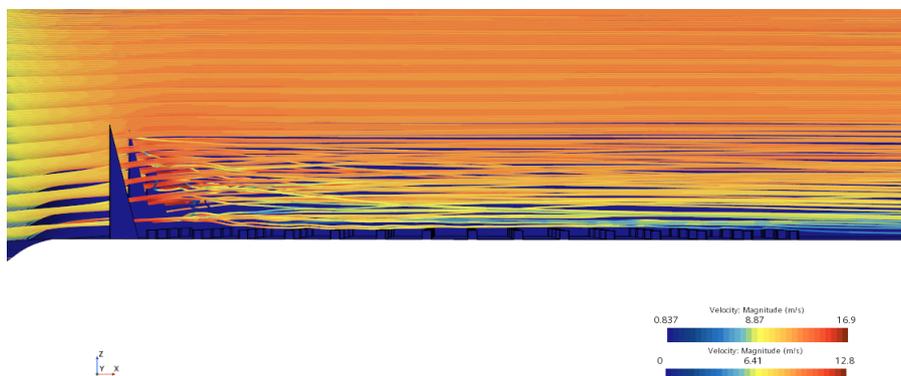
(c) Escena de *streamlines*

Figura 26: Resultados CFD obtenidos

Las escenas CFD obtenidas se enfocan en tratar de observar la evolución de la velocidad aguas abajo de las espiras. Las principales conclusiones obtenidas son:

- Tal y como se puede observar en la Figura 26, el flujo se desprende rápidamente una vez atraviesa las espiras
- Este efecto es el esperado ya que una vez las atraviesa, no tiene un cuerpo al que adherirse
- Los bloques permiten que el flujo se adhiera a ellos, retrasando y suavizando el desprendimiento
- En la Figura 26a y la Figura 26b se aprecia el efecto de incluir un refinamiento del mallado en la zona donde se sitúan las geometrías. Esto es debido a que se muestra como se capta un mayor detalle de la evolución del flujo

- Por último, las líneas de corriente (*streamlines*) permiten captar con mayor detalle el despredimiento del flujo aguas abajo de las espiras. Se aprecia como el flujo adquiere una gran aleatoriedad en dicha zona

6. Conclusión

A lo largo de esta sección se exponen las principales conclusiones del estudio expuesto:

- En primer lugar, se ha realizado una introducción al problema estudiado. Se ha presentado el estado del arte, el cual se basa en un artículo de los años 80 de Irwin quien afirma que, mediante el uso de espiras y bloques simuladores de la rugosidad del terreno se puede determinar un modelo de la capa límite planetaria
- Posteriormente, se ha planteado una introducción a la mecánica de fluidos computacional así como la configuración utilizada para el presente estudio
- Se ha expuesto el planteamiento del estudio, donde se ha tomado como referencia una capa límite logarítmica (Ley de Richard y Hoxey) y se ha tratado de ajustar la ley de Irwin que más se asemeje a dicha Ley.
- Se ha planteado los diferentes estudios realizados:
 - Estudios iniciales donde se ha variado el número de espiras, filas y columnas de bloques: se ha observado una mayor velocidad máxima conforme aumenta el número de espiras
 - Primer estudio avanzado donde se ha variado el tamaño de los bloques simuladores de rugosidad del terreno y la distancia entre ellos: se ha observado un efecto de esta variación en el desarrollo de la capa límite pero no se ha podido extraer conclusiones determinantes
 - Segundo estudio avanzado donde se ha incluido una variación de la relación base altura: es el estudio que mejor análisis estadístico ha proporcionado y el utilizado para plantear el modelo lineal final
- Una vez obtenido el modelo lineal final, se ha realizado una validación satisfactoria del ajuste obtenido y se ha presentado los resultados y observaciones de los estudios CFD realizados

6.1. Trabajo futuro

Esta Subsección 6.1 se dedica a desarrollar las principales líneas de trabajo en las que se debería enfocar estudios posteriores para mejorar el modelo obtenido a lo largo de este trabajo:

- La idea principal debería ser realizar un estudio en el túnel de viento WT5 que pudiese:
 - Validar el modelo lineal propuesto en el presente estudio, realizando una simulación de los mismos casos que han sido estudiados en CFD
 - Mediante el uso del túnel de viento observar comportamientos que no hayan sido apreciados en las simulaciones de mecánica de fluidos computacional
 - Utilizar dichas simulaciones para proponer un modelo aún más robusto del desarrollo de la capa límite planetaria
- Podría proponerse modificaciones del estudio CFD, variando entre otros, parámetros de la geometría, número de espiras o bloques o directamente proponer geometrías diferentes para las espiras. En el Apéndice A se da una introducción a un posible efecto a estudiar.
- Una vez realizadas las simulaciones CFD y en túnel de viento, el siguiente paso sería probar como de robusto es el modelo obtenido tratando de simular la capa límite planetaria en situaciones reales como puede ser en núcleos urbanos

7. Referencias

- [1] H.P.A.H Irwin. The design of spires for wind simulation. *Jorunal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1981.
- [2] Matthew L. Staten and Steven E. Benzley. Localized coarsening of conforming all-hexahedral meshes. *Research Gate*, April 2011. URL: <https://www.researchgate.net/publication/220677908>.
- [3] Jian Wang. Aerodynamic analysis of variable cant angle winglets for improved aircraft performance. *Research Gate*, September 2013. URL: https://www.researchgate.net/publication/257616854_Aerodynamic_Analysis_of_Variable_Cant_Angle_Winglets_for_Improved_Aircraft_Performance.
- [4] Eduardo José Demetrio Sanz. Estudio modelado y experimental de un ala con protuberancias. Online, 2021. URL: <https://riunet.upv.es/handle/10251/170838>.
- [5] Simscale. What is cfd? Online, 2021. URL: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>.
- [6] Daniel Soler Tejada. Desarrollo de la metodología para la obtención de las derivadas aerodinámicas de estabilidad de las aeronaves mediante herramientas de mecánica de fluidos computacional. Trabajo fin de grado, Universitat Politècnica de Valencia, 2018. URL: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/109463/SOLER%20-%20Desarrollo%20de%20la%20metodolog%C3%ADa%20para%20la%20obtencin%20de%20las%20derivadas%20aerodinmicas%20de%20estabili....pdf?sequence=3&isAllowed=y>.
- [7] Wangda Zuo. Introduction of computational fluid dynamics. Online. URL: http://wwwmayr.informatik.tu-muenchen.de/konferenzen/Jass05/courses/2/Zuo/Zuo_paper.pdf.
- [8] Pedro Martí Gómez-Aldaraví. Ampliación de mecánica de fluidos: Introducción al cfd. *Universidad Politècnica de Valencia*.
- [9] J.S. Shang. Three decades of accomplishments in computational fluid dynamics. *Science Direct*. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0376042104000211>.
- [10] Wikipedia. Eniac. Online. URL: <https://es.wikipedia.org/wiki/ENIAC>.
- [11] Lubos Pirkli. Trends and challenges in cfd. Online, 2017. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/trends-challenges-cfd-lubos-pirkli>.
- [12] NASA. Navier-stokes equations. Online. URL: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>.
- [13] Shamoan Jamshed. Using hpc for computational fluid dynamics. URL: <https://books.google.es/books?hl=en&lr=&id=luucBAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Using+hpc+for+computational+fluid+dynamics.&ots=oul21BmmaK&sig=GGw5RGf3g544cmP6LH5aTvwc3Do#v=onepage&q=Using%20hpc%20for%20computational%20fluid%20dynamics.&f=falseyear={2015}>.
- [14] Sara C. Eicher. Ts/cv/dc cfd team. Online. URL: http://cfd.web.cern.ch/Presentazioni/2005/06_28_ATSeminar/2_CFD_SEicher.pdf.
- [15] Pedro Martí Gómez-Aldaraví. Ampliación de mecánica de fluidos: Pre-proceso en cfd. *Universidad Politècnica de Valencia*.
- [16] Cfd computational domain. Online. URL: <https://www.idealsimulations.com/resources/cfd-computational-domain/>.

- [17] Kurt Kurtin. Flow simulation: Computational domain editing. Online, May 2019. URL: <https://www.cati.com/blog/2019/05/flow-simulation-computational-domain-editing-part-1-symmetry/>.
- [18] CFD Online. Mesh classification. Online. URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/Mesh_classification.
- [19] Capítulo 3: Mecánica de fluidos computacional (cfd). URL: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>.
- [20] CFD Online. Tetrahedral and polyhedral. Online. URL: <https://www.cfd-online.com/Forums/fluent/153997-tetrahedral-polyheadral.html>.
- [21] Siemens. Star ccm+ 16.02.009 user guide r8.
- [22] Turbulence: Which model should i select for my cfd analysis? Online, January 2021. URL: <https://www.simscale.com/blog/2017/12/turbulence-cfd-analysis/>.
- [23] O V Abreu M Lázaro J A Capote, D Alvear and P Espina. Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/41787713.pdf>.
- [24] Cedomir Kostic. Review of the spalart-allmaras turbulence model and its modifications to three-dimensional supersonic configurations. *Research Gate*. URL: <https://www.researchgate.net/publication/291815988>.
- [25] CFD Online. K-epsilon models. Online. URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/K-epsilon_models.
- [26] CFD Online. K-omega models. Online. URL: https://www.cfd-online.com/Wiki/K-omega_models.
- [27] Simscale. Boundary conditions. Online. URL: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/boundary-conditions/>.
- [28] Babak Gholami. How to set up bounday conditions in your simulation. *Simscale*, April 2021. URL: <https://www.simscale.com/blog/2015/06/how-to-properly-set-up-boundary-conditions-in-your-simulation/>.
- [29] What is convergence? Online. URL: <https://www.nafems.org/publications/guidelines-for-good-convergence-in-cfd/what-is-convergence/>.
- [30] Mike Kuron. 3 criteria for assesing cfd convergence. Online, January 2015. URL: <https://www.engineering.com/story/3-criteria-for-assessing-cfd-convergence>.
- [31] Pedro Martí Gómez-Aldaraví. Ampliación de mecánica de fluidos: Aspectos numéricos y resolución en cfd. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- [32] Pedro Martí Gómez-Aldaraví. Ampliación de mecánica de fluidos: Post proceso en cfd. *Universidad Politécnica de Valencia*.
- [33] Tips and tricks: Convergence and mesh independency study. Online, January 2012. URL: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/>.
- [34] Mesh models in star ccm+. Online. URL: <https://theansweris27.com/mesh-models-in-star-ccm/>.
- [35] Pliego de condiciones. Online. URL: <https://dpej.rae.es/lema/pliego-de-condiciones>.

- [36] Real decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. Online, April 1997. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/486>.
- [37] Real decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo. Online, April 1997. URL: <https://www.boe.es/eli/es/rd/1997/04/14/488/con>.
- [38] Manual de seguridad y salud para operaciones en talleres mecánicos y de motores térmicos. Online. URL: <https://www.sprl.upv.es/msmecanico1.htm>.
- [39] Documentos de un proyecto de ingeniería: El pliego de condiciones. Online, October 2017. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9wvjsrxlN4w>.
- [40] Los 17 objetivos. Online. URL: <https://sdgs.un.org/es/goals>.
- [41] Cálculo de huella de carbono. Online. URL: <https://www.ceroco2.org/soluciones-ceroco2/calculo-huella-de-carbono/que-es-la-huella-de-carbono>.
- [42] Elisabeth González Cortés. Huella de carbono de la universidad de alicante 2021 (evolución 2018-2021). Online. URL: <https://web.ua.es/es/ecocampus/documentos/calidad-ambiental-ua/huella-de-carbono/huella-de-carbono-2021.pdf>.
- [43] Sueldo del ingeniero aeroespacial en españa. Online. URL: <https://www.jobted.es/salario/ingeniero-aeroespacial>.
- [44] Horas y jornada anual máxima de trabajo efectivo, según estatuto de los trabajadores. Online, September 2020. URL: https://www.elplural.com/economia/asesoria-laboral-ugt/jornada-maxima-de-trabajo-efectivo-y-promedio-computo-anual_120611102.
- [45] Licence prices. Online. URL: https://f.hubspotusercontent10.net/hubfs/402067/stat19web/V19_PRICELIST.pdf.
- [46] Microsoft. Reinventar la productividad con microsoft 365 y microsoft teams. Online. URL: <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/business/compare-all-microsoft-365-business-products>.
- [47] Consulta el precio de la luz hoy: Detalles y evolución de la tarifa pvpc. Online. URL: <https://tarifaluzhora.es/>.
- [48] Consulta el precio diario de la luz: tarifa y comparativa. Online. URL: <https://bitfab.io/es/blog/cuanto-cuesta-imprimir-en-3d/>.

A. Anexo

Como pequeño avance para futuros estudios propuestos y, en relación al efecto de los chaflanes mencionado en la Subsubsección 2.3.8, se estudia un caso con 5 espiras en el que se aumenta la relación b/h de las espiras laterales. Si se observa la Figura 27 se aprecia como, tanto para el caso de la velocidad como para la intensidad turbulenta, existe un efecto importante de esta nueva geometría de las espiras. Se puede apreciar como en la zona de influencia de dichas espiras el flujo tiende a uniformizarse. Por otra parte, también parece que las espiras intermedias también deberían de ser modificadas para conseguir una uniformidad total del desarrollo de la capa límite.

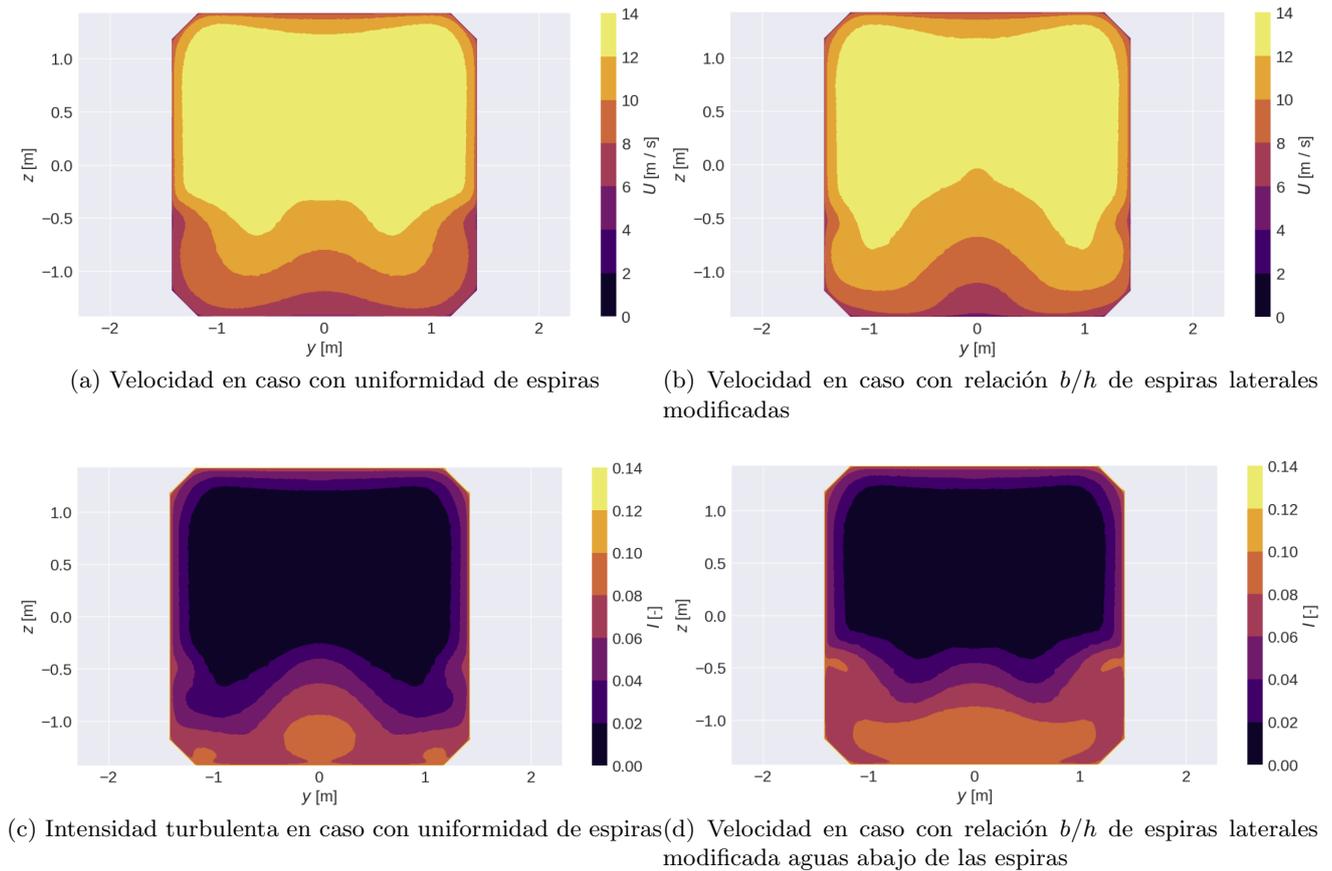


Figura 27: Comparativa casos con uniformidad en la geometría de las espiras vs relación b/h de las espiras laterales modificada

Tal y como ha sido comentado, el modelado de este caso queda fuera de los objetivos del trabajo pero sí que se considera interesante como propuesta de trabajo futuro ahondar en este caso particular.

B. Anexo: Plano

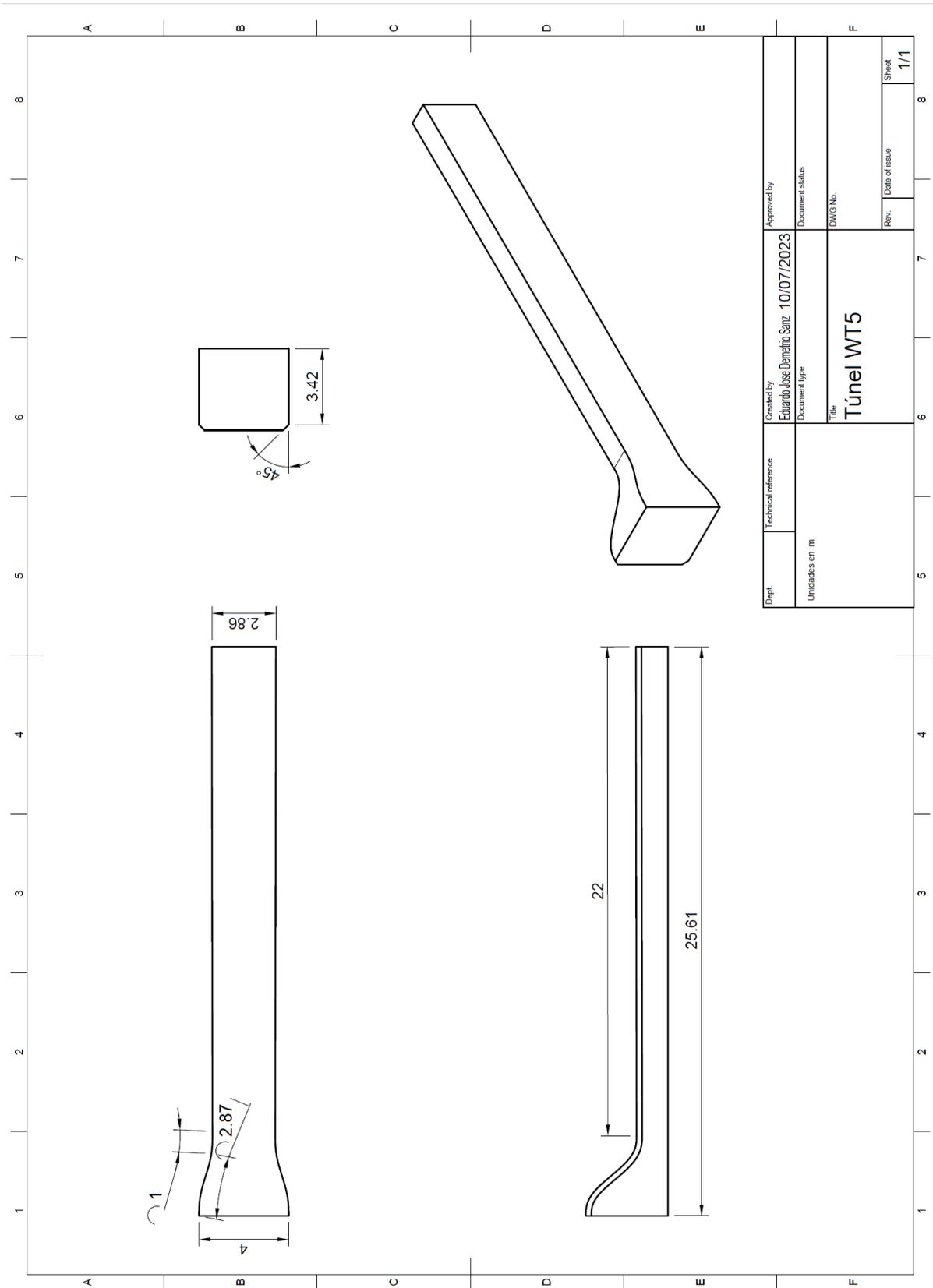


Figura 28: Plano túnel de viento WT5

Parte II

Pliego de condiciones

C. Pliego de condiciones

Se resalta que se ha tomado como referencia para este apartado (Apéndice C) el realizado en el Trabajo Final de Grado del autor del presente estudio, Eduardo José Demetrio Sanz [4], realizando las modificaciones necesarias para este trabajo.

C.1. Definición y alcance del pliego

Un pliego de condiciones es, tal y como se define en la Real Academia Española (RAE), “un documento en el que se establecen las condiciones y criterios reguladores de una subasta o contrato” [35]. Por tanto, es un documento de carácter contractual entre las partes que están involucradas en un trabajo.

El objeto de este documento en el presente estudio es establecer las condiciones que se han de cumplir para poder llevarlo a cabo de forma correcta. Esto implica las condiciones técnicas, facultativas y económicas.

En ciertas ocasiones, se podrán alterar alguno de los pasos predeterminados en este documento, siempre y cuando esté debidamente justificado y no se actúe por debajo de los límites mínimos de calidad preestablecidos.

C.2. Condiciones y norma de carácter general

En esta parte del pliego se exponen aquellas normas comunes que se han de cumplir en proyectos cuyas tareas sean similares a las de este estudio.

En primer lugar, las condiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo están publicadas en el Real Decreto 486/1997 del 14 de abril [36]. En los anexos que lo componen se desarrollan las siguientes cuestiones que se han de cumplir en el lugar en el que se realice el estudio:

- Anexo I: Condiciones de seguridad en los lugares de trabajo
- Anexo II: Orden, limpieza y mantenimiento
- Anexo III: Condiciones ambientales de los lugares de trabajo
- Anexo IV: Iluminación de los lugares de trabajo
- Anexo V: Servicios higiénicos y locales de descanso

Por otra parte, gran parte del trabajo que se realiza en el estudio implica el uso de un ordenador. Por tanto, la normativa vigente en cuanto a las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas al trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización está publicada en el Real Decreto 488/1997 del 14 de abril [37]. Al igual que en el caso anterior, existen anexos que definen las cuestiones que se han de cumplir:

- Anexo: Disposiciones mínimas

C.3. Condiciones particulares

A continuación, se exponen otros factores específicos de este estudio que se han de cumplir:

C.3.1. Especificaciones técnicas

En caso de realizar estudios de túnel de viento se tendría la necesidad de hacer uso de talleres. Para esto, la normativa que se ha de seguir se puede encontrar resumida en el Manual de seguridad y salud para operaciones en talleres mecánicos y de motores térmicos publicado por la UPV [38].

C.3.2. Especificaciones facultativas

En este apartado se regulan los derechos y obligaciones de las partes involucradas en el proyecto [39].

Se divide en [39]:

- Obligaciones y derechos del contratista: entre otros destacan:
 - Conocer la norma aplicable
 - Conocer el proyecto de forma completa
 - Obligación de seguir en todo momento las indicaciones establecidas en el proyecto
 - Obligación de cumplimiento de los plazos
- Obligaciones y facultades de la dirección facultativa: entre otros destacan:
 - Supervisar los aspectos del proyecto que puedan afectar a fiabilidad, calidad y seguridad
 - Estar presente en los momentos en lo que se le necesite durante la realización del proyecto
 - Realizar el seguimiento necesario para asegurar que se cumplan los plazos
 - Resolver aquellos problemas que no hayan sido previstos en primera instancia

C.3.3. Especificaciones económicas

Este apartado se desarrolla de forma independiente en el Apéndice F.

Parte III

Objetivos de desarrollo sostenible y Huella de carbono

D. Objetivos de desarrollo sostenible

A lo largo de este Apéndice D se desarrolla como está relacionado el presente estudio con los Objetivos de Desarrollo Sostenible que marca la Agenda 2030 [40] de Naciones Unidas. Resulta importante destacar que tanto este trabajo como la filosofía de la UPV están alineados con el fin de cumplir los objetivos marcados en la Agenda.

De manera general, el trabajo realizado se centra en tratar de obtener un modelo que permita predecir capas límites planetarias de forma más precisa que la bibliografía existente. Esto es algo que tiene un valor real ya que el estudio de este tipo de capas límite se ha de realizar en múltiples situaciones tales como:

- Estudios de vientos en núcleos urbanos
- Diseño de estructuras civiles
- Implantación de energías sostenibles tales como la solar o la eólica

De esta manera, resulta evidente que si se obtiene un modelo lo más fiel a la realidad posible, se podría disminuir de manera exponencial los recursos necesarios para realizar los estudios -por ejemplo, menos horas de túnel de viento- a la vez que se podría aumentar la eficacia de los mismos.

De manera más precisa, se podría relacionar los estudios con los siguientes objetivos de la Agenda 2030:

- Objetivo 7 Energía asequible y no contaminante: este objetivo está centrado en “garantizar el acceso a una energía asequible, fiable y sostenible” [40]. El desarrollo de un modelo de capa límite planetaria funcional podría mejorar el diseño de placas solares y parques eólicos que permitan aumentar el uso de las energías renovables y disminuir el precio de la energía.
- Objetivo 8 Trabajo decente y crecimiento económico: el crecimiento de las energías renovables resulta hoy en día un punto fundamental de la economía. De esta manera, si se consiguiese mejoras en su diseño podría desencadenar un crecimiento económico del país.
- Objetivo 9 Industria, innovación e infraestructura: este objetivo se centra en una industrialización inclusiva y sostenible. A través de la mejora del diseño de estructuras civiles gracias al conocimiento de la capa límite planetaria se está innovando y se podría crear infraestructura con una mayor sostenibilidad.
- Objetivo 11 Ciudades y comunidades sostenibles: al igual que en el objetivo anterior se podría crear, en general, núcleos urbanos con una mayor sostenibilidad.
- Objetivo 13 Acción por el clima: la mejora y optimización de energías renovables es clave para reducir el efecto del cambio climático y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Finalmente, se presenta en la Tabla 24 la relación global del trabajo con cada uno de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Se ha clasificado como “Alto” los Objetivos mencionados anteriormente. Como “Medio” y “Bajo” aquellos que guardan una relación menos fuerte y como “No Procede” aquellos cuya relación con el estudio es poco significativa.

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

Tabla 24: Relación del trabajo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible

E. Huella de carbono

A lo largo de este Apéndice E se expone la huella de carbono en $\text{kg } CO_2 \text{ eq}$ que supone la realización de este trabajo. De manera resumida, se considera esta huella de carbono como los gases de efecto invernadero emitidos de forma directa o indirecta como consecuencia de la actividad humana [41]. En este caso, se aplica esta definición para desglosar el impacto de la realización de este estudio.

La huella de carbono se calcula siguiendo la siguiente expresión:

$$Huella \text{ de carbono} = \sum (Dato \text{ actividad} \cdot Factor \text{ de emisión}) [41][42] \quad (27)$$

Siendo [41] [42]:

- Dato actividad: el valor de la actividad generadora de gases de efecto invernadero.
- Factor de emisión: la cantidad de gases de efecto invernadero por cada dato de actividad.

En el estudio, los gases de efecto invernadero se centran en el consumo eléctrico y las emisiones del ordenador utilizado para la realización de los cálculos y el informe, ya que no existen otros factores como posibles desplazamientos para la realización del estudio. De esta manera, la estimación de la huella de carbono de este estudio se muestra en la Ecuación 30:

$$Dato \text{ actividad} = 1560 \text{ kWh} \quad (28)$$

$$Factor \text{ emisión} = 0,41 \text{ kg } CO_2eq/kWh [41] \quad (29)$$

$$Huella = 1560 \cdot 0,41 = 639,6 \text{ kg } CO_2eq \quad (30)$$

Parte IV

Presupuesto

F. Presupuesto

A continuación, se expone el presupuesto en el que se desglosan los costes que tiene realizar un proyecto de investigación como el que ha sido realizado en este estudio.

En primer lugar, es necesario comprender los diferentes pasos que abarca el proyecto:

1. Documentación y revisión bibliográfica
2. Diseño de las geometrías estudiadas { *Modelado de las geometrías*
3. Estudio en CFD { *Familiarización con el programa : Star CCM+*
Programación y realización de las simulaciones
4. Comparación de resultados
5. Redacción de la memoria del estudio

Todas estas actividades engloban costes de diversa índole, lo que en el presupuesto final se denota como *conceptos*. Estos se pueden clasificar según la Tabla 25.

Recursos humanos	Ingeniero aeroespacial/aeronáutico junior
	Ingeniero aeroespacial/aeronáutico senior
Recursos materiales	Ordenador/es
Licencias de software	Star CCM+
	StatGraphics
	Office
Otros	Consumo eléctrico

Tabla 25: Conceptos presupuesto

A continuación, se expone en varias tablas los costes asociados a cada uno de estos bloques:

En la Tabla 26 se hace referencia a los costes de recursos humanos. El coste unitario ha sido calculado en base a los sueldos anuales medios de un ingeniero aeroespacial recién titulado (25000 €) y un ingeniero senior (70000 €) [43]. Por otra parte, se ha tomado el máximo número de horas laborables anuales para un contrato de 40 horas semanales: 1944 horas [44]. Se ha estimado que el tiempo dedicado por el supervisor del estudio es un 20% del tiempo total del autor del estudio.

Concepto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
Ingeniero junior	13 €/h	300	3900 €
Ingeniero senior	36 €/h	60	2160 €

Tabla 26: Costes de recursos humanos

En cuando a los dispositivos utilizados para realizar el estudio, se ha utilizado un ordenador portátil de 32 GB de RAM. Se estima que el coste inicial del mismo es de 2500 €. El valor residual se establece en 750€ y su periodo de amortización es de 4 años. De los datos aportados se calcula el coste en €/h:

$$coste\ ordenador = \frac{2500 - 750}{35046} = 0,05 \quad (31)$$

Por otra parte, para la simulación de los casos se ha hecho uso del *cluster* de la UPV. En la Tabla 27 se desglosan los costes de recursos materiales.

Concepto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
Ordenador	0.05 €/h	300 h	15 €
Cluster UPV	0.01 €/h cpu	55000 h cpu	550 €

Tabla 27: Costes de recursos materiales

La Tabla 28 hace referencia a los costes de las licencias necesarias de los distintos programas utilizados. En cuanto al programa *StatGraphics* las licencias ofertadas son, normalmente, anuales [45]. Se ha tenido en cuenta que existe la posibilidad de utilizar un mes de prueba de forma gratuita por lo que no sería necesario pagar la suscripción. Para el coste del programa *Star CCM+* se ha tomado como referencia el utilizado por Soler en su estudio [6]. Para el *Office* se ha tomado el precio de suscripción mensual para una empresa [46].

Concepto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
StatGraphics	- €/mes	1	- €
Star CCM+	0.5 €/h	1200	600 €
Office	11.7 €/mes	3	35.1 €

Tabla 28: Costes de licencia de software

La Tabla 29 hace referencia a otros costes involucrados en el desarrollo del trabajo. Para el consumo eléctrico se ha tomado la media del mes de junio de 2023 [47]. El precio medio obtenido es 0.1506 €/kWh [48]. Se estima que se consume alrededor de 1kW por hora.

Concepto	Coste unitario	Cantidad	Coste total
Consumo eléctrico	0.1506 €/h	1560	234.9 €

Tabla 29: Otros costes

Finalmente, en la Tabla 30 y la Tabla 31 se muestra un presupuesto que resume el coste total de cada uno de los bloques y el coste final del estudio.

Concepto	Uds	Base Ud.	Base Total	% I.V.A	I.V.A
Costes de recursos humanos					
Ingeniero junior	300	13 €	3900 €	21 %	819 €
Ingeniero senior	60	36 €	2160 €	21 %	453.6 €
Coste de recursos materiales					
Ordenador	300	0.05 €	15 €	21 %	3.2 €
Cluster UPV	55000	0.01 €	550 €	21 %	115.5 €
Costes de licencia de software					
StatGraphics	1	-	-	21 %	-
Star CCM+	1200	0.5 €	600 €	21 %	126 €
Office	2	11.7 €	35.1 €	21 %	7.4 €
Otros costes					
Consumo eléctrico	1560	0.1506 €	234.9 €	21 %	49.3 €

Tabla 30: Desglose presupuesto

Totales	
Total B.I	7495.04 €
Total I.V.A	1573.96 €
TOTAL	9069 €

Tabla 31: Coste total final