

INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA EN EL CICLISMO MEDIANTE CÁLCULO CFD

Autor del trabajo:

Pallás Cervera, Borja

Titulación:

Grado en Ingeniería Aeroespacial

Tutor del trabajo: Antonio Gil Megías

Cotutor del trabajo: Pau Raga Nieto

Valencia, Julio de 2018

Dedicado a mi familia, que han vivido estos 4 años tanto como yo, siempre a mi lado,
demostrándome que, con trabajo, al final las cosas salen.
Dedicado a mis amigos de toda la vida. Alberto, Belén, Alba, gracias por vuestro continuo
interés sobre mi trabajo y sobre mi carrera, por ese apoyo incondicional que siempre me
sorprenderá.
Dedicado mis amigos de la universidad, los alimañas, por enseñarme a relativizar la vida y
por ser responsables de las mayores carcajadas estos 4 años.
Dedicado a la gente del despancho por sus continuos consejos, especialmente a Andrea
Mares, compañera inseparable durante este último año.
Y, por supuesto, dedicado a Antonio Gil, Pedro Quintero y, sobre todo, a Pau Raga, por
contestar siempre amablemente y con infinita paciencia a mis dudas, por todos los consejos
recibidos durante el curso y por haberme permitido realizar un proyecto alejado de lo
común que tanto he disfrutado.

Resumen

El presente Trabajo de Final de Grado consiste en una serie de estudios a modo de introducción de los efectos aerodinámicos en el ciclismo mediante CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Se modela un problema base a partir del cual se avanza en el estudio global realizando las modificaciones pertinentes, con la finalidad de adecuar el caso para todos los estudios e incluso para futuras ampliaciones.

Tras una introducción teórica, se ha desarrollado y justificado toda la configuración de todos los casos, incidiendo en las herramientas utilizadas que ofrece STAR-CCM+. Una vez definidos todos los casos, se han presentado los resultados, entre los que se incluyen el estudio del ciclista en solitario, junto con la correspondiente independencia de malla; un estudio paramétrico sobre la distancia axial entre dos ciclistas, y su comparación con el caso base; un acercamiento a los efectos del viento en el ciclismo y, finalmente, un caso transitorio donde se pretende analizar las fuerzas implicadas durante un movimiento de relevo. A partir de estos estudios, se dan una serie de conclusiones que cierran el proyecto.

Resum

El present Treball de Fi de Grau consisteix en una sèrie d'estudis a mode d'introducció dels efectes aerodinàmics al ciclisme mitjançant CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Es modela un problema base a partir del qual s'avança a l'estudi global realitzant les modificacions pertinents, amb el fi d'adequar el cas per a tots els estudis i també per a futures ampliacions.

Tras la introducció teòrica, s'ha desenvolupat i justificat tota la configuració de tots els casos, incidint en les ferramentes utilitzades que ofereix STAR-CCM+. Una vegada definits tots els casos, s'han presentat els resultats, els quals inclouen l'estudi d'un ciclista en solitari amb la independència de malla; un estudi paramètric sobre la distància axial entre dos ciclistes, y la seua comparació amb el cas inicial; un acostament als efectes del vent en el ciclisme i, finalment, un caso transitori on es pretén analitzar les forces implicades durant un moviment

de relleus. A partir d'estos estudis, es donen una sèrie de conclusions que tanquen el projecte.

Abstract

The present Final Degree Project consists of a series of studies in order to introduce the aerodynamic effects in cycling through CFD (textit Computational Fluid Dynamics). A basic problem is modeled after which progress is made in the global study, making the pertinent modifications, with the purpose of adapting the case for all the studies and even for future extensions. After a theoretical introduction, the configuration of all the cases has been developed and justified, focusing on the tools used by STAR-CCM+. Once all the cases have been defined, the results have been presented, including the study of the solo cyclist, together with its corresponding mesh independence; a parametric study on the axial distance between two cyclists, and its comparison with the base case; an approach to the effects of the wind in cycling and, eventually, a transient case where the main goal is to analyze the forces involved during a cycling relay movement. From these studies, a series of conclusions that close the project are given.

Índice general

Resumen	v
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	4
2. Fundamentos teóricos	7
2.1. Introducción	7
2.2. Fuerzas resultantes	7
2.3. Fuerzas de resistencia aerodinámica	9
2.3.1. Aerodinámica del cuerpo romo	10
2.4. Fundamentos de CFD	11
2.4.1. Tratado de la turbulencia	12
2.4.2. Método numérico	14
2.4.3. Solver	14
2.5. Mallado Overset	14
3. Metodología	17
3.1. Introducción	17
3.2. Modelado CFD	18
3.2.1. Definición geometría ciclista	18
3.2.2. Descripción del dominio	18
3.2.3. Estrategia de mallado	20
3.2.4. Configuración del caso	23
3.2.5. Particularidades de cada caso	25
3.3. Modelado del movimiento de la pierna	28
3.3.1. Introducción	28
3.3.2. Aproximación 2 g.d.l	28
4. Resultados	31
4.1. Introducción	31
4.2. Independencia de malla	31
4.3. Caso estacionario: ciclista en solitario	34
4.4. Caso estacionario: Distancia Axial	37
4.5. Caso estacionario: Viento lateral	43
4.6. Caso transitorio: Relevó	48

5. Conclusiones y trabajos futuros	51
5.1. Conclusiones	51
5.1.1. Conclusiones generales	51
5.1.2. Conclusiones particulares del caso	51
5.2. Trabajos futuros	53
6. Pliego de condiciones y Presupuesto	55
6.1. Introducción	55
6.2. Pliego de condiciones	55
6.2.1. Condiciones técnicas	55
6.2.2. Condiciones del puesto de trabajo	56
6.3. Presupuesto	58
6.3.1. Mano de obra	58
6.3.2. Apoyo computacional	59
6.3.3. Total	60
Bibliografía	60

Índice de figuras

1.1. El ciclista alemán del conjunto QuickStep, Tony Martin, experto en pruebas de contrarreloj y 4 veces Campeón del Mundo.	2
1.2. Distintos estudios sobre la influencia de la distancia axial sobre la reducción de resistencia sufrida por el ciclista trasero	3
2.1. Fuerzas resultantes sobre el conjunto del ciclista y la bicicleta.	8
2.2. Fuerzas resultantes sobre el ciclista.	10
2.3. Campo del flujo simplificado alrededor del ciclista.	11
2.4. Descomposición de las distintas regiones de la capa límite.	13
2.5. Regiones overset sobre el dominio global.	15
2.6. Pérdida de información en la interfase overset-dominio.	16
3.1. Geometría del caso inicial.	18
3.2. Dimensiones del dominio fluido	19
3.3. Bloques que definen los volúmenes de control	19
3.4. Refinamientos del mallado en base al ciclista y a la estela	20
3.5. Celdas de un cuarto del tamaño base en las zonas próximas a pared	21
3.6. capa límite en el cuadro de la bicicleta	22
3.7. valores del y^+ sobre la superficie del ciclista	22
3.8. Condición de contorno de velocidad de la rueda	24
3.9. esquema del caso de distancia axial	25
3.10. esquema del caso de viento lateral	25
3.11. mallado de la zona refinada para la estela de un viento de 60°	26
3.12. esquema del caso de relevo	26
3.13. mallado de la región del relevo en un plano YX	27
3.14. trayectoria elíptica seguida por el ciclista durante el relevo	27
3.15. El ciclista alemán del conjunto QuickStep, Tony Martin, experto en pruebas de contrarreloj y 4 veces Campeón del Mundo.	28
4.1. Variables que determinan la elección de la malla a utilizar	33
4.2. Representación de las líneas de corriente alrededor de ciclista, justificando su condición de cuerpo romo.	34
4.3. Aportación de cada parte del ciclista al drag total.	35
4.4. Reducción del drag del ciclista trasero en comparación con estudios de túnel de viento	37
4.5. Reducción del drag del ciclista líder	38

4.6. comparativa entre el coeficiente de presiones entre un ciclista rodando en solitario y otro yendo a rueda.	39
4.7. Efecto de la estela generada por el ciclista líder sobre el segundo.	40
4.8. Amplitud de la estela del primer ciclista con y sin ciclista a rueda.	41
4.9. Evolución de los perfiles de coeficiente de presiones con la distancia.	42
4.10. Evolución cúbica de la potencia con la velocidad resultante.	43
4.11. Evolución de los coeficientes de fuerza para distintos ángulos de incidencia del viento.	44
4.12. Campo de velocidades en el eje Y para el caso sin viento lateral y para viento lateral máximo (90°).	45
4.13. Diferencias ente los coeficientes de fuerzas.	46
4.14. Evolución de la posición del ciclista trasero en función del viento incidente sobre un campo de velocidades.	47
4.15. Evolución en el tiempo de la fuerza de resistencia sufrida por ambos ciclistas.	48
4.16. Evolución en el tiempo de las fuerzas laterales sufridas por ambos ciclistas.	49
4.17. Perfiles de C_p del ciclista con y sin movimiento.	50
4.18. Evolución de las estelas de velocidad durante el movimiento completo.	50

Índice de tablas

2.1. Valores de la fuerza de arrastre normalizada con al área frontal para los distintos modelos de turbulencia	13
2.2. Imbalance de masa	15
4.1. Tabla con las variables utilizadas para la independencia de malla	32
4.2. Comparación de la malla elegida (tamaño base de 16mm) con respecto a la siguiente	33
4.3. Descomposición del drag según las distintas partes del ciclista	35
4.4. tabla de la descomposición de las fuerzas por partes	36
4.5. Valores de Drag en función de la distancia axial entre la rueda trasera del primer ciclista y la delantera del segundo.	37
4.6. Coeficientes de fuerzas adimensionalizados	44
4.7. Valores de los coeficientes de fuerzas en posición inicial y corregida del ciclista a rueda	46
4.8. Desplazamientos realizados en X-Y	47
6.1. Descomposición de horas empleadas	59
6.2. Total mano de obra	59
6.3. Precio de las licencias utilizadas	59
6.4. Coste total	60

Introducción

Índice

1.1. Motivación	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	4

1.1. Motivación

Desde hace unos años, el deporte de competición ha experimentado una notable profesionalización hasta unos límites de competitividad extrema. Esto ha provocado que las marcas actuales en todos los deportes se hayan igualado fruto de las similitudes en las rutinas tradicionales de todos los deportistas, provocando la búsqueda y el desarrollo de métodos alternativos de mejora, más allá de los entrenamientos tradicionales. Entre ellos, la ciencia y la tecnología se han abierto paso como elemento de apoyo fundamental para la mejora del rendimiento.

Esta igualdad extrema encuentra su paradigma en los deportes de competición de carreras y, especialmente, por el caso que atañe, en el ciclismo profesional. Actualmente es habitual ver como en vueltas de una, dos o incluso tres semanas, la diferencia entre ganar y quedar segundo es de apenas unos segundos, o como en pruebas de contrarreloj individual de más de 50km, tan solo unas décimas te pueden apartar de una medalla mundial. Además, el gasto energético del ciclista, íntimamente relacionado con la aerodinámica, durante una prueba de un kilometraje que puede llegar a los 250km se convierte en un parámetro determinante del rendimiento del ciclista.

Debido a esta razón, los equipos profesionales han descubierto en el estudio tecnológico una fuente de posible desarrollo que les permitan conseguir esa diferencia que a la larga pudiere resultar determinante, las nombradas por el equipo Sky como "ganancias marginales".



Figura 1.1: El ciclista alemán del conjunto QuickStep, Tony Martin, experto en pruebas de contrarreloj y 4 veces Campeón del Mundo.

En la figura 3.15 se pueden observar algunos de los elementos tradicionales pensados para la mejora aerodinámica en pruebas contra el reloj, desde ruedas trasera lenticulares, pasando por cascos especializados e incluso la posición óptima que debe adoptar el ciclista sobre la bici, la cual cabe recordar que siempre estará limitada por la biomecánica del propio ciclista ya que, como se desarrollará posteriormente, lo ideal sería la consecución de una posición que minimizará el área frontal, imposible desde este punto de vista biomecánico. Sin embargo, este tipo de tecnología ya está ampliamente aceptado y compartido por los equipos, que actualmente dedican sus esfuerzos hacia estudios más específicos y a cuestiones más relacionadas con la colocación, como la distancia óptima de ir a rueda o incluso el aprovechamiento del aire para provocar los temidos abanicos.

Por lo tanto, el presente trabajo pretende elaborar un modelo en CFD que proporcione una primera aproximación a los efectos aerodinámicos en el ciclismo, con la intención de aplicar los conocimientos obtenidos a lo largo de los 4 años de la carrera en un ámbito a priori distinto a lo que se le presupone a esta especialidad, con el objetivo de desarrollar un trabajo original y cercano a una de las pasiones del autor: el deporte de competición.

1.2. Antecedentes

Hasta los años 90, la aerodinámica en el ciclismo no estaba considerada un campo de estudio determinante. Sin embargo, con la mayor profesionalización del ciclismo y con la difusión de pruebas como la búsqueda del récord del mundo de la hora, se empezó a valorar la opción del estudio de la aerodinámica en el ciclismo, así como el desarrollo de nuevas tecnologías y estrategias que optimicen las condiciones aerodinámicas, y por ende minimizar

el gasto energético del ciclista. Sin ir más lejos, la polémica por estas nuevas tecnologías fruto de la investigación fue una de las protagonistas del pasado Tour de Francia, cuando los nuevos *maillots* del equipo Sky, con los cuales se comentaba que se conseguía una ganancia de alrededor del segundo y medio por kilómetro [1], puso el acento en la necesidad de que los equipos profesionales desarrollen una sección dedicada a estudios de este tipo.

Tradicionalmente, al igual que en otros campos de aerodinámica externa como la automoción, ha sido la técnica del túnel de viento la más utilizada, debido a su capacidad de simular condiciones reales en geometrías idénticas a las que luego salen a la pista o carretera. Uno de los primeros estudios que se encuentran data de 1979, realizado por Kyle [2], ponía de manifiesto la reducción del drag sufrida por el ciclista trasero, señalando una reducción de hasta el 35% a distancias de 1m, a priori bastante mayores que las generalmente aceptadas para ir a rueda. Más recientemente, diversos estudios [3] señalaron la no linealidad de la reducción de la resistencia con la distancia axial. Incluso algunas valoran la posibilidad de que, para distancias extremadamente cercanas, no solo se pone en compromiso la seguridad del ciclista en términos de una posible caída, si no que incluso existe un aumento del drag en el ciclista trasero [4]. A pesar de que los resultados tienden a ser similares, lo cierto es que las condiciones de estudio, como la posición del ciclista o la geometría de la bicicleta pueden resultar determinantes para las diferencias observadas en la imagen figura 1.2. Resulta interesante el comentario sobre el estudio de Blocken [5]. La razón de que difiera tanto de los resultados es debido a que este es un estudio CFD en el cual, con el objetivo de buscar ahorro en coste computacional, no se modela la bicicleta. Por lo tanto, de esta manera se busca justificar uno de los puntos fuertes del trabajo que se va a desarrollar, ya que no es en absoluto habitual la simulación de todo el conjunto mediante técnicas CFD

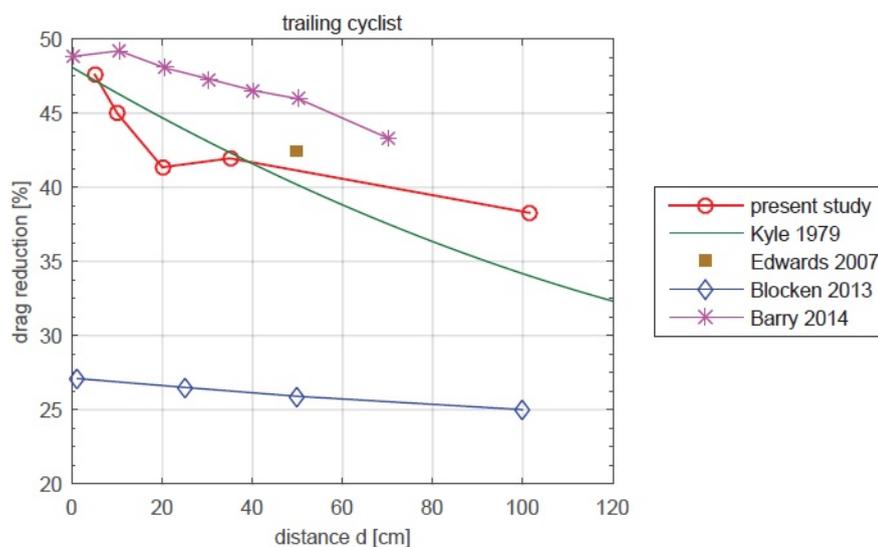


Figura 1.2: Distintos estudios sobre la influencia de la distancia axial sobre la reducción de resistencia sufrida por el ciclista trasero

Estudios de este mismo estilo han sido llevados a cabo para el análisis de vientos laterales y de las técnicas de relevo [6], con las limitaciones que implican el túnel de viento para analizar casos que, desde un punto de vista más realista, implican la interacción en movimiento

entre los dos ciclistas, de ahí que este se haya convertido en uno de los objetivos del proyecto.

En cuanto a las técnicas de CFD, ya introducidas, más interesantes en base al trabajo que se va a realizar, cada vez están siendo más utilizadas, especialmente en la búsqueda de la optimización de elementos aerodinámicos, tanto de la bicicleta (cuadro, ruedas lenticulares...) como del propio ciclista, siendo los relacionados con el casco de contrarreloj [7] los más habituales. En el estudio citado, por ejemplo, se realiza un estudio de 3 cascos distintos, así como de la influencia de la posición de la cabeza con respecto al torso, y las implicaciones que esto conlleva en términos aerodinámicos, estudiando la distinta separación del flujo entre las diversas posiciones.

Finalmente, se cree adecuado comentar que no es el primer trabajo relacionado con la aerodinámica en el ciclismo realizado por el autor de este proyecto, ya que en asignaturas anteriores se ha realizado una primera aproximación 2D en CFD al estudio de distintos cascos aerodinámicos, siendo una experiencia tan positiva que se decidió profundizar en este campo y en estas técnicas para la realización del proyecto final de carrera.

1.3. Objetivos

Los objetivos del presente Trabajo de Final de Grado pueden dividirse en 3 bloques fundamentales:

Por un lado, se persiguen una serie de objetivos meramente académicos, los cuales consisten fundamentalmente en la finalización de los estudios del Grado en Ingeniería Aeroespacial en l Universitat Politècnica de Valencia con la consecuente consecución del título en la especialidad de Aeromotores. Unido a este hecho, se buscar una correcta aplicación conceptual de los conocimientos adquiridos a lo largo de estos 4 años de carrera.

Por otro lado, existen una serie de objetivos profesionales, es decir, el aprendizaje de trabajo en un entorno profesional dentro de un despacho especializado en CFD. Dentro de este bloque se incluye el aprendizaje de la metodología diaria del trabajo, así como el desarrollo del trabajo en equipo.

Finalmente, el objetivo fundamental puramente técnico consiste es la implementación en CFD mediante el programa STAR-CCM+ de un modelo de un ciclista y los efectos aerodinámicos que sufre. De dicha meta derivan una serie de metas, a saber:

- Manipulación de una geometría inicial para adaptarla al caso.
- Diseño y optimización del proceso de mallado.
- Resolución de un caso base estacionario.
- Adaptación del movimiento cinemático asociado a la acción del pedaleo mediante un sistema de barras implementado en MATLAB.

- Manipulación de la estrategia de mallado conocida como *Overset Mesh* para la consecución del movimiento en un código CFD.
- Cuantificación del ahorro energético al ir a rueda.

Fundamentos teóricos

Índice

2.1. Introducción	7
2.2. Fuerzas resultantes	7
2.3. Fuerzas de resistencia aerodinámica	9
2.3.1. Aerodinámica del cuerpo romo	10
2.4. Fundamentos de CFD	11
2.4.1. Tratado de la turbulencia	12
2.4.2. Método numérico	14
2.4.3. Solver	14
2.5. Mallado Overset	14

2.1. Introducción

La física fundamental que gobierna el movimiento del ciclista es de sobra conocida y ha sido modelada con frecuencia, tanto el movimiento referido a las fuerzas externas actuantes como a la biomecánica propia del cuerpo humano de la cual resulta el movimiento del pedaleo.

A lo largo de este capítulo se introducirán, por un lado, dichas fuerzas externas que definen la potencia necesaria para superarlas que ha de desarrollar el ciclista, haciendo especial hincapié en las fuerzas aerodinámicas y en la dinámica del fluido alrededor del cuerpo, las cuales son el objetivo último del presente trabajo y las fuerzas fundamentales a lo largo de toda la carrera. Además, también se desarrollará teóricamente una exposición de los modelos físicos del CFD utilizados en el proyecto, así como una introducción a los fundamentos de la técnica de mallado overset.

2.2. Fuerzas resultantes

Desde un punto de vista clásico, se recurre a las leyes de Newton para observar el equilibrio de fuerzas resultante [8].

Primera ley de Newton : La Primera Ley de Newton establece que un objeto en reposo o en movimiento tiende a permanecer en su estado constante siempre y cuando no se le aplique una fuerza. La ley de la inercia se relaciona con el ciclista de una manera simple e intuitiva. El ciclista se movería con velocidad constante proporcionada por un pedaleo inicial siempre y cuando no existiesen las fuerzas que se oponen a dicho movimiento, como las fuerzas aerodinámicas y de fricción.

Segunda ley de Newton : La Segunda Ley de Newton afirma que la fuerza neta que se ejerce sobre un objeto es proporcional a la aceleración sufrida por dicho objeto y a su masa. Referida al ciclismo, este fenómeno se pone de manifiesto cuando la fuerza generada por el ciclista y las fuerzas contrarias generan una fuerza neta, la cual determina la aceleración del ciclista.

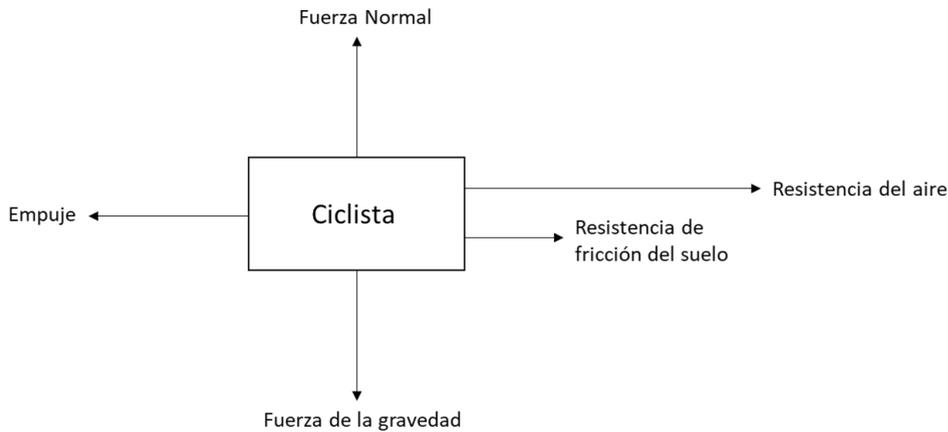


Figura 2.1: Fuerzas resultantes sobre el conjunto del ciclista y la bicicleta.

Las fuerzas actuantes sobre el ciclista son las que determinan la potencia que debe desarrollar el ciclista para conseguir el avance deseado [9]. Martin et al. [10] validaron un modelo matemático para determinar la potencia. Como vemos en la 2.1 , la potencia total transferida a las ruedas mediante el mecanismo de cadenas con un rendimiento E depende de las siguientes energías: la asociada a la resistencia aerodinámica (P_{AE}), la resistencia por la interacción entre la rueda y el suelo (P_{RR}), las pérdidas de fricción de la rueda (P_{WF}) y las no tan intuitivas fuerzas debido a los cambios en energía potencial (P_{PE}) por diferencia de alturas y los cambios de energía cinética (P_{KE}) surgidos de la aceleración lineal y rotacional.

$$P_{total} = \frac{P_{AE} + P_{RR} + P_{WF} + P_{PE} + P_{KE}}{E} \quad (2.1)$$

De las fuerzas presentadas, son las aerodinámicas las que suponen un mayor interés desde el punto de vista de este trabajo.

2.3. Fuerzas de resistencia aerodinámica

La potencia aerodinámica introducida en el primer término de la Ecuación 2.1 se debe fundamentalmente a 2 efectos: Los momentos aerodinámicos generados fruto de la rotación de las ruedas y la fuerza resistiva del aire que se opone al movimiento del ciclista, conocida como resistencia aerodinámica (del inglés *Drag*)¹, es decir, una componente rotacional y una componente lineal, en la cual recae el mayor interés.

Esta componente lineal, P_A , es directamente proporcional a la velocidad relativa del viento y a la fuerza de resistencia aerodinámica, la cual a su vez depende cuadráticamente de la velocidad, así como del área frontal, de la densidad del aire (razón por la cual los récords de la hora se intentan en altitud) y del coeficiente de resistencia C_D .

$$F_D = \frac{1}{2} * C_D * A * \rho * U^2 \quad (2.2)$$

Estudios [10] aseguran que la resistencia aerodinámica representa el 90% de las fuerzas que se oponen al movimiento del ciclista. Este valor disminuye conforme los efectos de la gravedad cobran importancia, es decir, en puertos de alta montaña, donde las fuerzas aerodinámicas quedan reducidas a valores alrededor del 20%. Para los estudios que ocuparán este proyecto, la potencia utilizada se definirá como:

$$W = \frac{F_D * U + 9,8 * P * F_R}{E} \quad (2.3)$$

Centrándose en los efectos aerodinámicos, son 3 las fuerzas y los momentos que sufre el ciclista, siendo la fuerza de arrastre predominante respecto a la fuerza lateral -la cual depende del viento- y a la de sustentación. Además, cada fuerza lleva asociada un momento referido al sistema de referencia de la rueda delantera, los cuales pueden comprometer la estabilidad del ciclista en situaciones adversas.

Además, el ciclista y la bicicleta también sufren una resistencia no tan inmediata, y generalmente de menor importancia, fruto de la rotación de las ruedas y de la propia rotación de las piernas.

¹a lo largo del proyecto, se usará indistintamente resistencia de arrastre o drag

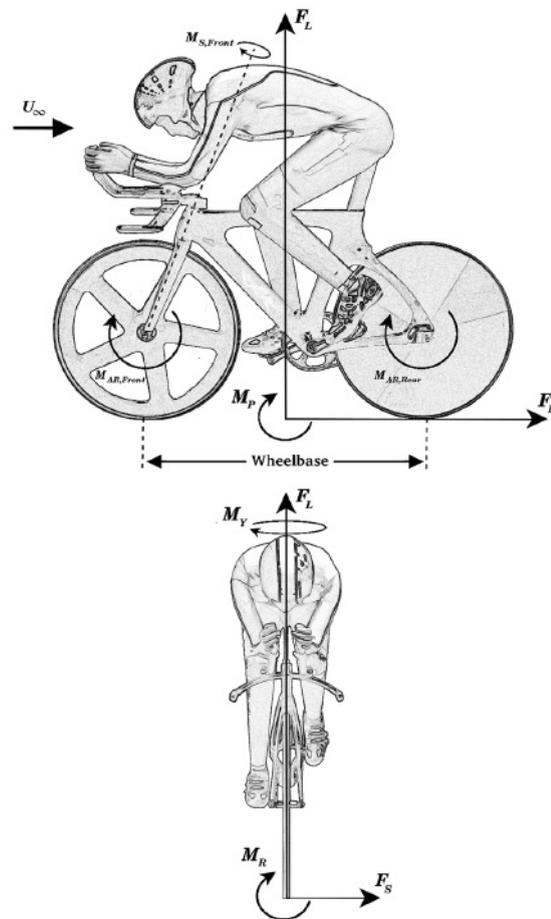


Figura 2.2: Fuerzas resultantes sobre el ciclista.

2.3.1. Aerodinámica del cuerpo romo

Los cuerpos, desde un punto de vista aerodinámico, pueden clasificarse en cuerpos romos (*bluff body*) o cuerpos esbeltos (*streamlined body*), en función de la fuerza de arrastre dominante en el caso. Cuando el drag predominante es el debido al desarrollo de la capa límite recibe el nombre de drag viscoso, y es característico de los *streamlined*. Por su parte, cuando el drag predominante es el debido al desarrollo de estructuras en el flujo, se denomina drag por presión, y es el característico de los cuerpos romos.

En el caso del conjunto ciclista-bicicleta, el flujo presenta extensas regiones de separación, por lo que quedaría englobado en la categoría de cuerpo romo. La separación del flujo alrededor de los ciclistas se visualiza mediante una onda turbulenta y escalas de vorticidad de baja presión.

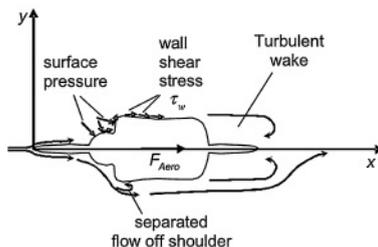


Figura 2.3: Campo del flujo simplificado alrededor del ciclista.

Para reducir la fuerza sufrida por el ciclista, independientemente de su talla, los esfuerzos han de dirigirse al coeficiente de drag, el cual depende de multitud de factores como la rugosidad superficial, el número de Reynolds, la forma del ciclista... La manera de conseguirlo radica en disminuir la diferencia de presiones entre la parte frontal y la trasera. Sin embargo, debido a las características del cuerpo, esto puede llevar a situaciones de separación de flujo, fenómeno que, unido a la tridimensionalidad del caso, complica considerablemente la reducción del drag.

2.4. Fundamentos de CFD

En esta sección se describirán los pasos fundamentales que se siguen en un proceso CFD. Tras un repaso general, se justificarán los modelos físicos, el enfoque para el estudio de la turbulencia y la técnica de mallado que posteriormente se comentará con más profundidad a lo largo de la subsección 3.2.3

Un programa de cálculo de fluidos computacional parte de las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, de las cuales buscará una solución mediante métodos numéricos. Estas ecuaciones, conocidas popularmente como ecuaciones de Navier-Stokes, tienen la desventaja de que, hasta la fecha, no existe solución analítica, lo que, unido a los fenómenos turbulentos, hace de la necesidad imperante de programas de este tipo para conseguir una solución a problemas en los cuales está implicada la mecánica de fluidos lo más cercanos posibles a la realidad.

Todo proceso CFD consta de 3 etapas fundamentales [11].

- Una etapa de preproceso, donde se modela conceptualmente el problema, se decide la geometría y la malla, así como los modelos físicos y condiciones del fluido y del contorno que cierren nuestro problema.
- Una etapa de cálculo, la cual engloba los solver utilizados por el programa en un proceso de resolución iterativa al cual se le marcan unos criterios de convergencia que den por válido el resultado e interrumpan el cálculo.
- Finalmente, una etapa de postproceso que consiste en el tratado de resultados y que engloba no solo a la herramienta CFD, sino a cualquier otro programa de tratamiento de datos.

2.4.1. Tratado de la turbulencia

Para el tratado de la turbulencia, existen dos enfoques fundamentales: el LES (*Large Eddy Scales*) y el RANS (Reynolds Average Navier-Stokes). En el primer método se calculan las escalas grandes de la turbulencia, mientras que las pequeñas son modeladas. Por su parte, el modelo RANS promedia las ecuaciones de Navier-Stokes descomponiendo cada variable ϕ en su media y su variable fluctuante. Las ecuaciones que resuelve son esencialmente como las de Navier-Stokes, pero se le añade un término conocido como el tensor de Reynolds, función de los flujos medios. Para el caso de este estudio se utilizará un modelo RANS, que para el objeto del trabajo funciona correctamente y supone un ahorro computacional considerable.

$$T_t = \rho \cdot \begin{bmatrix} \overline{u'u'} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'v'} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{w'v'} & \overline{w'w'} \end{bmatrix}$$

Dentro del RANS, existen distintos modelos cuyo objetivo es modelar ese tensor de Reynolds característico del RANS, conocidos como modelos de viscosidad. La aproximación más común es la de Boussinesq. La ventaja de estos modelos radica en la resolución de escalares adicionales que posibilitan la derivación de la viscosidad turbulenta μ_t . Los 3 modelos más utilizados y considerados inicialmente para este proyecto han sido los siguientes:

- Spallart-Almaras: Este método surge de la industria aeronáutica y presumiblemente, es en casos de separación de flujo de perfiles alares donde mejor funciona. A diferencia de los dos modelos que se presentarán a continuación, tan solo resuelve una ecuación de transporte, lo que, si bien es cierto que le hace más simple, también resulta menos efectivo en casos que impliquen recirculaciones complejas o fuerzas sobre el cuerpo.
- K-Epsilon: El siguiente modelo considerado es el K-Epsilon, el cual utiliza dos ecuaciones para resolver la energía cinética turbulenta κ y el ratio de disipación turbulenta ϵ , escalares que le dan el nombre al modelo. Dentro del modelo, existen distintas aproximaciones, habiendo utilizada la de Reynolds bajo en el caso presentado.
- K-Omega: Este modelo, el cual ha sido el seleccionado por las razones expuestas tras la explicación, también utiliza dos ecuaciones para definir la viscosidad turbulenta, resolviendo en este caso la energía cinética turbulenta κ y el ratio de disipación turbulenta específico ω . Dichas ecuaciones son las que preceden:

$$\frac{\partial \kappa}{\partial t} + U_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} = P_k - Cte \cdot \kappa \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\kappa \nu_\tau) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha Cte_2^2 - Cte_3 \cdot \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \sigma_\kappa \nu_\tau) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F) \sigma_{\omega^2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial \kappa}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (2.5)$$

Este modelo ofrece dos variantes, la estándar y la SST. Esta segunda ha sido la seleccionada, ya que resuelve uno de las desventajas fundamentales del modelo K-Omega respecto al K-Epsilon, el problema de sensibilidad en condiciones de flujo no perturbado y a la entrada del dominio.

La mayor ventaja de este método es su capacidad de modelar la capa límite, en especial

la capa viscosa más próxima a la pared, en nuestro caso el ciclista, lo que le convierte en el modelo más óptimo para el caso de este proyecto.

No obstante, y con la intención de asegurar un resultado lo más realista posible, se resolvió el caso base variando únicamente el modelo de turbulencia con el objetivo de comprobar su influencia. En la tabla presentada a continuación se puede comprobar como los modelos de dos ecuaciones apenas presentan diferencias entre ellos, mientras que se observa que el modelo Spallart-Albaras resulta ser el menos adecuado, justificando así el desarrollo del proyecto con el K-Omega.

Experimental	$\kappa\text{-}\omega$	$\kappa\text{-}\epsilon$	Spallart-Albaras
59.4	56.307	55.04	53.24

Tabla 2.1: Valores de la fuerza de arrastre normalizada con al área frontal para los distintos modelos de turbulencia

Ligado al modelo de turbulencia, aparece el modelo de tratamiento de pared en función del y^+ objetivo. STAR-CCM+ ofrece 3 opciones de tratamiento de pared: para y^+ bajos, altos y todos. En función de los valores de y^+ en los que se vaya a trabajar, interesará usar un modelo u otro. En el caso del ciclista, el modelo seleccionado es el *All y^+ Wall Treatment*. Este modelo resuelve la capa límite en aquellas zonas por debajo de $y^+=5$, que presumiblemente serán las predominantes. Sin embargo, asumiendo que habrá zonas de y^+ elevado, especialmente en zonas de suelo más alejadas, este modelo de tratamiento total modelará el comportamiento para y^+ superiores a 30. En la zona intermedia, conocida como capa buffer, los efectos resultan impredecibles ya que no funciona ninguna de las ecuaciones de las otras dos zonas, por lo que el modelo tratará de resolver en la medida de lo posible.

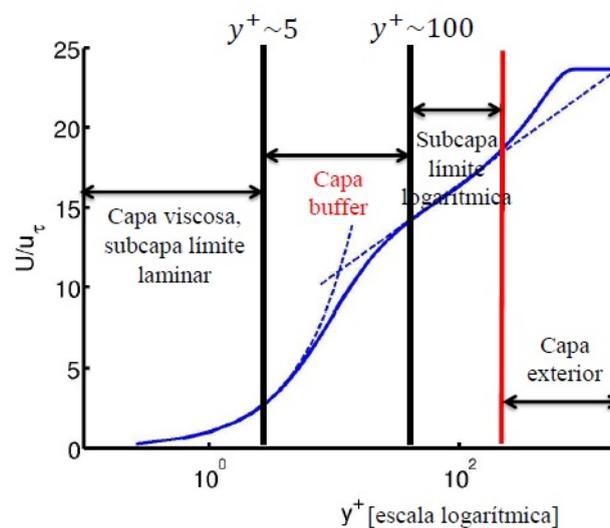


Figura 2.4: Descomposición de las distintas regiones de la capa límite.

2.4.2. Método numérico

STAR CCM+, al igual que la gran mayoría de códigos CFD, propone dos métodos numéricos de cálculo fundamentales: *Pressure-based* y *Density-based*.

Del nombre del método se deduce su funcionamiento. Mientras que el primero utiliza la ecuación de continuidad para obtener la ecuación de la presión, la segunda la utiliza para obtener el campo de densidades.

A pesar de que actualmente ambos métodos han sido desarrollados y te permiten una amplia flexibilidad, tradicionalmente el *Pressure-based* es utilizado para cálculos con flujo incompresible -Mach inferior a 0.3-, mientras que el *Density-based* se utiliza en aquellos casos donde los efectos de la compresibilidad cobran importancia. Por tanto, resulta evidente la elección del *Pressure-based* para este proyecto, donde las velocidades manejadas nunca superan $M=0.05$, por lo que los efectos compresibles no se contemplan. Además, unido a este fenómeno y justificado por el mismo, se seleccionan los modelos de gas-aire y de densidad constante.

2.4.3. Solver

Para el modelado del flujo, también son dos las opciones que maneja STAR-CCM+: *Coupled Flow* y *Segregated Flow*.

La diferencia fundamental radica en la resolución de ecuaciones, ya que el método *Coupled* resuelve simultáneamente las ecuación de presión y velocidad, resultando en un aumento de los recursos necesarios por el caso en términos de memoria y tiempo computacional. Tradicionalmente se ha defendido que este método es más adecuado en casos con notables gradientes de densidad, siendo el método *Segregated* el óptimo en el resto de casos, entre los que, de acuerdo a esta justificación, se encontraría el ciclista.

No obstante, el *Coupled* te da la opción de controlar el número de Courant, cuyo correcto manejo posibilita acelerar el proceso de convergencia de los casos, lo que supone un ahorro de tiempo.

Dentro del *Coupled Flow*, se ha optado por un método de discretización de segundo orden y de integración implícito.

2.5. Mallado Overset

Como se comentará posteriormente en la subsección 3.2.3, la técnica de mallado Overset ha sido una de las utilizadas para el desarrollo de gran parte del proyecto, por lo que en este apartado se ofrece una breve explicación de esta técnica, de sus fundamentos y de su correcta implementación.

El uso de la malla overset encuentra su justificación fundamentalmente en casos donde se busca el movimiento de una parte del dominio respecto al resto, tanto desde un punto de vista estacionario, donde una malla overset permite la traslación de dicha región sin necesidad de remallar, con el ahorro de tiempo que ello supone, como desde un punto de vista transitorio, donde se busca simular el movimiento relativo entre dos o más cuerpos.

Su funcionamiento se explica a partir del otro nombre con el que es conocido este tipo de

malla: *overlapping region*, que traducido queda como región superpuesta.

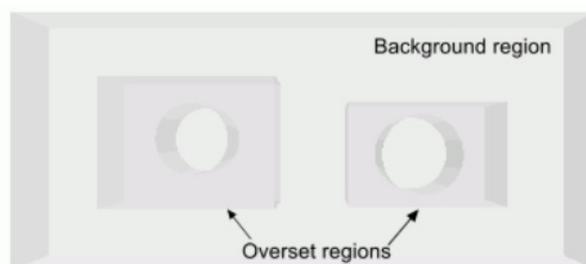


Figura 2.5: Regiones overset sobre el dominio global.

Es decir, una malla overset consiste en una superposición entre la malla principal y la nueva, de manera que la información pase de una a otra a través de la interfase de ambas mediante la interpolación de los datos de las celdas adyacentes, siempre y cuando la superficie superpuesta entre las dos mallas sea suficiente [12]. Las celdas se dividen entonces en activas [13], donde las ecuaciones se resuelven, e inactivas, en las cuales no se resuelven pero que están preparadas en caso de que la región overset se mueva. Las celdas activas se dividen entre celdas donantes y celdas receptoras *donor and acceptor cells*. Cada celda receptora debe encontrar al menos una celda donante para que se produzca la interpolación de datos. La solución se calcula simultáneamente en todas las celdas activas. Una de las desventajas de este método radica en la no conservación del mismo en cuanto a la conservación de masa, lo que explica la necesidad de conseguir una malla adecuada en la interfase, de manera que la pérdida de datos sea la menor posible. Por ello se ha realizado, a partir de un caso en el que no se usa malla overset, una comparación con un caso overset con la intención de conseguir los resultados más exactos posibles. En la figura 2.6 se puede ver como en la zona de la interfase inevitablemente hay una zona de pérdida de información. Sin embargo, tras varias pruebas, consiguió una malla donde las diferencias de resultados entre el caso con y sin overset son mínimas. Cuantitativamente, este hecho se ha justificado realizando un imbalance de masa entre la entrada y la salida del dominio para ambos casos, dando como resultado:

Tabla 2.2: Imbalance de masa

	Con Overset	Sin Overset
Inlet (kg/s)	1.641,05	1.640,94
Outlet (kg/s)	1.642,22	1.641,36
Imbalance (%)	0,07	0,025
Diferencia (%)	0,045	

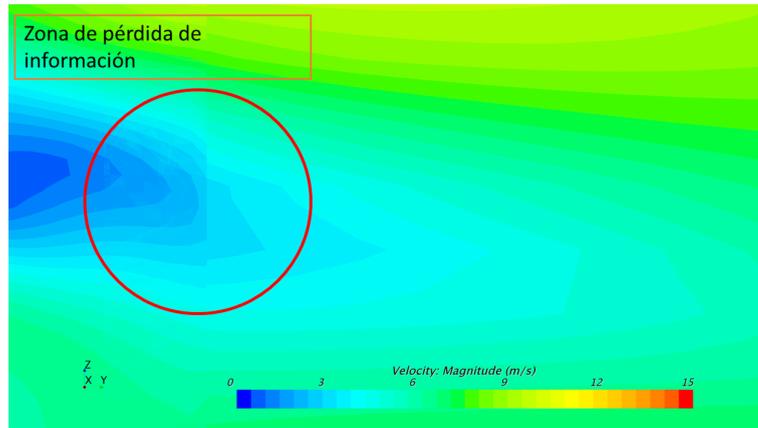


Figura 2.6: Pérdida de información en la interfase overset-dominio.

La interfase ofrece varias opciones de interpolación, habiendo seleccionado finalmente una interfase lineal, de mayor precisión que la *distance weighted*.

Metodología

Índice

3.1. Introducción	17
3.2. Modelado CFD	18
3.2.1. Definición geometría ciclista	18
3.2.2. Descripción del dominio	18
3.2.3. Estrategia de mallado	20
3.2.4. Configuración del caso	23
3.2.5. Particularidades de cada caso	25
3.3. Modelado del movimiento de la pierna	28
3.3.1. Introducción	28
3.3.2. Aproximación 2 g.d.l	28

3.1. Introducción

A lo largo de este capítulo, dividido en 2 secciones fundamentales, se mostrará detalladamente el procedimiento utilizado para la configuración de los casos de los cuales surgirán los resultados.

Por un lado, se abordará paso por paso el proceso mediante el cual se prepara en CFD el caso base, desde el trato de la geometría y la descripción del dominio, la estrategia de mallado seguida en vistas al futuro caso transitorio y la elección del modelo físico seleccionado.

Por otro lado, se comentará el diseño del sistema de barras que representa el movimiento del pedaleo con sus dos casos propuestos (1 y 2 grados de libertad), así como su traslado al modelo CFD de STAR-CMM+, con las modificaciones pertinentes necesarias.

3.2. Modelado CFD

3.2.1. Definición geometría ciclista

El primer paso antes de abordar el problema consiste en la definición de la geometría del ciclista. Para ello, se toma como base un modelo de la base de datos de SIEMENS CD-ADAPCO.

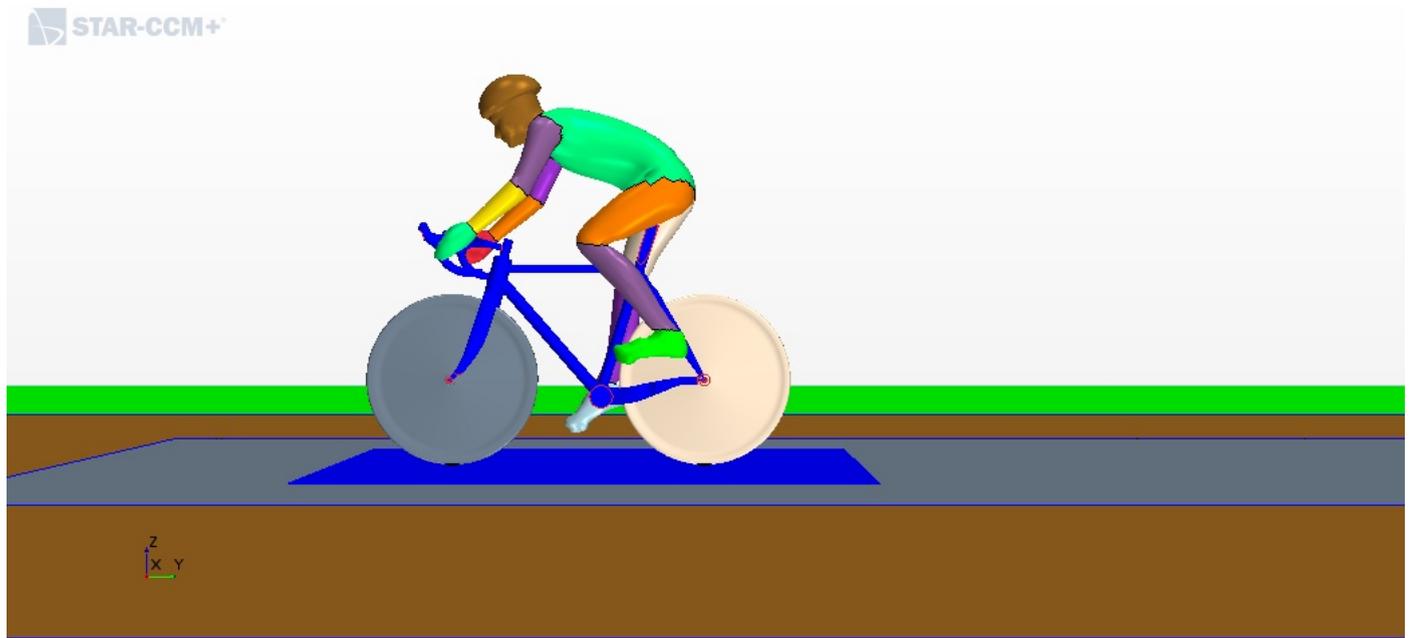


Figura 3.1: Geometría del caso inicial.

Como se puede ver en la figura 3.1, la figura se aproxima satisfactoriamente a la de un ciclista real. Cabe mencionar, para tenerlo en cuenta posteriormente a la hora de validar los resultados con experimentos, que el ciclista se encuentra en una posición media en términos aerodinámicos, es decir, no está completamente erguido pero tampoco en posición de *trial*. Además, para evitar problemas en el mallado, las ruedas son completamente macizas, fenómeno que habrá que tener en cuenta especialmente en los estudios donde las fuerzas laterales cobren importancia.

3.2.2. Descripción del dominio

El dominio impuesto, como en todo modelo CFD, debe tener unas dimensiones suficientes que garanticen que las condiciones de contorno impuestas no afecten a los resultados, es decir, que el flujo tenga espacio suficiente para desarrollarse sin problemas.

En la 3.2 se observa con claridad la diferencia de tamaño entre el ciclista y el dominio fluido. Numéricamente, el dominio tendría unas dimensiones X-Y-Z de $11,9m - 24,9m - 8,15m$, siendo Y la componente en la cual se desplazaría el ciclista. El ciclista, por su parte, está colocado a cota $Z = 0m$, totalmente centrado respecto al eje X y a una distancia

Y del inicio del dominio fluido de $8m$, mientras que sus dimensiones máximas son de $0,41m - 1,66m - 1,76m$. Es decir, unas 5 longitudes características por delante, y unas 15 por detrás, superando las 3 y 10 habituales en proyectos anteriores realizados en la carrera.

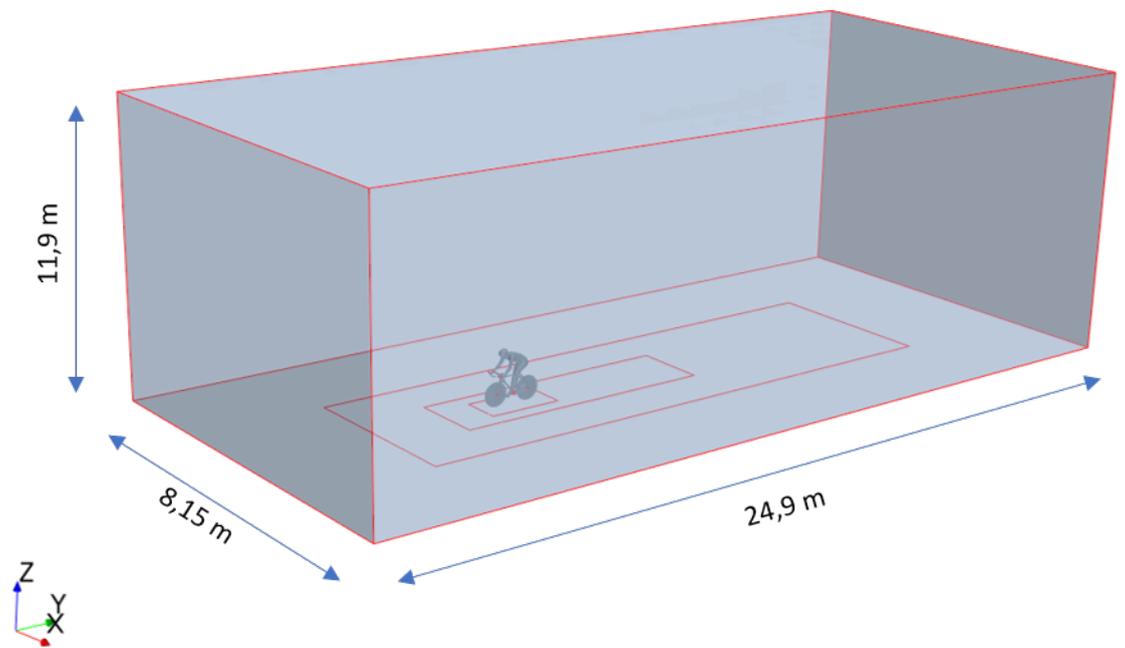


Figura 3.2: Dimensiones del dominio fluido

STAR-CCM+

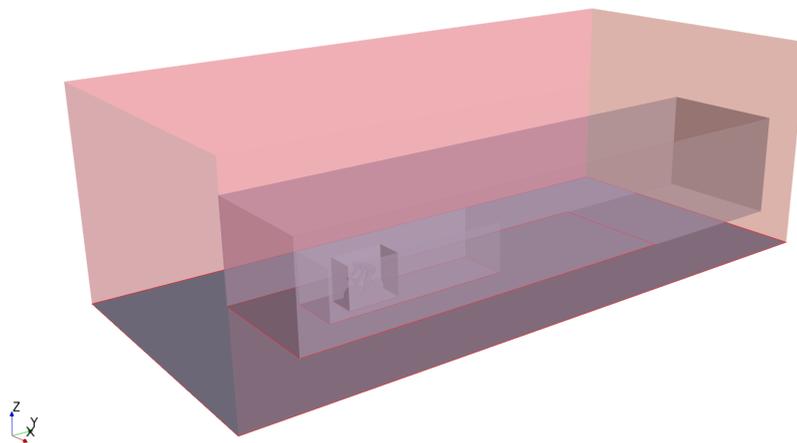


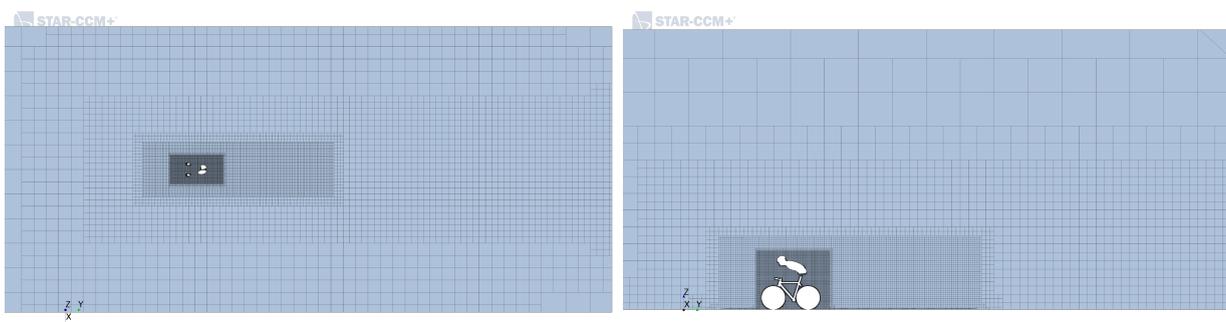
Figura 3.3: Bloques que definen los volúmenes de control

Por otro lado, se ha llevado a cabo la creación de 3 bloques que actúan como volumen de control, de manera que se pueda seguir con mayor exactitud el desarrollo del flujo. El primer bloque se construye alrededor del ciclista, mientras que los otros dos van dirigidos al estudio de la estela dejada por el ciclista, tal y como se ve en la figura 3.3. Para ello se aprovechará de la geometría las partes denominadas *ROAD*, las cuales representan la carretera.

3.2.3. Estrategia de mallado

La estrategia de mallado seguida parte de una *Trimmed Cell Mesher*, es decir, está constituida por elementos hexagonales que proporcionan la mayor precisión para un mismo número de elementos. A estos elementos se les impone un tamaño base, en este caso de 16mm, siendo este tamaño el del elemento más próximo al ciclista y a partir del cual se referirán el resto de tamaños de los otros elementos tales como volúmenes de control. La elección de este tamaño de celda se justificará posteriormente en la sección 4.2 al desarrollar el proceso de independencia de malla.

Tras esto, sobre la malla del dominio principal y utilizando las partes que definían las secciones de carretera, se realiza un *Surface Control* sobre cada una de ellas, así como un *Volumetric Control* sobre cada bloque definido con anterioridad, con la intención de ahorrar celdas en las zonas más lejanas donde la solución pierda interés. Una vez creados, se define el tamaño de malla referido al tamaño base inicial, siendo del 100 % para la malla más cercana al ciclista y aumentando de manera considerable conforme te alejas, hasta un tamaño del 32000 % en la zona más alejada, es decir, en el *Surface Mesh* denominado Farfield y que corresponde a los lados, al inlet y al outlet . Este refinamiento buscado se puede ver en la figura 3.4, donde se observa como son el contorno del ciclista y la estela las zona de mayor calidad de celda.



(a) Malla en plano XY

(b) Malla en plano YZ

Figura 3.4: Refinamientos del mallado en base al ciclista y a la estela

En la tabla adjunta a continuación podemos ver el tamaño de celda de las distintas superficies y volúmenes definidos.

Base Size	Vol Control 1	Vol Control 2	Vol Control 3	Surf Control 1	Surf Control 2
16mm	100 %	400 %	Abs (0.3m)	400 %	400 %

Sobre esta configuración base, se fijan unos límites mínimos de malla del 25 % del tamaño base, con la intención de conseguir una transición adecuada entre aquellas zonas que requieren mayor sensibilidad, donde se desarrollará una capa límite y el volumen de control, como por ejemplo en las ruedas o el manillar.

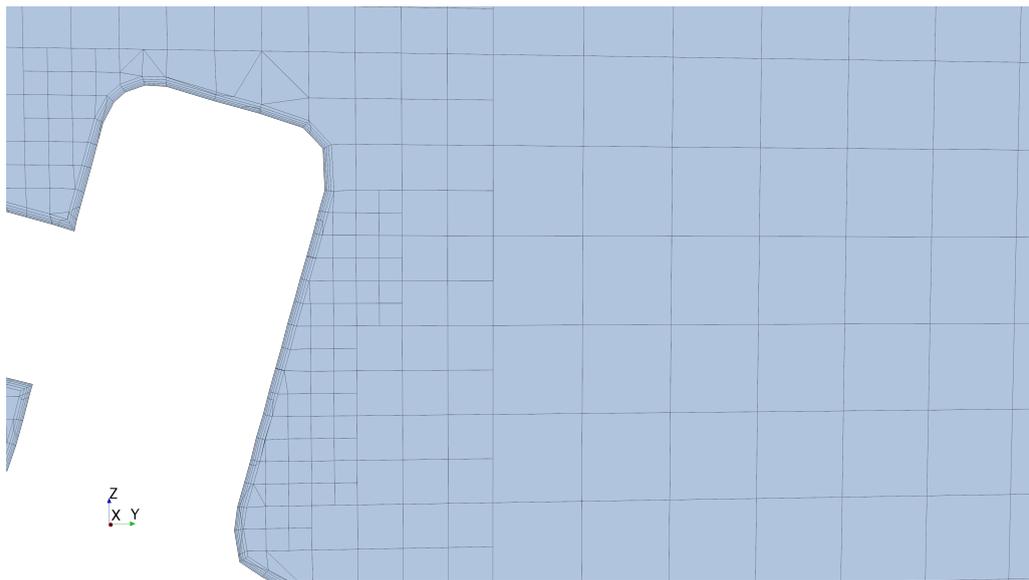


Figura 3.5: Celdas de un cuarto del tamaño base en las zonas próximas a pared

Además, en las ruedas de la bicicleta y en el contorno del ciclista se configura un mallado de capa límite de 5 filas de celdas, *thickness* de un espesor del 10 %, de manera que se consigue un y^+ alrededor del ciclista, cumpliéndose así el objetivo, y un crecimiento entre cada *layer* de 1.3, en base a las directrices justificadas en la subsección 2.4.1. Cabe comentar, como se ve en la figura 3.7, que existen zonas en las que se llega a valores de $y^+=10$, debido a aumentos en el número de Reynolds (como por ejemplo en la parte exterior de las ruedas). No obstante, son zonas muy puntuales que no comprometen la solución.

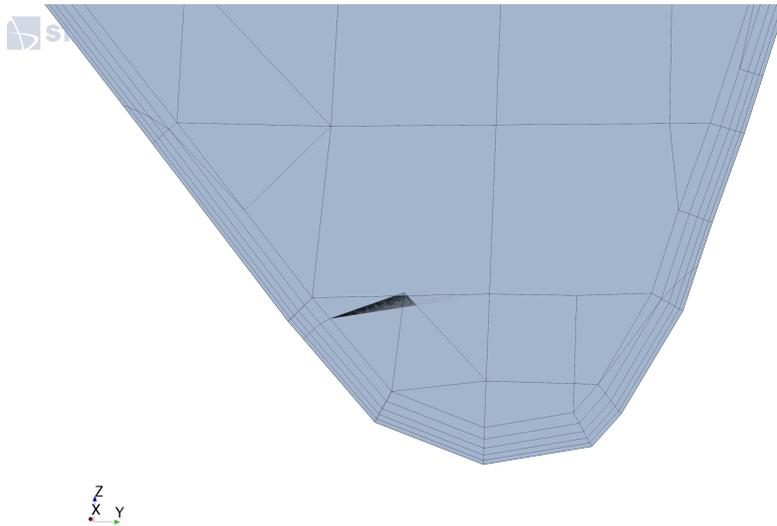


Figura 3.6: capa límite en el cuadro de la bicicleta

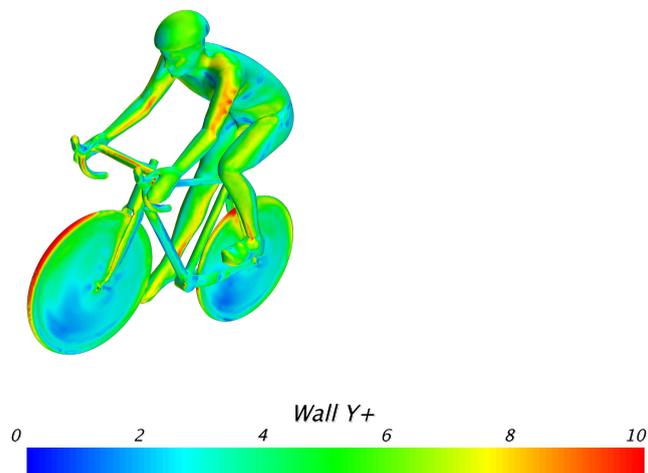


Figura 3.7: valores del $y+$ sobre la superficie del ciclista

Por otro lado, en la *Surface Control 1*, correspondiente a la zona del suelo inmediatamente debajo del ciclista, se le impone un decrecimiento del tamaño de la celda hasta un 25% del tamaño base en la parte definida como *Tyre Road*, la cual hace referencia a la zona de contacto entre la rueda y el suelo, para evitar así futuros problemas con la *Overset Mesh*, ya que entre una malla *Overset* y una superficie cuya *boundary* sea de pared, debe haber cierto margen para posibilitar el intercambio de información entre las celdas explicado en la sección 2.5.

3.2.4. Configuración del caso

Para la configuración del caso, es fundamental la elección correcta y bien razonada de los distintos modelos físicos necesarios, así como de las condiciones de contorno cuyo conjunto proporcione una solución lo más semejante posible a las condiciones reales que se quieran estudiar. En esta sección se adjuntan los modelos elegidos, las condiciones de contorno y el *Solver* utilizado, previamente justificado en la subsección 2.4.3:

Selección de los modelos

El primer paso consiste en la elección de los distintos modelos físicos necesarios para una correcta simulación. Tras crear el *Physics Continuum*, se seleccionan los modelos indicados a continuación.

Modelos físicos:

- All y+ Wall Treatment
- Constant Density
- Coupled Flow
- Exact Wall Distance
- Gas
- Gradients
- K-Omega Turbulence
- Reynolds-Averaged Navier-Stokes
- SST (Menter) K-Omega
- Steady
- Three Dimensional
- Turbulent

Cabe reiterar, como es evidente, que para el caso transitorio se llevará a cabo la modificación del modelo *Time*, pasando del modelo *Steady* al *Implicit Unsteady*.

Condiciones de contorno

Una vez definida la geometría, se procede a su transformación en regiones, dentro de las cuales se definirán las distintas *Boundaries* de sus distintas partes. Entre las condiciones de contorno comunes a todos los casos, se encuentran:

- **Velocity Inlet:** A la entrada del dominio fluido, en las paredes laterales y en la pared superior impondremos, como es habitual en estudios aerodinámicos, la condición de velocidad, que en el caso base corresponde a $13,7\text{m/s}$, unos 50km/h , velocidad habitual en pruebas llanas de ciclismo profesional.
- **Pressure Outlet:** A la salida se impone la presión de 0Pa , referida a la presión de referencia, que resulta ser la atmosférica.
- **Walls:** Al resto de contornos se les impone la condición de pared. Sin embargo, entre ellas habrá diferencias, comentadas a continuación.

Wheels: Para simular el movimiento rotatorio, tal y como se ve en la figura 3.8, se le imponen a las dos ruedas una velocidad tangencial de rotación referida a su correspondiente sistema de referencia de cada rueda de 38rad/s .

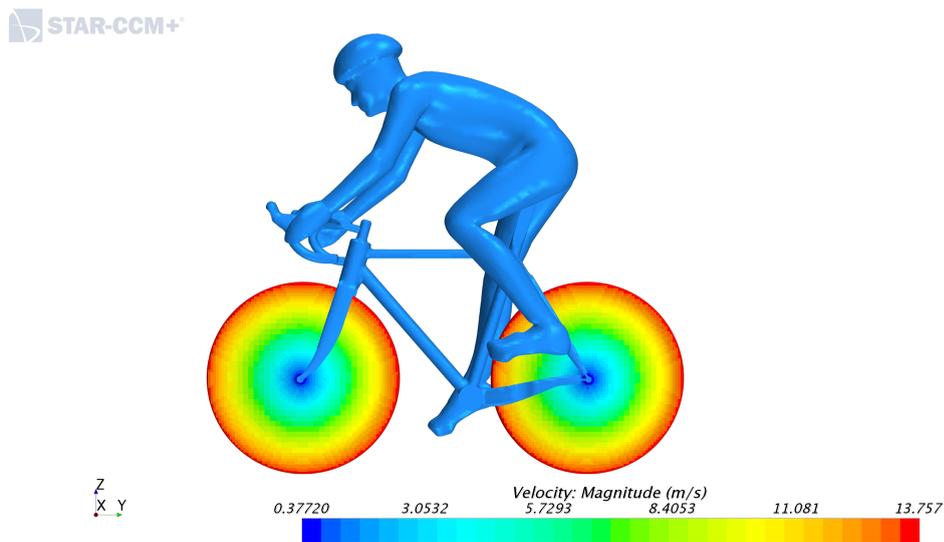


Figura 3.8: Condición de contorno de velocidad de la rueda

Floor: Además, también hay que eliminar el movimiento relativo del suelo con respecto del aire, de manera que fuese solo el ciclista el que experimenta movimiento. Por tanto, y asumiendo viento nulo, al suelo se le impone una velocidad axial de misma magnitud y sentido al de la entrada.

- **Overset Mesh:** Además, en aquellos casos que requieran de un mallado Overset, se le impondrá dicha condición a las paredes exteriores que están en contacto con el resto de la futura malla.

3.2.5. Particularidades de cada caso

Una vez definido y convergido el caso base, se procede a la preparación de los múltiples estudios que se desean realizar. Con el fin de no repetir aquello que se mantiene constante, en este punto se comentarán tan solo las diferencias fundamentales, así como las modificaciones implementadas en cada caso.

Distancia axial

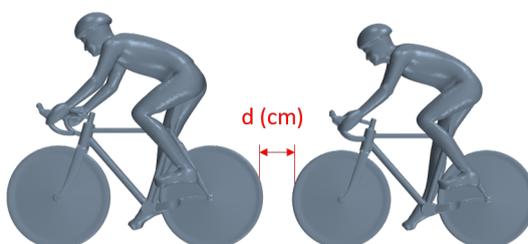


Figura 3.9: esquema del caso de distancia axial

El primero de los estudios realizado es el de la variación de la distancia axial entre dos ciclistas, con la intención de estudiar su influencia en el fenómeno del *drafting*, es decir, el rebufo.

Para ello, se realiza una intersección entre el dominio y un bloque creado alrededor del *dummy*, de manera que la parte resultante consiste en un nuevo ciclista rodeado de las paredes del bloque que actuarán de *Overset*, basándose en los principios explicados en la sección 2.5.

Una vez realizada esta operación, se traslada a la distancia deseada y se sigue un mallado coherente con el seguido hasta ahora (tamaño de celda de 16mm), de manera que la diferencia entre la malla del nuevo ciclista y la del dominio (32mm en esta zona) no sea lo suficientemente elevada. Finalmente, y con la intención de poder utilizar uno de los estudios escogidos a modo de comparación, se reduce el nuevo ciclista a escala 0,95 para ser coherente con tal estudio. De la región resultante de esta nueva parte, se le impondrán las mismas *boundaries* que al ciclista líder, añadiéndole la condición de contorno de *Overset Mesh* en la superficie del bloque.

Viento lateral



Figura 3.10: esquema del caso de viento lateral

Para el estudio del viento cruzado, se parte una geometría y de una malla como la del caso anterior. En términos de configuración, los cambios fundamentales van dirigidas a las condiciones de contorno. Tomamos como hipótesis que el ciclista siempre avanza a la misma velocidad con respecto al sistema de referencia fijo, sea cual sea el viento, y que el viento tiene un valor en módulo de 20km/h .

La condición de contorno de la pared lateral de salida del aire, fruto de que ahora entra con un ángulo característico, ahora pasará a ser *Pressure Outlet*, con los mismos valores que la salida.

La velocidad que se impone al suelo permanece invariable, pero la del aire viene corregida por las componentes del viento, tal y como se muestra en la figura 3.10

Finalmente, conforme se evalúen los diferentes ángulos, se le realizará una traslación al ciclista trasero de manera que optimice la protección del ciclista delantero. Para ello, habrá que refinar progresivamente la malla, de manera que la nueva estela resultante disponga de una malla adecuada para su desarrollo, tal y como se puede ver en la figura 3.11.

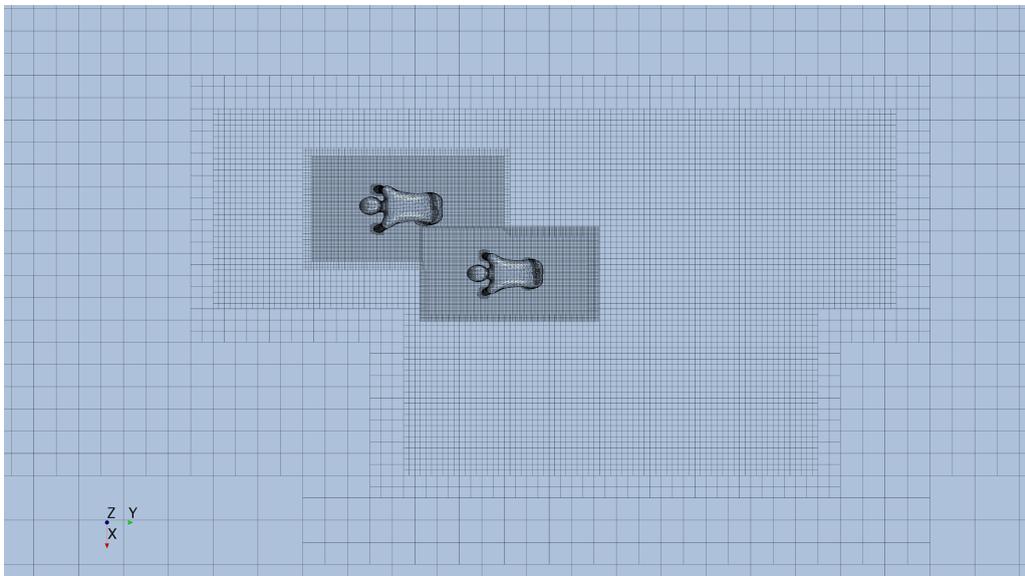


Figura 3.11: mallado de la zona refinada para la estela de un viento de 60°

Relevo



Figura 3.12: esquema del caso de relevo

El último estudio a realizar es el del relevo entre los dos ciclistas en transitorio, por lo que la configuración cambia considerablemente.

Geoméricamente, el bloque y el ciclista que se moverán, al que se le denominará Ciclista Overset, se colocará delante del hasta ahora líder.

A continuación, y debida a la necesidad de mallar de manera más fina el movimiento con la intención de evitar problemas en el Overset, se construye un nuevo bloque en la parte izquierda de los ciclistas, que actuará como nuevo volumen de control para el movimiento.

Este nuevo volumen de control se malla a tamaño base, de manera que en la interfase entre el Overset y el dominio principal no haya ningún cambio de tamaño de celda, lo que, unido a la opción de Alineamiento de Malla, evita la aparición de errores al implementar el movimiento, a costa de un importante sacrificio en términos de tamaño de malla, llegando en este caso a superar las 10 millones de celdas, tal y como se ve en en plano que corta al dominio en la figura figura 3.13.

En cuanto al movimiento que realiza el ciclista, se propone un relevo en forma de elipse, tal y como se ve en la figura 3.14, el más óptimo según la literatura, cumpliendo la ecuación de velocidad.

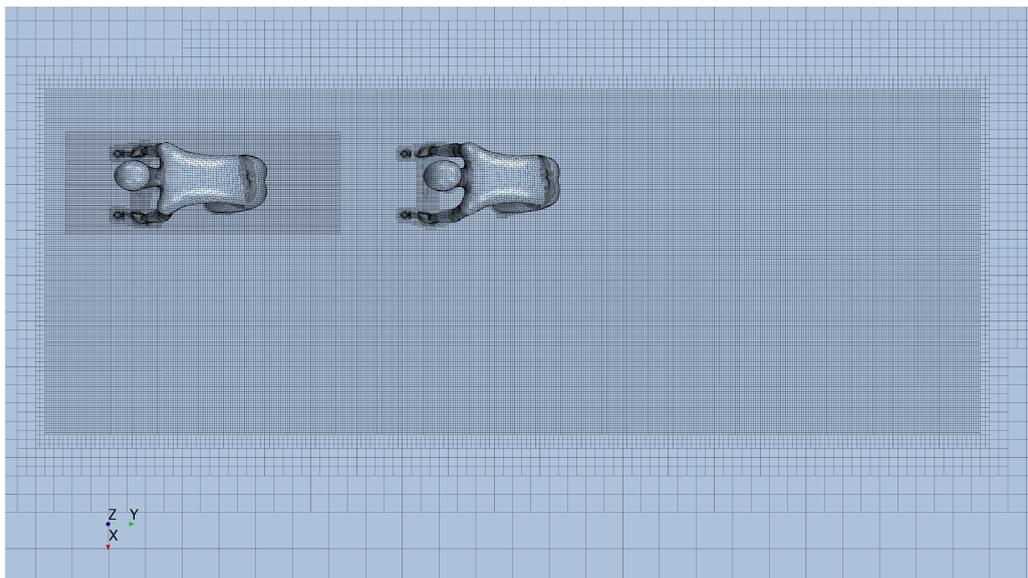


Figura 3.13: mallado de la región del relevo en un plano YX

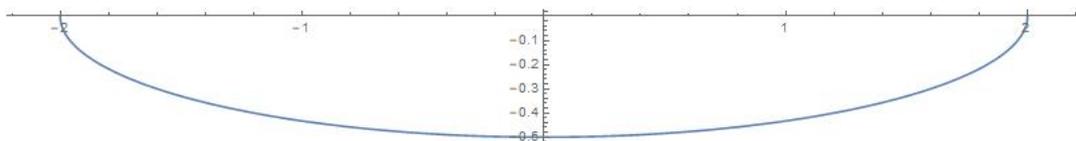


Figura 3.14: trayectoria elíptica seguida por el ciclista durante el relevo

3.3. Modelado del movimiento de la pierna

3.3.1. Introducción

A pesar de que, por falta de tiempo y de geometría adecuada, no se ha implementado el movimiento en STAR-CC+, se comentará el desarrollo de las ecuaciones en vistas a una posible futura ampliación del proyecto.

El movimiento de la pierna se decidió simplificar el movimiento del conjunto de la pierna como un sistema de 5 barras tradicional en un plano, cuyo movimiento bidimensional se implementará en la herramienta MATLAB. Para ello, en un sistema de 5 barras adecuado para una pierna, es directo comprobar que se disponen de 2 grados de libertad mediante la fórmula de Guebler-Kurtzbaach particularizada para 2D.

$$F = 3 \cdot (n - 1) - 2 \cdot J_1 \quad (3.1)$$

Siendo, en la Ecuación 3.1, n el número de sólidos rígidos y J_1 las uniones, y particularizado al caso, 5 ambos. Por tanto, el problema a resolver sería el correspondiente al problema de velocidades de un sistema de barras con 2 grados de libertad.

3.3.2. Aproximación 2 g.d.l

Antes de comenzar el desarrollo, conviene identificar que representa cada barra rígida, a saber: biela, pie, tibia, fémur y una quinta barra sin movimiento que representaría la unión de ciclista y bicicleta, tal y como se ve en la figura 3.15.



Figura 3.15: El ciclista alemán del conjunto QuickStep, Tony Martin, experto en pruebas de contrarreloj y 4 veces Campeón del Mundo.

A continuación, se lleva a cabo la decisión de los grados de libertad de nuestro sistema. Se opta por fijar la velocidad angular de la biela -el pedaleo se aproxima a un movimiento circular- y la velocidad angular del pie, es decir, el movimiento del pie con respecto al tobillo. El primer grado de libertad se tomará, como ya se ha comentado, como un movimiento circular de velocidad angular constante $w1w1$. En cuanto al segundo grado de libertad, el movimiento del tobillo, se estudiaron dos posibles aproximaciones:

Por un lado, se busca modelar el movimiento realista, en el cual el tobillo si acompañaría al movimiento del pedal. Para ello, y puesto que tal movimiento está acotado por la biomecánica del cuerpo humano, para conocer la relación entre las dos variables, se lleva a cabo un ajuste trigonométrico a partir de varios puntos de posición, basándose en la observación de un ciclista real, dando como resultado la siguiente θ_1 .

$$\theta_2 = \frac{\pi}{8} \cdot (1 - \cos(\theta_1 - \frac{\pi}{2})) \quad (3.2)$$

Finalmente, derivando con respecto del tiempo se consigue w_2 , quedando definidos los dos grados de libertad.

Por otro lado, y con la intención de simplificar la posterior implementación, así como de agilizar el cálculo, se propone mantener la w_2 nula, de manera que el pie siempre mantenga el mismo ángulo, siendo el movimiento del pedal el único que le afectaría. Aunque este método es visiblemente más simple y está más alejado de la realidad, se opta por su elección final respecto al caso más realista, asumiendo que el aporte en términos aerodinámicos del movimiento del tobillo será despreciable.

Una vez decididos los dos grados de libertad, el siguiente paso consiste en la resolución del problema cinemático de posiciones y velocidades de nuestro sistema de barras, con el objetivo de conseguir las velocidades angulares de las barras que participan en el modelo. Como en todo problema cinemático, el problema de posiciones, por ser un problema no lineal, supone la mayor dificultad y el mayor tiempo de cálculo. Tradicionalmente, se divide el tiempo de cálculo en 85-10-5, para los problemas de posición, velocidad y aceleración respectivamente.

Por trigonometría simple, se calculan las componentes en el eje X y en el eje Y de los puntos 2 y 3, los cuales representan la punta del pie y el tobillo, siendo A y B las longitudes del pedal y del pie:

$$p_{2x} = A \cdot \cos(\theta_1) \quad (3.3)$$

$$p_{2y} = A \cdot \sin(\theta_1) \quad (3.4)$$

$$p_{3x} = A \cdot \cos(\theta_1) + B \cdot \cos(\theta_2) \quad (3.5)$$

$$p_{3y} = A \cdot \sin(\theta_1) + B \cdot \sin(\theta_2) \quad (3.6)$$

Una vez definidos estos dos puntos, para completar el problema de posiciones faltaría por definir la rodilla. A partir de este punto es donde el problema se vuelve lineal, por lo que se acude al método de Newton-Rhapson para la resolución de 3.7.

$$E_x = C \cdot \cos(\theta_3) + D \cdot \cos(\theta_4) + p_{3x} \quad (3.7)$$

$$E_y = C \cdot \sin(\theta_3) + D \cdot \sin(\theta_4) + p_{3y} \quad (3.8)$$

Finalmente, una vez hallados θ_3 y θ_4 , y teniendo en cuenta que C y D son las longitudes de tibia y fémur, se cierra el problema de posiciones.

$$p_{4x} = A \cdot \cos(\theta_1) + B \cdot \cos(\theta_2) + C \cdot \cos(\theta_3) \quad (3.9)$$

$$p_{4y} = A \cdot \sin(\theta_1) + B \cdot \sin(\theta_2) + C \cdot \sin(\theta_4) \quad (3.10)$$

A continuación, con las posiciones en mano, el siguiente paso consiste en resolver el problema de velocidades. Para ello, se derivan las posiciones con respecto del tiempo y, puesto que el interés de este método en vistas a la posterior implementación en STAR-CCM+ radica en las velocidades angulares, se resuelve el sistema de ecuaciones lineal cuyas incógnitas son w_3 y w_4 mediante el Jacobiano.

$$J\dot{x} = b \quad (3.11)$$

Siendo:

$$J = \begin{bmatrix} C \cdot \sin(\theta_4) & E_y - p_{4y} \\ C \cdot \cos(\theta_4) & E_x - p_{4x} \end{bmatrix}$$

$$x = \begin{bmatrix} w_3 \\ w_4 \end{bmatrix}$$

$$b = \begin{bmatrix} -A \cdot w_1 \cdot \sin(\theta_1) \\ -A \cdot w_1 \cdot \cos(\theta_1) \end{bmatrix}$$

Resultados

Índice

4.1. Introducción	31
4.2. Independencia de malla	31
4.3. Caso estacionario: ciclista en solitario	34
4.4. Caso estacionario: Distancia Axial	37
4.5. Caso estacionario: Viento lateral	43
4.6. Caso transitorio: Relevó	48

4.1. Introducción

En este capítulo, tal y como su nombre indica, se procede a la exposición y análisis de los resultados obtenidos en los distintos casos configurados, tratando de dar una correcta explicación de los valores y de las figuras obtenidas. El esquema que sigue dicho capítulo consta de una sección en la que se comenta la independencia de malla, con el objetivo de determinar el caso base a partir del cual se desarrollará el estudio. A continuación se presentará el caso estacionario de un ciclista, el cual se utilizará para comentar todas las fuerzas aerodinámicas implicadas. Tras ello, se proponen dos estudios estacionarios basados en la interacción entre dos ciclistas, situación muy habitual en el ciclismo de competición, centrándose en los beneficios de ir a rueda, es decir, de aprovechar el rebufo del ciclista delantero. Finalmente, se presentará un estudio transitorio en el que se analizará la evolución de las fuerzas desarrolladas durante el proceso de relevó entre los dos ciclistas.

4.2. Independencia de malla

Una vez llevado a cabo todo el proceso metodológico de acondicionamiento del caso para poder extraer resultados, el siguiente paso consiste en conseguir la denominada independencia de malla, es decir, la consecución de una malla cuyo tamaño, expresado en número de celdas, no afecte a los resultados, sin comprometer en la medida de lo posible al tiempo de cálculo. Este proceso se ha decidido llevar a cabo sobre el caso estacionario y posteriormente extrapolarlo al resto. Esto puede realizarse debido a que las velocidades que posteriormente

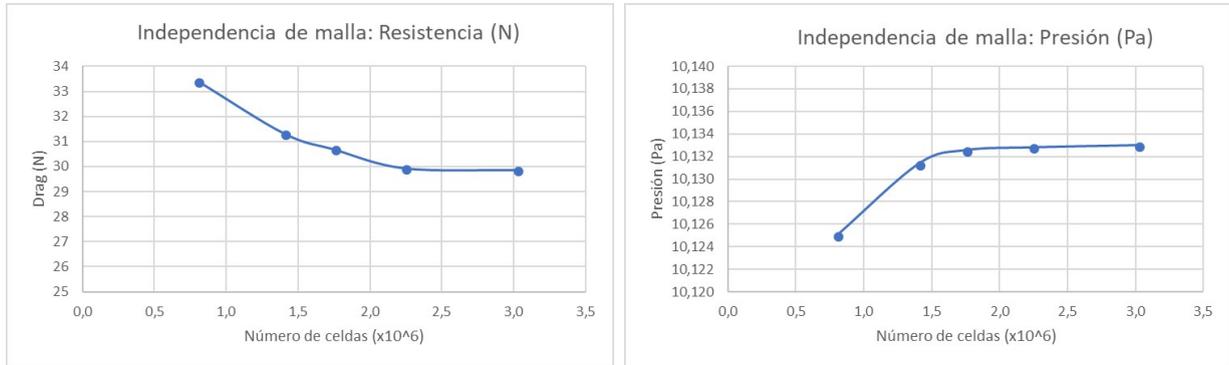
se manejarán no son elevadas, luego resulta idóneo desde el punto de vista del rendimiento en base al tiempo computacional realizarlo sobre dicho caso. El estudio de independencia de malla se ha realizado a partir de los siguientes pasos:

- Elección de las propiedades y características de la malla definitiva, tal y como se ha explicado en subsección 3.2.3
- A continuación se eligen una serie de tamaños base a estudiar. La estrategia a utilizar ha sido la habitual, es decir, escoger un tamaño a priori elevado, del cual resulte una malla gruesa en un tiempo computacional razonable e ir disminuyendo dicho tamaño progresivamente con una reducción del 10% hasta conseguir la independencia. En la tabla 4.1 podemos ver los casos estudiados con sus datos fundamentales.

Tabla 4.1: Tabla con las variables utilizadas para la independencia de malla

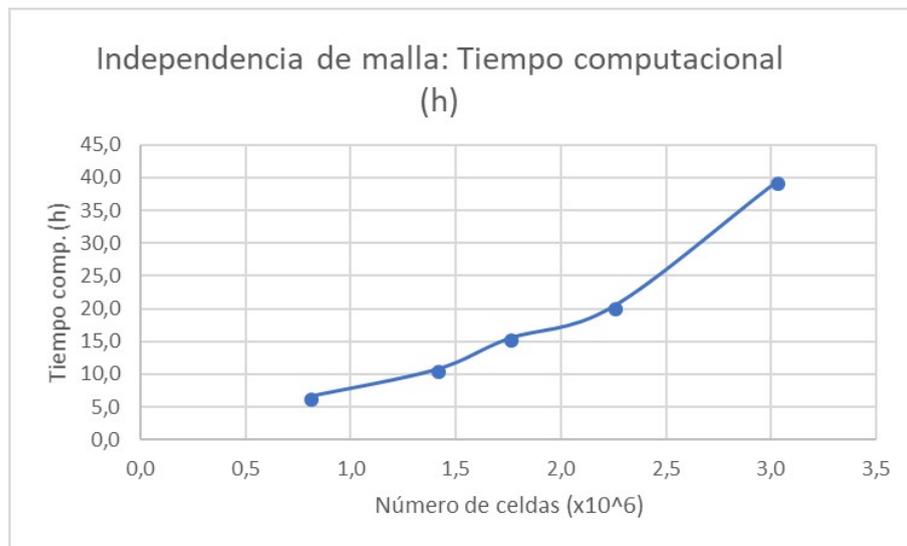
Base Size (mm)	Number of Cells	Computational Time (h)	Drag (N)	Pressure x 10 ⁴ (Pa)
14	3,0	39,41	29,87	10,13
16	2,2	20,3	29,94	10,13
18	1,8	15,41	30,69	10,13
20	1,4	10,658	31,32	10,13
25	0,8	6,5	33,41	10,125

- Tras configurar dichos casos, el siguiente paso consiste en decidir aquellas variables que posteriormente se utilizarán como factor de decisión para elegir el caso óptimo. En este caso, teniendo siempre presente el cálculo computacional, resulta obvia la elección de la resistencia aerodinámica como parámetro fundamental para realizar este estudio, ya que es la finalidad último de este trabajo. En consecuencia, se configura un *Report* sobre la componente de la fuerza paralela al flujo integrada sobre todo el cuerpo del ciclista y bicicleta.
Sin embargo, y con la intención de conseguir un estudio más riguroso, es habitual tener en cuenta también variables de carácter puntual, de naturaleza distinta a las integradas como es el caso de la resistencia. Por esta razón, se decide también configurar otro *Report* en el que se mide la presión absoluta en Pascal en un punto del dominio el cual esté afectado por el ciclista, eligiéndose en este trabajo un punto en la parte trasera del casco.
- Finalmente, se lleva a cabo un postprocesado en *Excel* donde se observan las variaciones de la resistencia y de la presión con el número de celdas, monitorizando paralelamente el tiempo de cálculo de cada caso, con la intención de que este cálculo computacional sea un parámetro determinante a la hora de decidir el caso definitivo.



(a) Drag vs número de celdas

(b) Presión vs número de celdas



(c) Tiempo computacional vs número de celdas

Figura 4.1: Variables que determinan la elección de la malla a utilizar

Finalmente, en base a figura 4.1, el caso elegido es el de tamaño base 16mm, ya que, con respecto al caso siguiente de 14mm, apenas existe un 0,2% de diferencia en el drag, y el tiempo computacional prácticamente se dobla.

Tabla 4.2: Comparación de la malla elegida (tamaño base de 16mm) con respecto a la siguiente

Tamaño base (mm)	16	Tamaño base (mm)	14
n° elementos ($\times 10^6$)	2,2	n° elementos ($\times 10^6$)	3,02
Drag (N)	29,94	Error Drag (%)	0,2
Presión (Pa)	10,13	Error Presión (%)	0,15
Tiempo comp. (h)	20,3	Δ tiempo (h)	19,11

4.3. Caso estacionario: ciclista en solitario

Una vez elegido el caso deseado, el estudio fundamental a realizar es el de la descomposición de fuerzas sufridas por el ciclista, siendo la fuerza de resistencia, el *drag*, la de mayor trascendencia e interés.

Tal y como se presentó en la sección 2.2, el drag por presión es el predominante en un ciclista frente al drag viscoso, concretamente un orden de magnitud mayor, poniendo de manifiesto la caracterización del cuerpo como un cuerpo romo, tal y como se ve en la figura 4.2. Resulta interesante observar que la bicicleta, formada por las partes del cuadro y por las ruedas, apenas representa un 20 % del drag generado, siendo la aportación de las ruedas prácticamente despreciable. Esto es debido a la simplificación de la geometría en la cual las ruedas se han representado como cuerpos macizos -ruedas lenticulares, cuyo uso en ciclismo en pista está muy extendido-, las cuales según numerosos estudios reducen el drag considerablemente a costa de comprometer la estabilidad. En cuanto a la aportación del ciclista, llama la atención que la pierna derecha genere casi el doble de drag -3.05 frente a 1.59- que la izquierda. Esto se debe a la posición del ciclista de la geometría, en la que la pierna derecha se encuentra extendida, lo que aumenta considerablemente su área frontal frente a la izquierda. Finalmente, también es interesante comentar la elevada aportación de la cabeza y el torso, justificando así el especial interés existente en optimizar la posición encima de la bicicleta.

En conjunto, el drag generado por el ciclista representa el 78,4 % del total, frente al 21,6 % restante de la bicicleta.

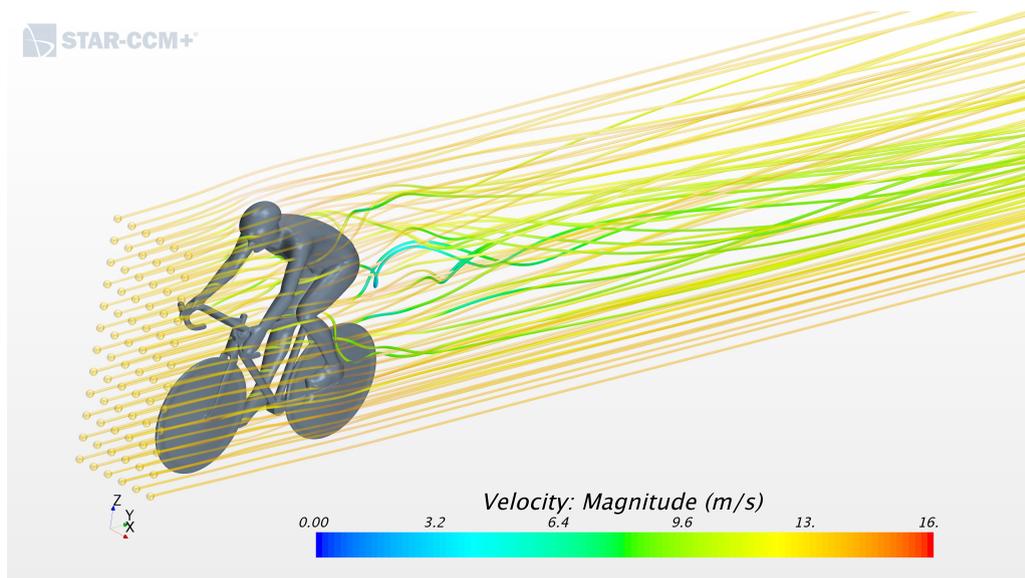


Figura 4.2: Representación de las líneas de corriente alrededor de ciclista, justificando su condición de cuerpo romo.

Tabla 4.3: Descomposición del drag según las distintas partes del ciclista

Parte	Pressure (N)	Shear (N)	Net (N)
Cabeza	1,54	0,08	1,63
Torso	5,89	0,17	6,06
Brazo izquierdo	1,30	0,01	1,30
Brazo derecho	1,20	0,05	1,25
Antebrazo izquierdo	0,56	0,05	0,61
Antebrazo derecho	0,69	0,05	0,74
Mano izquierda	0,26	0,02	0,28
Mano derecha	0,17	0,03	0,20
Muslo izquierdo	1,59	0,11	1,69
Muslo derecho	3,05	0,14	3,20
Pierna baja izquierda	2,21	0,11	2,32
Pierna baja derecha	2,72	0,13	2,85
Pie izquierdo	0,36	0,06	0,42
Pie derecho	1,13	0,01	1,14
Cuadro	4,80	0,38	5,18
Rueda delantera	0,59	0,32	0,91
Rueda trasera	0,00	0,26	0,26
Total	27,40	2,00	29,39

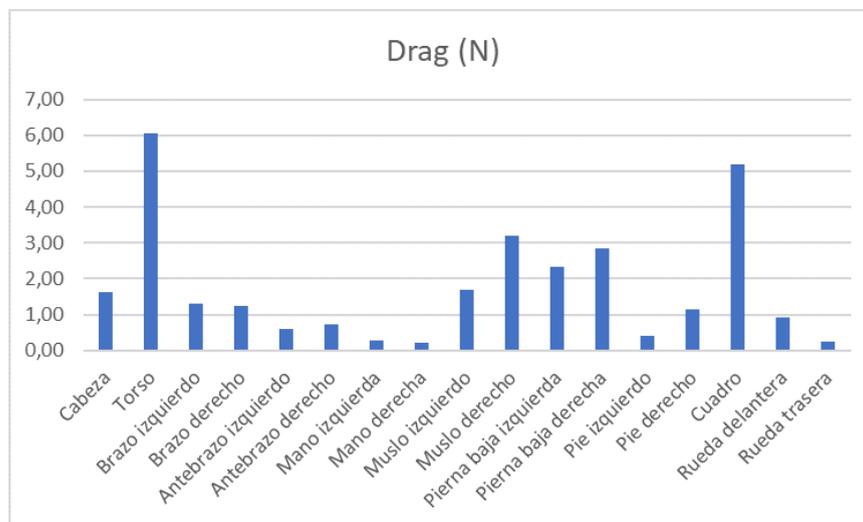


Figura 4.3: Aportación de cada parte del ciclista al drag total.

En cuanto a las otras dos fuerzas implicadas, la fuerza lateral y la fuerza de sustentación, vemos en la tabla 4.4 que, en comparación con el drag, son considerablemente menores. Sin embargo, habiendo configurado un caso sin viento lateral fundamentalmente simétrico, el valor de la fuerza lateral -5.34N en la dirección negativa del eje x , es decir, empujando al ciclista por la izquierda- resulta elevado en comparación con la bibliografía. Tras analizar la fuerza sufrida por cada parte del ciclista, se observa que dicho valor resulta del torso y de la pierna extendida, volúmenes que, geoméricamente, rompen con la simetría del ciclista. presumiblemente, esta fuerza se compensaría con una de la misma magnitud y sentido contrario cuando el ciclista se encuentra pedaleando.

Tabla 4.4: tabla de la descomposición de las fuerzas por partes

Parte	Fuerza lateral (N)	Drag (N)	Lift (N)
Cabeza	0,17	1,63	2,46
Torso	0,19	5,46	9,07
Brazo izquierdo	2,00	1,35	-0,10
Brazo derecho	-1,97	1,25	-0,42
Antebrazo izquierdo	-0,19	0,64	-0,92
Antebrazo derecho	0,27	0,74	-0,94
Mano izquierda	0,16	0,27	-0,25
Mano derecha	-0,13	0,20	-0,17
Muslo izquierdo	3,43	1,68	1,51
Muslo derecho	-4,29	3,15	-0,10
Pierna baja izquierda	2,57	2,24	-0,58
Pierna baja derecha	-0,81	2,82	-17,00
Pie izquierdo	0,28	0,41	-0,58
Pie derecho	0,19	1,21	-1,10
Cuadro	0,16	5,18	-0,22
Rueda delantera	0,23	0,31	-0,45
Rueda trasera	-2,97	0,26	0,19
Total	-3,13	29,40	2,87

La fuerza de sustentación o *lift*, por su parte, presenta un valor de $2,86\text{N}$. A pesar de que a efectos prácticos no afecta al ciclista, ya que la fuerza contraria ejercida por el peso es considerablemente mayor. Una vez analizada la descomposición de fuerzas en el caso de un ciclista en solitario, se procede a realizar los distintos estudios de interés.

4.4. Caso estacionario: Distancia Axial

El primer caso de interacción entre ciclistas que se presenta consiste en la variación de la distancia axial entre el primer ciclista, al que se le denominará líder, y el segundo, conocido como ciclista de rueda. Esta situación es muy habitual en el ciclismo profesional, en la que el ciclista trasero busca la mayor protección del ciclista delantero. Las distancias analizadas son 5, 10, 20, 40 y 80cm, con la intención de ser coherente con el caso experimental usado como referencia [3].

Tabla 4.5: Valores de Drag en función de la distancia axial entre la rueda trasera del primer ciclista y la delantera del segundo.

distancia (cm)	Drag sin rueda (ciclista 1)	Drag (ciclista 1)	Drag (ciclista 2)
5	29,39	27,44	17,84
10	29,39	27,7	18,48
20	29,39	27,83	18,88
40	29,39	28,1	19,1
80	29,39	28,75	19,5

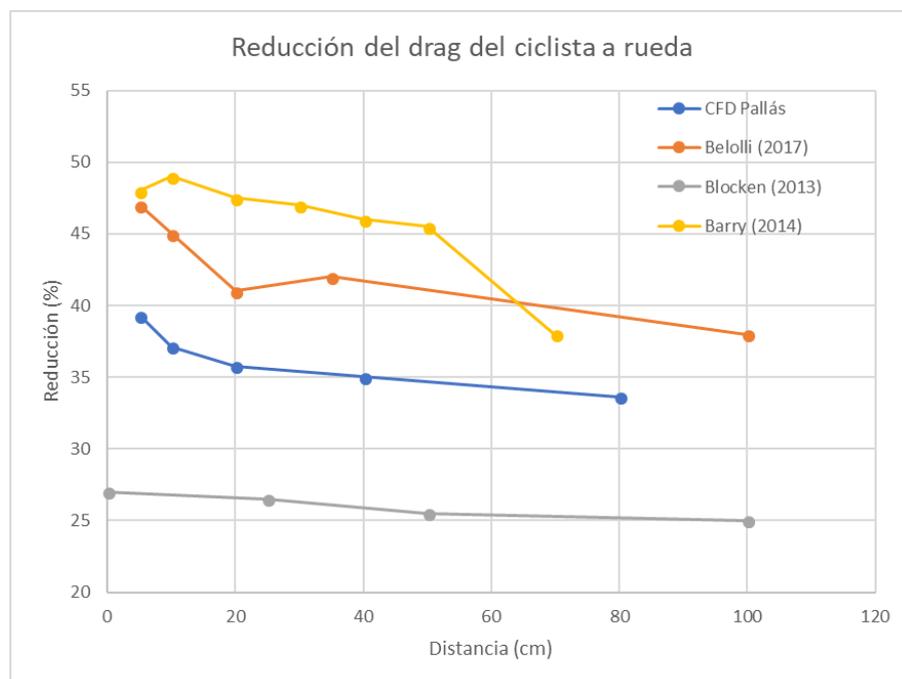


Figura 4.4: Reducción del drag del ciclista trasero en comparación con estudios de túnel de viento

Los estudios utilizados, reiterando lo comentado en la sección 1.2 a modo de validación son 4: los 3 primeros son estudios de túnel de viento, método de estudio más habitual

en situaciones de *drafting*, es decir, de interacción entre ciclistas, debido al alto coste computacional que se le presupone. El último estudio, añadido por ser un caso CFD, presenta valores inferiores a la tónica general debido a que se realizó sin el modelado de la bicicleta.

En cuanto a los resultados obtenidos en el caso de este trabajo, los cuales ya se han presentado en la tabla 4.5, podemos observar como las tendencias que resultan son similares. Si bien es cierto que a priori las diferencias del Drag sufrido por el ciclista de rueda son inferiores a las obtenidas experimentalmente, del orden del 7%, entre los propios experimentos ya existen ciertas diferencias, ya que al final la propia fisionomía del ciclista, así como su posición en la bicicleta pueden afectar a los resultados finales.

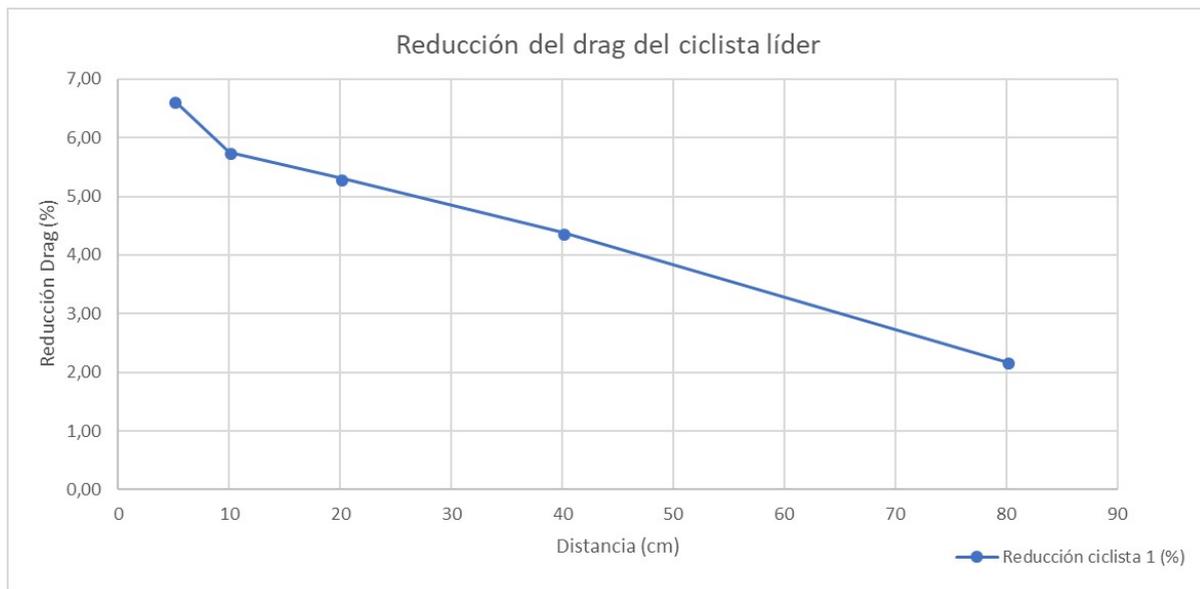


Figura 4.5: Reducción del drag del ciclista líder

Sin embargo, si que se comprueba de forma satisfactoria como las tendencias resultantes concuerdan con los datos experimentales, aumentando el drag sufrido por el ciclista de rueda conforme aumenta la distancia, siendo la pendiente mayor durante los primeros cm de separación. Desde un punto de vista más cercano al meramente deportivo, llama la atención como este aumento del drag no es tan pronunciado como podría suponerse, lo que hace pensar que la pérdida de rueda en situaciones de carrera se deba en mayor medida a un menor rendimiento y capacidades del ciclista de rueda cuando se descuelga, más que a cuestiones aerodinámicas.

En cuanto al ciclista líder, vemos como, en contra de lo que pudiese pensar un ciclista profesional, también experimenta una disminución del drag respecto a la situación de ir solo, siendo esta reducción considerablemente menor que la sufrida por el segundo, pero aún así mencionable.

Para desarrollar la justificación de los fenómenos aerodinámicos, se utilizan las escenas añadidas a continuación, así como referencias al mundo aeronáutico, aprovechando así los conocimientos desarrollados durante la carrera.

La reducción del drag del ciclista trasero es debida a la zona de baja presión creada tras la

espalda del primer ciclista, lo que hace que la diferencia de presiones entre la parte delantera y la trasera del ciclista sea menos que en el caso de un ciclista en solitario, disminuyendo por lo tanto el módulo de la fuerza sufrida en la dirección señalada. En la imagen podemos ver esta diferencia de presiones que se comenta a partir del coeficiente de presiones Ecuación 4.1. Cabe mencionar que las figuras del coeficiente de presiones están muy saturadas, es decir, que existen valores superiores al 0.1 y valores inferiores al -0.05 señalados en la barra de valores. Sin embargo, con la finalidad de poder observar claramente las estructuras de depresión y sobrepresión comentadas, se ha optado por tales límites, englobando en color rojo toda las zonas cuyo coeficiente de presión es mayor a 0.1, y en azul aquellas menores de -0.05.

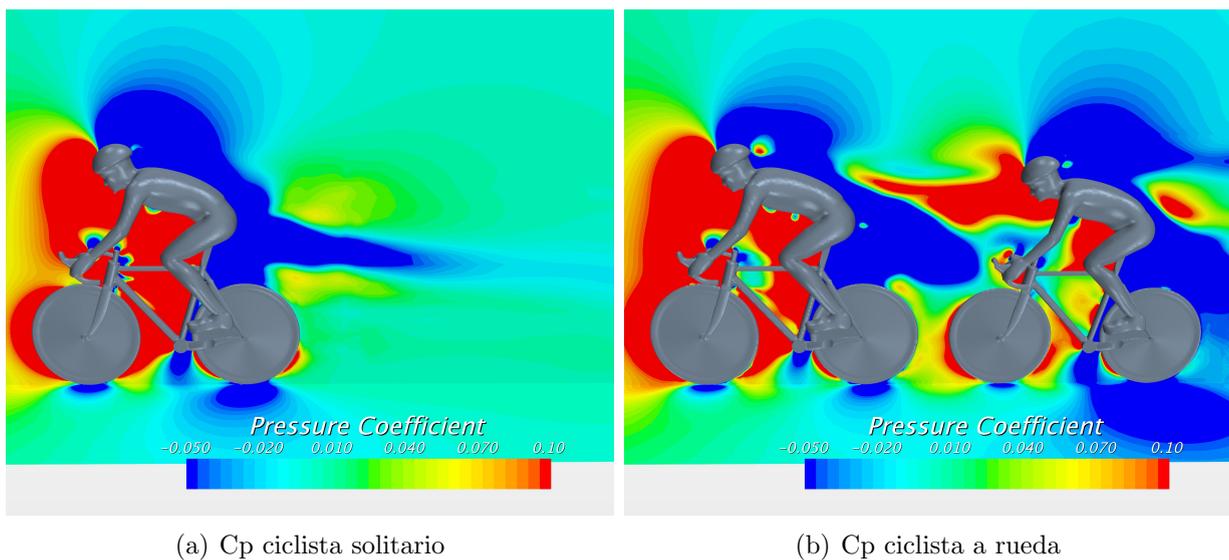


Figura 4.6: comparativa entre el coeficiente de presiones entre un ciclista rodando en solitario y otro yendo a rueda.

$$C_p = 2 \cdot \frac{P - P_0}{U_\infty \cdot \rho} \quad (4.1)$$

Al final, desde un punto de vista fenomenológico y más intuitivo de cara a usuarios no familiarizados con conceptos aerodinámicos, el segundo ciclista basa su ganancia en el aprovechamiento de la estela del ciclista, luego la fuerza que percibe del aire es menor, como se ve en el perfil de velocidades de la figura figura 4.7 .

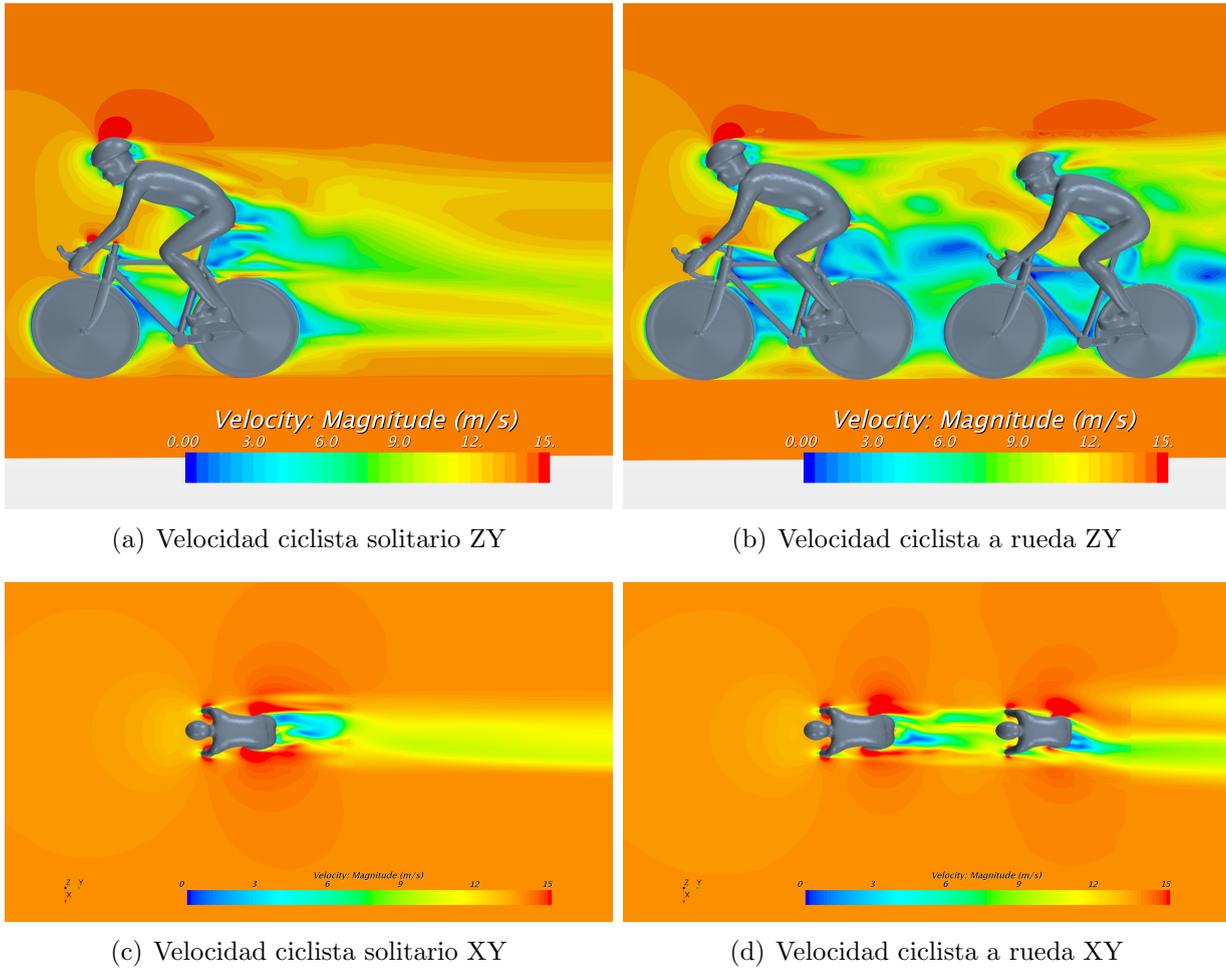
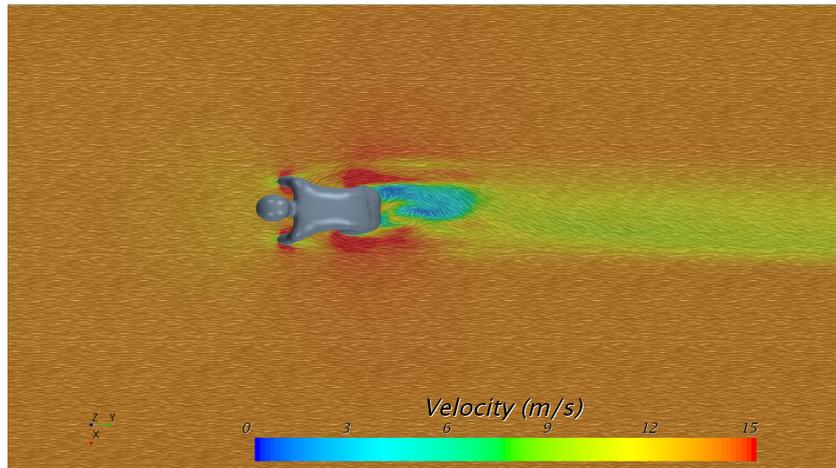
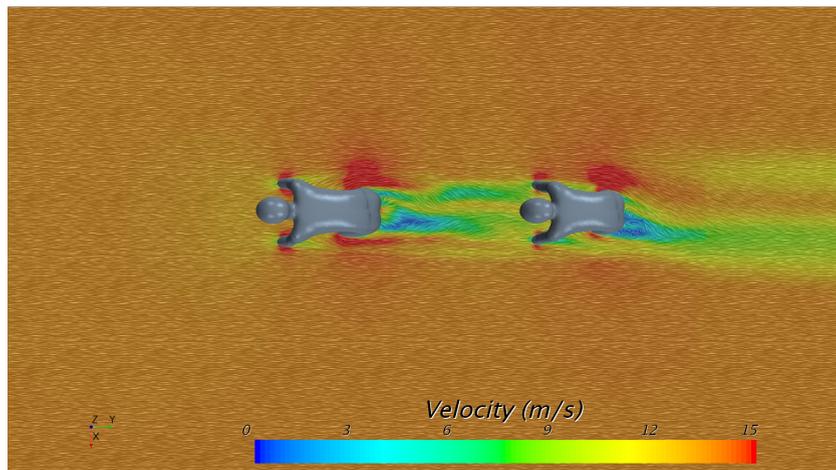


Figura 4.7: Efecto de la estela generada por el ciclista líder sobre el segundo.

Por su parte, el efecto sobre el ciclista delantero se obtiene observando las líneas de corriente. Al haber un obstáculo en la parte trasera, en este caso el segundo ciclista, el flujo tiende a readherirse al segundo ciclista, de manera que la estela dejada disminuye en amplitud, y por tanto disminuye el drag, haciendo el efecto similar al de la cola del avión, de manera que el conjunto de los dos ciclistas genera un cuerpo más esbelto. Sin embargo, ya se ha comentado que este efecto es de poco más del 5% en el caso más favorable, por lo que resulta complicado de ver en la figura 4.8. Se puede observar como las burbujas de máxima velocidad de los laterales del ciclista en solitario son ligeramente mayores en tamaño que las del caso segundo, siguiéndose esta tendencia en las zonas de baja velocidad de la espalda.



(a) En solitario



(b) En conjunto

Figura 4.8: Amplitud de la estela del primer ciclista con y sin ciclista a rueda.

Evidentemente, de la explicación de ambos efectos se deduce que, a mayor distancia, más facilidad tiene el flujo de volver a su trayectoria inicial, y por lo tanto a suavizar el efecto, provocando que la reducción del drag se vaya perdiendo con la distancia. A continuación, en la figura 4.9, vemos que, conforme la distancia aumenta, la caída de presión que experimenta el ciclista trasero disminuye, especialmente en zonas como las ruedas, en la cual se explica la tendencia pronunciada a distancias pequeñas. Según la literatura, no es hasta distancias superiores a los 100cm cuando el efecto empieza a desaparecer por completo. Esta suave tendencia contrasta con la experiencia que surge del ciclismo profesional, donde es habitual que, hasta que el segundo ciclista no está completamente detrás, a distancia de unos 25cm, no se considera que está a rueda, pudiendo incluso no llegar a la misma, lo que a priori potencia el factor psicológico, más allá del fenomenológico, de estas situaciones en carrera.

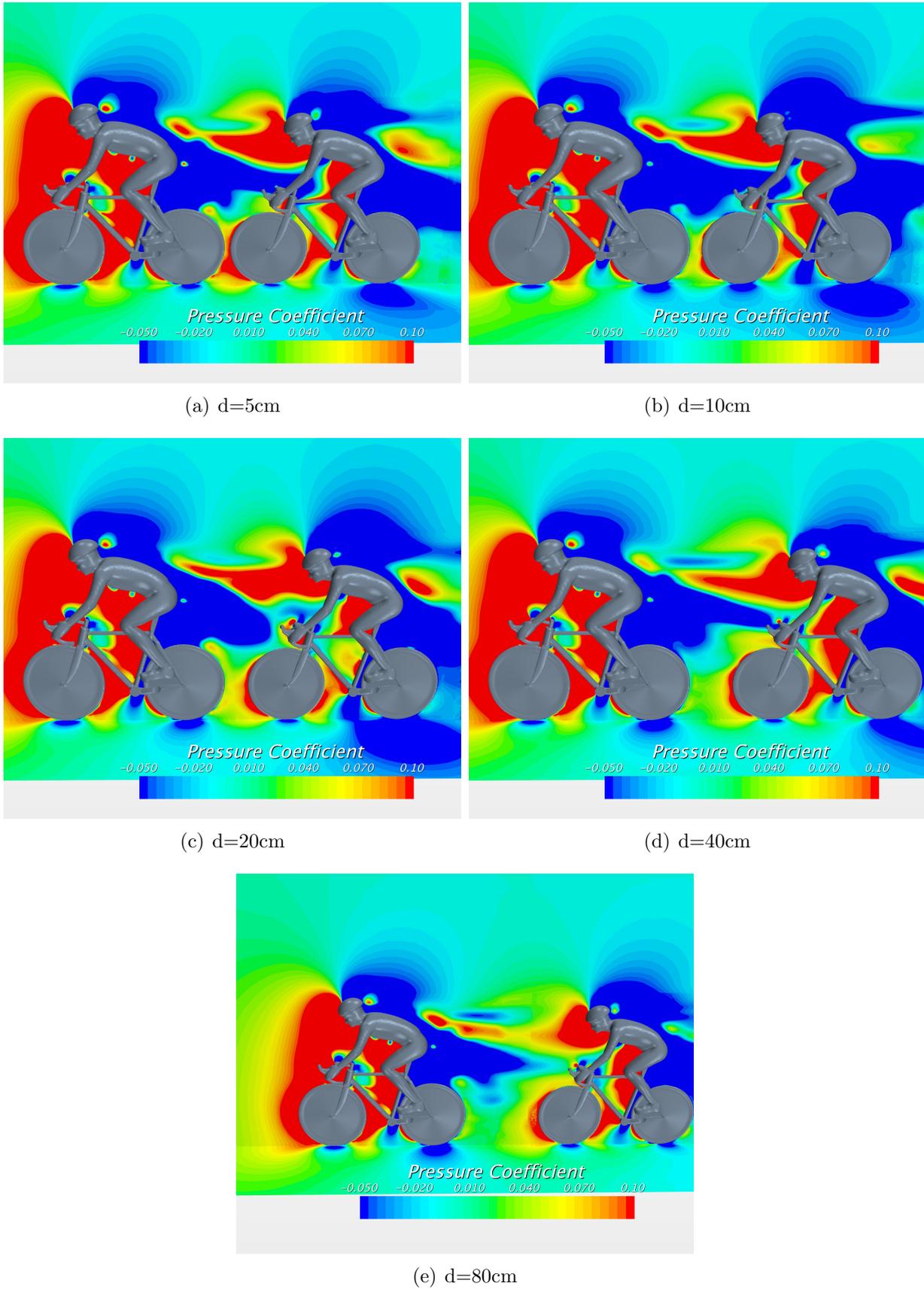


Figura 4.9: Evolución de los perfiles de coeficiente de presiones con la distancia.

4.5. Caso estacionario: Viento lateral

El último estudio en condiciones estacionarias que se propone consiste en observar el comportamiento de las fuerzas y momentos actuantes sobre los ciclistas en condiciones de viento lateral.

Para ello, se han evaluado los casos de viento de 0° , 30° , 45° , 60° y 90° , siempre por la derecha del ciclista, asumiendo que existiría comportamiento simétrico en caso de venir por la izquierda. Además, en cada caso se busca la posición óptima del ciclista trasero, de forma que se consiga la mayor protección posible frente al viento.

En un primer momento se realiza una primera aproximación en la que se mantiene constante la velocidad del ciclista. Sin embargo, esto no es realista, ya que esta velocidad constante más la componente del viento lleva a valores de potencia no realistas como se ve en la figura 4.10. En busca de un estudio realista, se fija como constante la velocidad frontal del ciclista constante, es decir, que conforme el viento entra más de cara (para ángulos pequeños), la velocidad del ciclista disminuye, con la intención de que la potencia desarrollada por el ciclista no crezca exponencialmente ya que como mucho puede alcanzar valores máximos de 450W durante 1 hora (datos de Tony Martin) [14]. En la figura 4.10 se observa dicho crecimiento de la potencia con la velocidad. Podemos ver como, para un simple aumento de 1m/s, la potencia necesaria puede aumentar en un 20%, debido a la relación cúbica de la potencia con la velocidad, expuesta en la sección 2.2.



Figura 4.10: Evolución cúbica de la potencia con la velocidad resultante.

Para el análisis de las fuerzas implicadas, se utilizarán los coeficientes adimensionalizados, con la intención de que el drag y la fuerza lateral puedan ser comparados entre si, ya que la superficie de referencia lateral es considerablemente mayor, especialmente por la condición de ruedas lenticulares. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 4.6: Coeficientes de fuerzas adimensionalizados

ang (°)	Drag Coefficient	Side Force Coefficient	Drag Coefficient	Side Force Coefficient
30	0,64	0,41	0,58	0,23
45	0,68	0,61	0,59	0,42
60	0,69	0,79	0,6	0,61
90	0,73	0,91	0,64	0,78

Los valores de la tabla 4.6 graficados quedarían así:

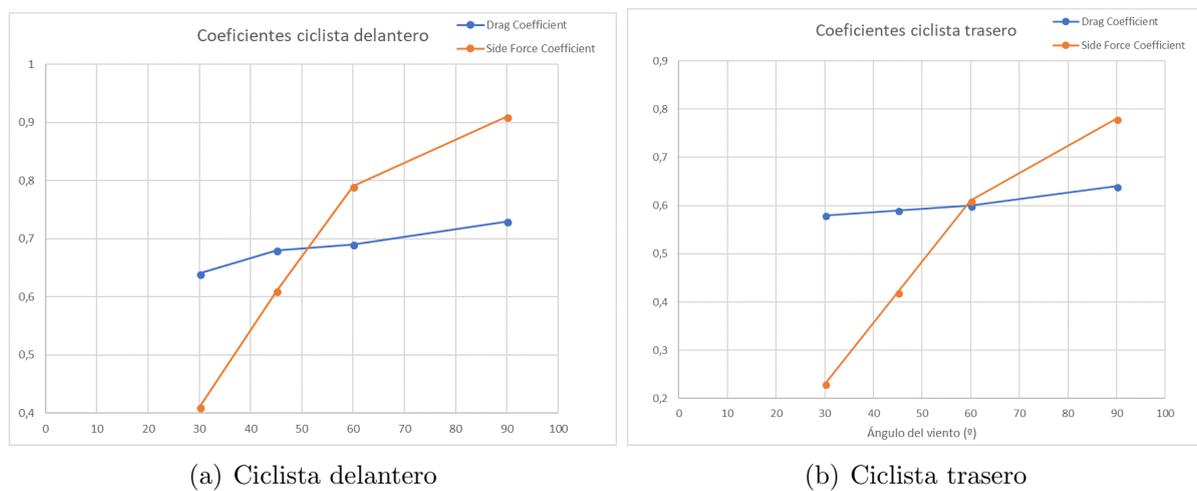
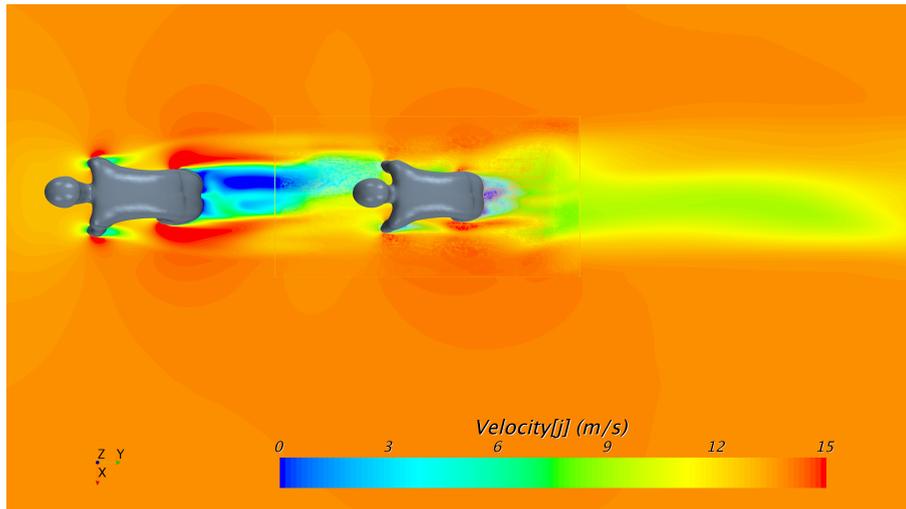
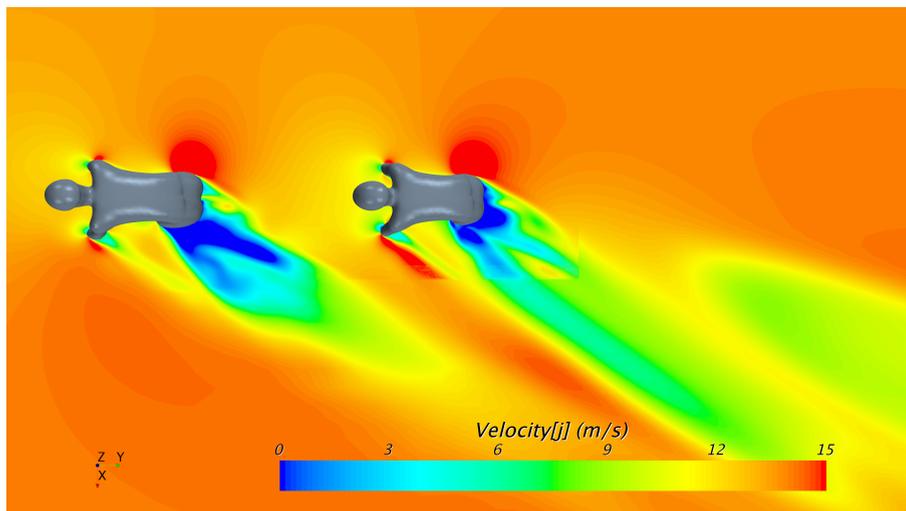


Figura 4.11: Evolución de los coeficientes de fuerza para distintos ángulos de incidencia del viento.

Como se puede observar en las gráficas de la figura 4.11, tanto el drag como la fuerza lateral sufridas por el ciclista aumentan a mayor ángulo, siendo el caso de 90° el más desfavorable. A simple vista se puede observar como para ángulos bajos, el drag sigue siendo la fuerza predominante, pero su crecimiento con el ángulo es muy suave, prácticamente despreciable, en comparación con el aumento del coeficiente de fuerza lateral, poniendo de manifiesto que, el efecto de viento lateral en pruebas de ciclismo afecta fundamentalmente a las fuerzas laterales, y por ende a la estabilidad del ciclista. De esta manera se justificaría el desarrollo de los abanicos en el ciclismo profesional, uno de los estudios propuestos futuros. El ligero aumento de drag con el viento lateral podría deberse a que, a pesar de que la velocidad frontal se mantiene, el estrechamiento creado entre los dos ciclistas provoca una ligera aceleración del aire entrante fruto de la lateralidad, por lo que la diferencia de velocidad (y por tanto de presión, siguiendo el análisis del apartado anterior) entre la parte delantera y trasera del ciclista disminuye. En la figura 4.12 se puede observar claramente la velocidad en el estrechamiento.



(a) Sin viento lateral



(b) Viento lateral

Figura 4.12: Campo de velocidades en el eje Y para el caso sin viento lateral y para viento lateral máximo (90°).

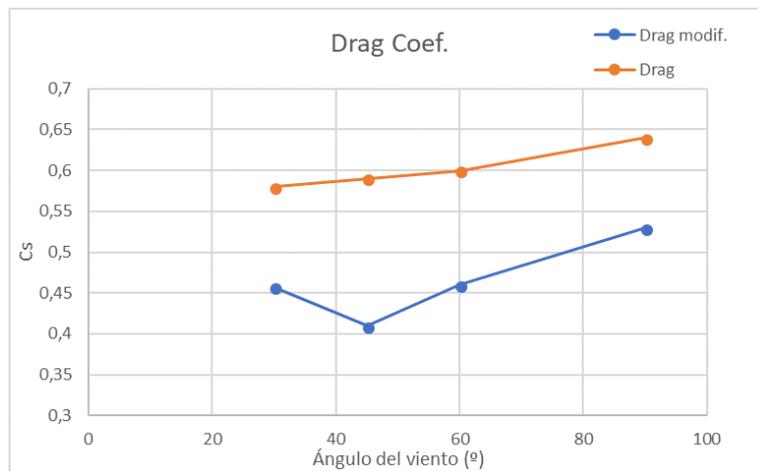
Por su parte, el aumento de la fuerza lateral es más intuitivo, ya que a mayor ángulo, mayor es el módulo de la velocidad incidente lateralmente, lo que hace aumentar considerablemente la fuerza en tal dirección.

Por lo tanto, estos resultados ponen de manifiesto la importancia y la necesidad de una correcta protección del ciclista trasero, siendo este hecho incluso más importante que en estudios anteriores por la gran influencia del viento lateral. Por ello, y en base a la observación de la estela dejada por el ciclista delantero, se proponen unas posibles posiciones del ciclista a rueda en busca de esta protección. Los resultados obtenidos son los siguientes:

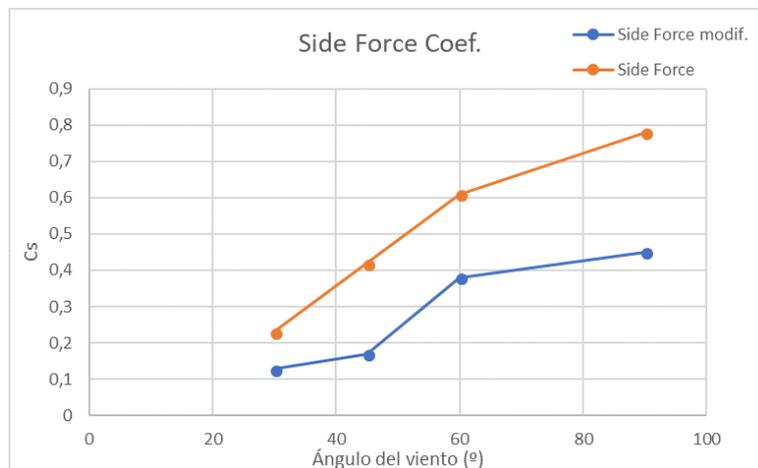
La disminución de las fuerzas experimentadas por el ciclista trasero se pueden ver a continuación graficadas.

Tabla 4.7: Valores de los coeficientes de fuerzas en posición inicial y corregida del ciclista a rueda

ang (°)	Cd1	Cs1	Cd2	Cs2	Cd1*	Cs1*	Cd2*	Cs2*	Δ Cd (%)	Δ Cs (%)
30	0,64	0,41	0,58	0,23	0,647	0,39	0,457	0,128	0,21207	0,44348
45	0,68	0,61	0,59	0,42	0,68	0,53	0,41	0,17	0,30508	0,59524
60	0,69	0,79	0,6	0,61	0,65	0,68	0,46	0,38	0,23333	0,37705
90	0,73	0,91	0,64	0,78	0,68	0,78	0,53	0,45	0,17188	0,42308



(a) Drag coef



(b) Side F.bcoef

Figura 4.13: Diferencias ente los coeficientes de fuerzas.

Vemos que, desplazando el ciclista trasero hacia la estela del ciclista delantero, la fuerza lateral sufrida por el ciclista trasero disminuye considerablemente. El drag también se ve reducido, pero nunca a valores tan elevados como en el caso axial, debido a la mayor dificultad de adaptarse a la estela, teniendo que buscar una solución de compromiso con la

fuerza lateral. Las diferencias son similares porcentualmente para cada viento, situándose en torno al 25% en el drag, y llegando hasta al 40% en la fuerza lateral. En cambio, el ciclista delantero no sufre apenas variaciones marginales en estas configuraciones, ya que los efectos comentados en la sección 4.4 no tienen lugar en este caso. A continuación se expone como queda la configuración de ciclista delantero y ciclista a rueda para cada caso estudiado. Como ya se ha comentado, esto se ha hecho en base a la observación, por lo que está sujeto a cierto error, abriéndose así otro posible campo de optimización.

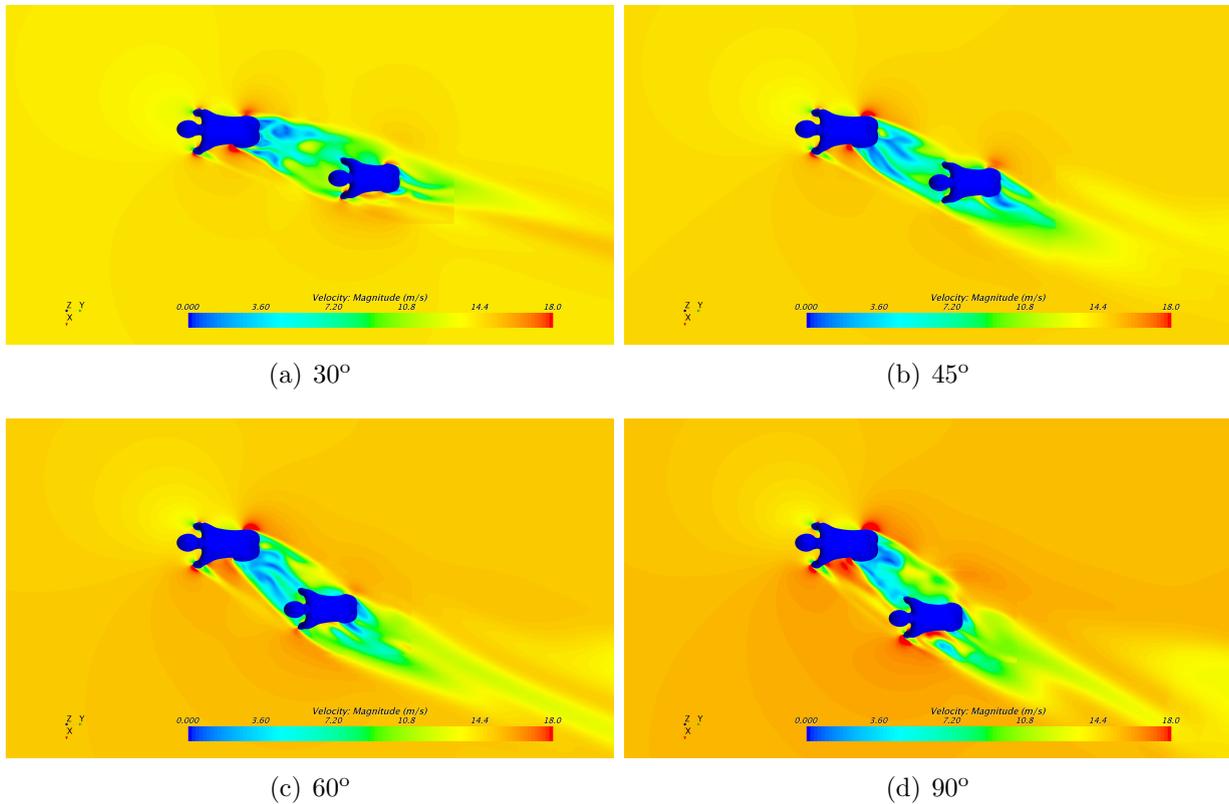


Figura 4.14: Evolución de la posición del ciclista trasero en función del viento incidente sobre un campo de velocidades.

Siendo estos los desplazamientos realizados:

ang (°)	Variación x (m)	Variación y (m)
30	0,4	0,3
45	0,6	0,45
60	0,75	0,75
90	0,85	0,9

Tabla 4.8: Desplazamientos realizados en X-Y

Como se ve, conforme el viento incide más lateralmente, el desplazamiento del ciclista trasero se realiza de manera más vertical. Conviene subrayar que, a pesar de esta tendencia seguida, nunca se coloca en la línea frontal al viento, ya que la propia velocidad de los ciclistas hace que el viento aparente sufrido sea de un ángulo menor al que habría en reposo.

En resumen, la influencia del viento puede ser un factor fundamental para el avance y la estabilidad del ciclista, y un correcto estudio y tratamiento de la estrategia para minimizar su efecto puede resultar determinante, como sucede en los llamados abanicos.

4.6. Caso transitorio: Relevo

El último estudio realizado consiste en observar la variación en el tiempo de las fuerzas sufridas por dos ciclistas durante la maniobra de relevo. Es importante señalar que los valores absolutos que se manejan distan de los que se habían desarrollado hasta el momento. Esto se debe a que, debido a problemas con el cálculo computacional, se decide cambiar a una malla más gruesa. Además, se verá que los valores tienden a oscilar bastante, posiblemente debido a que por la misma razón se han impuesto un número de iteraciones internas para cada paso de tiempo muy pequeño. A pesar de que el autor es consciente que, en consecuencia los valores dejan de ser representativos de la realidad, las tendencias resultantes son consecuentes con lo esperado, por lo que se decide avanzar en el estudio. No obstante, y en vistas a una futuro ampliación, se considera necesario señalar que la malla correcta debe tener los mismos parámetros que en los estudios realizados hasta el momento, así como realizar un estudio de independencia de iteraciones internas, a costa de un aumento lineal con ellas del cálculo computacional.

En la figura 4.15 y la figura 4.16 vemos la evolución del drag y de las fuerzas laterales, las cuales ayudan a entender el proceso del movimiento:

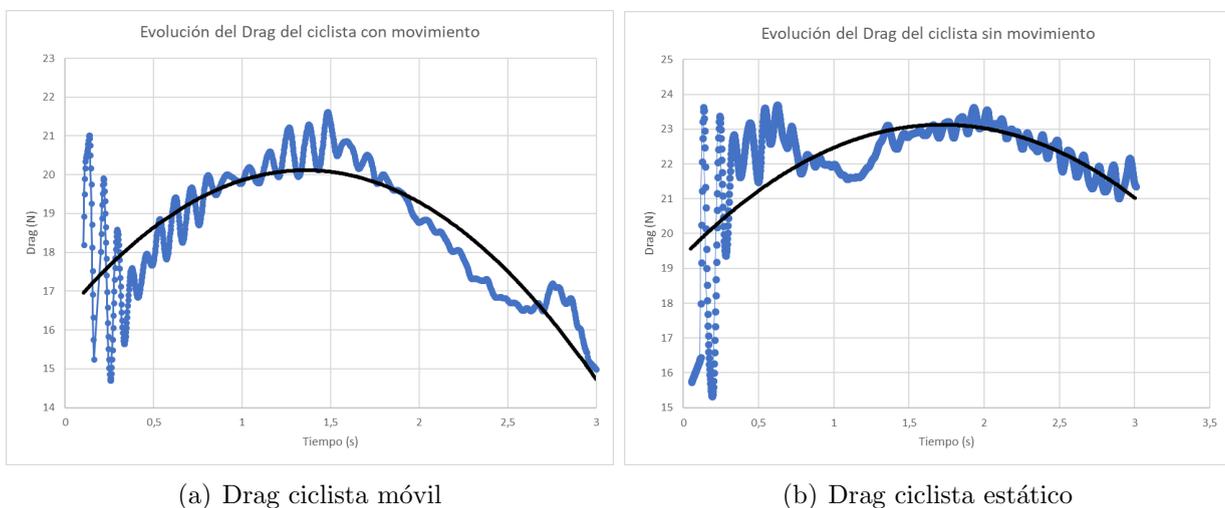


Figura 4.15: Evolución en el tiempo de la fuerza de resistencia sufrida por ambos ciclistas.

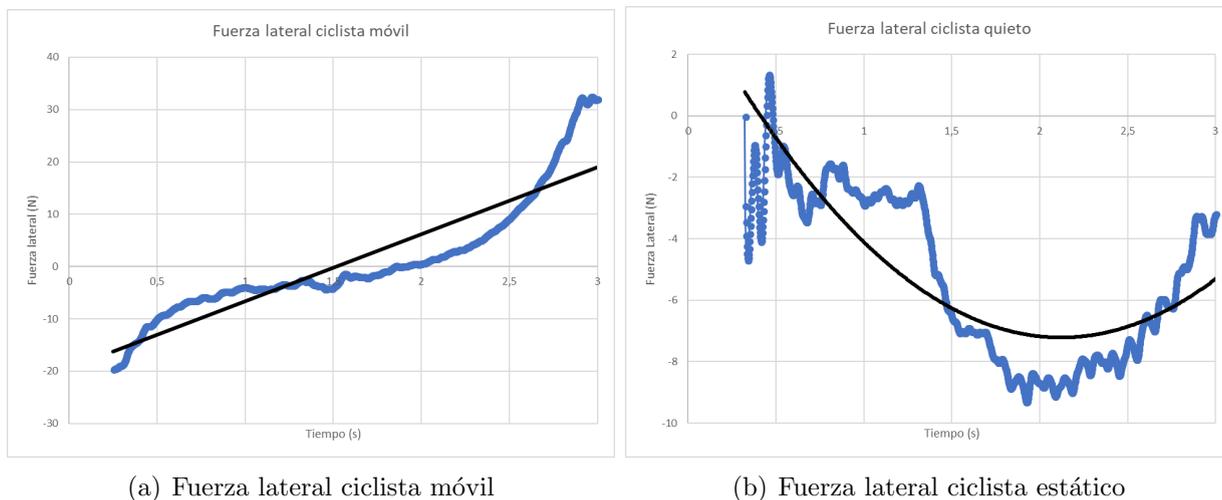


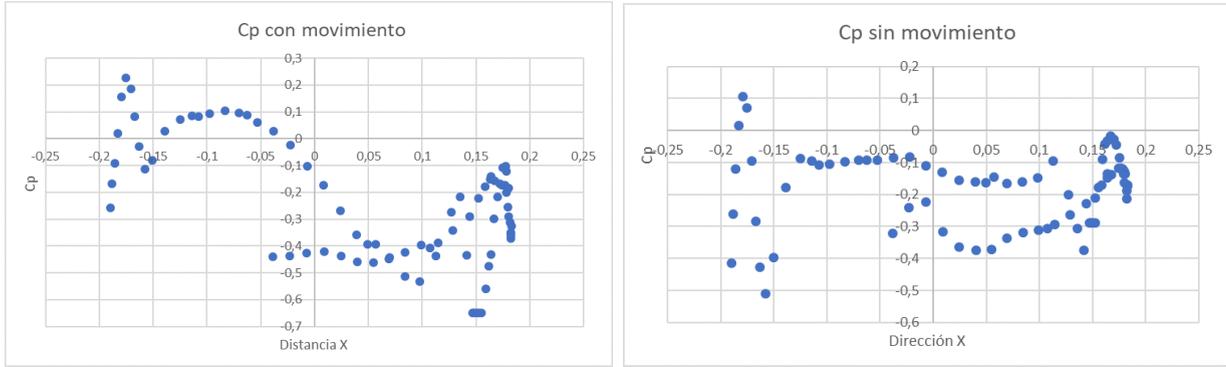
Figura 4.16: Evolución en el tiempo de las fuerzas laterales sufridas por ambos ciclistas.

Como se puede observar en las gráficas del drag de la figura 4.15, el drag del ciclista delantero, el cual realiza el movimiento, es decreciente durante todo el proceso, hasta llegar a un mínimo cuando se coloca detrás del otro ciclista debido a dos fenómenos fundamentales: por un lado, conforme se retrasa empieza a sentir la protección del otro ciclista. Pero especialmente, esta reducción se debe a la disminución de la velocidad experimentada por el ciclista, ya que a la velocidad entrante se le sustrae la propia de la trayectoria. Uno de los puntos que merecen la pena comentar, ya que representa un punto de inflexión en las 4 gráficas presentadas, ocurre en el segundo 2, cuando el ciclista móvil comienza la trayectoria de vuelta a la fila de ciclistas.

Por su parte, la gráfica del drag del ciclista trasero pone de manifiesto el crecimiento de la fuerza experimentada fruto de perder la protección del ciclista móvil. Sin embargo, vemos que hacia el final del movimiento, el drag vuelve a disminuir ligeramente, ya que el ciclista fijo empieza a sentir el efecto de tener un ciclista a rueda, efecto ya comentado en la sección 4.4.

En cuanto a los efectos laterales, los errores ya comentados dificultan su explicación. Vemos que el ciclista quieto mantiene una fuerza lateral cercana a valores nulos, aumentando tan solo hasta valores de 8N en dirección de X negativa cuando el ciclista móvil comienza a situarse a su rueda.

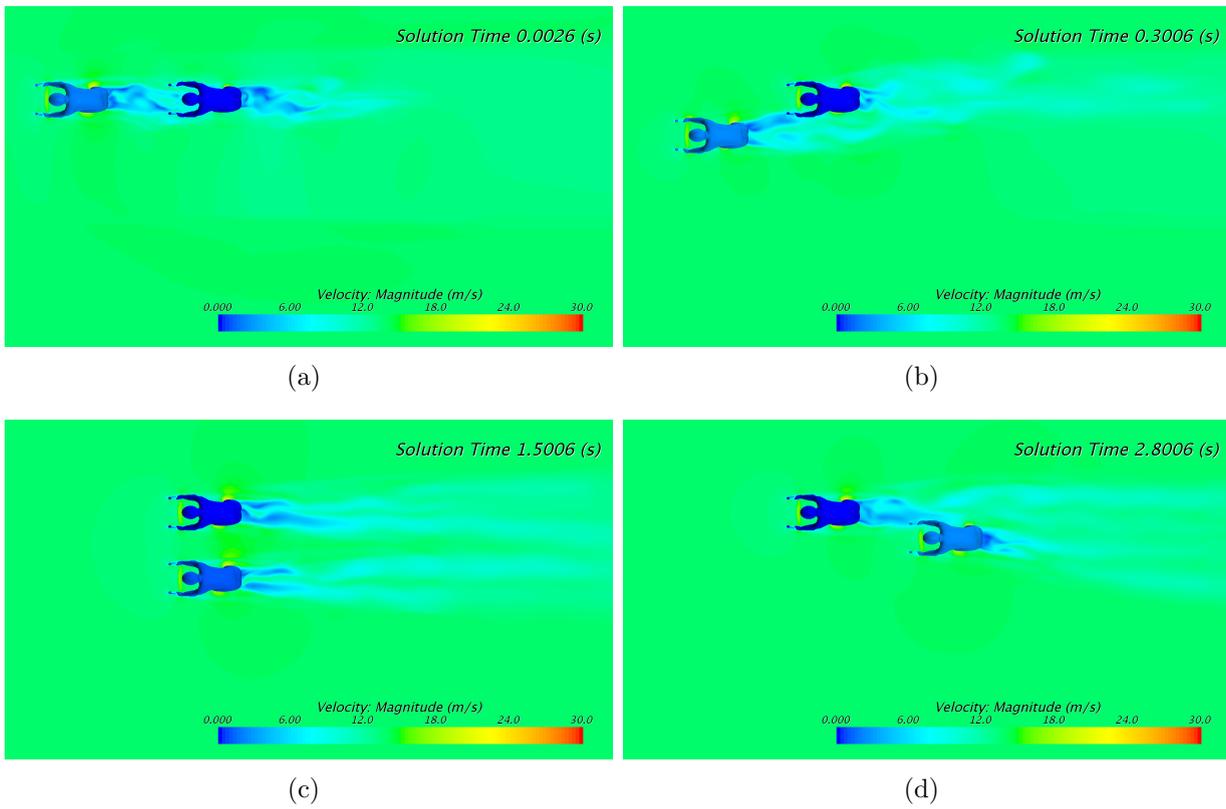
Por su parte, el ciclista que realiza el movimiento, y posiblemente el de mayor interés, tiene un crecimiento aproximadamente monótono desde valores de -20N hasta valores muy elevados de 30N. A priori, estos valores y esta tendencia no concuerda con los perfiles de velocidad y presión. Por lo tanto, tratando de llegar a una posible explicación, se realizaron diversas pruebas, como por ejemplo analizando los coeficientes de presiones en una superficie 2D, tal y como se muestra en la figura 4.17, o suprimiendo el movimiento del ciclista en X en una posición determinada para ver la evolución del valor de la fuerza lateral en tal posición, observando una disminución considerable de dicha fuerza, justificando así, por lo tanto, que esta fuerza pueda deberse, mayoritariamente, al movimiento impuesto al ciclista en esa dirección.



(a) Cp con movimiento

(b) Cp sin movimiento

Figura 4.17: Perfiles de Cp del ciclista con y sin movimiento.



(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 4.18: Evolución de las estelas de velocidad durante el movimiento completo.

Conclusiones y trabajos futuros

Índice

5.1. Conclusiones	51
5.1.1. Conclusiones generales	51
5.1.2. Conclusiones particulares del caso	51
5.2. Trabajos futuros	53

5.1. Conclusiones

5.1.1. Conclusiones generales

A lo largo de estos meses, se han cumplido las etapas establecidas en los objetivos iniciales, a saber:

El aprendizaje y manejo de los elementos básicos un código CFD a partir del cual desarrollar el trabajo aquí mostrado.

El desarrollo de una metodología adecuada para el caso realizado y para posibles variantes del trabajo, poniendo especial interés en la creación de una malla adecuada y de una configuración del caso acorde a las necesidades.

La preparación del postproceso para el tratamiento de los resultados y su justificación.

Como conclusión general, el aprendizaje diario en un entorno profesional ha permitido conocer y entrar en contacto con la metodología de trabajo dentro del mismo, así como a realizar un proyecto desde un inicio con las condiciones propias de dicho entorno.

5.1.2. Conclusiones particulares del caso

En el trabajo presentado se ha desarrollado una primera aproximación a los efectos aerodinámicos en el ciclista mediante técnicas CFD.

En un primer momento, se han estudiado las condiciones del caso, lo que ha determinado la malla a utilizar, así como la configuración del caso en general, la cual ha sido debidamente justificada.

Se han llevado a cabo diversos estudios con la intención de observar los fenómenos aerodinámicos y de demostrar que, no solo el ciclismo, sino el deporte en general tiene ya la puerta abierta a este tipo de técnicas para la mejora de sus resultados. Dichos estudios son:

- Desarrollo en profundidad del ciclista en solitario, tanto para un estudio del propio como para su uso como caso base. Se ha comentado las aportaciones de cada parte del ciclista y de la bicicleta al drag total, siendo esta del 78,4 % para el ciclista, frente al 21,6 % restante de la bicicleta., dejando entrever cuales serían las mejoras para disminuir dicha resistencia aerodinámica.
Además, este caso base ha servido para los estudios de independencia de malla y de modelo de turbulencia.
- Estudio de la influencia de ir a rueda, y de como la distancia entre los ciclistas puede afectar a las fuerzas sufridas. Se ha comprobado como el ciclista trasero experimenta una reducción notable del drag y como esta reducción se mantiene considerablemente elevada para distancias relativamente altas. Además, se ha observado que también existe una disminución del drag en el ciclista delantero, no tan intuitivo, debido a que el segundo ciclista actúa a modo de *carenado*, disminuyendo las pérdidas en la parte trasera del primer ciclista.
Por otro lado, en contra de lo que se puede pensar, la disminución del efecto con la distancia no es tan elevado como se puede presuponer, ya que la estela generada por el primer ciclista es considerable.
- Teniendo en cuenta la influencia del viento en el ciclismo, también se ha estudiado el efecto del mismo, introduciendo una nueva componente a tener en cuenta, la fuerza lateral, la cual aumenta conforme en viento entra con mayor ángulo lateral. Además, partiendo de la primera solución, se ha propuesto una posición del ciclista trasero que optimice las fuerzas resultantes sobre el mismo, observando que es mayor la disminución de la fuerza lateral que del propio drag, abriendo un futuro campo de estudio al fenómeno de los abanicos.
- Finalmente, un estudio transitorio mediante la técnica de malla móvil ha facilitado la comprensión del reparto de fuerzas durante un movimiento de relevo y su evolución durante todo el movimiento, además de corroborar el interés del CFD y la malla móvil en casos transitorios con movimiento, presentándose como una alternativa más versátil al túnel de viento.

En resumen, se ha tratado de relacionar conceptos aplicados en otras disciplinas y de justificar sus amplias posibilidades dentro del ciclismo, a la vez que se han adquirido conocimientos avanzados sobre la manipulación de una herramienta tan poderosa como el Cálculo de Fluidos Computacional.

5.2. Trabajos futuros

En este apartado se proponen posibles ampliaciones para el proyecto realizado. Al ser este un caso CFD abierto, son infinitas las opciones que quedan abiertas para estudios futuros. A lo largo del proyecto, ya se han ido proponiendo ciertas ideas y ampliaciones específicas en función del caso, pero en este apartado se expondrán en conjunto para mayor comodidad.

Desde el punto de vista del autor, la ampliación inmediata sería la de implementar el movimiento modelado en STAR-CCM+, de manera que se pueda evaluar el efecto del movimiento de la pierna en la resistencia generada por el ciclista al llevar a cabo el pedaleo, uno de los objetivos originales.

Y más allá de este estudio, son múltiples los posibles análisis independientes que se pueden derivar del caso configurado con geometrías más versátiles. El autor propone 4, comentados a continuación:

- Estudio de los componentes aerodinámicos fundamentales, como el casco del ciclista o las ruedas lenticulares.
- Estudio de los efectos aerodinámicos en el fenómeno conocido como abanicos, que consiste en aprovechar en equipo las corrientes de viento lateral.
- Optimización en términos aerodinámicos de la posición del ciclista sobre la bicicleta.
- Estudios dirigidos a otros campos de interés, como el intercambio de calor del ciclista con el exterior, en vistas a la mejora del confort del ciclista.

Pliego de condiciones y Presupuesto

Índice

6.1. Introducción	55
6.2. Pliego de condiciones	55
6.2.1. Condiciones técnicas	55
6.2.2. Condiciones del puesto de trabajo	56
6.3. Presupuesto	58
6.3.1. Mano de obra	58
6.3.2. Apoyo computacional	59
6.3.3. Total	60

6.1. Introducción

En este capítulo se expondrá el pliego de condiciones y el presupuesto requerido para la realización total del proyecto. Dentro de los primeros, se comentarán tanto los recursos humanos como los recursos materiales, entre los cuales se comentarán los sistemas Hardware y Software utilizados.

El presupuesto, por su parte, representa el coste económico y la inversión llevada a cabo, por lo que su importancia se explica por si mismo.

6.2. Pliego de condiciones

6.2.1. Condiciones técnicas

Hardware

Las condiciones que tienen que cumplir el soporte físico para la realización del proyecto son, simple y llanamente, las necesarias para soportar el volumen de cálculo y de proceso de la casuística desarrollada. El equipo utilizado, junto con sus especificaciones, es el siguiente:

- Modelo del sistema: HP Pavilion Notebook

- Procesador: Intel(R) Core(TM) i7-6500U CPU @ 2.50GHz, 2592 Mhz, 2 procesadores principales, 4 procesadores lógicos
- Memoria: 8 GB DDR4-2133 SDRAM (1 x 8 GB)
- Almacenamiento SSD M.2 de 256 GB
- Tarjeta gráfica integrada Intel HD Graphics 610
- Teclado estándar
- Ratón HP
- Sistema Operativo Windows 10

Software

Para llevar a cabo el trabajo, se han utilizado diversos programas informáticos, desde programas de simulación numérica, pasando por programas de proceso de datos hasta programas de edición de texto.

Para el diseño, mallado y cálculo del caso en CFD se ha utilizado el software comercial proporcionado por el CMT conocido como STAR-CMM+ 13.

Ocasionalmente, para el diseño y cálculo de ciertas funciones matemáticas se ha utilizado las herramientas matemáticas de MATLAB 2018a y Wolfram Mathematica 10.

Finalmente, para el postproceso de los resultados numéricos y para la presentación se ha utilizado el paquete de Office ofertado por Microsoft, mientras que la memoria se ha realizado con el editor de texto TeXstudio de LaTeX.

6.2.2. Condiciones del puesto de trabajo

Las condiciones a las que se ve sometido el autor durante la realización de un trabajo de este calibre pueden afectar tanto al desarrollo de la propia actividad como a la propia salud. Por lo tanto, resulta fundamental prestar atención a los posibles riesgos existentes, especialmente en términos ergonómicos.

El Real Decreto 488/1997 del 14 de Abril, sobre disposiciones mínimas requeridas para la seguridad y la salud en el trabajo con equipos que incluyen pantallas de visualización, es el documento oficial bajo el cual se han de regir las condiciones laborales para este proyecto, siendo las variables fundamentales a tener en cuenta el tiempo y la complejidad de un trabajo de estas condiciones.

De este modo, los riesgos que pueden presentarse son:

- Seguridad: contactos eléctricos, caídas, traslado del equipo
- Higiene industrial: relacionado con las condiciones de iluminación, ruido, temperatura...
- Ergonomía: relacionado con la correcta postura a la hora de trabajar y fatigas tales como visual, mental o física.

En base a dichas condiciones y posibles riesgos, el Real Decreto 488/1997 cita en su anexo unas condiciones mínimas, las cuales se resumen a continuación:

Equipo

La utilización del equipo no supone un riesgo en si mismo, sin embargo hay que tener precaución con ciertas variables como la luminosidad de la pantalla (evitar destellos y centelleos), la nitidez del texto (mismo espaciado y renglonado) y la posición de la propia pantalla, la cual debe ser ajustable para una correcta colocación según convenga.

Teclado

El teclado debe ser independiente del equipo y facilitar la comodidad del usuario, retrasando el cansancio del mismo en brazos y manos. Debe haber espacio suficiente para la colocación de los brazos, y su disposición debe ser tal que se llegue sin problemas a cualquier tecla del teclado, las cuales estén debidamente separadas y señaladas.

Mesa de trabajo

La mesa debe tener las dimensiones suficientes para la colocación del equipo y de todo el material que se considere necesario. El soporte o mesa ha de ser estable y estar regulado impidiendo movimientos incómodos de cabeza y ojos.

Asiento

El asiento debe ser estable, permitir al usuario libertad de movimientos y proporcionar una postura confortable. La altura y el respaldo deben ser regulables y reclinables. Si el usuario precisa de un reposapiés, se le debe conseguir un ejemplar.

Entorno

- **Espacio:** El puesto de trabajo deberá tener unas dimensiones o suficientemente grandes y estar acondicionado de tal modo que haya espacio para los cambios de posición y postura.
- **Iluminación:** Los niveles de iluminación, de fuentes naturales o artificiales, deberán ser los adecuados y guardar una correcta relación con la iluminancia de la pantalla, en función de las características del trabajo y las necesidades visuales del autor. El acondicionamiento del lugar de trabajo, así como el de las luces artificiales, deberá coordinarse de tal manera que se eviten los deslumbramientos y los reflejos molestos.
- **Reflejos y deslumbramientos** Las fuentes de luz del lugar de trabajo, cualquiera que sea su forma, deben estar instaladas de manera que no produzcan deslumbramientos

directos ni reflejos incómodos, estando las ventanas equipadas con dispositivos que permitan regular la luz entrante de acuerdo a las necesidades del usuario.

- **Ruido:** El ruido de los equipos debe ser el mínimo a fin de que no perturbe la atención.
- **Calor:** Los equipos instalados no deben constituir una fuente adicional de calor.
- **Emisiones:** Toda radiación fuera de la parte visible del espectro electromagnético deberá estar reducida hasta niveles insignificantes con la finalidad de no representar un peligro para el usuario.
- **Humedad:** Deberá conservarse dentro de unos límites admisibles que garanticen el confort del usuario.
- **Interconexión ordenador-persona:** El empresario ha de tener en cuenta una serie de factores: el programa debe estar adaptado a la tarea objetivo; el programa debe ser fácil de utilizar, adecuándose a los niveles de conocimientos y experiencia del usuario, dando indicaciones adecuadas sobre la manera de proceder; los principios de ergonomía, ya expuestos, deben aplicarse en particular al tratamiento de la información por parte de la persona.

6.3. Presupuesto

Para la exposición del presupuesto, se propone un modelo basado en la división parcial entre el presupuesto referido a la mano de obra y el referido al equipo informático utilizado para e proyecto. Al valor final se le aplicará el 21 % correspondiente al IVA (Impuesto sobre el Valor Añadido). La unidad monetaria a utilizar, de acuerdo con la Unión Europea, será el Euro.

6.3.1. Mano de obra

En este apartado se realiza un desglose de la mano de obra de este proyecto, analizando tanto las horas trabajadas como el coste por hora no solo del autor del trabajo, sino también del profesor ayudante.

Las horas dedicadas por el autor del trabajo, de acuerdo a los 12 créditos ocupados por el Trabajo Final de Carrera, serían de 360h, a razón de 30h por crédito establecidas según el Plan Bolonia. Desglosando dichas horas en función del tiempo dedicado a cada tarea, y añadiendo el tiempo empleado por el profesor ayudante. Suponiendo un sueldo de ingeniero para el autor del trabajo de 23 €y de un sueldo de doctor de 42 €, en la tabla 6.1 podemos ver la descomposición del tiempo empleado.

Tabla 6.1: Descomposición de horas empleadas

Concepto	Horas	Sueldo por hora (€)
Autor	360	21
Aprendizaje	60	
Preproceso	170	
Postproceso	100	
Elaboración memoria	30	
Profesor ayudante	20	42

Por lo tanto, en base a dichas horas y sueldos, el presupuesto de mano de obra total es de NUEVE MIL CIENTO VEINTE EUROS.

Tabla 6.2: Total mano de obra

Concepto	Valor (€)
Autor	8280
Profesor	840
Total	9120

6.3.2. Apoyo computacional

Junto a la mano de obra, el apoyo computacional forma el conjunto del presupuesto del trabajo. En dicho grupo, se incluye los equipos físicos utilizados, así como los Softwares de CFD y de cálculo, así como sus licencias, utilizados para la elaboración del trabajo.

El equipo particular utilizado es un LAPTOP HP Pavilion Notebook. En base a su valor de compra de 895 €, su período de amortización de 1 año y su valor residual respecto al valor de compra (85%), el coste de amortización es:

$$C.A. = \frac{(1 - 0,15) * ValorCompra}{Tiempo} = 760,75 \quad (6.1)$$

Por otro lado, entre los programas utilizados, se encuentran el Software de CFD STAR-CMM+ 13.02.013-R8, MATLAB R2018a STUDENT, Wolfram Mathematica 10.4 STUDENT y la licencia anual de Microsoft Office que incluye Powerpoint, Word y Excel. Las licencias de dichos programas suponen un coste tal que:

Tabla 6.3: Precio de las licencias utilizadas

Concepto	Valor (euro)
STAR-CMM+	1900
MATLAB	39
MATHEMATICA	0
MICROSOFT OFFICE	115

El uso del STAR-CMM+, sin embargo se cuantifica en base al número de horas, por lo que, de acuerdo al número de horas empleadas, de aproximadamente 1135 horas y al precio por hora de 1 €.

Finalmente, teniendo en cuenta estos todos estos factores, la parte computacional supone un coste de DOS MIL CUARENTA Y NUEVE EUROS CON SETENTA Y CINCO CÉNTIMOS (2049,75 €)

6.3.3. Total

Por lo tanto, en base al presupuesto desglosado a lo largo del capítulo, y teniendo en cuenta la contribución del IVA, el coste total es de TRECE MIL QUINIENTOS QUINCE EUROS CON 40 CÉNTIMOS.

Tabla 6.4: Coste total

Concepto	Valor (\euro)
Mano de Obra	9120
Apoyo informático	2049,75
IVA	2345.65
Total	13515,4

Bibliografía

- [1] Fernando Llamas. *Las 'ganancias marginales' del Sky escuecen a sus rivales y crean polémica*. 2017. URL: <http://www.marca.com/ciclismo/tour-francia/2017/07/03/5959f50622601d04338b45ea.html> (visitado 02-06-2018).
- [2] Chester R Kyle. “Reduction of wind resistance and power output of racing cyclists and runners travelling in groups”. En: *Ergonomics* 22.4 (1979), págs. 387-397.
- [3] Marco Belloli, Stefano Giappino, Fabio Robustelli y Claudio Somaschini. “Drafting effect in cycling: Investigation by wind tunnel tests”. En: *Procedia engineering* 147 (2016), págs. 38-43.
- [4] Nathan Barry, John Sheridan, David Burton y Nicholas AT Brown. “The effect of spatial position on the aerodynamic interactions between cyclists”. En: *Procedia Engineering* 72 (2014), págs. 774-779.
- [5] Bert Blocken, Thijs Defraeye, Erwin Koninckx, Jan Carmeliet y Peter Hespel. “CFD simulations of the aerodynamic drag of two drafting cyclists”. En: *Computers & Fluids* 71 (2013), págs. 435-445.
- [6] DM Fintelman, Mark Sterling, Hassan Hemida y F-X Li. “The effect of crosswinds on cyclists: an experimental study”. En: *Procedia Engineering* 72 (2014), págs. 720-725.
- [7] F Beaumont, R Taiar, G Polidori, H Trenchard y F Grappe. “Aerodynamic study of time-trial helmets in cycling racing using CFD analysis”. En: *Journal of biomechanics* 67 (2018), págs. 1-8.
- [8] Timothy Haron. *Forces of cycling*. 2011. URL: <https://timothyharonphysicsproject.weebly.com/forces.html> (visitado 12-05-2018).
- [9] Timothy N Crouch, David Burton, Zach A LaBry y Kim B Blair. “Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics”. En: *Sports Engineering* 20.2 (2017), págs. 81-110.
- [10] James C Martin, Douglas L Milliken, John E Cobb, Kevin L McFadden y Andrew R Coggan. “Validation of a mathematical model for road cycling power”. En: *Journal of applied biomechanics* 14.3 (1998), págs. 276-291.
- [11] Roberto Navarro. *Ampliación de Mecánica de Fluidos: Apuntes de la asignatura*. 2016.
- [12] Hidajet Hadzic. “Development and application of finite volume method for the computation of flows around moving bodies on unstructured, overlapping grids”. Tesis doct. Technische Universität Hamburg, 2006.

- [13] STAR CCM+. *Using Overset Meshes*. 2010. URL: <file:///C:/ProgramFiles/CD-adapco/13.02.013-R8/STAR-CCM+13.02.013-R8/doc/en/online/index.html#page/STARCCMP%2FGUID-BCE34E65-9112-4382-9EA9-451F1F381AFE%3Den%3D.html%23> (visitado 04-06-2018).
- [14] James Witts. *Tony Martin: the man machine*. 2016. URL: <http://www.cyclist.co.uk/in-depth/1115/tony-martin-the-man-machine> (visitado 05-06-2018).