



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Simulación numérica del efecto de viento cruzado
sobre vehículos ferroviarios de alta velocidad

Numerical simulation of the crosswind effect on
high-speed railway vehicles

Autor

Carlos Ramón Duo

Directora

Pilar Brufau García

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2024

RESUMEN

Hoy en día, la industria ferroviaria de alta velocidad se muestra preocupada por la eficiencia, estabilidad y seguridad de los trenes, construidos cada vez con materiales mas ligeros, que pueden conducir a problemas aerodinámicos como el aumento de la resistencia, las estelas, el viento inducido por el propio tren, la distribución de presión generada por la circulación del mismo, el ruido aerodinámico, o la posibilidad de volcado frente al viento cruzado, entre otras.

La estabilidad de los vehículos ferroviarios frente al viento cruzado supone un reto debido a los accidentes de vuelco que se han producido en varios países. Para abordar este problema, se pueden realizar medidas experimentales a escala real usando túneles de viento u optar por técnicas de simulación numérica o computacional, más conocida como CFD (Computational Fluid Dynamics).

Los avances en simulación numérica durante las últimas décadas permiten analizar la aerodinámica del flujo del aire alrededor de estos vehículos con precisión y un coste computacional no muy elevado, haciendo de esta metodología una de las más óptimas para abordar este problema.

En este Trabajo Fin de Grado, se aborda el estudio de la aerodinámica en trenes de alta velocidad (300 km/h), centrándose en la influencia de las variaciones de la velocidad del flujo de aire sobre el vehículo, los ángulos de incidencia del flujo de aire sobre el mismo y las características de la malla computacional empleada para su cálculo aerodinámico. El análisis se desarrolla mediante simulaciones computacionales utilizando el programa Ansys Fluent bajo diferentes configuraciones.

ABSTRACT

Nowadays, the high-speed railway industry is increasingly concerned with the efficiency, stability, and safety of trains, which are being constructed with lighter materials. This trend can lead to aerodynamic issues such as increased drag, wake formation, wind induced by the train itself, pressure distribution generated by its movement, aerodynamic noise, or the possibility of overturning under crosswind conditions, among others.

The stability of railway vehicles against crosswinds presents a challenge due to rollover accidents that have occurred in various countries. To address this issue,

experimental measurements at full scale can be carried out using wind tunnels, or numerical or computational simulation techniques, more commonly known as CFD (Computational Fluid Dynamics), can be employed.

Advances in numerical simulation over the past decades allow the analysis of airflow aerodynamics around these vehicles with precision and at a relatively low computational cost, making this methodology one of the most optimal for tackling this problem.

In this Final Degree Project, the study of aerodynamics in high-speed trains (300 km/h) is addressed, focusing on the influence of variations in airflow velocity over the vehicle, the angles of airflow incidence on it, and the characteristics of the computational mesh used for aerodynamic calculations. The analysis is conducted through computational simulations using the Ansys Fluent software under different configurations.

Índice

Lista de Figuras	5
Lista de Tablas	11
1. Introducción y objetivos	13
2. Modelos de estudio	15
3. Simulación numérica con Ansys Fluent	23
3.1. Geometría	23
3.2. Mallado	28
3.3. Condiciones iniciales y de contorno del flujo	30
3.3.1. Metodología de simulación	32
3.3.2. Condiciones iniciales	35
3.3.3. Condiciones de contorno	35
4. Resultados numéricos	39
4.1. Análisis de sensibilidad de la malla de cálculo	39
4.2. Efecto del viento frontal sobre los modelos de tren	43
4.3. Influencia del ángulo de incidencia del viento	47
4.4. Efecto del viento frontal sobre el modelo de tren completo EUROLINK	49
5. Conclusiones	55
Bibliografía	56
Anexos	58
A. Aspectos fundamentales de la aerodinámica	61
A.1. Definición	61
A.2. Fuerzas aerodinámicas	61
A.2.1. Fuerza de arrastre o drag	61

A.2.2. Fuerza de sustentación o lift	63
B. Modelo numérico	65
C. Métodos numéricos en Ansys Fluent	67
C.1. First Order UPWIND	67
C.2. Second Order UPWIND	68
C.3. QUICK	68
C.4. Third order MUSCL	69
D. Resultados de las simulaciones del modelo 1 base de tren	71
D.1. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento, variando la velocidad relativa viento-tren	72
D.2. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento con velocidad 30 km/h usando diferentes métodos numéricos de cálculo	75
D.3. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento de 30 km/h variando el número de celdas de la malla de cálculo	77
D.4. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación variando el ángulo de incidencia y velocidad del flujo de aire	79
E. Resultados de las simulaciones del modelo 2 EUROLINK de tren	89
E.1. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento, variando la velocidad relativa viento-tren	90
E.2. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación variando el ángulo de incidencia y velocidad del flujo de aire	93

Lista de Figuras

2.1. Vista 3D general del modelo 1 base de tren de alta velocidad.	15
2.2. Vista lateral del modelo 1 base de tren de alta velocidad.	16
2.3. Parte del modelo de tren de alta velocidad seleccionado para realizar la simulación.	16
2.4. Pantalla de Ansys Fluent en la que se obtiene el área proyectada del modelo de tren elegido.	17
2.5. Comparación de las 4 mallas de cálculo utilizadas en la simulación del modelo 1 base de tren para analizar la convergencia de los resultados. .	19
2.6. Vista general del modelo 2 de tren EUROLINK.	20
2.7. Vista lateral del modelo 2 de tren EUROLINK.	20
2.8. Modelo 2 utilizado en la simulación.	21
3.1. Modelo de tren base 1 sin modificar.	23
3.2. Modelo de tren base 1 modificado para realizar la simulación.	24
3.3. Vista del modelo 1 base de tren tras su paso por Menu Facets y Shrinkwrap.	25
3.4. Vista del modelo 1 base de tren definitivo.	25
3.5. Vista del modelo 1 base en el Menu Tools y Auto Skin.	26
3.6. Vista del modelo base sólido.	26
3.7. Vista del volumen que engloba al modelo de tren en el Menu Enclosure.	27
3.8. Intersección de volúmenes que proporciona el área a simular en la que se encuentra el flujo según el Menu Enclosure.	27
3.9. Distribución de grupos en las caras del volumen generado.	28
3.10. Vista 3D de la malla de cálculo.	29
3.11. Detalle de la malla alrededor del tren.	29
3.12. Superficies de entrada de flujo, paredes y contorno del tren.	31
3.13. Superficies de salida de flujo, suelo y paredes.	31
3.14. Definición de la gravedad en el programa Ansys Fluent.	32
3.15. Modelo de turbulencia elegido en la simulación.	33
3.16. Valores de referencia utilizados en la simulación con Ansys Fluent. . . .	34

3.17. Condición de contorno Inlet frontal.	36
3.18. Condición de contorno Inlet con ángulo de incidencia 10°	37
3.19. Condición de contorno Outlet.	37
4.1. Variación del coeficiente de arrastre frente al número de celdas.	40
4.2. Evolución del valor del coeficiente de arrastre para una malla de 750.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.	41
4.3. Evolución del valor del coeficiente de arrastre para una malla de 1.000.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.	41
4.4. Evolución del valor del coeficiente de sustentación para una malla de 750.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.	42
4.5. Evolución del valor del coeficiente de sustentación para una malla de 1.000.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.	42
4.6. Vista 3D de la distribución de presiones del flujo de aire alrededor del modelo 1 base de tren.	43
4.7. Perfil de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo 1 base de tren.	44
4.8. Perfil de la distribución de velocidad del flujo de aire alrededor del modelo 1 base de tren.	44
4.9. Vista 3D de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.	45
4.10. Perfil de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.	46
4.11. Perfil de la distribución de velocidad del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.	46
4.12. Vista 3D de la malla de cálculo para el modelo completo del tren EUROLINK.	49
4.13. Comparación del tamaño de celda en el tren con respecto al resto del volumen mallado en el modelo de tren completo EUROLINK.	50
4.14. Vista 3D de la distribución de la presión y líneas de corriente del flujo de aire sobre el modelo completo de tren EUROLINK.	51
4.15. Vista 3D de la distribución de la velocidad y líneas de corriente del flujo de aire sobre el modelo completo de tren EUROLINK.	51

4.16. Vista 3D de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo completo de tren EUROLINK.	51
4.17. Detalle de la distribución de presión del flujo del aire en el espacio entre vagones del modelo completo del tren EUROLINK.	52
4.18. Perfil de la distribución de velocidad del flujo de aire alrededor del modelo completo de tren EUROLINK.	52
A.1. Resistencias aerodinámicas según la forma. Apuntes Mecánica de Fluidos EINA - UNIZAR.	62
A.2. Evolución temporal del valor del coeficiente de arrastre en vehículos. Apuntes Mecánica de Fluidos EINA -UNIZAR.	63
A.3. Parámetros aerodinámicos relevantes en un perfil alar. Apuntes Mecánica de Fluidos EINA - UNIZAR.	64
C.1. Representación de un volumen de control unidimensional.	68
D.1. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 30 km/h.	72
D.2. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 50 km/h.	73
D.3. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 70 km/h.	73
D.4. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 90 km/h.	74
D.5. Resultados numéricos de la simulación con el método First order UPWIND	75
D.6. Resultados numéricos de la simulación con el método QUICK.	76
D.7. Resultados numéricos de la simulación con el método Third order MUSCL.	76
D.8. Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 250.000 celdas.	77
D.9. Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 500.000 celdas	78
D.10. Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 750.000 celdas	78
D.11. Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 1.000.000 celdas	79
D.12. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 5°.	79
D.13. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 5°.	80
D.14. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 5°.	80

D.15.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 5º.	81
D.16.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 10º.	81
D.17.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 10º.	82
D.18.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 10º.	82
D.19.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 10º.	83
D.20.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 15º.	83
D.21.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 15º.	84
D.22.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 15º.	84
D.23.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 15º.	85
D.24.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 20º.	85
D.25.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 20º.	86
D.26.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 20º.	86
D.27.Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 20º.	87
E.1. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 30 km/h.	90
E.2. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 50 km/h.	91
E.3. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 70 km/h.	91
E.4. Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 90 km/h.	92
E.5. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 5º.	93

E.6. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 5°.	94
E.7. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 5°.	94
E.8. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 5°.	95
E.9. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 10°.	95
E.10. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 10°.	96
E.11. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 10°.	96
E.12. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 10°.	97
E.13. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 15°.	97
E.14. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 15°.	98
E.15. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 15°.	98
E.16. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 15°.	99
E.17. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 20°.	99
E.18. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 20°.	100
E.19. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 20°.	100
E.20. Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 20°.	101

Lista de Tablas

2.1. Valores de velocidad del tren, viento y relativa usadas en las simulaciones numéricas.	17
2.2. Casos simulados atendiendo a las modificaciones del ángulo de incidencia del viento y al a velocidad del tren.	18
2.3. Número de celdas de cada una de las mallas usadas para el cálculo en una primera aproximación.	18
2.4. Número de celdas de cada una de las 4 mallas usadas en el análisis de convergencia de los resultados.	18
3.1. Número de celdas, caras, nodos y particiones de la malla del modelo 1 base de tren.	29
3.2. Volúmenes máximo, mínimo y total de las celdas de la malla del modelo 1 base de tren.	30
3.3. Número de celdas, caras, nodos y particiones en el modelo 2 EUROLINK.	30
3.4. Volúmenes máximo, mínimo y total de las celdas de la malla del modelo 2 EUROLINK.	30
3.5. Áreas enfrentadas al flujo en el modelo 1 base de tren para distintos ángulos de incidencia.	35
3.6. Áreas enfrentadas al flujo en el modelo 2 EUROLINK para distintos ángulos de incidencia.	35
3.7. Condiciones iniciales del flujo en el dominio de cálculo.	35
3.8. Condiciones de contorno en cada superficie.	36
4.1. Comparación de los coeficientes de resistencia y sustentación obtenidos con una malla gruesa y una fina.	39
4.2. Valores de coeficientes de resistencia y sustentación según el número de celdas usado en cada una de las mallas de cálculo.	40
4.3. Resultados numéricos de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación sobre el modelo 1 base de tren para diferentes velocidades relativas tren-viento.	43

4.4.	Resultados numéricos de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación del flujo de aire sobre el modelo 2 EUROLINK.	44
4.5.	Resultados numéricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 1 base de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.	47
4.6.	Resultados numéricos del coeficiente de sustentación sobre el modelo 1 base de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.	47
4.7.	Resultados teóricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 1 base de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.	48
4.8.	Resultados numéricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 2 EUROLINK de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.	48
4.9.	Resultados numéricos del coeficiente de sustentación sobre el modelo 2 EUROLINK de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.	48
4.10.	Resultados teóricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 2 EUROLINK de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.	49
4.11.	Resultados numéricos de los coeficientes de arrastre y sustentación sobre el modelo completo del tren EUROLINK variando la velocidad relativa tren-aire bajo incidencia frontal.	50
C.1.	Comparación de los resultados numéricos de los coeficientes de arrastre y sustentación para el flujo de aire frontal sobre el modelo 1 base de tren usando diferentes métodos numéricos de resolución espacial.	70

Capítulo 1

Introducción y objetivos

En el diseño de trenes de alta velocidad, la aerodinámica se ha convertido en un pilar fundamental para garantizar su eficiencia y seguridad. Aunque a primera vista el diseño exterior pueda parecer guiado por criterios estéticos, en realidad es la aerodinámica la que define gran parte de la funcionalidad y el rendimiento de estos vehículos. Este campo no solo influye en la apariencia, sino que también aporta características técnicas esenciales para mejorar la estabilidad y el desempeño durante la operación. Al desplazarse, los trenes interactúan constantemente con el aire, lo que genera dos tipos principales de flujo: el flujo externo, relacionado con el aire que pasa por la superficie del tren, y el flujo interno, que incluye el aire utilizado en sistemas como la ventilación y la refrigeración.

El flujo externo genera tres fuerzas principales que actúan sobre el tren: la resistencia al avance, que se opone al movimiento y afecta directamente la eficiencia energética; la fuerza vertical, que puede manifestarse como sustentación (hacia arriba) o como carga aerodinámica descendente (hacia abajo), dependiendo del diseño; y la fuerza lateral, que puede desestabilizar el tren en condiciones de viento cruzado. Estas fuerzas son especialmente críticas en trenes de alta velocidad, ya que tienen un impacto directo en la estabilidad y el confort de los pasajeros. Además, el flujo externo también influye en aspectos como la acumulación de suciedad en las ventanas, que reduce la visibilidad, y la generación de ruido causada por la separación de la capa límite, problemas que deben resolverse mediante un diseño aerodinámico eficiente.

Por otro lado, el flujo interno desempeña un papel esencial en el funcionamiento del tren, ya que asegura una ventilación adecuada, el enfriamiento de componentes clave y el mantenimiento de una temperatura confortable en los vagones. Este flujo debe estar diseñado cuidadosamente para equilibrar las necesidades internas con el rendimiento aerodinámico global.

A lo largo del tiempo, los avances en aerodinámica se han centrado en reducir la resistencia al avance con el objetivo de alcanzar mayores velocidades y optimizar el

consumo de energía. Sin embargo, a medida que los trenes superan los 300 km/h, el control de las fuerzas laterales y verticales ha cobrado una importancia similar para garantizar la estabilidad y la seguridad, especialmente en condiciones desafiantes como el viento cruzado o la entrada y salida de túneles. Estas mejoras son visibles en elementos como las formas aerodinámicas optimizadas de las narices de los trenes, diseñadas para reducir las ondas de presión y mejorar la interacción con el flujo de aire.

La sostenibilidad también es un aspecto clave en el diseño de trenes de alta velocidad. Optimizar la aerodinámica no solo reduce la resistencia al avance, mejorando la eficiencia energética, sino que también disminuye el consumo eléctrico, especialmente cuando se combina con tecnologías como el frenado regenerativo. Además, el uso de materiales reciclados y reciclables, junto con estrategias de economía circular, permite construir trenes más ligeros y sostenibles a lo largo de todo su ciclo de vida. Estas innovaciones, sumadas a diseños que facilitan el mantenimiento y a la integración del ferrocarril en sistemas de transporte intermodal, convierten a los trenes de alta velocidad en una solución clave para avanzar hacia una movilidad más limpia y respetuosa con el medio ambiente.

En este contexto, el presente proyecto se centra en el estudio computacional de la aerodinámica de los trenes de alta velocidad, analizando las principales leyes y fuerzas que rigen este campo, así como los coeficientes adimensionales característicos. El objetivo es comprender cómo las variaciones en las condiciones de flujo, como la velocidad del aire o los ángulos de incidencia, afectan el comportamiento aerodinámico del tren. De este modo, se busca reforzar los conocimientos adquiridos en mecánica de fluidos y contribuir al diseño de trenes más seguros y eficientes.

Capítulo 2

Modelos de estudio

Para poder realizar el estudio aerodinámico del flujo de aire alrededor de trenes de alta velocidad se han seleccionado 2 modelos de tren. Como nos centramos principalmente en la parte delantera del mismo, se han seleccionado modelos de tren con distintas formas en esa parte, y que fuesen lo más semejantes en el resto del modelo.

Los modelos han sido seleccionados de la misma fuente. Tanto el modelo base, como el modelo modificado, se han obtenido de <https://sketchfab.com/feed>.

Se han intentado seleccionar modelos que son usados hoy en día en viajes de alta velocidad, y comparar sus resultados con estudios que se han realizado en condiciones similares, para asegurar la veracidad de nuestros resultados (ver capítulo 4). El objetivo es ver qué modelo se comporta mejor ante variaciones del ángulo de entrada de la velocidad del flujo de aire, teniendo en cuenta la velocidad relativa entre el tren de alta velocidad y el aire.

A continuación, se adjuntan figuras con la forma del modelo base:

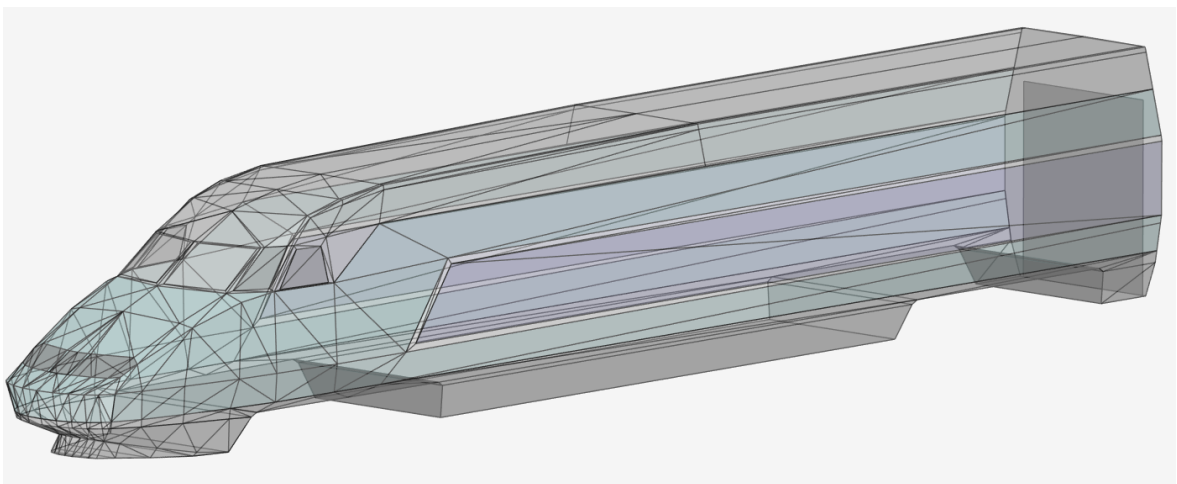


Figura 2.1: Vista 3D general del modelo 1 base de tren de alta velocidad.

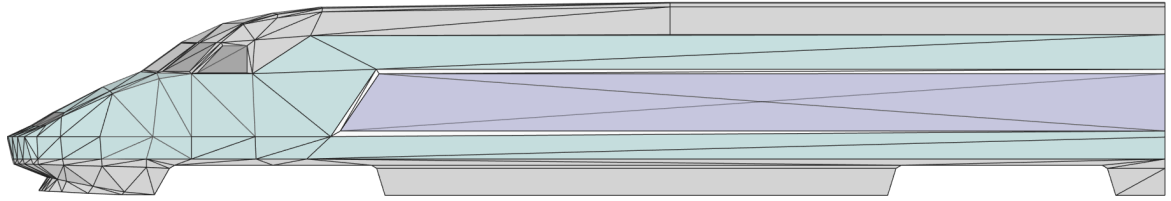


Figura 2.2: Vista lateral del modelo 1 base de tren de alta velocidad.

Para el estudio numérico de este modelo, nos vamos a centrar en aproximadamente la mitad del mismo con una longitud de referencia de 12 metros. Y a su vez, utilizaremos la simetría del modelo, para optimizar el cálculo, centrándonos en la mitad, para mallar y calcular los diferentes parámetros necesarios.

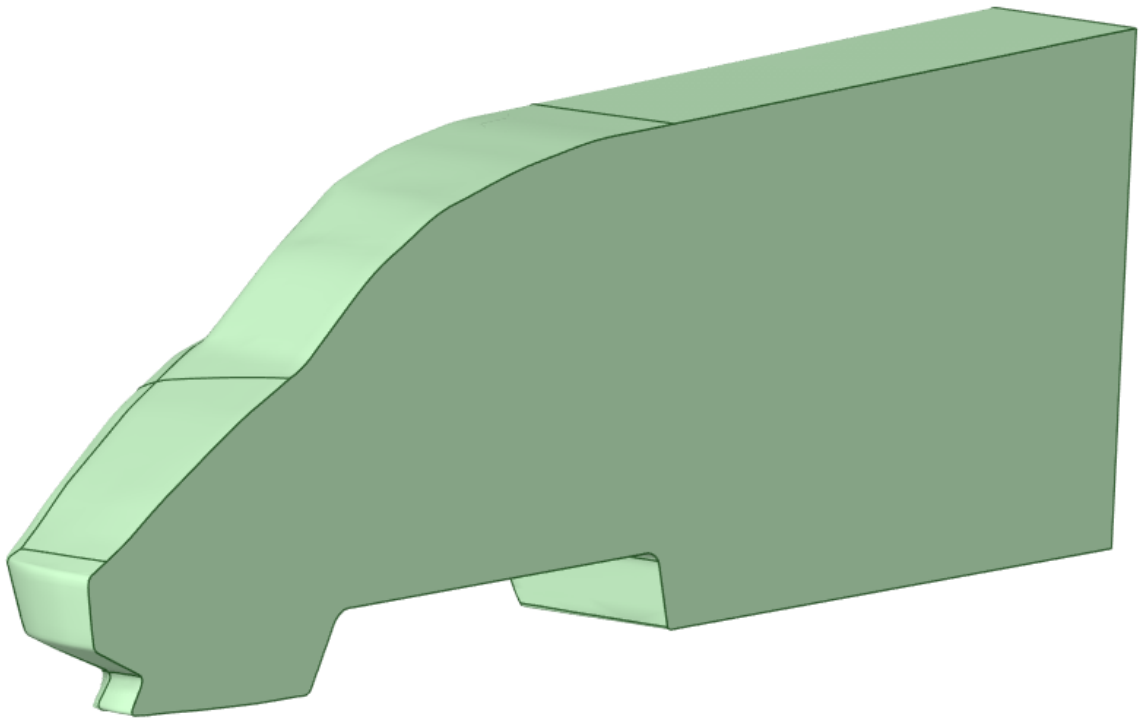


Figura 2.3: Parte del modelo de tren de alta velocidad seleccionado para realizar la simulación.

El área de referencia del objeto la hemos obtenido mediante una herramienta de Ansys Fluent llamada "Projected Areas". Para el caso base nos ha dado un área aproximadamente de $5,41 \text{ m}^2$.

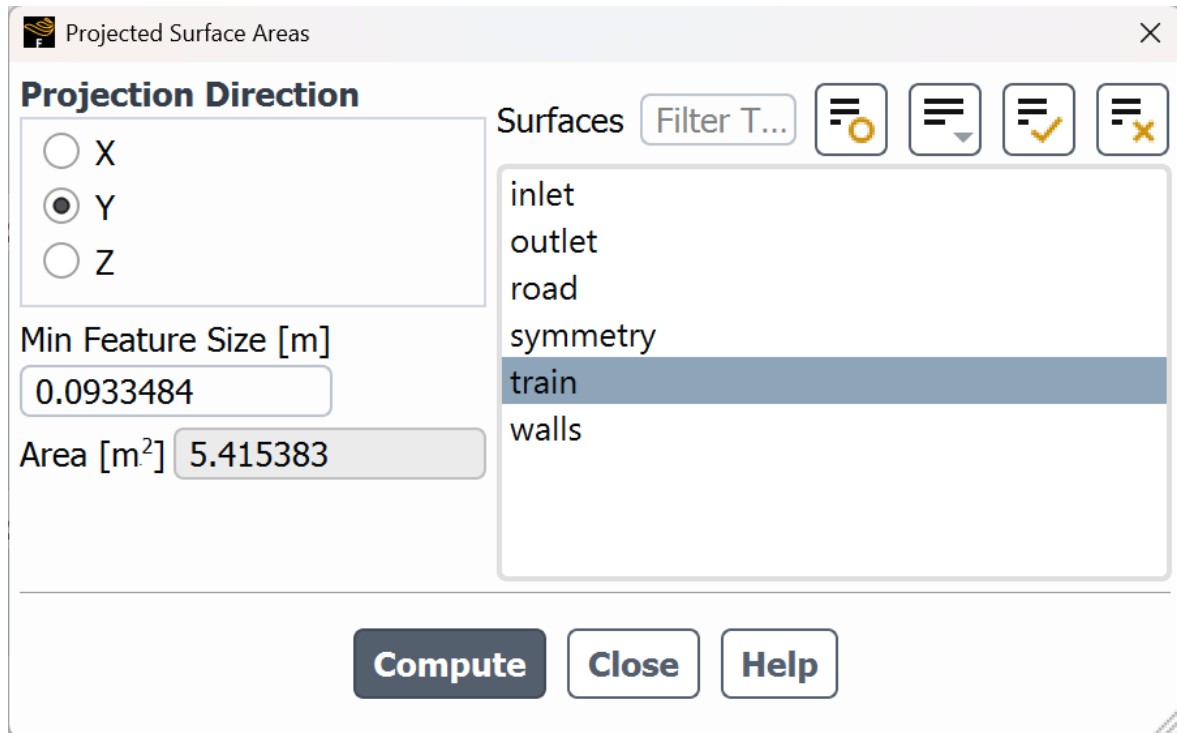


Figura 2.4: Pantalla de Ansys Fluent en la que se obtiene el área proyectada del modelo de tren elegido.

Para comprobar el efecto del viento sobre el tren de alta velocidad, se han simulado diferentes velocidades del viento, que se recogen en la siguiente tabla.

Vel. tren(km/h)	Vel. viento(km/h)	Vel. relativa(km/h)	Vel. relativa (m/s)
300	30	270	75
300	50	250	69,44
300	70	230	63,89
300	90	210	58,33

Tabla 2.1: Valores de velocidad del tren, viento y relativa usadas en las simulaciones numéricas.

Por otro lado, para ver la influencia del ángulo de incidencia o efecto del viento cruzado sobre el modelo de tren, para los diferentes valores anteriores de velocidad, se han analizado los resultados numéricos de las simulaciones variando el ángulo en 5, 10, 15 y 20 grados.

5 grados	10 grados	15 grados	20 grados
270 km/h	270 km/h	270 km/h	270 km/h
250 km/h	250 km/h	250 km/h	250 km/h
230 km/h	230 km/h	230 km/h	230 km/h
210 km/h	210 km/h	210 km/h	210 km/h

Tabla 2.2: Casos simulados atendiendo a las modificaciones del ángulo de incidencia del viento y al a velocidad del tren.

Además, se han realizado distintas simulaciones para comprobar la sensibilidad de la malla. Por un lado, se han creado dos mallas: una gruesa, que es la que se ha usado para las simulaciones correspondientes a los dos modelos, y otra fina, las dos mallas son de forma tetraédrica. A continuación, se muestra una tabla con el número de celdas de cada una de las primeras mallas utilizadas para el cálculo y el análisis de convergencia de los resultados.

Malla	Nº celdas
Malla gruesa	$\approx 580,000$
Malla fina	$\approx 1,040,000$

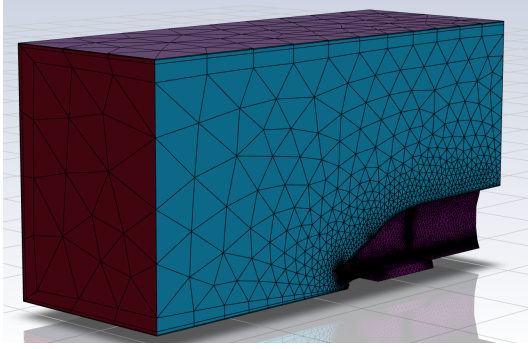
Tabla 2.3: Número de celdas de cada una de las mallas usadas para el cálculo en una primera aproximación.

Posteriormente, a la vista de los resultados numéricos, se vio necesario hacer un análisis más exhaustivo de convergencia; y por este motivo, se generaron 4 mallas de cálculo, incrementando linealmente el número de celdas de la malla, con una diferencia de 250.000 celdas entre ellas. Así se buscó comprobar la convergencia de los resultados con independencia de la malla.

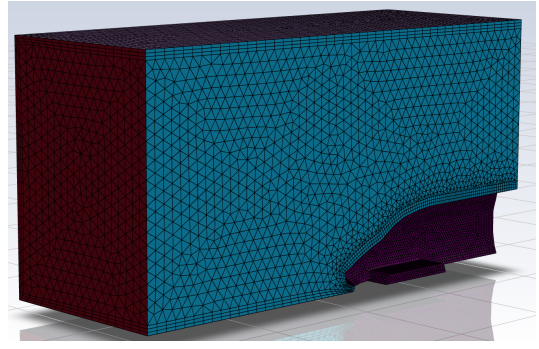
Número de celdas			
250.000	500.000	750.000	1.000.000

Tabla 2.4: Número de celdas de cada una de las 4 mallas usadas en el análisis de convergencia de los resultados.

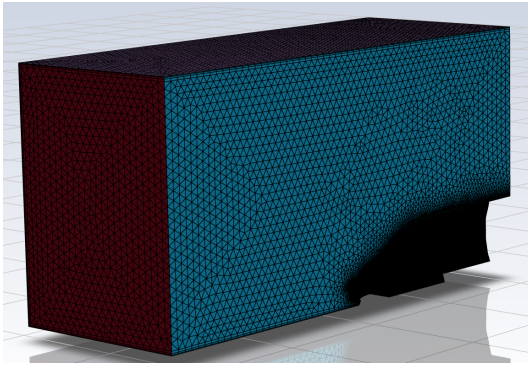
En las siguientes imágenes se muestran las mallas de cálculo para cada caso expuesto anteriormente en la tabla.



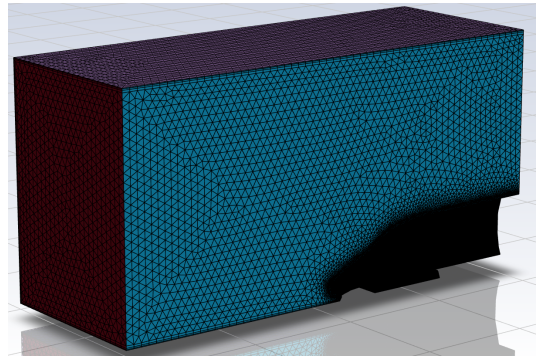
(a) 250.000 celdas.



(b) 500.000 celdas.



(c) 750.000 celdas.



(d) 1.000.000 celdas.

Figura 2.5: Comparación de las 4 mallas de cálculo utilizadas en la simulación del modelo 1 base de tren para analizar la convergencia de los resultados.

Como se ha comentado antes, hemos elegido 2 tipos de trenes de alta velocidad para nuestro estudio. En el segundo modelo, el cambio principal es la forma de la parte delantera, que es la que nos interesa estudiar para poder ver el efecto aerodinámico del viento que choca contra el modelo de tren.

En este caso, se ha escogido el modelo teórico para el tren EUROLINK. A continuación, se adjuntan imágenes de las vistas del mismo.

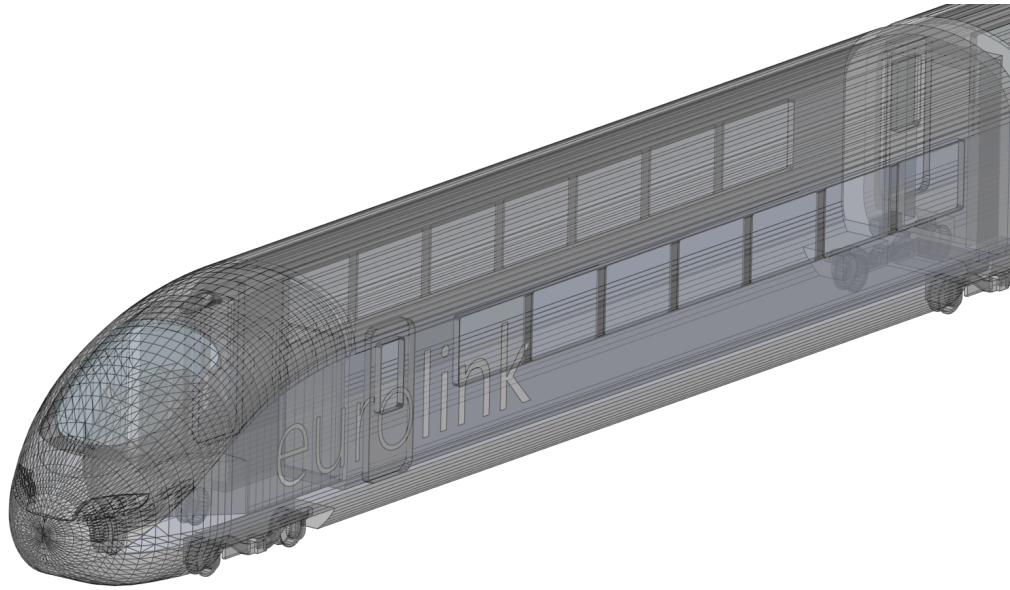


Figura 2.6: Vista general del modelo 2 de tren EUROLINK.

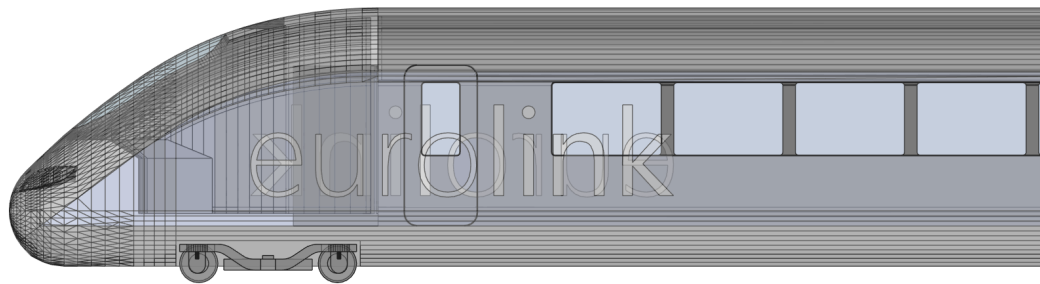


Figura 2.7: Vista lateral del modelo 2 de tren EUROLINK.

Y como en el modelo 1 base, para la simulación, seleccionamos aproximadamente la mitad del vagón delantero con una longitud de aproximadamente 11 metros; y de ella, la mitad; ya que es un modelo simétrico en anchura.

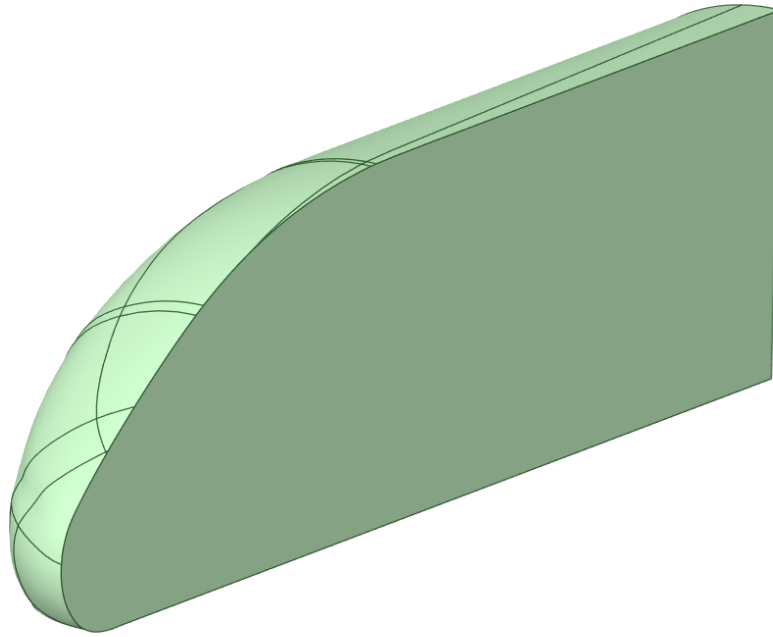


Figura 2.8: Modelo 2 utilizado en la simulación.

Hemos usado la misma herramienta que para el modelo 1 base a la hora de calcular el área proyectada, siendo en este caso de aproximadamente $4,88 \text{ m}^2$.

Para este modelo 2, las modificaciones que se han realizado han sido los cambios en la velocidad con la que incide el viento, tabla 2.1. También el ángulo de incidencia con el que el viento incide sobre el tren, tabla 2.2.

Por ultimo, se ha realizado una simulación del tren completo, y no sólo una longitud de 12 metros, incluyendo los vagones, cuando el viento incide de manera frontal.

Capítulo 3

Simulación numérica con Ansys Fluent

Para los dos modelos de tren se ha seguido el mismo proceso, tanto para geometría como para el mallado y condiciones de contorno. A continuación, se explican los pasos seguidos en cada parte, para llevar a cabo las diferentes simulaciones definidas anteriormente.

3.1. Geometría

Para preparar la geometría que mallaremos y simularemos, usaremos la herramienta SpaceClaim de Ansys Fluent. En primer lugar, se elimina todo lo que consideramos innecesario. El modelo descargado de la web es un modelo completo de un tren de alta velocidad; por lo que eliminaremos todos los vagones, excepto el primero en el que se encuentra la parte frontal, que es la que se quiere analizar. Además, se eliminan extras que dificultan el proceso, y que son innecesarios para la simulación. A continuación, se muestra cómo es el modelo al inicio sin modificarlo.

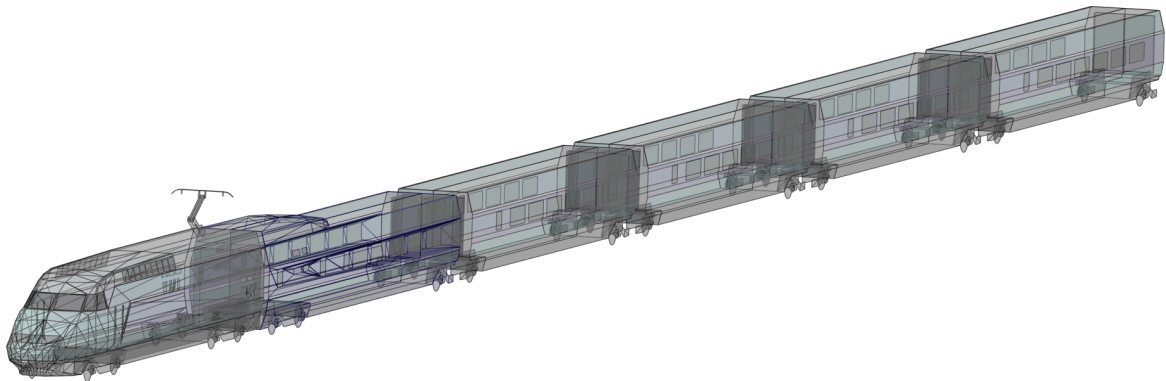


Figura 3.1: Modelo de tren base 1 sin modificar.

Modificamos la geometría hasta que queda como en la Figura 2.1.

Lo siguiente es convertirlo en un sólido. Nuestro modelo, al ser un archivo .skp, se importa como un archivo en forma de superficie. SpaceClaim con ese tipo de archivos da problemas para poder crear el volumen a mallar; por lo que lo convertiremos a sólido.

Cuando ya tenemos el modelo base, lo siguiente es reparar el modelo. Este menú es muy útil para corregir imperfecciones que, en un futuro, nos pueden dar errores en la simulación. Vamos a la pestaña Repair y usamos las 3 opciones: **Gaps**, **Missing Faces** y **Stitch**.

En la siguiente imagen, se muestra un ejemplo usando, en este caso, la opción de **Missing Faces**.

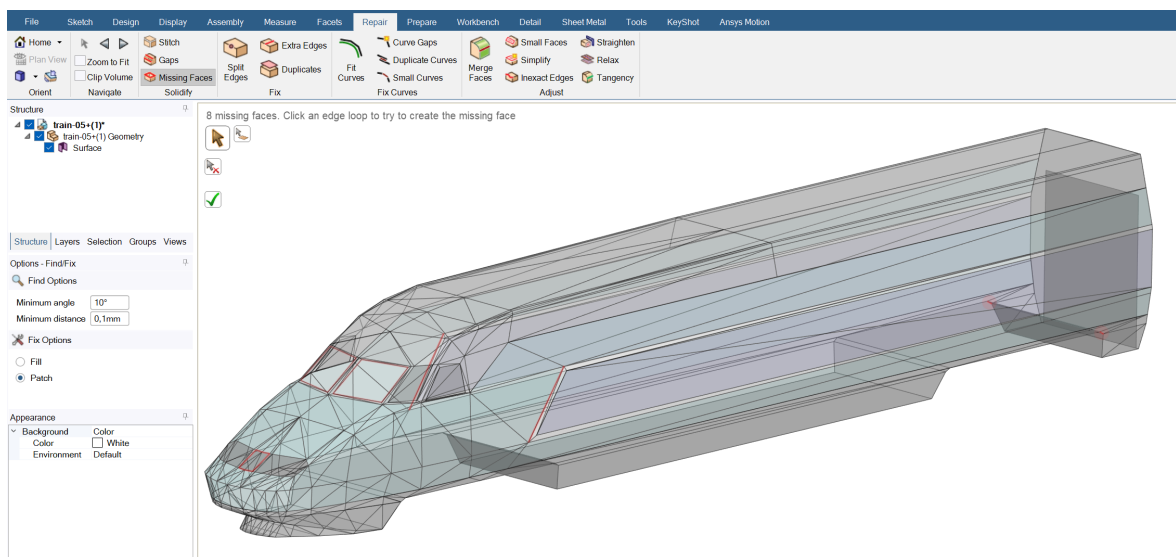


Figura 3.2: Modelo de tren base 1 modificado para realizar la simulación.

Cuando se ha reparado el modelo todo lo posible, pasamos a crear un faceted body, que es un cuerpo tridimensional compuesto por múltiples caras planas.

Para ello, usaremos el menú **Facets**, concretamente la opción "Shrinkwrap". Seleccionamos el tamaño que queremos, en este caso 30 milímetros, para que sea lo más parecido posible al modelo original, sin que de ningún error.

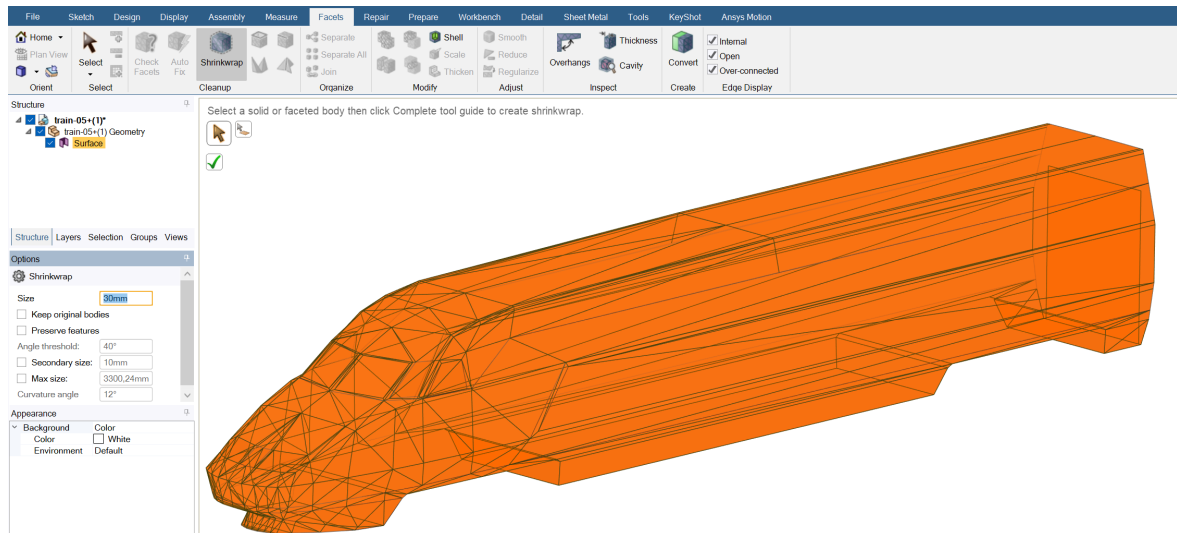


Figura 3.3: Vista del modelo 1 base de tren tras su paso por Menu Facets y Shrinkwrap.

Cuando el programa ha terminado, queda un modelo como el que aparece en la siguiente imagen.

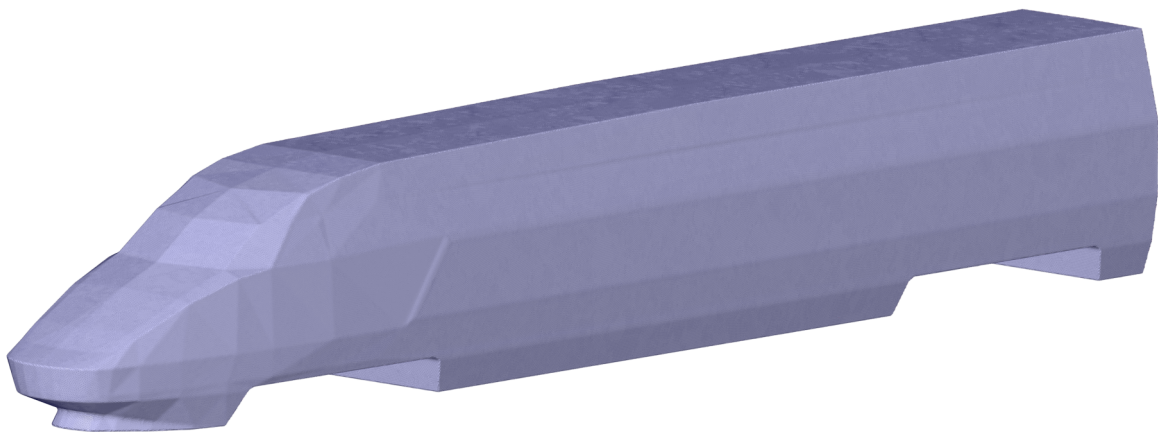


Figura 3.4: Vista del modelo 1 base de tren definitivo.

Como se puede apreciar, al poner un tamaño tan pequeño, el faceted body tiene prácticamente la misma forma que el modelo original. En Facets, al crear este faceted body podemos usar la opción **Auto Fix** para asegurarnos de que no hay ningún error en el modelo.

Por ultimo, usaremos el menú **Tools** para crear el sólido. Para ello, usaremos la herramienta **Auto Skin** en el modelo y crearemos el sólido.

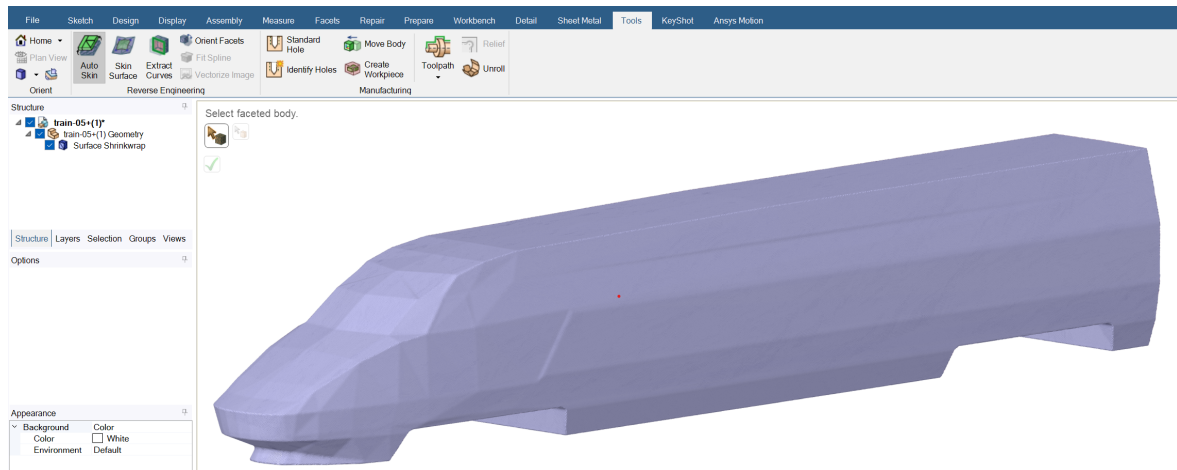


Figura 3.5: Vista del modelo 1 base en el Menu Tools y Auto Skin.

Cuando se completa, queda el siguiente sólido:

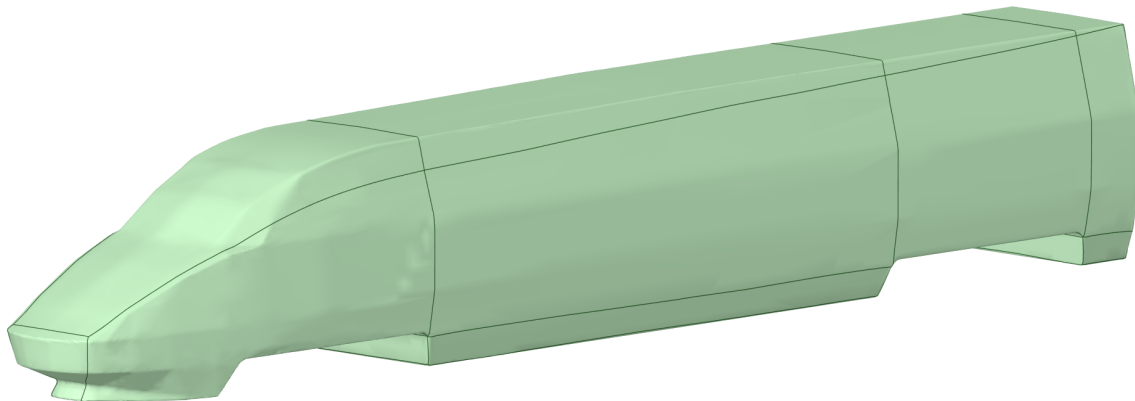


Figura 3.6: Vista del modelo base sólido.

Al tener ya el modelo de tren sólido, se pueden crear superficies a través de las cuales se puede recortar el sólido, para que, al final, quede la parte que nos interesa, como se ha plasmado en la Figura 2.3.

Cuando ya se tiene el modelo de tren sólido, se puede crear el volumen que usaremos para realizar las diferentes simulaciones. Para ello, vamos a usar la herramienta **Enclosure** en el menu **Prepare**.

En nuestro caso, crearemos un sólido para tener una forma personalizada que se superpondrá al sólido del tren. Definimos en qué sólido se va a crear el volumen alrededor y cuál será el que dé forma a ese volumen.

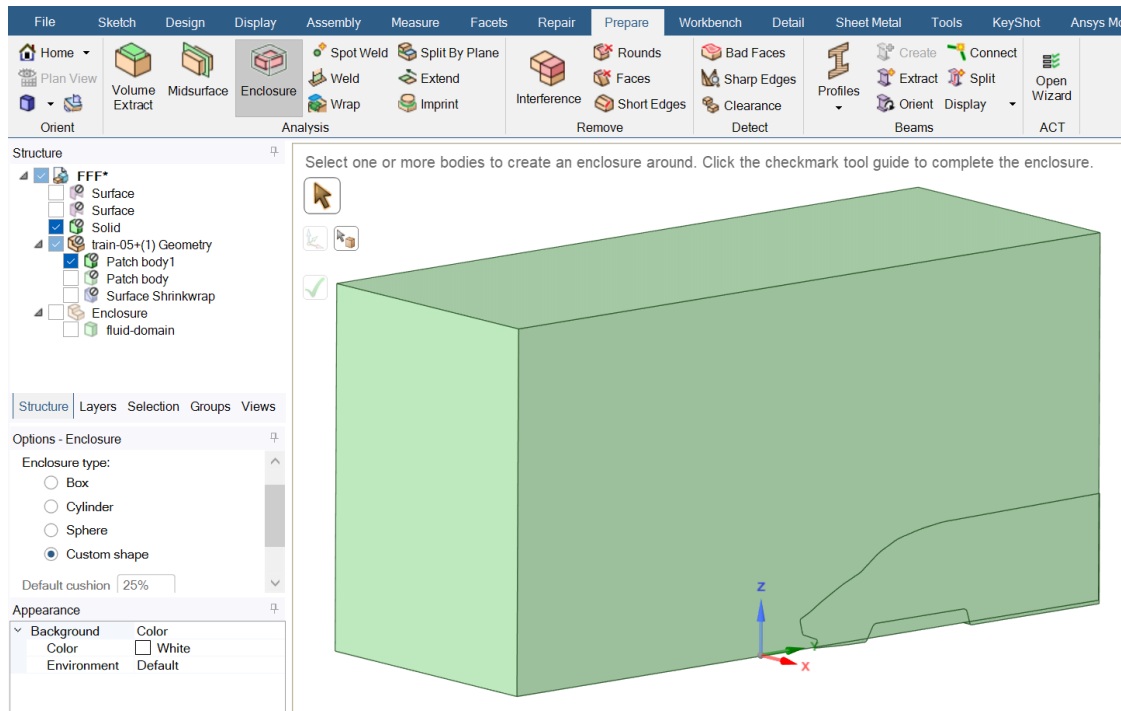


Figura 3.7: Vista del volumen que engloba al modelo de tren en el Menu Enclosure.

Al finalizar, tendremos la intersección entre volúmenes, que es la zona en la que simularemos el flujo de aire. En nuestro caso, hacemos que el sólido del tren se salga unos milímetros por la parte trasera e inferior para que no de error al tener tan poco grosor el volumen, por lo cual en esas dos partes no habrá volumen, como aparece en la siguiente figura:

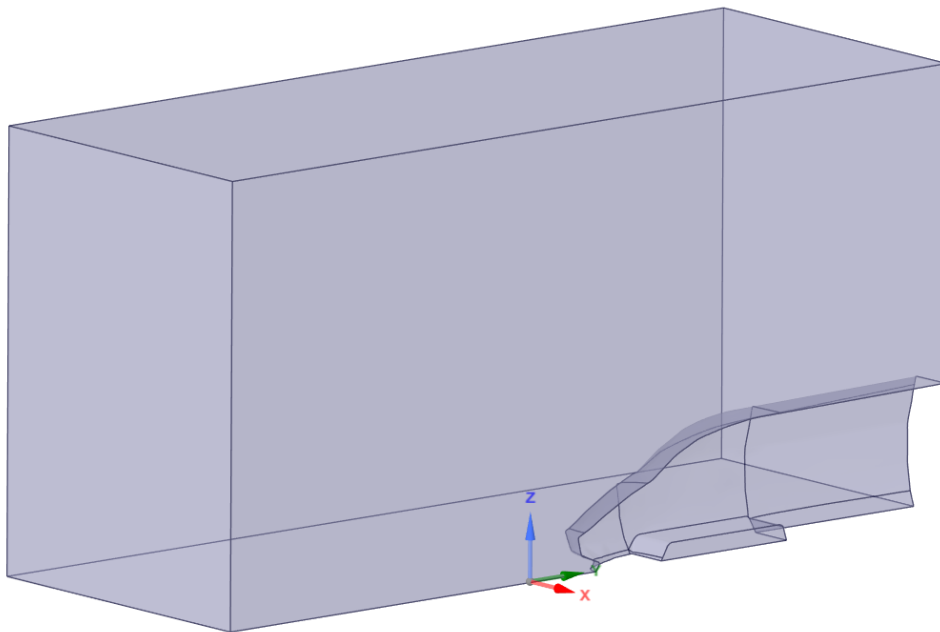


Figura 3.8: Intersección de volúmenes que proporciona el área a simular en la que se encuentra el flujo según el Menu Enclosure.

Por último, es fundamental definir en cada cara del volumen, los diferentes grupos para poder asignar las condiciones de contorno más adelante.

En la parte inferior del listado de objetos, hay una parte llamada "Groups". En esa parte, se va a definir cada cara. En este caso, las correspondientes a inlet, outlet, symmetry, etc.

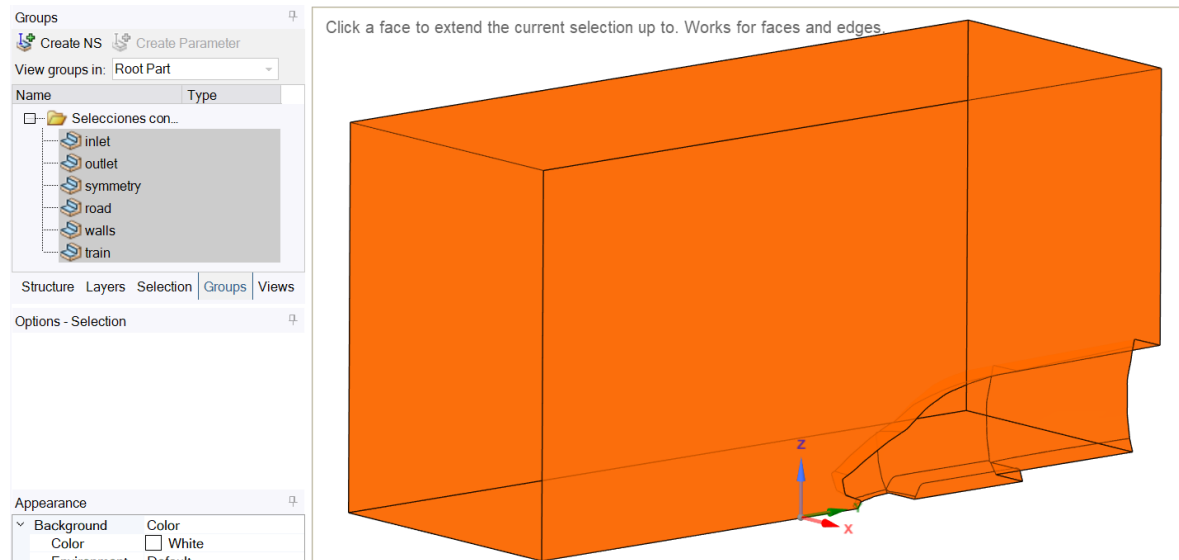


Figura 3.9: Distribución de grupos en las caras del volumen generado.

3.2. Mallado

Después de preparar la geometría, lo siguiente es realizar el mallado del volumen que hemos desarrollado anteriormente. El mallado es una parte fundamental para el análisis de volúmenes finitos. Se trata del proceso de dividir la geometría que queremos estudiar en volúmenes más pequeños, llamados celdas, sobre los cuales se van a integrar las ecuaciones que describen el flujo.

Siguiendo los pasos del propio programa, definimos los diferentes parámetros, de tal manera que quede una malla lo más optimizada posible para el análisis. Como en nuestro volumen tenemos una zona específica para el tren, se ha hecho un mallado local en esa zona con un tamaño menor ya que los resultados que necesitamos son la influencia del viento sobre el tren. Cuanto menor sea el tamaño, mayor número de celdas habrá y más preciso será el resultado de la simulación.

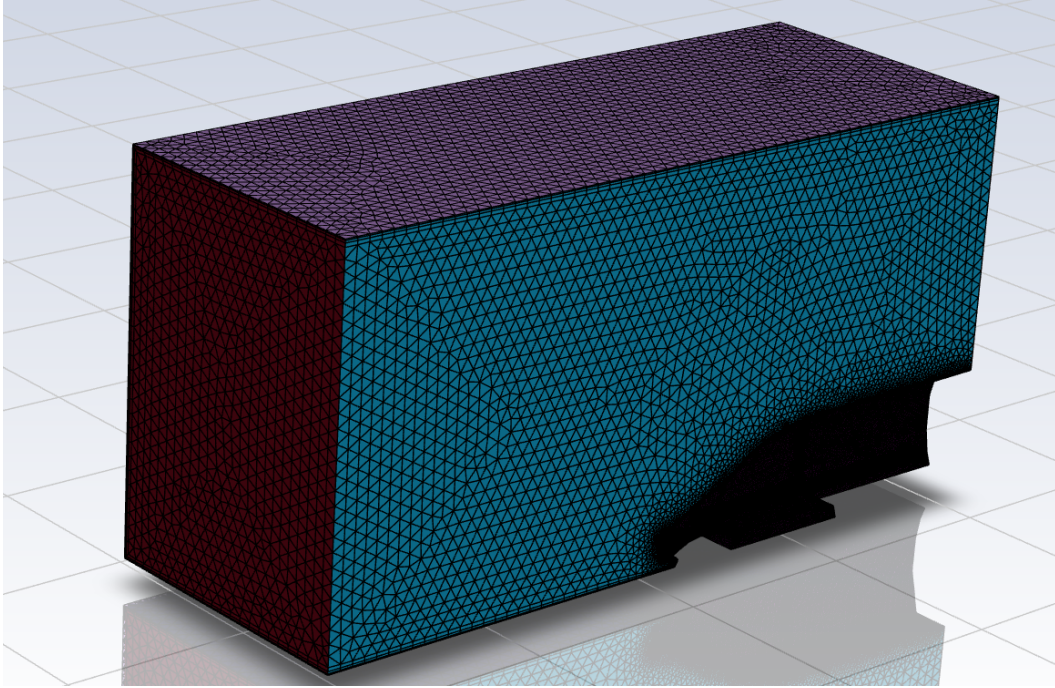


Figura 3.10: Vista 3D de la malla de cálculo.

Como hemos comentado antes, la zona del tren necesita celdas de menor tamaño. A continuación, se muestra la relación entre el tamaño de celda del resto del volumen y del tren.

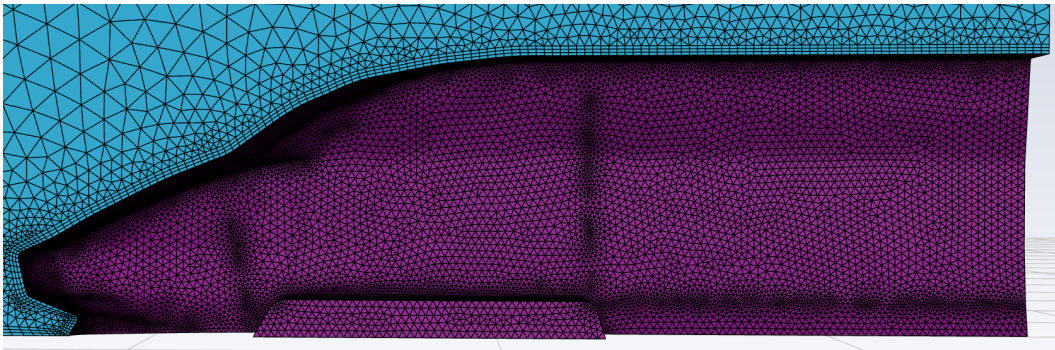


Figura 3.11: Detalle de la malla alrededor del tren.

Por último, se presentan algunos datos relacionados con la malla final del volumen correspondiente al primer modelo base de tren.

Celdas	Caras	Nodos	Particiones
590937	1263155	250378	3

Tabla 3.1: Número de celdas, caras, nodos y particiones de la malla del modelo 1 base de tren.

Vol. máximo	Vol. mínimo	Vol. total
$7.604 \times 10^{-7} \text{ m}^3$	$3.302 \times 10^{-2} \text{ m}^3$	$2.803 \times 10^3 \text{ m}^3$

Tabla 3.2: Volúmenes máximo, mínimo y total de las celdas de la malla del modelo 1 base de tren.

Con respecto al modelo 2 EUROLINK, tenemos las siguientes características de la malla.

Celdas	Caras	Nodos	Particiones
583218	1225172	134925	3

Tabla 3.3: Número de celdas, caras, nodos y particiones en el modelo 2 EUROLINK.

Vol. máximo	Vol. mínimo	Vol. total
$3.890 \times 10^{-7} \text{ m}^3$	$1.663 \times 10^{-2} \text{ m}^3$	$2.810 \times 10^3 \text{ m}^3$

Tabla 3.4: Volúmenes máximo, mínimo y total de las celdas de la malla del modelo 2 EUROLINK.

3.3. Condiciones iniciales y de contorno del flujo

En las simulaciones, es fundamental definir correctamente tanto las condiciones iniciales como las de contorno, además de otros parámetros de simulación, para garantizar resultados precisos y relevantes.

Las condiciones iniciales especifican el estado del flujo al comienzo de la simulación, incorporando parámetros como velocidad, presión o temperatura inicial. Estas son esenciales para representar de manera realista el sistema y obtener resultados confiables.

Por otra parte, las condiciones de contorno se aplican en los límites del dominio y describen cómo interactúa el flujo en distintas áreas del mismo. Estas pueden incluir variables como velocidad, presión o temperatura y abarcan diferentes tipos, como las aplicadas en superficies de entrada, salida o simetría, entre otras.

En las siguientes imágenes se muestran las diferentes superficies que forman parte del contorno del dominio de cálculo y que tendrán una definición específica de variables del flujo:

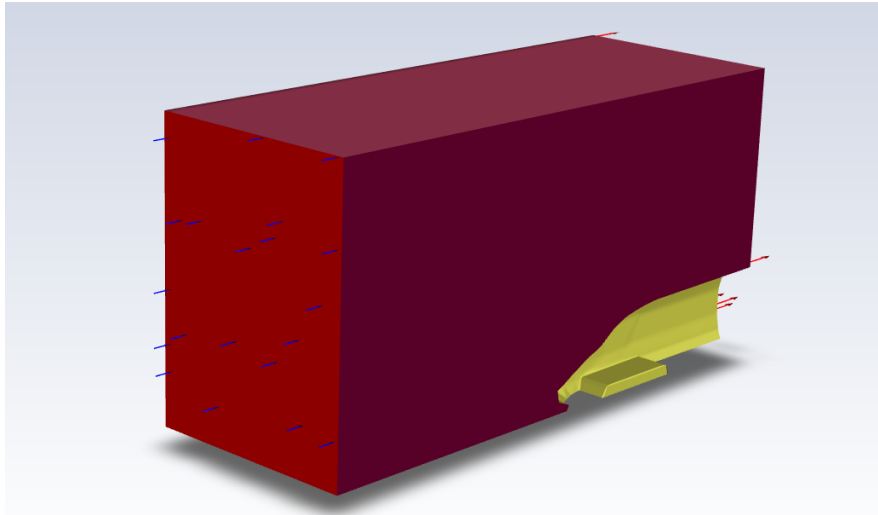


Figura 3.12: Superficies de entrada de flujo, paredes y contorno del tren.

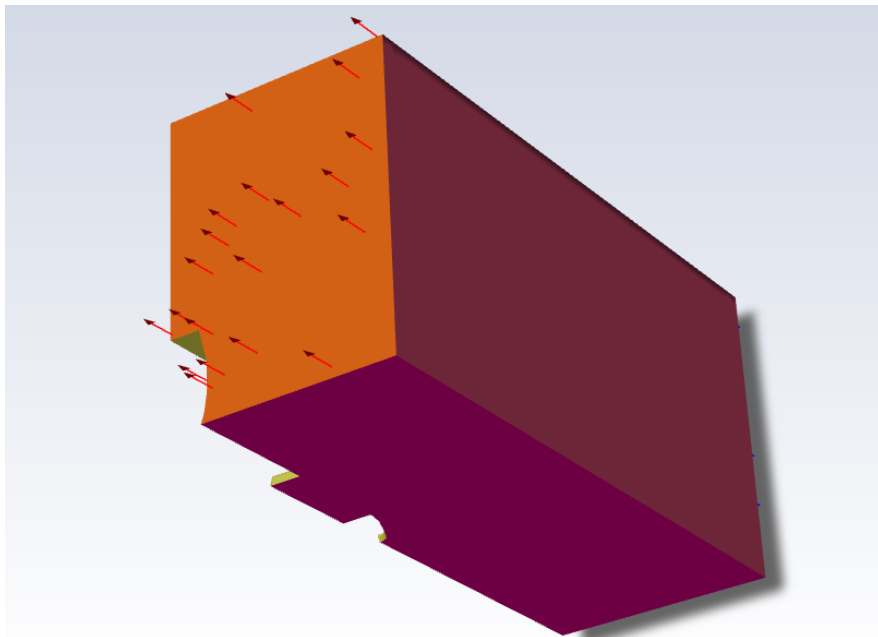


Figura 3.13: Superficies de salida de flujo, suelo y paredes.

Vamos a definir y a explicar cada una de las superficies que aparecen en las imágenes.

- **Entrada (inlet):** Representada en rojo, corresponde a la superficie por donde el fluido ingresa al dominio.
- **Pared (walls):** Identificada en rosa, actúa como una pared que impide que el flujo la atraviese. Esta superficie, junto con el modelo del tren, está definida como **stationary wall**. Aquí se distinguen las paredes del dominio de cálculo, la superficie del tren y el suelo.

- **Simetría (symmetry)**: Representada por la superficie más oscura, indica al programa el eje de simetría de la simulación. Esta superficie será clave para obtener los contornos resultantes de las distintas simulaciones. Es una superficie útil para la representación gráfica pero no para el cálculo.
- **Salida (outlet)**: Superficie de color naranja que representa la salida del fluido a presión atmosférica.

A continuación, se explicarán los pasos seguidos en Ansys Fluent, así como las condiciones iniciales y de contorno que hemos definido en las simulaciones.

3.3.1. Metodología de simulación

En este apartado se detalla la metodología usada para las simulaciones, con los cambios especificados en el apartado de los modelos de estudio.

Empezando con las condiciones generales, para que sea lo más cercano a la realidad, hemos definido la fuerza de la gravedad en el eje z con valor -9.81 m/s^2 , como podemos ver en la siguiente imagen:

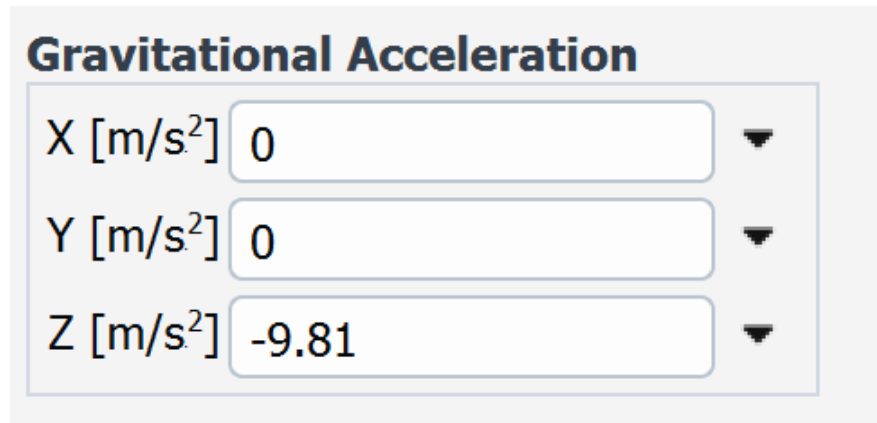


Figura 3.14: Definición de la gravedad en el programa Ansys Fluent.

En cuanto al modelo numérico utilizado para resolver la turbulencia, se ha escogido el modelo viscoso k- ϵ , tal y como se aprecia en la siguiente imagen.

Model	Model Constants
<input type="radio"/> Inviscid <input type="radio"/> Laminar <input type="radio"/> Spalart-Allmaras (1 eqn) <input checked="" type="radio"/> k-epsilon (2 eqn) <input type="radio"/> k-omega (2 eqn) <input type="radio"/> Transition k-kl-omega (3 eqn) <input type="radio"/> Transition SST (4 eqn) <input type="radio"/> Reynolds Stress (7 eqn) <input type="radio"/> Scale-Adaptive Simulation (SAS) <input type="radio"/> Detached Eddy Simulation (DES) <input type="radio"/> Large Eddy Simulation (LES)	Cmu <input type="text" value="0.09"/> C1-Epsilon <input type="text" value="1.44"/> C2-Epsilon <input type="text" value="1.92"/> TKE Prandtl Number <input type="text" value="1"/> TDR Prandtl Number <input type="text" value="1.3"/>
k-epsilon Model <input checked="" type="radio"/> Standard <input type="radio"/> RNG <input type="radio"/> Realizable	User-Defined Functions Turbulent Viscosity <input type="text" value="none"/>
Near-Wall Treatment <input checked="" type="radio"/> Standard Wall Functions <input type="radio"/> Scalable Wall Functions <input type="radio"/> Non-Equilibrium Wall Functions <input type="radio"/> Enhanced Wall Treatment <input type="radio"/> Menter-Lechner <input type="radio"/> User-Defined Wall Functions	Prandtl Numbers TKE Prandtl Number <input type="text" value="none"/> TDR Prandtl Number <input type="text" value="none"/>
Options <input type="checkbox"/> Curvature Correction <input type="checkbox"/> Production Kato-Launder <input type="checkbox"/> Production Limiter	
<div> <input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/> <input type="button" value="Help"/> </div>	

Figura 3.15: Modelo de turbulencia elegido en la simulación.

El siguiente paso consiste en definir los valores de referencia. En estos valores, la velocidad toma los valores definidos en la Tabla 2.1; y a su vez, también cambiará el área frontal expuesta al flujo. Esto es debido a que, cuando cambiamos el ángulo con el que incide el fluido, el área proyectada también cambia.

Reference Values ?

Compute from

Reference Values

Area [m ²]	5.41
Density [kg/m ³]	1.225
Enthalpy [J/kg]	0
Length [m]	12
Pressure [Pa]	0
Temperature [K]	288.16
Velocity [m/s]	75
Viscosity [kg/(m s)]	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4
Yplus for Heat Tran. Coef.	300

Reference Zone

Figura 3.16: Valores de referencia utilizados en la simulación con Ansys Fluent.

Para calcular el área proyectada en los casos de variación del ángulo de incidencia del flujo de aire, se ha utilizado una relación aproximada, utilizada para modelar el comportamiento de áreas proyectadas en cuerpos curvados o aerodinámicos [8, 2]:

$$A(\theta) = A_0 + (A_{90} - A_0) \cdot \sin(\theta)$$

$A(\theta)$: Área proyectada en función del ángulo θ .

A_0 : Área proyectada a 0° .

A_{90} : Área proyectada a 90° .

θ : Ángulo en grados.

$\sin(\theta)$: Función seno del ángulo θ .

El área a 90 grados, la proporciona el programa Ansys Fluent, que en el caso del modelo 1 base de tren es de 39.07 m^2 , por lo que ya podemos calcular las áreas como se muestra en la siguiente tabla:

Ángulo	Área
0°	5.41 m^2
5°	8.34 m^2
10°	11.25 m^2
15°	14.12 m^2
20°	16.92 m^2

Tabla 3.5: Áreas enfrentadas al flujo en el modelo 1 base de tren para distintos ángulos de incidencia.

Para el modelo de tren 2 EUROLINK, seguimos el mismo proceso anteriormente explicado, y calculamos también las áreas proyectadas en los diferentes ángulos.

Ángulo	Área
0°	4.88 m^2
5°	7.33 m^2
10°	9.77 m^2
15°	12.18 m^2
20°	14.53 m^2

Tabla 3.6: Áreas enfrentadas al flujo en el modelo 2 EUROLINK para distintos ángulos de incidencia.

Por último, definimos los parámetros que se van a analizar, que en este caso son los coeficientes de resistencia y sustentación C_D y C_L y las fuerzas de resistencia y sustentación F_D y F_L .

3.3.2. Condiciones iniciales

Para todas las simulaciones se han mantenido todas las condiciones iniciales iguales que se muestran en la siguiente tabla.

Presión a la entrada y salida	1 atm
Temperatura del aire	288.16 K
Viscosidad del aire	1.7894x10 ⁻⁵ kg/ms
Densidad del aire	1.225 kg/ m^3

Tabla 3.7: Condiciones iniciales del flujo en el dominio de cálculo.

3.3.3. Condiciones de contorno

Se han definido las condiciones de contorno para cada una de las caras del volumen, a las cuales les asignamos un grupo al preparar la geometría.

Inlet	Entrada de flujo
Outlet	Salida de flujo
Symmetry	Eje de simetría
Road, walls y train	Paredes estáticas

Tabla 3.8: Condiciones de contorno en cada superficie.

Para ambos modelos de tren, las condiciones de contorno permanecen iguales. En las simulaciones donde varía el ángulo de incidencia del flujo, se han realizado modificaciones específicas para mejorar la representación realista del flujo. En lugar de definir una única cara como **Inlet**, se han configurado dos entradas; o bien, la condición de **Symmetry** ha sido sustituida por **Outlet** para simular de manera más precisa la salida del flujo. Para la condición de entrada de flujo, imponemos la velocidad relativa del flujo de aire respecto a la velocidad del tren, incluida su dirección. Para el primer caso, de flujo frontal, la dirección estará alineada con en el eje y, mientras que cuando el ángulo de incidencia del flujo vaya variando, se utilizarán los senos y cosenos de los diferentes ángulos en los ejes X e Y, según corresponda.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method: Magnitude and Direction

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude [m/s]: 75

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa]: 0

Coordinate System: Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction: 0

Y-Component of Flow Direction: 1

Z-Component of Flow Direction: 0

Turbulence

Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%]: 5

Turbulent Viscosity Ratio: 10

Apply Close Help

Figura 3.17: Condición de contorno Inlet frontal.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Velocity Specification Method Magnitude and Direction

Reference Frame Absolute

Velocity Magnitude [m/s] 75

Supersonic/Initial Gauge Pressure [Pa] 0

Coordinate System Cartesian (X, Y, Z)

X-Component of Flow Direction 0.1736481777

Y-Component of Flow Direction 0.984807753

Z-Component of Flow Direction 0

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Turbulent Intensity [%] 5

Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

Figura 3.18: Condición de contorno Inlet con ángulo de incidencia 10° .

A su vez, como se ha comentado anteriormente, la condición de contorno impuesta en la salida se trata de salida a presión atmosférica, en la siguiente imagen se especifica como se ha configurado en Ansys:

Pressure Outlet

Zone Name
outlet

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential Structure UDS

Backflow Reference Frame Absolute

Gauge Pressure [Pa] 0

Pressure Profile Multiplier 1

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Backflow Pressure Specification Total Pressure

☐ Prevent Reverse Flow

☐ Radial Equilibrium Pressure Distribution

☐ Average Pressure Specification

☐ Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Turbulent Intensity [%] 5

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10

Apply Close Help

Figura 3.19: Condición de contorno Outlet.

Por último, se ha determinado el número de iteraciones. En este proyecto, se han

realizado todas las simulaciones con 1000 iteraciones.

Capítulo 4

Resultados numéricos

4.1. Análisis de sensibilidad de la malla de cálculo

Tras haber detallado los pasos seguidos para realizar las simulaciones numéricas en los anteriores capítulos, procedemos a explicar los resultados obtenidos en las mismas.

En primer lugar, presentamos los resultados del estudio de sensibilidad de la malla realizado sobre el modelo base. Como se ha explicado anteriormente, en primer lugar se realizaron simulaciones con una malla gruesa, de aproximadamente 580.000 celdas, y con una malla fina, de aproximadamente 1.040.000 celdas, que es el máximo número de celdas que permite la versión de Ansys Student; para comparar los resultados en una primera aproximación. Los resultados han sido los siguientes:

Malla	C_D	C_L
580.000	0.1031	0.00493
1.040.000	0.1059	-0.0103

Tabla 4.1: Comparación de los coeficientes de resistencia y sustentación obtenidos con una malla gruesa y una fina.

Se puede concluir viendo los resultados obtenidos, que resultan extraños, debido a que en la malla gruesa el coeficiente de sustentación resulta positivo, mientras que en la malla fina es negativo con una diferencia de aproximadamente 0.014 unidades, lo cual se podría determinar que es una diferencia más grande de lo esperado; o al menos que presenta una discrepancia alta en el resultado de este coeficiente.

Debido a estos resultados, se decidió realizar un análisis de sensibilidad de la malla, buscando la convergencia de los resultados, que se expondrá a continuación. Para ello se generaron, como ya se ha comentado, 4 mallas.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos de los coeficientes de arrastre y sustentación en las 4 mallas, y en la figura 4.1 cómo varía el coeficiente de arrastre según el número de celdas de cada una de las mallas usadas en el cálculo:

Nº de celdas en cada malla	C_D	C_L
250.000	0.1115	0.01024
500.000	0.1035	-0.00435
750.000	0.1057	-0.00468
1.000.000	0.1058	-0.00785

Tabla 4.2: Valores de coeficientes de resistencia y sustentación según el número de celdas usado en cada una de las mallas de cálculo.

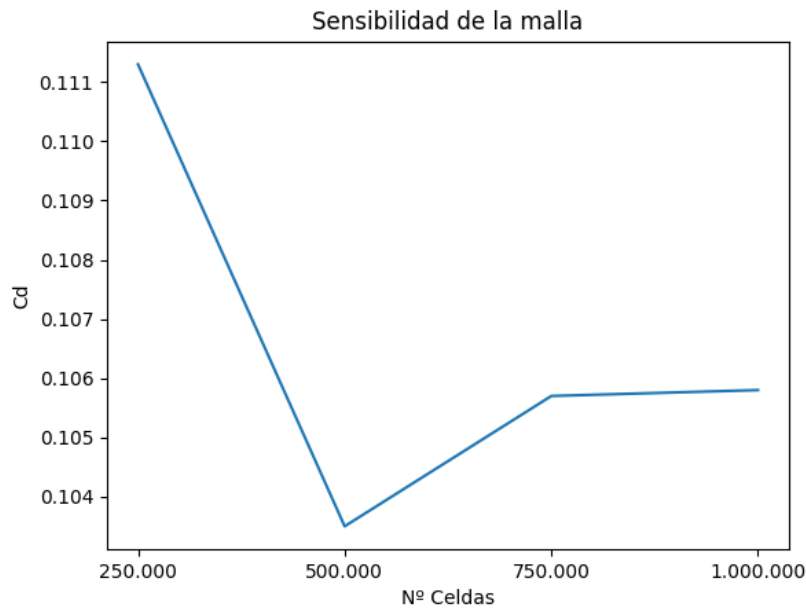


Figura 4.1: Variación del coeficiente de arrastre frente al número de celdas.

Se observa que, la simulación que presenta el mayor coeficiente de arrastre corresponde a la malla con menor cantidad de celdas. Esto se debe a que, al disponer de menos celdas, la solución es menos precisa en comparación con las mallas más refinadas. A medida que se incrementa el número de celdas, los coeficientes tienden a converger hacia un valor estable, considerado como el correcto. A partir de un refinamiento de 750,000 celdas, los resultados presentan una variación mínima, indicando que se ha alcanzado un nivel adecuado de precisión.

Como era de esperar, las simulaciones con mayor cantidad de celdas, específicamente las de 750,000 y 1,000,000, requirieron un tiempo computacional considerablemente mayor, concretamente, la simulación de 750.000 tardó aproximadamente 2 horas, mientras que la de 1.000.000 de celdas tardó 4 horas aproximadamente, debido al aumento de cálculos de todas las variables en todas las celdas de la malla. Por el contrario, las simulaciones con 250,000 y 500,000 celdas tuvieron tiempos de cálculo significativamente menores en torno a los 5 minutos para la simulación de 250.000 y

20 minutos para la de 500.000.

Sin embargo, a medida que se incrementa el número de celdas, se espera que el número de iteraciones necesarias para alcanzar la convergencia disminuya. A pesar de esto, en algunas simulaciones, especialmente con menor refinamiento, no se logró una convergencia completa. Las gráficas de evolución de los coeficientes de arrastre y sustentación según el número de iteraciones, muestran que los resultados alcanzan el valor esperado rápidamente, y posteriormente presentan variaciones mínimas, generando curvas prácticamente constantes como se puede apreciar en las siguientes imágenes.

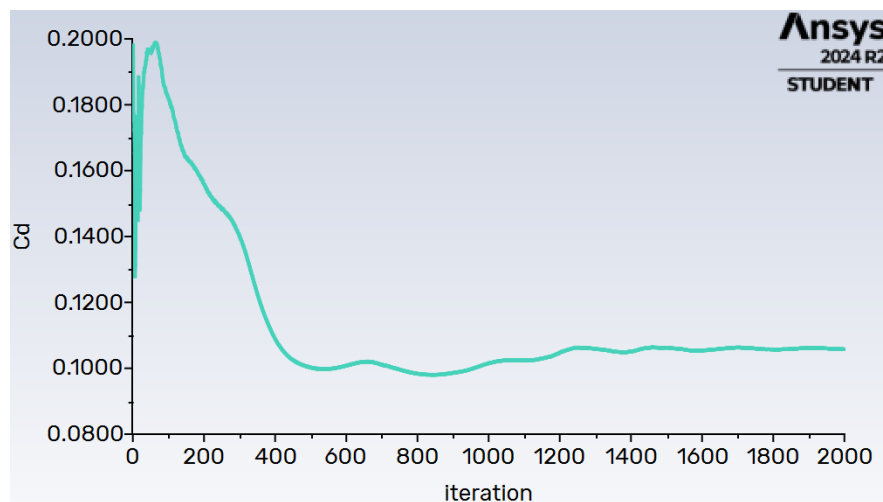


Figura 4.2: Evolución del valor del coeficiente de arrastre para una malla de 750.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.

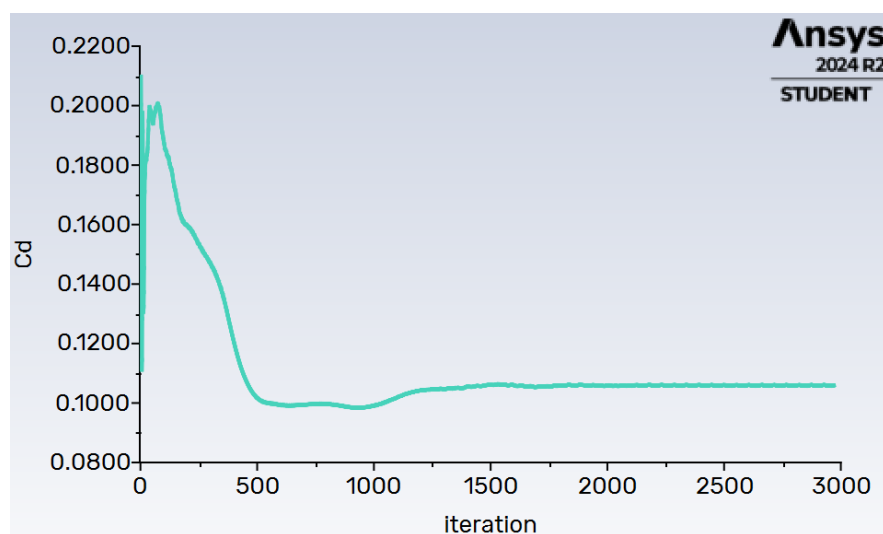


Figura 4.3: Evolución del valor del coeficiente de arrastre para una malla de 1.000.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.

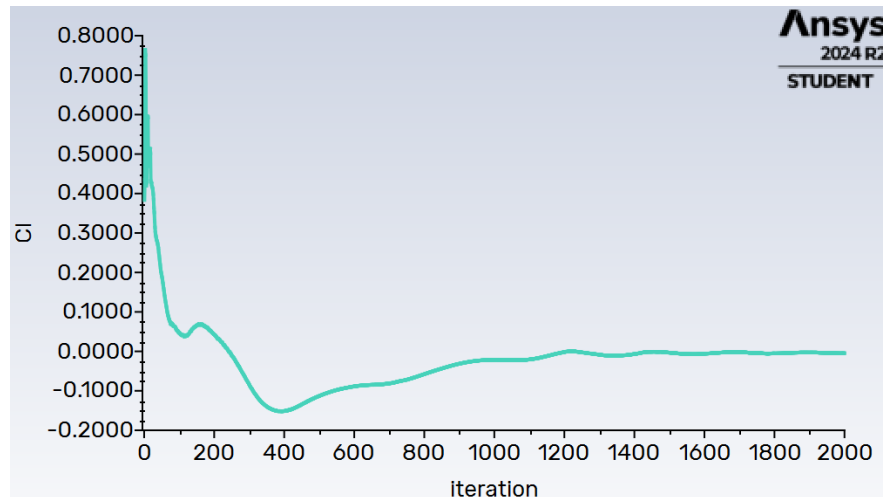


Figura 4.4: Evolución del valor del coeficiente de sustentación para una malla de 750.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.

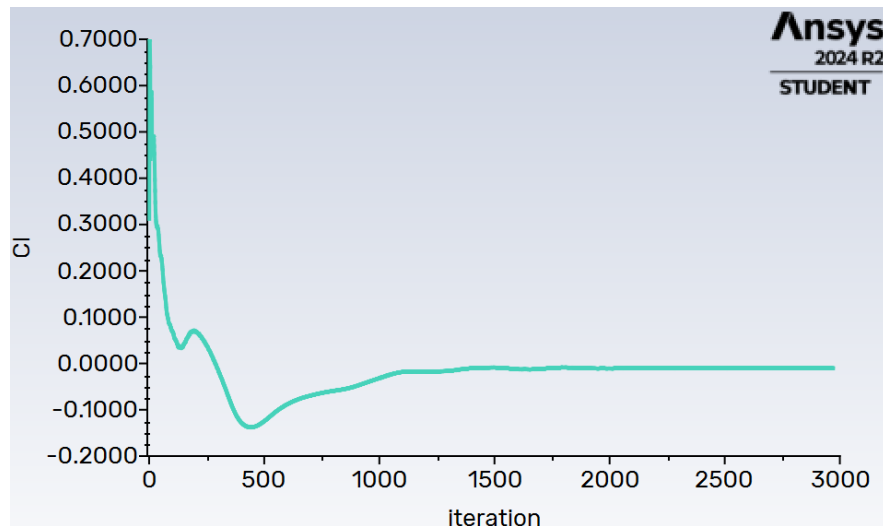


Figura 4.5: Evolución del valor del coeficiente de sustentación para una malla de 1.000.000 celdas en el modelo 1 base de tren conforme avanzan las iteraciones en el cálculo.

Otro aspecto relevante es que, durante la generación de la malla para los casos de 250,000 y 500,000 celdas, fue necesario realizar ajustes adicionales en los parámetros de mallado para garantizar la calidad de las simulaciones. Estas modificaciones afectaron a los resultados finales, lo que resalta la importancia de contar con un refinamiento adecuado para minimizar posibles inconsistencias en el modelo.

4.2. Efecto del viento frontal sobre los modelos de tren

A continuación, se muestra una tabla con los resultados de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación cuando el viento incide frontal al modelo base de tren 1, para los valores de las velocidades relativas tren-viento especificadas en la tabla 2.1.

Vel. Relativa (km/h)	C_D	C_L	$F_D(N)$	$F_L(N)$
270	0.1031	0.00493	1912.7	34.94
250	0.1039	0.00612	1660.32	97.14
230	0.1031	0.00592	1394.48	80.33
210	0.1035	0.00546	1167.02	61.79

Tabla 4.3: Resultados numéricos de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación sobre el modelo 1 base de tren para diferentes velocidades relativas tren-viento.

Como se ha comentado anteriormente en este trabajo, la aerodinámica para este tipo de vehículos, como son los trenes de alta velocidad, está muy relacionada con la eficiencia energética, ya que disminuyendo el coeficiente de arrastre se consigue disminuir el consumo eléctrico, tan importante hoy en día.

Para conseguir eso, necesitamos un coeficiente de arrastre lo más pequeño posible; y a su vez, un coeficiente de sustentación también muy reducido o lo más negativo posible.

Observando los resultados del modelo 1 base, podemos apreciar que se cumplen las dos características, por lo que podríamos decir que es un modelo muy aerodinámico.

Las siguientes imágenes muestran la distribución de presión y velocidad del flujo de aire sobre el modelo base de tren 1 en una vista 3D y de perfil.

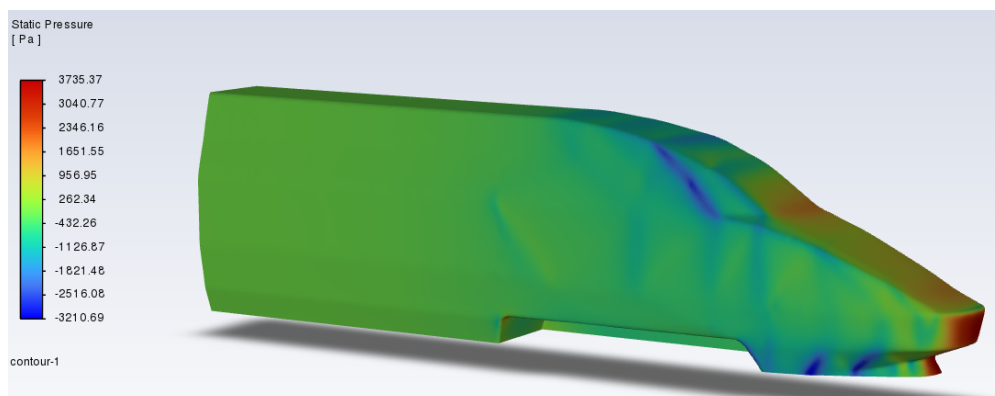


Figura 4.6: Vista 3D de la distribución de presiones del flujo de aire alrededor del modelo 1 base de tren.



Figura 4.7: Perfil de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo 1 base de tren.

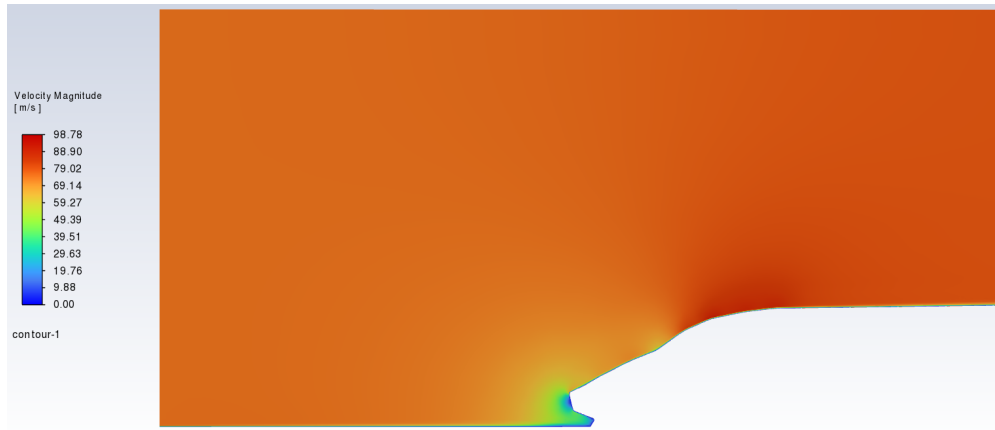


Figura 4.8: Perfil de la distribución de velocidad del flujo de aire alrededor del modelo 1 base de tren.

La siguiente tabla, muestra los resultados numéricos obtenidos de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación del flujo de aire sobre el segundo modelo de tren simulado, el modelo 2 EUROLINK.

Vel. Relativa (km/h)	C_D	C_L	$F_D(N)$	$F_L(N)$
270	0.1025	0.1568	1057.93	1578.36
250	0.1029	0.1563	1505.05	2157.09
230	0.1036	0.1562	1279.26	1822.22
210	0.1040	0.1552	1071.46	1514.39

Tabla 4.4: Resultados numéricos de los coeficientes y fuerzas de arrastre y sustentación del flujo de aire sobre el modelo 2 EUROLINK.

Comparando los resultados numéricos obtenidos en los dos modelos, se puede apreciar que, en términos del coeficiente de arrastre, los dos modelos tienen resultados parecidos; pero si nos fijamos en los resultados obtenidos para el coeficiente de

sustentación, comprobamos que los del modelo 2 EUROLINK son superiores al del modelo base.

Eso nos indica que el modelo 2 EUROLINK es peor, aerodinámicamente hablando, que el modelo 1 base, ya que habrá una fuerza de sustentación hacia arriba que puede causar que el modelo 2 EUROLINK tenga que estar construido de un material más pesado para contrarrestar esta fuerza de sustentación; por lo que presentaría una peor eficiencia energética.

En el artículo *Aerodynamics of High-Speed Trains*[12], se presenta una tabla con diferentes coeficientes de arrastre para diversos tipos de trenes de alta velocidad. Entre ellos, destaca el modelo ICE, cuyo vagón principal tiene un coeficiente de arrastre de 0.2, a su vez este modelo es bastante parecido al modelo 2 EUROLINK mientras que dista bastante del modelo 1 base. Comparando este dato con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede afirmar que los valores calculados son consistentes y se encuentran dentro de rangos aceptables. Además, se observa una mejora de los diseños evaluados en este estudio en comparación con el modelo ICE, que corresponde a una generación anterior de trenes.

A continuación, se muestran imágenes de la distribución de presiones y velocidades del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.

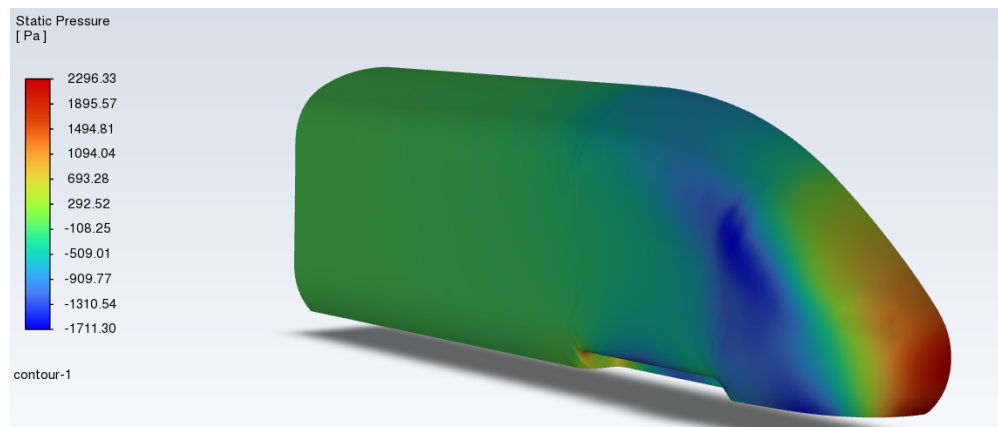


Figura 4.9: Vista 3D de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.



Figura 4.10: Perfil de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.

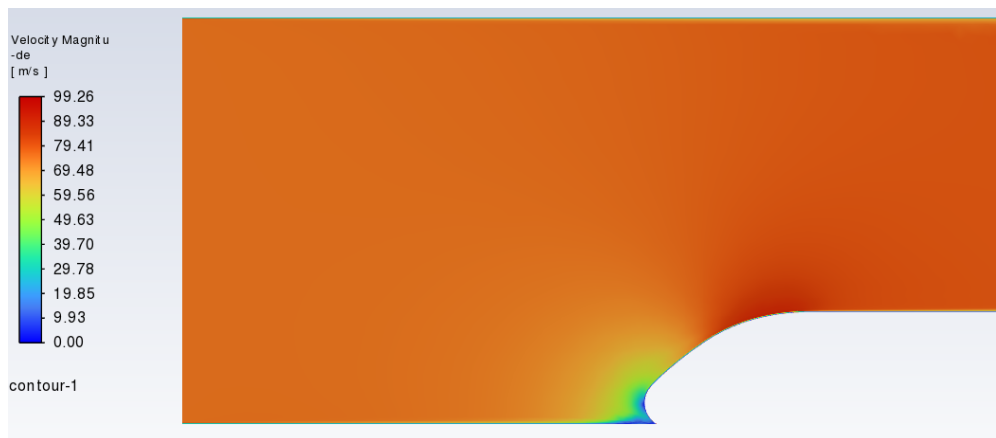


Figura 4.11: Perfil de la distribución de velocidad del flujo de aire alrededor del modelo 2 EUROLINK.

En las figuras 4.6, 4.7, 4.9 y 4.10, como hemos comentado anteriormente, se muestran las distribuciones de presión del flujo de aire sobre los dos modelos de tren. Las zonas de mayor presión se representan en color rojo mientras que las de menor presión se muestran en color azul.

Como era previsible, obtenemos mayor presión en la parte frontal de ambos modelos, y conforme se alcanza la parte final, la presión disminuye y aumenta la velocidad. De hecho, si nos fijamos en la parte superior de los modelos, existe una zona de presión mínima en la que la velocidad se vuelve máxima. La curvatura y el diseño del tren fuerzan al aire a acelerar en esta parte superior, por la conservación de la energía y en presencia del desprendimiento de la capa límite con zonas de recirculación del flujo de aire.

4.3. Influencia del ángulo de incidencia del viento

Las siguientes simulaciones que se presentan corresponden a las variaciones del ángulo de incidencia del flujo de aire hacia el tren.

Las siguientes tablas muestran los resultados numéricos de los coeficientes de arrastre y sustentación obtenidos para los distintos ángulos de incidencia del flujo de aire sobre el tren, teniendo en cuenta la velocidad relativa tren-aire, en el modelo 1 base de tren:

Vel. Relativa (km/h)	C_D (5°)	C_D (10°)	C_D (15°)	C_D (20°)
270	0.1276	0.1317	0.1536	0.1806
250	0.1283	0.1317	0.1535	0.1814
230	0.1272	0.1320	0.1534	0.1810
210	0.1279	0.1330	0.1537	0.1811

Tabla 4.5: Resultados numéricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 1 base de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.

Vel. Relativa (km/h)	C_L (5°)	C_L (10°)	C_L (15°)	C_L (20°)
270	-0.0068	0.07974	0.1597	0.2285
250	-0.0072	0.07829	0.1591	0.2284
230	-0.0130	0.07859	0.1589	0.2286
210	-0.0105	0.07595	0.1592	0.2286

Tabla 4.6: Resultados numéricos del coeficiente de sustentación sobre el modelo 1 base de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.

Con respecto al coeficiente de arrastre con viento cruzado, J.L. Peters [12] indica que se puede calcular de manera teórica este coeficiente de arrastre para vientos que no sobrepasen los 30 grados de inclinación sobre el sólido, siguiendo esta fórmula:

$$C_D(\beta) = C_D(0)(1 + 0,02\beta) \quad (4.1)$$

$C_D(\beta)$ = Coeficiente de arrastre en función del ángulo de inclinación del viento sobre el sólido

$C_D(0)$ = Coeficiente de arrastre cuando el viento incide con un ángulo de 0°

β = Ángulo de inclinación con el que incide el viento sobre el sólido

Siguiendo esta fórmula, se han calculado los coeficientes de arrastre en este caso:

Vel. Relativa (km/h)	C_D (5°)	C_D (10°)	C_D (15°)	C_D (20°)
270	0.1134	0.1237	0.1340	0.1443
250	0.1142	0.1246	0.1350	0.1454
230	0.1134	0.1237	0.1340	0.1443
210	0.1138	0.1242	0.1345	0.1449

Tabla 4.7: Resultados teóricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 1 base de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.

Comparando los valores teóricos y los resultados numéricos del coeficiente de arrastre se observa que éstos son similares, validando así los resultados de las simulaciones numéricas; aunque se observa que conforme el ángulo de incidencia del viento sobre el tren aumenta, los valores de los coeficientes de arrastre obtenidos de la simulación numérica se separan y son más altos que los predichos con la fórmula teórica. Para poder resolver esta diferencia quizás se podría recurrir a la experimentación en un túnel de viento y analizar si las medidas experimentales se acercan más al modelo teórico o al numérico.

También se realizó el mismo estudio para viento cruzado sobre el modelo 2 EUROLINK, obteniendo los siguientes resultados del coeficiente de arrastre en función del ángulo de incidencia del viento y de la velocidad relativa tren-aire:

Vel. Relativa (km/h)	C_D (5°)	C_D (10°)	C_D (15°)	C_D (20°)
270	0.1612	0.1640	0.1813	0.2023
250	0.1615	0.1643	0.1803	0.2016
230	0.1618	0.1635	0.1808	0.2013
210	0.1620	0.1637	0.1798	0.2017

Tabla 4.8: Resultados numéricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 2 EUROLINK de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.

Vel. Relativa (km/h)	C_L (5°)	C_L (10°)	C_L (15°)	C_L (20°)
270	0.00960	0.0427	0.0935	0.1372
250	0.00683	0.0422	0.0910	0.1369
230	0.00717	0.0452	0.0899	0.1368
210	0.00619	0.0453	0.0898	0.1365

Tabla 4.9: Resultados numéricos del coeficiente de sustentación sobre el modelo 2 EUROLINK de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.

En el caso del modelo 2 EUROLINK, también se realizan los cálculos teóricos de los coeficientes de arrastre, que se presentan en la siguiente tabla:

Vel. Relativa (km/h)	C_D (5°)	C_D (10°)	C_D (15°)	C_D (20°)
270	0.1127	0.1230	0.1332	0.1435
250	0.1131	0.1234	0.1337	0.1440
230	0.1139	0.1243	0.1346	0.1450
210	0.1144	0.1248	0.1352	0.1456

Tabla 4.10: Resultados teóricos del coeficiente de arrastre sobre el modelo 2 EUROLINK de tren variando el ángulo de incidencia del flujo de aire y la velocidad relativa tren-aire.

Comparando los resultados teóricos y numéricos obtenidos con las simulaciones, se observa el mismo comportamiento que el obtenido en el modelo 1 base de tren: el coeficiente de arrastre tiene valores similares en ambos casos, y conforme el ángulo de incidencia aumenta, la separación entre ambos valores se hace mayor.

4.4. Efecto del viento frontal sobre el modelo de tren completo EUROLINK

Como se ha descrito en el capítulo 1, se ha realizado una simulación para comprobar cómo sería el efecto del viento frontal sobre todo el volumen del modelo 2 EUROLINK.

En las siguientes figuras, se muestra la malla utilizada en el cálculo para este caso. Se ha utilizado el mayor número de celdas posible sin sobrepasar el límite de la versión, que en este caso ha sido 1.020.000 celdas; y el detalle de las celdas alrededor del tren y en las uniones entre vagones.

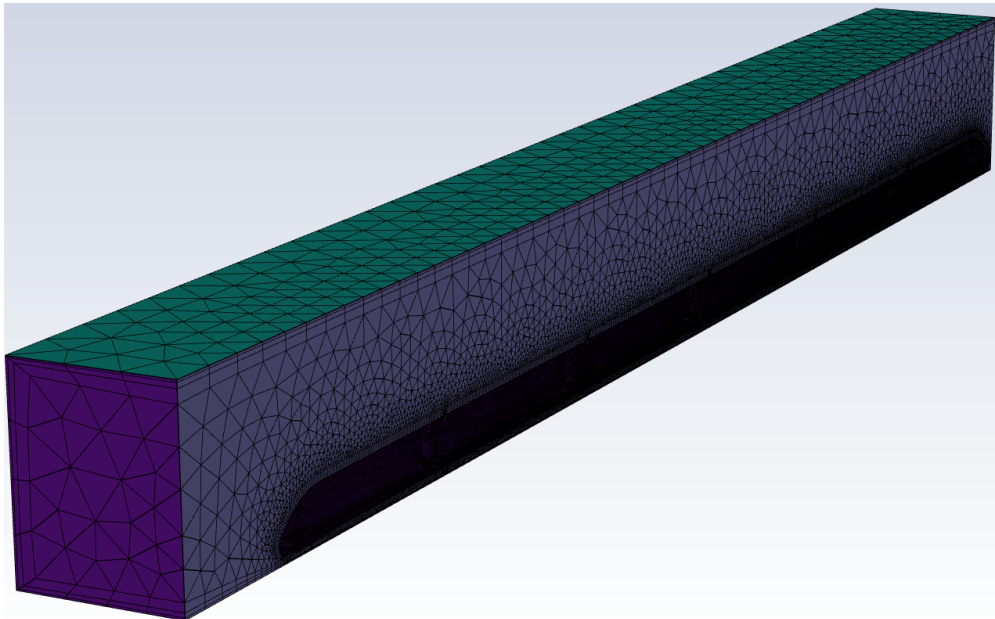


Figura 4.12: Vista 3D de la malla de cálculo para el modelo completo del tren EUROLINK.

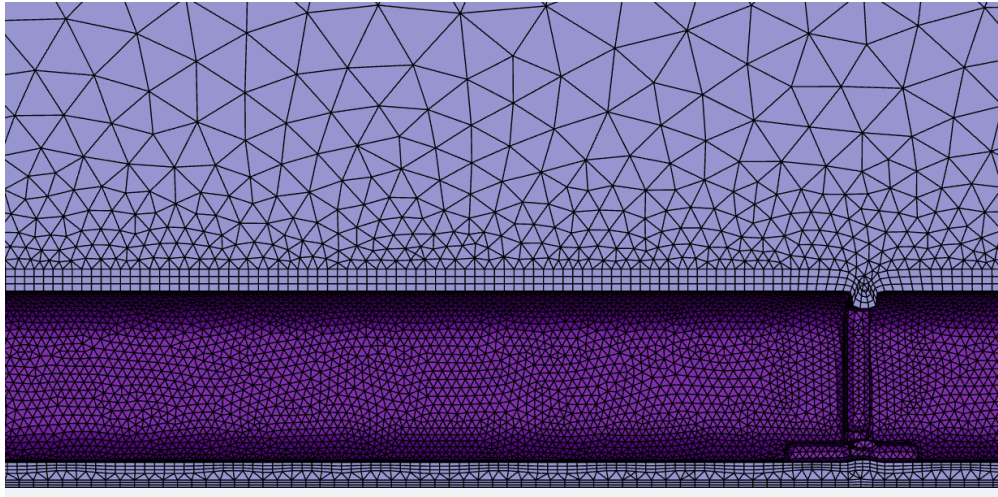


Figura 4.13: Comparación del tamaño de celda en el tren con respecto al resto del volumen mallado en el modelo de tren completo EUROLINK.

Con respecto a las condiciones iniciales y de contorno que se han establecido para esta simulación, son las mismas que para la simulación del vagón principal.

En la siguiente tabla, se muestran los resultados numéricos de los coeficientes de arrastre y sustentación variando la velocidad del flujo de aire que incide de forma frontal sobre el tren:

Vel. Relativa (km/h)	C_D	C_L
270	0.7100	0,089
250	0.7081	0,094
230	0.7093	0.087
210	0.7112	0.084

Tabla 4.11: Resultados numéricos de los coeficientes de arrastre y sustentación sobre el modelo completo del tren EUROLINK variando la velocidad relativa tren-aire bajo incidencia frontal.

Estos resultados se consideran preliminares, ya que no se ha realizado un estudio en profundidad sobre la aerodinámica cuando el modelo está completo, sino que se ha realizado para que se pueda hacer una comparación con los resultados aerodinámicos del vagón inicial. Se busca ver cómo afecta añadir los vagones a los valores de los coeficientes de arrastre y sustentación, frente a los valores de los mismos cuando sólo se analiza el vagón motor.

Comparando los resultados, se puede comprobar cómo el coeficiente de arrastre aumenta, debido a que ahora se está teniendo en cuenta el tren completo; así como las uniones entre vagones, elementos que producen mucha resistencia aerodinámica y que serían los que harían aumentar el valor del coeficiente.

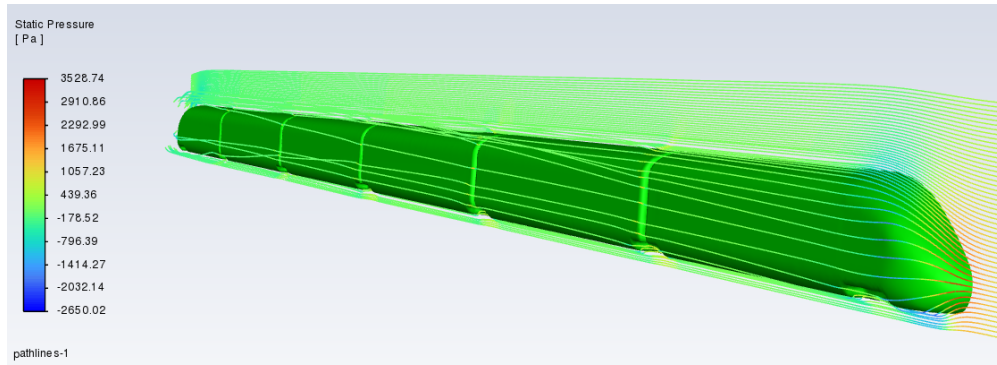


Figura 4.14: Vista 3D de la distribución de la presión y líneas de corriente del flujo de aire sobre el modelo completo de tren EUROLINK.

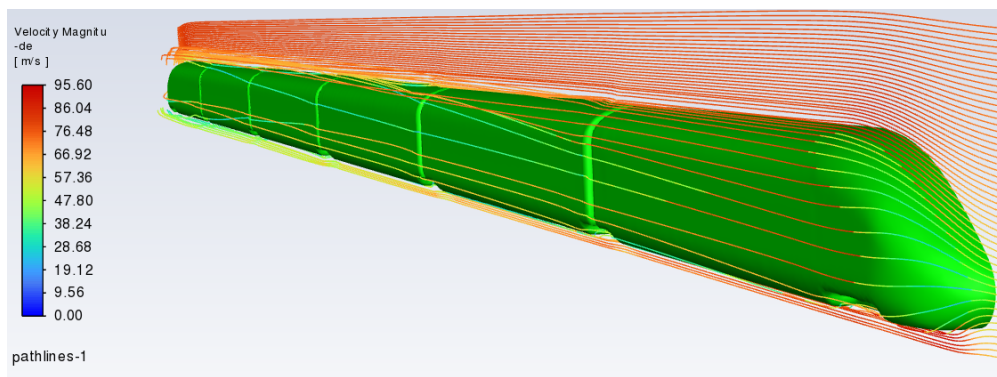


Figura 4.15: Vista 3D de la distribución de la velocidad y líneas de corriente del flujo de aire sobre el modelo completo de tren EUROLINK.

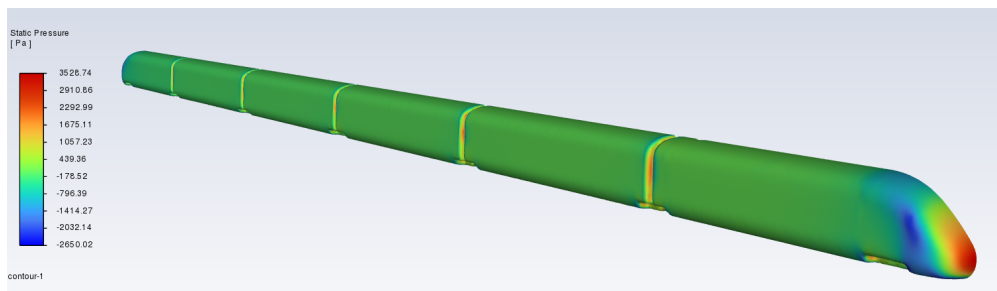


Figura 4.16: Vista 3D de la distribución de presión del flujo de aire alrededor del modelo completo de tren EUROLINK.

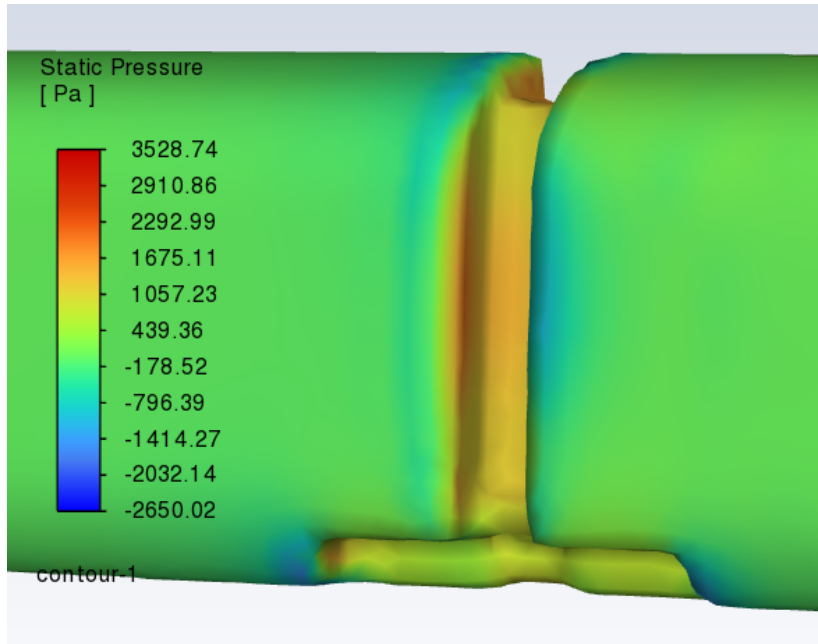


Figura 4.17: Detalle de la distribución de presión del flujo del aire en el espacio entre vagones del modelo completo del tren EUROLINK.

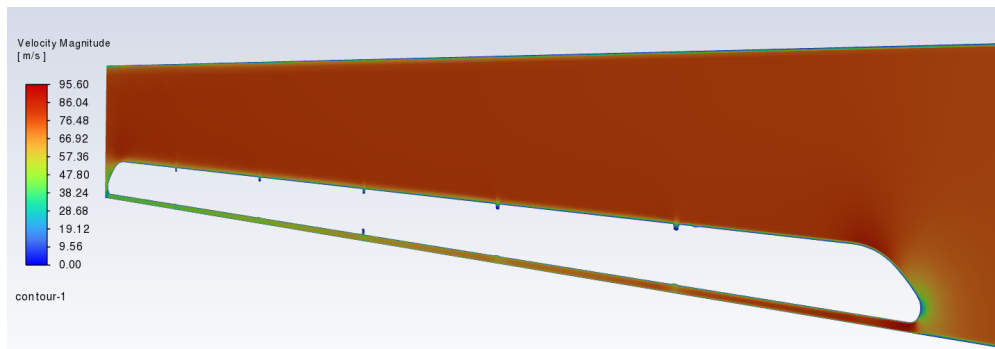


Figura 4.18: Perfil de la distribución de velocidad del flujo de aire alrededor del modelo completo de tren EUROLINK.

Inspeccionando las imágenes anteriores, se aprecia que ocurre lo mismo que estudiando el vagón inicial; y que es éste el que marca cómo se va a comportar el flujo en el sentido aerodinámico; ya que es donde se tienen los valores máximos y mínimos de las variables; y por tanto, el que más problemas podría ocasionar; validando así que todo el análisis se haya hecho sobre el primer vagón. La zona donde se concentra mayor presión es la parte frontal y, a su vez, va disminuyendo conforme nos alejamos de esa zona. La diferencia esencial entre esta simulación y la del vagón primero único es la existencia de las uniones entre vagones. En la figura 4.17 se aprecia cómo aumenta la presión debido a que la geometría es más plana que en el resto del tren.

Con la velocidad, ocurre lo opuesto. La mayor velocidad se encuentra en la parte superior del modelo, mientras que disminuye conforme se va acercando a la parte

frontal. En la zona entre vagones, como era previsible, existe también velocidad mínima por lo comentado con la presión. Como es esperable, conforme nos alejamos de la parte frontal, la velocidad en la parte inferior del tren disminuye también.

Capítulo 5

Conclusiones

En el presente trabajo se ha analizado mediante simulación numérica, con el programa Ansys Fluent, el flujo de viento frontal y cruzado sobre la parte delantera de dos modelos de trenes de alta velocidad, de forma separada, para poder conocer mejor el efecto aerodinámico sobre cada uno de ellos. En ambas situaciones, se han analizado tanto los coeficientes como las fuerzas de arrastre y sustentación bajo diferentes ángulos de incidencia del flujo de aire sobre los trenes, diferentes velocidades de viento, diferentes materiales para el tren y diferentes mallas de cálculo.

De este análisis, en términos generales, se ha concluido que tanto el coeficiente de arrastre, como el de sustentación, aumenta conforme aumenta el ángulo de incidencia del flujo de aire sobre el tren. La distribución de presión del flujo de aire alrededor del tren nos muestra que la presión máxima se origina en la parte frontal de los modelos, mientras que la presión mínima se encuentra en la parte superior de los mismos. Tal y como cabe esperar, el comportamiento de la distribución de velocidad es el opuesto. La velocidad máxima se encuentra en la parte superior del tren, mientras que la mínima aparece en la parte frontal de los modelos.

Del análisis de convergencia de la malla de cálculo, se observa que para obtener resultados precisos se necesita el mayor número de celdas de cálculo. Teniendo en cuenta que la versión de estudiante de este programa está limitada, se ha elegido el máximo que corresponde aproximadamente a un millón de celdas. Conforme el número de celdas aumenta, el tiempo de cálculo también aumenta; de forma que habría que llegar a un compromiso entre precisión y rapidez. También se concluye que los dos modelos de tren simulados, aerodinámicamente hablando, son muy positivos como consecuencia de que en los coeficientes obtenidos, ninguno supera el valor de 0.25 tanto de arrastre como de sustentación, independientemente del ángulo de incidencia del viento. La situación menos óptima de todas las simuladas

sería cuando el viento cruzado incide con un ángulo de 20° , dicha situación, es la más propensa a originar vuelco y además, desde el punto de vista energético, es la más desfavorable. En el caso del modelo EUROLINK, ocurriría lo mismo que con el modelo 1 base, la situación más desfavorable sería cuando el viento cruzado incide con un ángulo de 20° , y las consecuencias serían las mismas que para el anterior modelo.

Los resultados numéricos obtenidos de los coeficientes de arrastre han sido validados mediante modelos de referencia en la literatura, como son el modelo ICE, explicado anteriormente. También se ha realizado una comparación de esos resultados con cálculos teóricos siguiendo la fórmula proporcionada por J.L. Peters [12], además de haberse modelado el modelo completo del tren EUROLINK con todos los vagones para conseguir una primera aproximación de lo que sucedería al extender el análisis de sólo un vagón al modelo completo. Debido a que se trata de una primera aproximación, y que en este trabajo no se han realizado más simulaciones con respecto a este asunto, es necesario más trabajo a futuro como el refinamiento de los resultados o el estudio del viento cruzado para este modelo.

Por otra parte, este trabajo se considera que ha sido muy interesante porque ha servido para el entendimiento de un tema tan importante como es la aerodinámica aplicándolo a casos reales como puede ser, en este caso, trenes de alta velocidad. Además, gracias a este trabajo, se ha podido observar que la aerodinámica es un sector donde siempre pueden existir mejoras, aunque sean mínimas, para optimizar los cálculos de los coeficientes y fuerzas imprescindibles en este campo. El uso de simulaciones numéricas como herramienta principal de cálculo y diseño abre la puerta a análisis más detallados y menos costosos en comparación con experimentos de laboratorio, lo que facilita la validación de nuevos diseños y conceptos en un entorno controlado. El siguiente paso sería validar estos resultados numéricos en una condición determinada de flujo con medidas de laboratorio.

Bibliografía

- [1] John Anderson. *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill Education, 1995.
- [2] John D. Anderson. *Fundamentals of Aerodynamics*. 5th. McGraw-Hill Education, 2011.
- [3] *Ansys Fluent User's Guide, 2010*.
- [4] Adrian Ariso Azcárate. “Análisis del comportamiento aerodinámico de un alerón trasero y su aplicación a un Fórmula E”. Trabajo fin de grado. Universidad de Zaragoza, 2024.
- [5] H. Hemida. “Contribution of computational wind engineering in train aerodynamics—past and future”. En: *Wind Engineering & Industrial Aerodynamics* (2023).
- [6] Pujar Nagabhushan Jalammanavar Kuberappa y Raj R. Vishnu. *Finite Element Study On Mesh Discretization Error Estimation For Ansys Workbench*. 2018 International Conference on Computational Techniques, Electronics y Mechanical Systems (CTEMS), 2018.
- [7] Milovan Perić Joel H. Ferziger. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, 2019.
- [8] Michael L. Smith John J. Bertin. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 3rd. Prentice Hall, 1979.
- [9] Bruce R. Munson et al. *Fundamentals of Fluid Mechanics*. 6th. Wiley, 2009.
- [10] David R Dowling Pijush K. Kundu Ira M. Cohen. *Fluid Mechanics*. Academic Press Inc., 2015.
- [11] Francisco Rubio Martínez. “Análisis computacional de la aerodinámica de un Tesla Model S con Ansys – Fluent”. Trabajo fin de grado. Universidad de Zaragoza, 2020.
- [12] Joseph A. Schetz. “Aerodynamics on High-Speed Trains”. En: *Aerospace and Ocean Engineering Department* (2001).
- [13] Frank M. White. *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill Education, 1994.
- [14] David C. Wilcox. *Turbulence Modelling for CFD*. DCW Industries, Inc., 1994.

Anexos

Anexo A

Aspectos fundamentales de la aerodinámica

A.1. Definición

La aerodinámica es la rama de la Mecánica de Fluidos que se ocupa del movimiento del aire y otros fluidos gaseosos y de las fuerzas que actúan sobre los cuerpos que atraviesan dicho fluido. La aerodinámica trata, en particular, de explicar los principios que rigen el vuelo de los aviones, cohetes y misiles. También se ocupa del diseño de automóviles, trenes de alta velocidad y barcos, así como de la construcción de estructuras como puentes y edificios altos para determinar su resistencia a los vientos fuertes [9, 2].

Un objeto en un fluido gaseoso modifica el reparto de presiones y velocidades de las partículas del fluido, lo que origina fuerzas de sustentación y arrastre.

La aerodinámica responde a varios fenómenos físicos que se explicarán a continuación, así como algunos números adimensionales característicos que son capaces de definir las propiedades del fluido [11].

A.2. Fuerzas aerodinámicas

Al estudiar la aerodinámica de un objeto a través de un fluido, ya sea aire o agua, se producen de forma natural dos fuerzas: **Fuerza de arrastre** y **Fuerza de sustentación**

Explicaremos estas dos fuerzas fijándonos en los resultados de las mismas para diferentes objetos.

A.2.1. Fuerza de arrastre o drag

La fuerza de arrastre o drag force es una de las dos principales fuerzas aerodinámicas que se tienen en cuenta a la hora de estudiar la aerodinámica de un objeto en la situación

que nosotros planteemos.

Esta fuerza actúa en dirección opuesta al movimiento del objeto a través del fluido y esta compuesta por dos factores, la **resistencia de presión** y la **resistencia de fricción**.

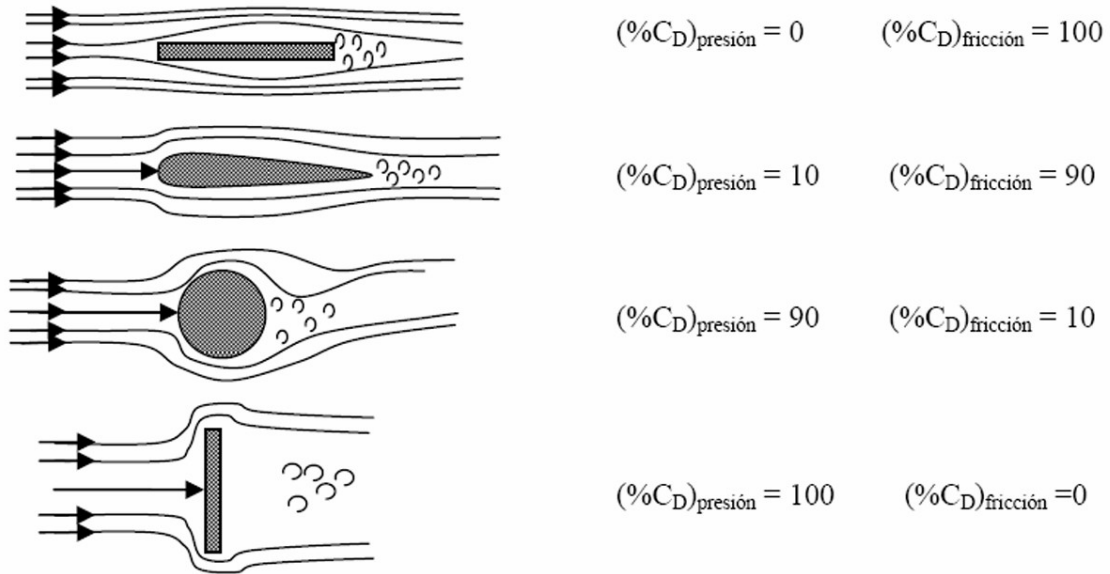


Figura A.1: Resistencias aerodinámicas según la forma. Apuntes Mecánica de Fluidos EINA - UNIZAR.

Coeficiente de arrastre o drag

El coeficiente de arrastre es un parámetro adimensional y una parte fundamental del estudio de la aerodinámica de cualquier objeto a través de un fluido. Este coeficiente depende de varios parámetros como son la velocidad relativa del objeto, su área frontal o la densidad del fluido.

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot S_F \cdot v^2 \quad (\text{A.1})$$

F_D = Fuerza de arrastre

C_D = Coeficiente de arrastre

ρ = Densidad del fluido

S_F = Superficie frontal del objeto

v = Velocidad relativa del objeto

Como se ha comentado antes, este parámetro nos dice si un objeto es más aerodinámico o menos en distintas situaciones.

En la siguiente imagen podemos ver una gráfica de comparaciones entre distintos modelos de coches y sus respectivos coeficientes de resistencia.

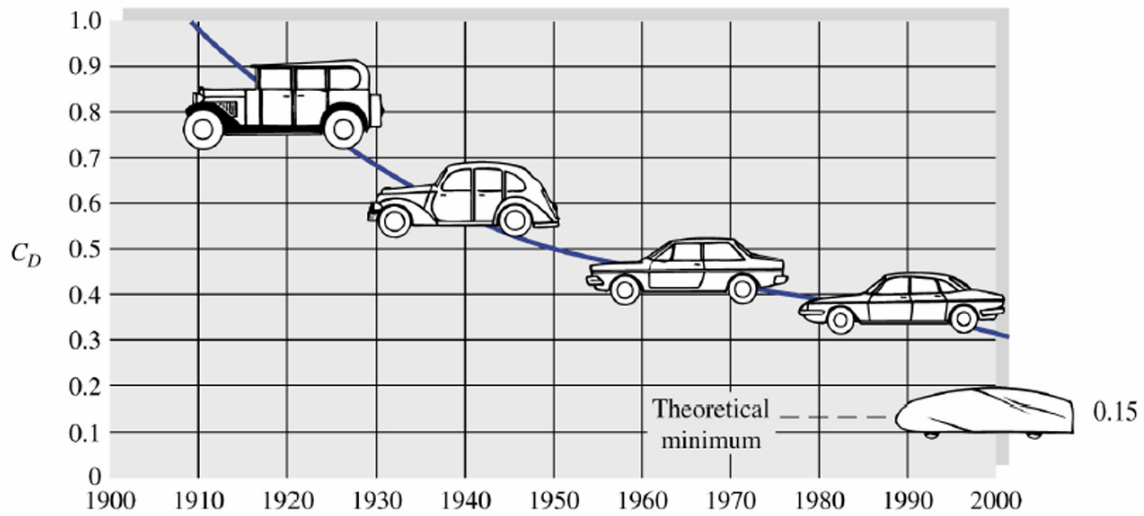


Figura A.2: Evolución temporal del valor del coeficiente de arrastre en vehículos. Apuntes Mecánica de Fluidos EINA -UNIZAR.

Cuanto mayor es el coeficiente de arrastre, menos aerodinámico es el objeto y cuanto menor es dicho coeficiente, más aerodinámico es.

A.2.2. Fuerza de sustentación o lift

La fuerza de sustentación o lift es la segunda fuerza aerodinámica principal que se tiene en cuenta. Actúa en dirección perpendicular a la velocidad del flujo; por lo que, para cada objeto, buscamos un valor u otro. Por ejemplo, para el perfil alar de la figura A.3 buscamos una fuerza de sustentación alta para un buen perfil aerodinámico; mientras que para casos de vehículos, ya sean coches, o en este caso de estudio, trenes, buscamos una sustentación baja o negativa para evitar problemas de separación con el suelo.

Coeficiente de sustentación o lift

Al igual que el coeficiente de arrastre, el coeficiente de sustentación tiene una fórmula análoga, que en este caso depende de la fuerza de sustentación. La fórmula que usamos es la siguiente:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot S_S \cdot v^2 \quad (\text{A.2})$$

F_L = Fuerza de sustentación

C_L = Coeficiente de sustentación

ρ = Densidad del fluido

S_S = Superficie que produce sustentación

v = Velocidad relativa del objeto

A diferencia del coeficiente de arrastre, no podemos observar una relación entre aerodinámica y el perfil de un sólo tipo de vehículo. Dependiendo del tipo de objeto, como se ha comentado anteriormente, necesitaremos un coeficiente mayor o menor.

La siguiente figura muestra de forma más visual, en este caso en un perfil alar, las distintas fuerzas aerodinámicas.

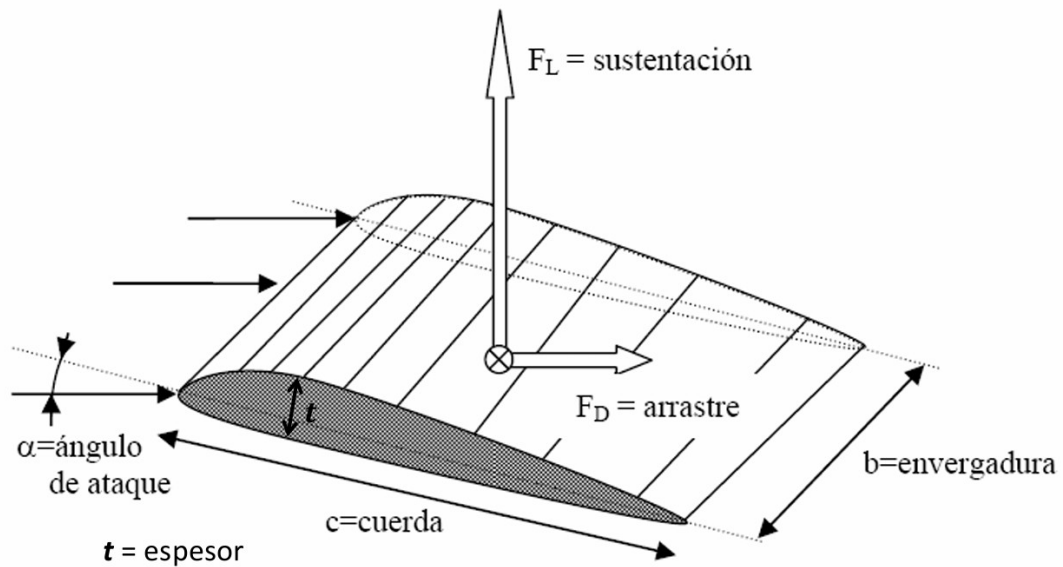


Figura A.3: Parámetros aerodinámicos relevantes en un perfil alar. Apuntes Mecánica de Fluidos EINA - UNIZAR.

Anexo B

Modelo numérico

El flujo que circula alrededor de un vehículo viene representado por las ecuaciones de conservación de Navier-Stokes que se pueden representar matemáticamente de una forma global como [10, 13]:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = S \quad (\text{B.1})$$

donde ρ es la densidad del fluido, (x, y, z) son las coordenadas espaciales en un sistema de referencia cartesiano, t representa el tiempo, (u, v, w) son las componentes del vector velocidad del flujo en el sistema de coordenadas cartesianas, y ϕ es una variable genérica que permite formular las ecuaciones de conservación de manera general.

Para obtener la ecuación de conservación de la masa, se establece que $\phi = 1$. En el caso de la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, se toma $\phi = \mathbf{v}$, donde \mathbf{v} es el vector velocidad. De manera similar, el término S representa la fuente correspondiente a cada ecuación de conservación, cuyos valores dependen del caso en cuestión. Por ejemplo, en la ecuación de conservación de la masa, $S = 0$. En cambio, en la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento, S incluye todas las fuerzas que generan cambios en esta cantidad, como las fuerzas de superficie (presión y rozamiento) y las fuerzas volumétricas o masivas (como la gravedad).

En la ecuación general (B.1) se pueden identificar los siguientes términos principales:

- **Término temporal o transitorio:** Representa la variación en el tiempo de las propiedades del fluido dentro del dominio de simulación.
- **Término convectivo:** Describe cómo el movimiento del fluido afecta sus propiedades a lo largo del espacio.
- **Término fuente:** Incluye las fuerzas externas que actúan sobre el fluido en el dominio de cálculo.

Un aspecto crucial en este contexto es la modelización de la turbulencia, dado que su naturaleza es aleatoria y compleja. El enfoque más común consiste en promediar las ecuaciones del flujo, enfocándose en las características de gran escala y omitiendo las fluctuaciones. Sin embargo, también es esencial considerar los efectos de las pequeñas escalas y las fluctuaciones asociadas.

Entre los modelos más utilizados para simular la turbulencia [7], se encuentran los **RANS** (*Reynolds Average Navier-Stokes*), que han sido empleados en este trabajo. En estos modelos, las variables se dividen en un valor promedio y una fluctuación. Esto permite formular las ecuaciones de Navier-Stokes tanto para los valores promedios de las variables como para sus fluctuaciones.

Este enfoque introduce un término adicional en las ecuaciones, conocido como el **tensor de esfuerzos de Reynolds**, que representa la transferencia de cantidad de movimiento debida a las fluctuaciones turbulentas. Sin embargo, la inclusión de este término da lugar a nuevas incógnitas relacionadas con dichas fluctuaciones, lo que genera un problema de cierre en las ecuaciones y dificulta su resolución.

Para abordar este problema, se añaden ecuaciones adicionales que eliminan la dependencia directa de las fluctuaciones. Uno de los modelos más utilizados es el **modelo de turbulencia $k - \epsilon$** , que es el que se ha usado en este trabajo y se hace referencia a él en la memoria principal de este documento. Este modelo incluye dos ecuaciones de transporte para describir:

- k : La energía cinética turbulenta, que mide la energía asociada a las fluctuaciones turbulentas por unidad de masa.
- ϵ : La tasa de disipación turbulenta, que describe cómo la energía cinética turbulenta se convierte en energía térmica interna.

Dado que este sistema completo de ecuaciones no tiene una solución analítica para problemas complejos, es necesario recurrir a métodos numéricos para resolverlo, empleando herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (*CFD*, por sus siglas en inglés).

Anexo C

Métodos numéricos en Ansys Fluent

Una vez se tiene el modelo físico que representa el flujo y su representación matemática, el siguiente paso consiste en resolver el sistema de ecuaciones presentado. Para ello se necesita establecer el método numérico más apropiado y así resolver todas las variables del flujo para conocer su valor en el espacio y en el tiempo en cada una de las celdas de cálculo en las que se divide el dominio.

Se ha realizado un análisis para comprobar las diferencias que habría usando un método de cálculo u otro. Ansys establece automáticamente el método **Second Order UPWIND** para discretizar las ecuaciones en el espacio; que es el que hemos usado para todas las simulaciones. También se ha realizado una simulación con los métodos numéricos **First Order UPWIND**, **QUICK** y **Third order MUSCL**, que son los otros métodos que Ansys nos proporciona.

Antes de discutir los resultados obtenidos, vamos a explicar cada uno de los métodos brevemente.

C.1. First Order UPWIND

Cuando se desea una precisión de primer orden, las variables en las caras de las celdas se determinan asumiendo que los valores en el centro de las celdas de cualquier variable de campo representan un valor promedio de la celda y se mantienen constantes en toda la celda. Las variables en las caras son idénticas a las variables en las celdas. Por lo tanto, cuando se selecciona el método upwind de primer orden, el valor en la cara ϕ_f se establece igual al valor en el centro de la celda ϕ en la celda aguas arriba [3].

C.2. Second Order UPWIND

Cuando se desea una precisión de segundo orden, las variables en las caras de las celdas se calculan utilizando un enfoque de reconstrucción lineal multidimensional. En este enfoque, se logra una precisión de mayor orden en las caras de las celdas mediante una expansión en serie de Taylor de la solución centrada en la celda alrededor de su centroide. Por lo tanto, cuando se selecciona el método upwind de segundo orden, el valor en la cara ϕ_f se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$\phi_{f,\text{SOU}} = \phi + \nabla\phi \cdot \vec{r}$$

donde ϕ y $\nabla\phi$ son el valor de la variable en el centro de la celda y su gradiente en la celda aguas arriba, y \vec{r} es el vector de desplazamiento desde el centroide de la celda aguas arriba hasta el centroide de la cara. Esta formulación requiere la determinación del gradiente $\nabla\phi$ en cada celda. Finalmente, el gradiente $\nabla\phi$ se limita para que no se introduzcan nuevos máximos o mínimos [3].

C.3. QUICK

Para mallas cuadriláteras y hexaédricas, donde se pueden identificar caras y celdas aguas arriba y aguas abajo únicas, Ansys Fluent también proporciona el esquema QUICK para calcular un valor de orden superior de la variable convectiva ϕ en una cara. Los esquemas de tipo QUICK se basan en un promedio ponderado de interpolaciones upwind de segundo orden y central de la variable. Para la cara e , si el flujo va de izquierda a derecha, tal valor puede escribirse como [3]:

$$\phi_e = \theta \left[\frac{S_d}{S_c + S_d} \phi_p + \frac{S_c}{S_c + S_d} \phi_E \right] + (1 - \theta) \left[\frac{S_u + 2S_c}{S_u + S_c} \phi_p - \frac{S_c}{S_u + S_c} \phi_W \right]$$

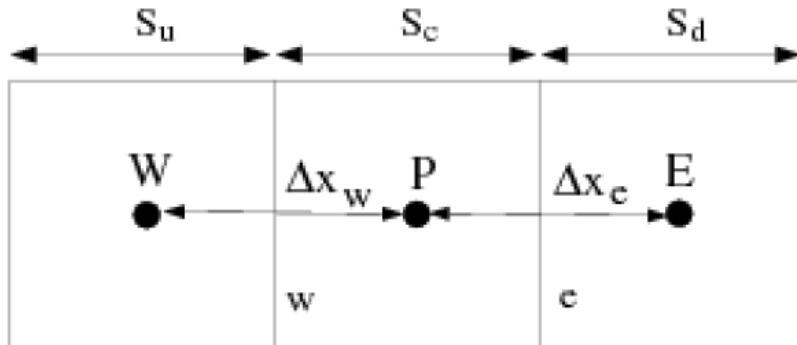


Figura C.1: Representación de un volumen de control unidimensional.

En el caso en que $\theta = 1$, la ecuación anterior resulta una interpolación central de segundo orden, mientras que si $\theta = 0$, produce un valor upwind de segundo orden. El esquema QUICK tradicional se obtiene configurando $\theta = 1/8$. La implementación en Ansys Fluent utiliza un valor variable y dependiente de la solución para θ , elegido de forma que se evite la introducción de nuevos extremos en la solución [3].

El esquema QUICK será típicamente más preciso en mallas estructuradas alineadas con la dirección del flujo. Cabe señalar que Ansys Fluent permite el uso del esquema QUICK para mallas no estructuradas o híbridas; en tales casos, se utilizará el esquema de discretización upwind de segundo orden habitual en las caras de celdas no hexaédricas (o no cuadriláteras, en 2D). El esquema upwind de segundo orden también se empleará en los contornos de partición cuando se utilice la paralelización del código [3].

C.4. Third order MUSCL

Este esquema de tercer orden se concibió a partir del MUSCL original (Monotone Upstream-Centered Schemes for Conservation Laws) combinando un esquema de diferencias centradas con el esquema upwind de diferencias descentradas de segundo orden como [3]:

$$\phi_f = \theta \phi_{f,CD} + (1 - \theta) \phi_{f,SOU}$$

donde $\phi_{f,CD}$ está definido mediante el esquema de diferencias centradas, $\phi_{f,SOU}$ se calcula utilizando el esquema upwind de segundo orden, y el factor de mezcla θ es igual a $1/3$ [3].

A diferencia del esquema QUICK, que es aplicable sólo a mallas estructuradas hexaédricas, el esquema MUSCL es aplicable a mallas arbitrarias. En comparación con el esquema upwind de segundo orden, el esquema de tercer orden tiene el potencial de mejorar la precisión espacial para todo tipo de mallas al reducir la difusión numérica, siendo especialmente significativo para flujos tridimensionales complejos. Este esquema está disponible para todas las ecuaciones de transporte en el programa [3].

Habiendo explicado los 4 métodos numéricos, procedemos a exponer los resultados obtenidos para cada uno de ellos en el caso de simular el flujo frontal de aire sobre el modelo 1 base de tren con velocidad relativa aire-tren de 270 km/h equivalente a 75 m/s.

Metodo	C_D	C_L
First Order UPWIND	0.1252	-0.06207
Second Order UPWIND	0.1031	0.00493
QUICK	0.1077	0.00501
Third Order MUSCL	0.1086	-0.00154

Tabla C.1: Comparación de los resultados numéricos de los coeficientes de arrastre y sustentación para el flujo de aire frontal sobre el modelo 1 base de tren usando diferentes métodos numéricos de resolución espacial.

Como podemos observar, sólo hay una diferencia significativa en el primer método; mientras que, comparando los demás entre sí, no existe gran diferencia; por lo que se decide que el método **Second Order UPWIND** está bien utilizado en este tipo de simulaciones y es el elegido.

Anexo D

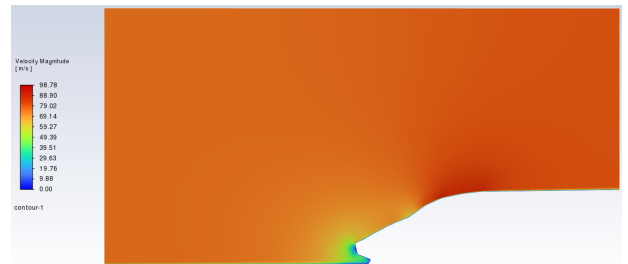
Resultados de las simulaciones del modelo 1 base de tren

En este anexo se presentan todos los resultados obtenidos para las simulaciones con Ansys Fluent del flujo de aire sobre el modelo 1 base de tren. En primer lugar, presión velocidad y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación para una incidencia de viento frontal variando la velocidad del viento. En segundo lugar, se presentan los resultados numéricos de las mismas variables para un flujo de aire que incide sobre el tren variando la velocidad y el ángulo de incidencia.

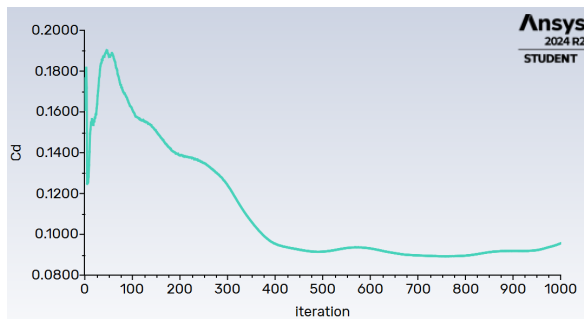
D.1. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento, variando la velocidad relativa viento-tren



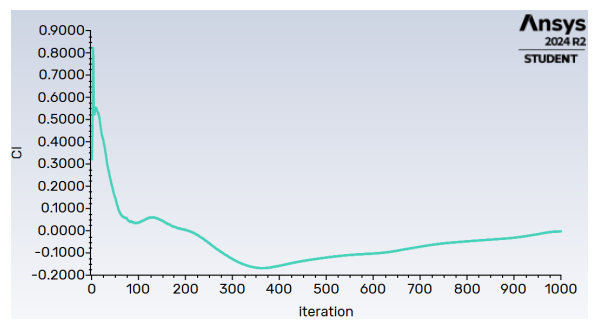
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

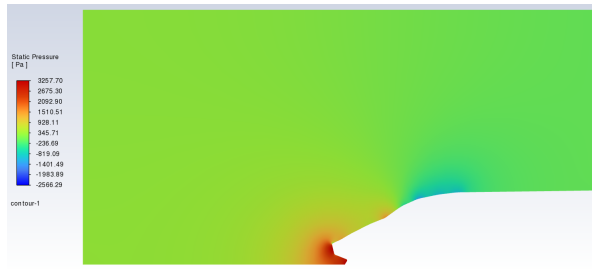


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

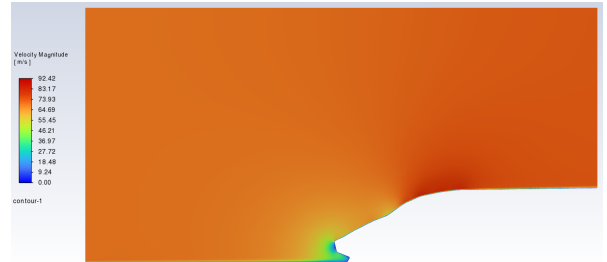


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

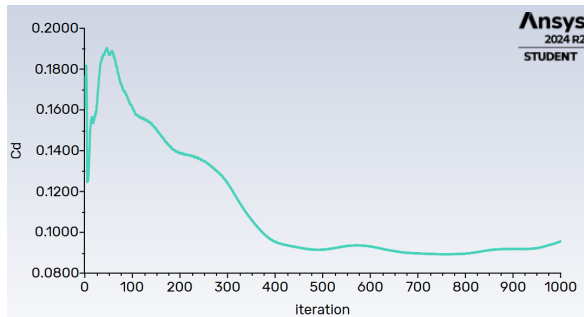
Figura D.1: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 30 km/h.



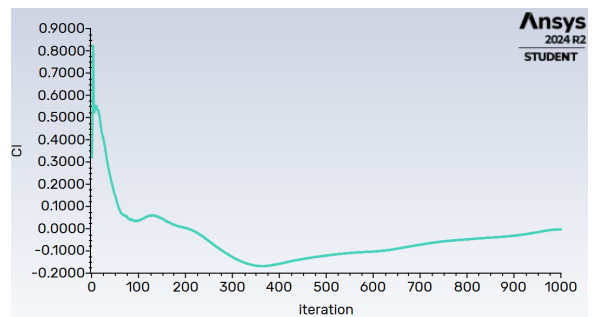
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

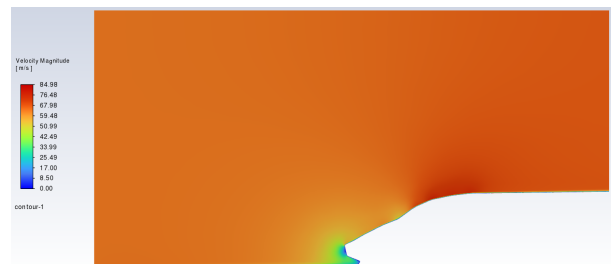


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

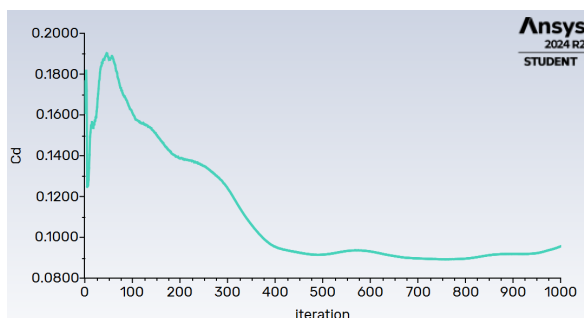
Figura D.2: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 50 km/h.



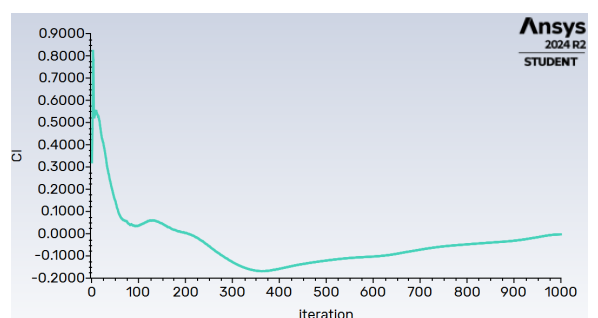
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

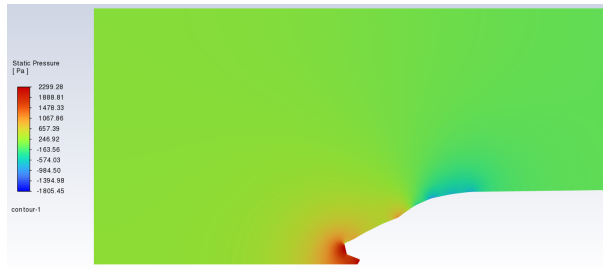


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

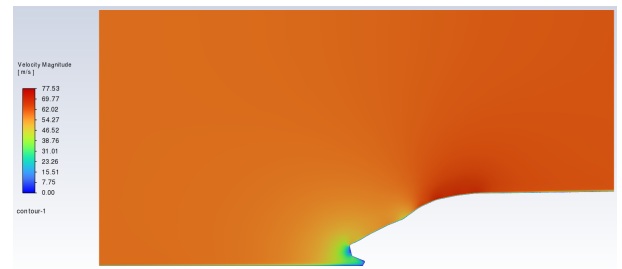


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

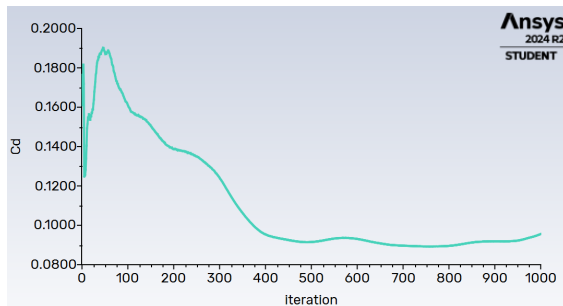
Figura D.3: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 70 km/h.



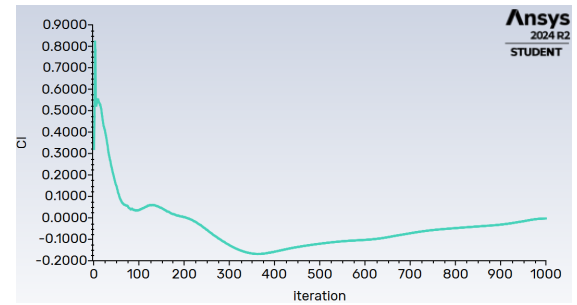
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



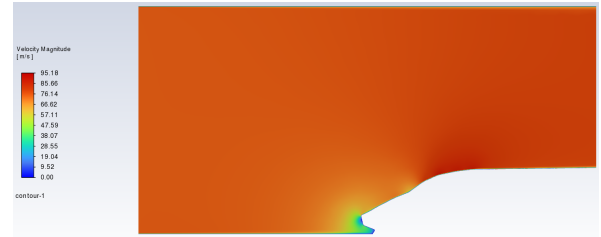
(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

Figura D.4: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 90 km/h.

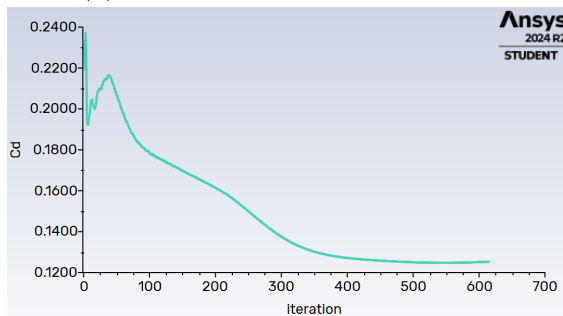
D.2. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento con velocidad 30 km/h usando diferentes métodos numéricos de cálculo



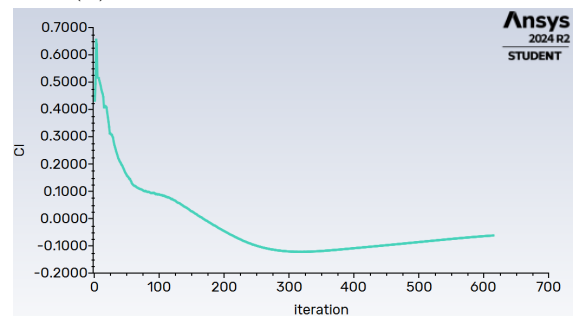
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

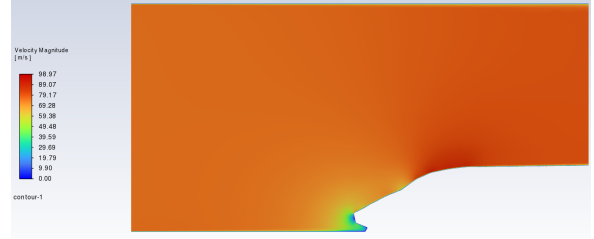


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

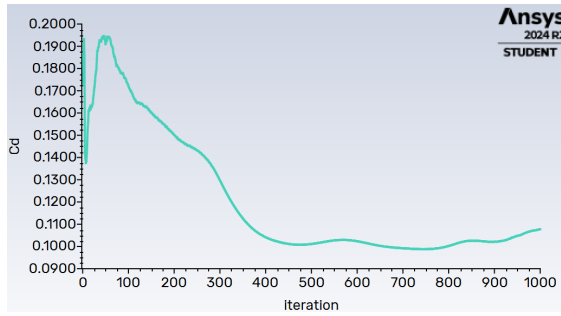
Figura D.5: Resultados numéricos de la simulación con el método First order UPWIND



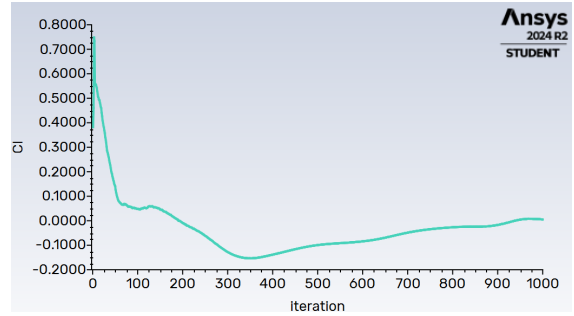
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

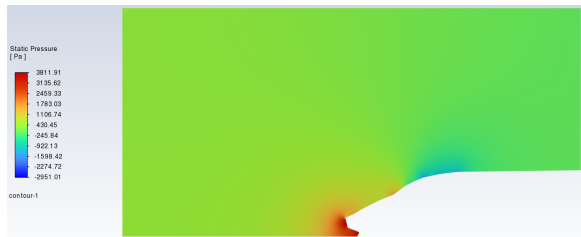


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

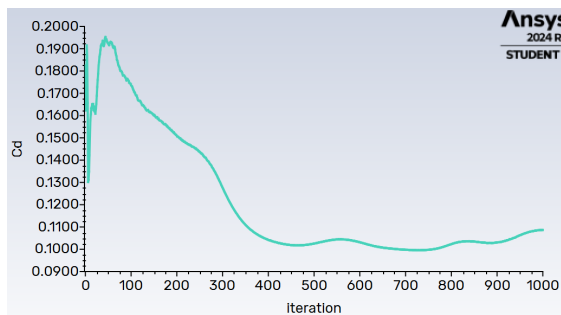
Figura D.6: Resultados numéricos de la simulación con el método QUICK.



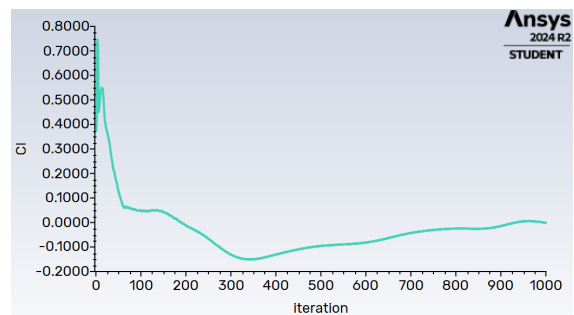
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



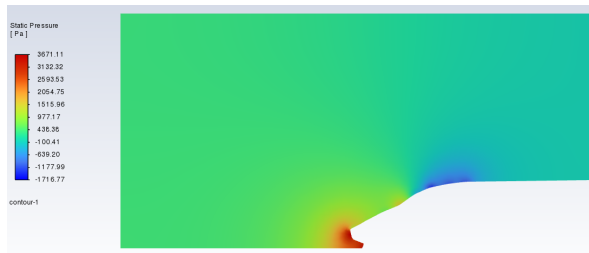
(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



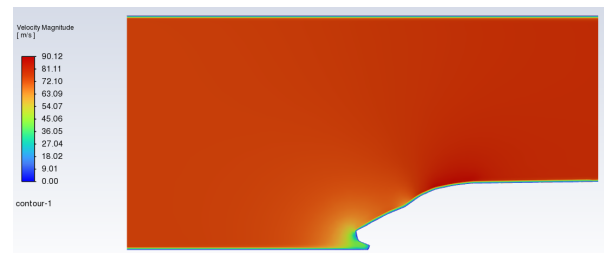
(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

Figura D.7: Resultados numéricos de la simulación con el método Third order MUSCL.

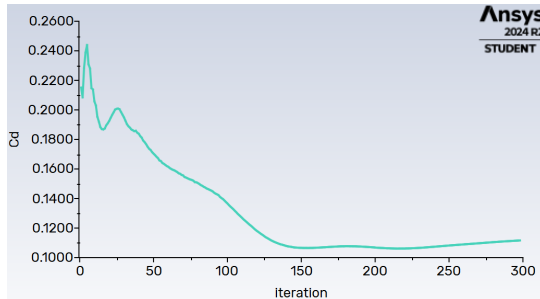
D.3. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento de 30 km/h variando el número de celdas de la malla de cálculo



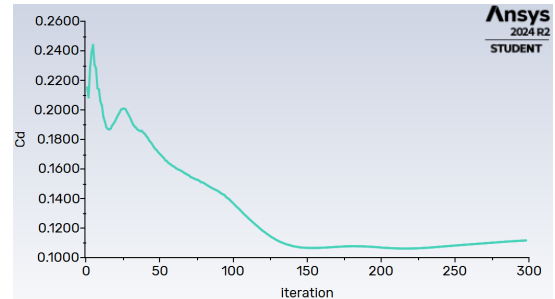
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

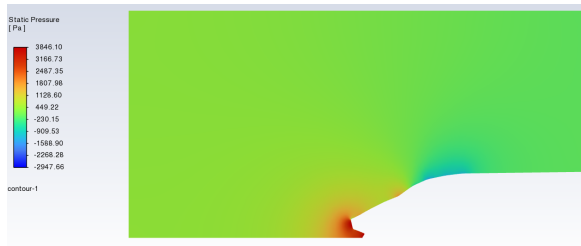


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

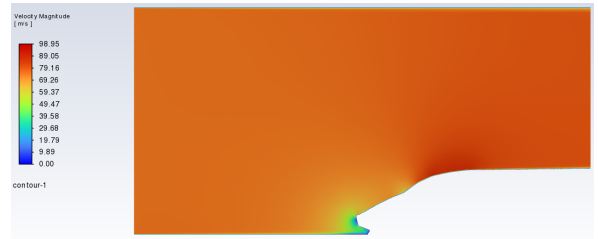


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

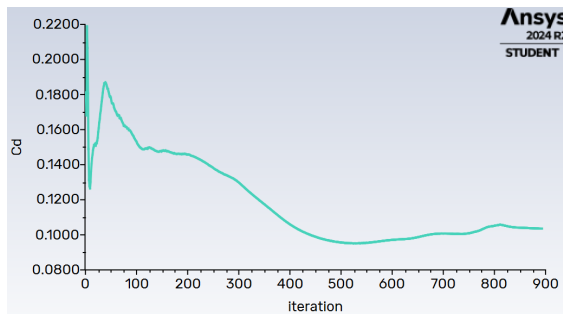
Figura D.8: Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 250.000 celdas.



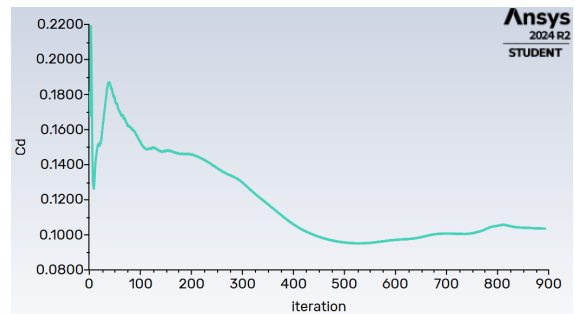
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

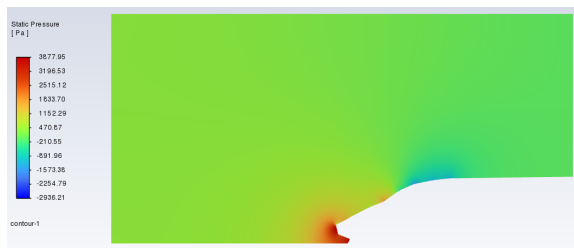


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

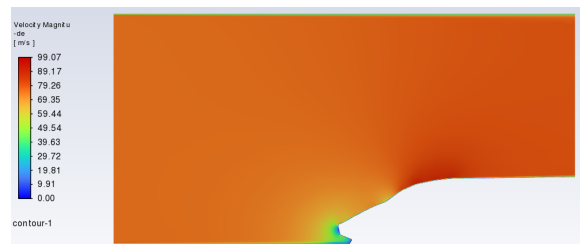


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

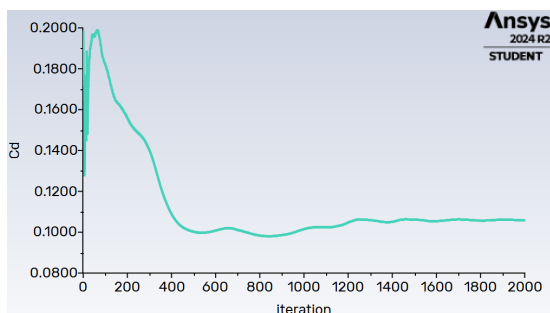
Figura D.9: Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 500.000 celdas



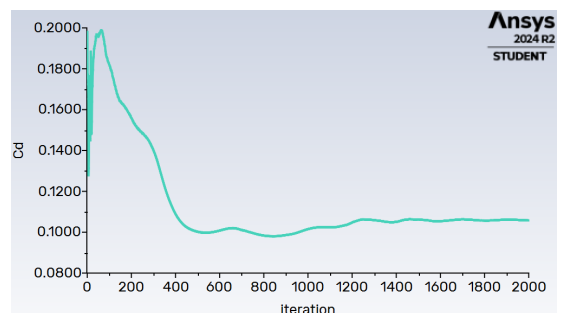
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

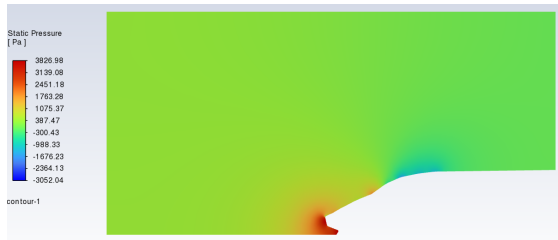


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

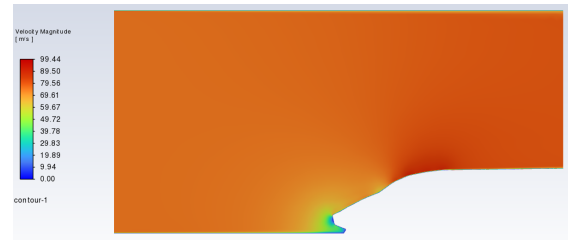


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

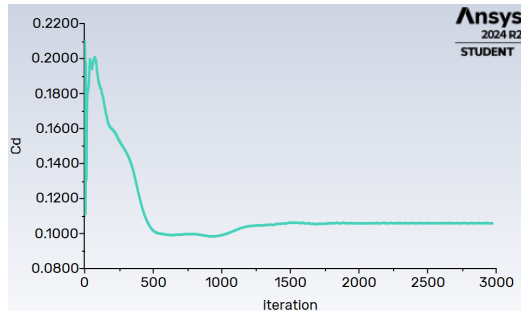
Figura D.10: Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 750.000 celdas



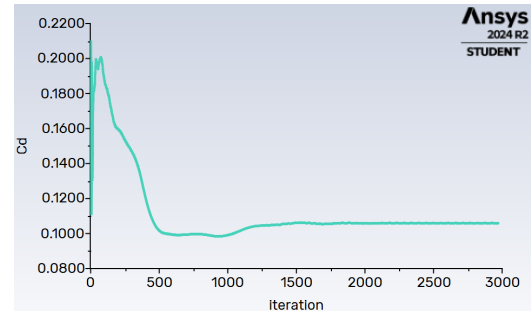
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

Figura D.11: Resultados numéricos de la simulación usando una malla de 1.000.000 celdas

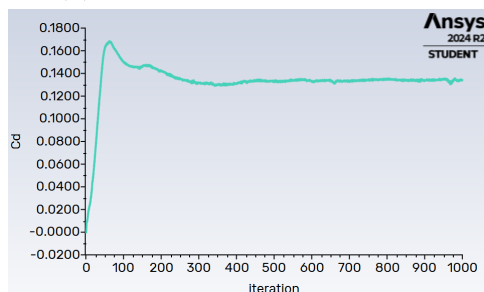
D.4. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación variando el ángulo de incidencia y velocidad del flujo de aire



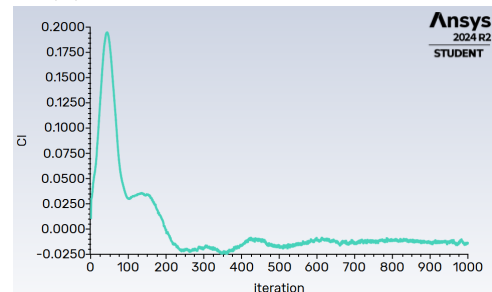
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

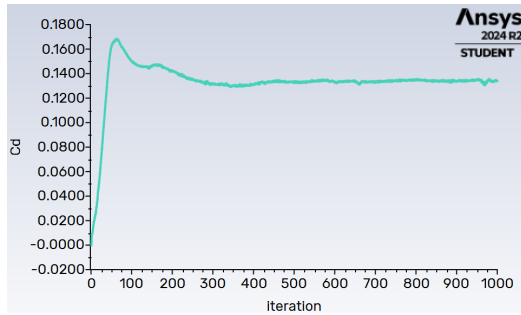
Figura D.12: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 5°.



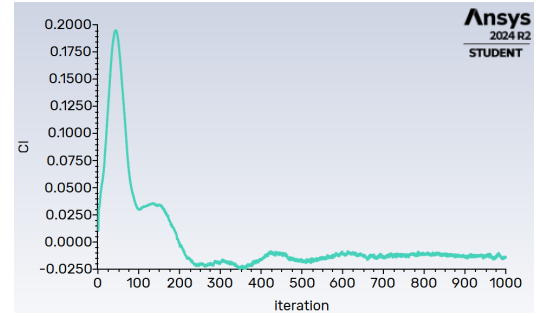
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

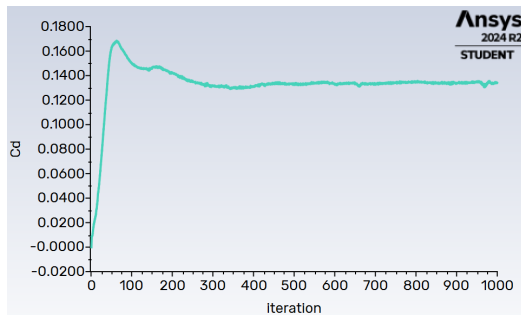
Figura D.13: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 5° .



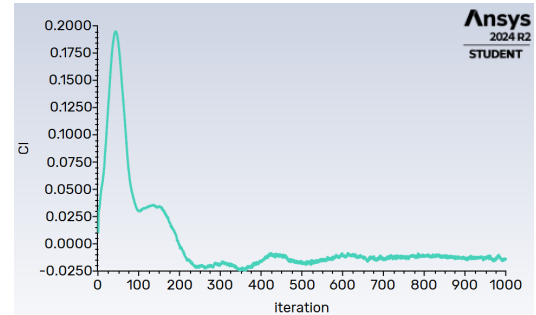
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

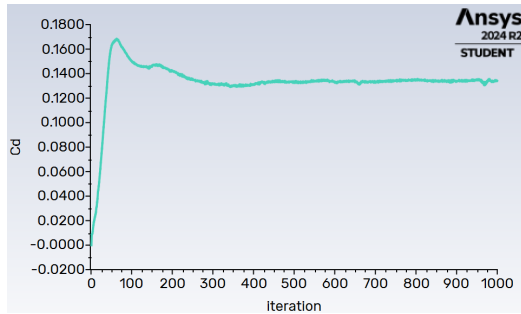
Figura D.14: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 5° .



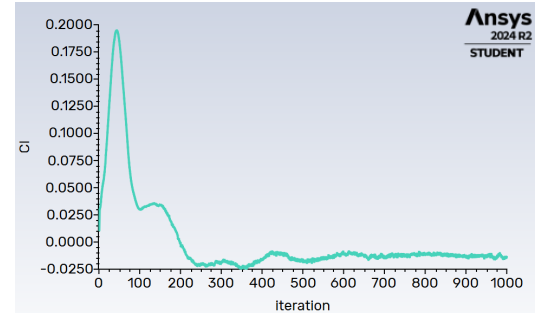
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

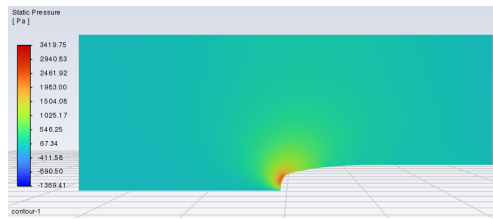


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

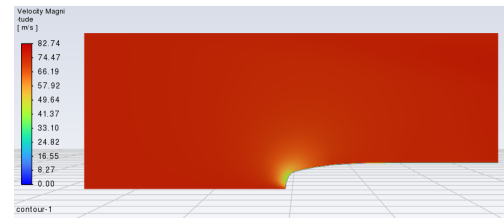


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

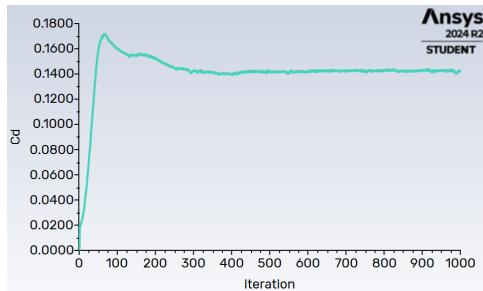
Figura D.15: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 5° .



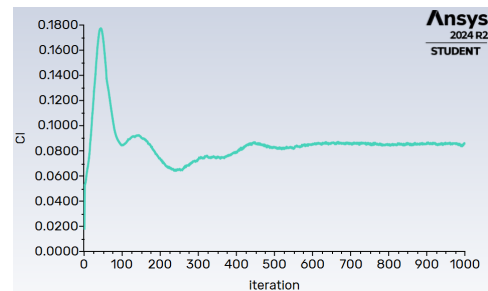
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

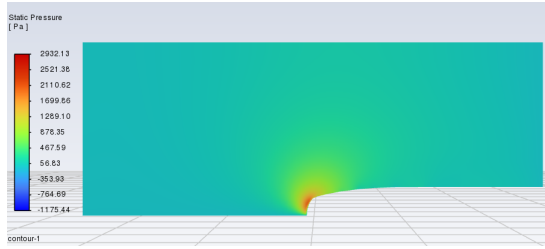


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

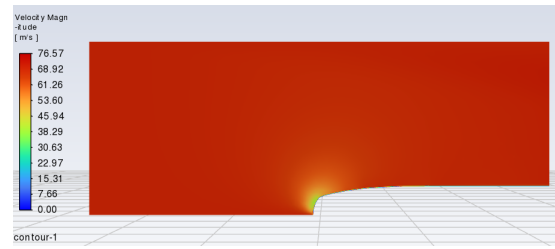


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

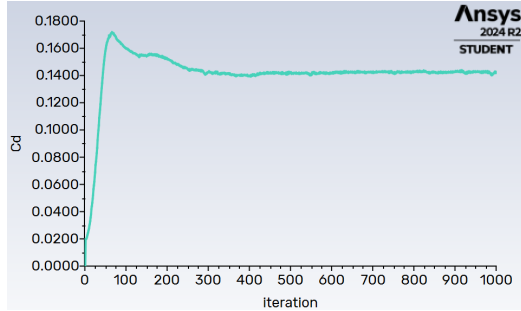
Figura D.16: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 10° .



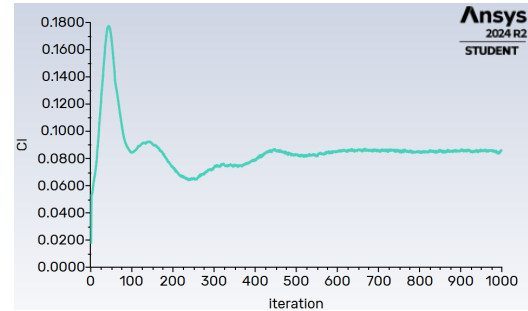
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

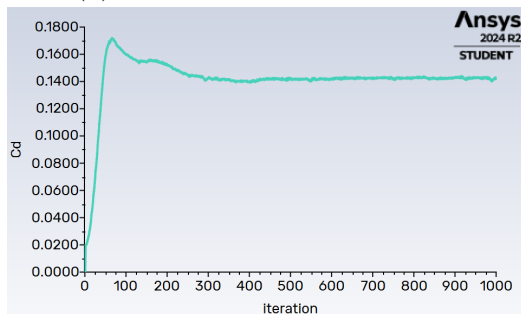
Figura D.17: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 10° .



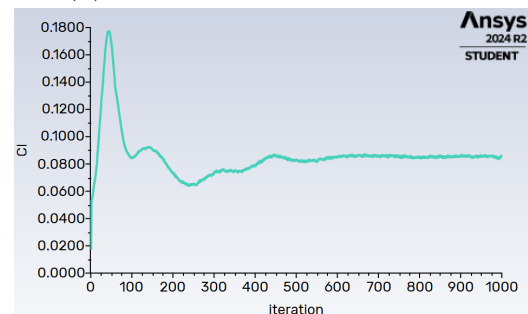
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

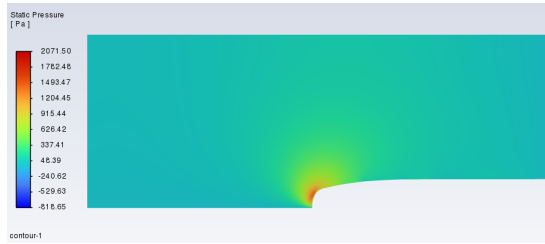


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

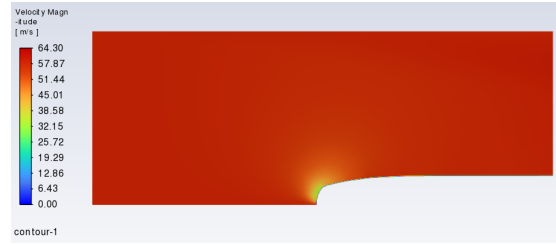


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

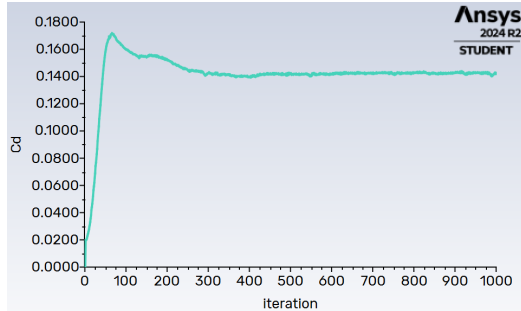
Figura D.18: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 10° .



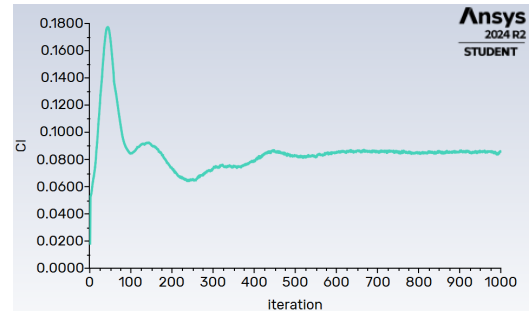
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

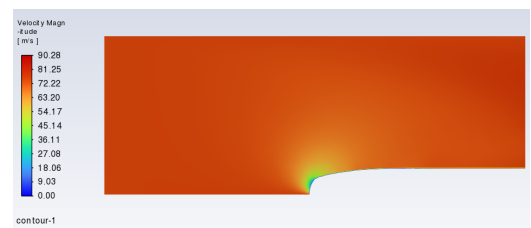


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

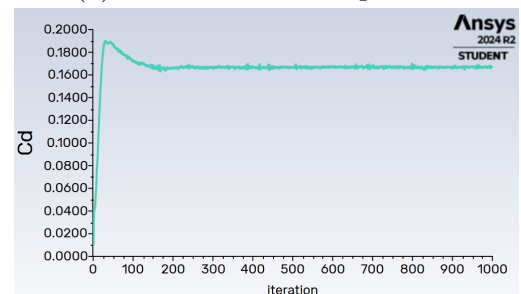
Figura D.19: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 10° .



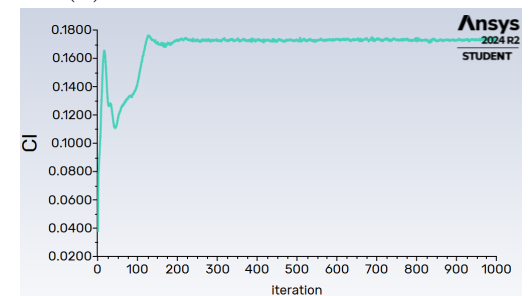
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

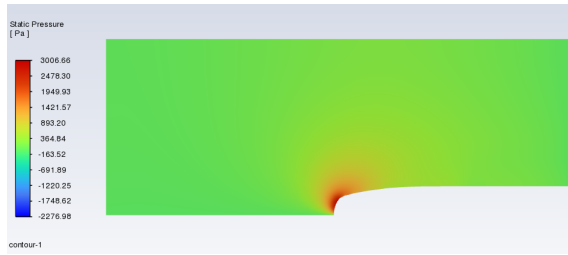


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

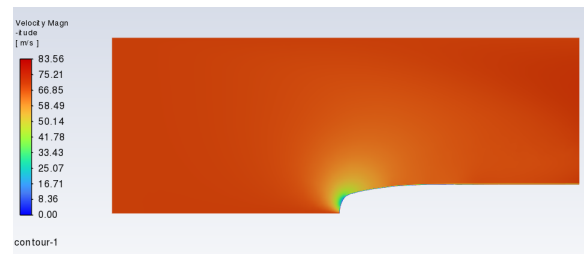


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

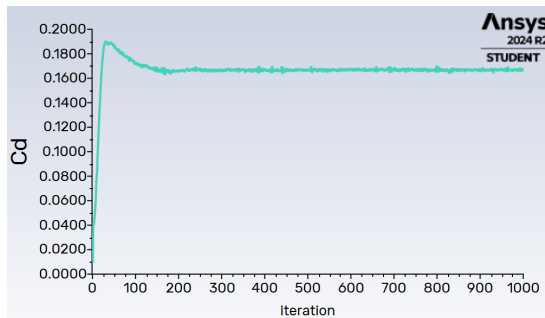
Figura D.20: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 15° .



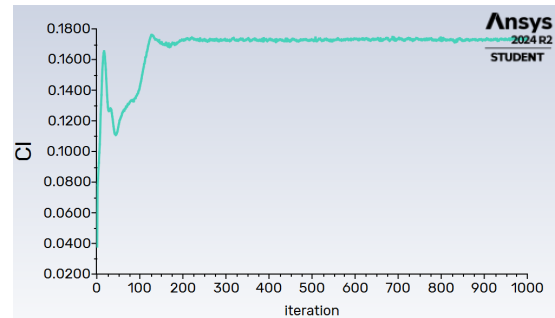
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

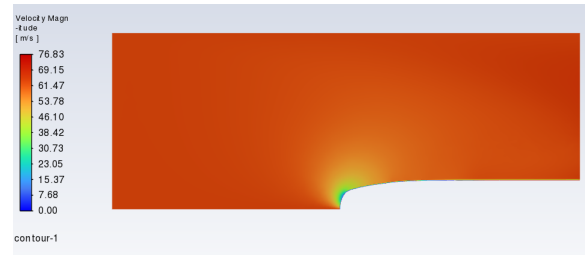


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

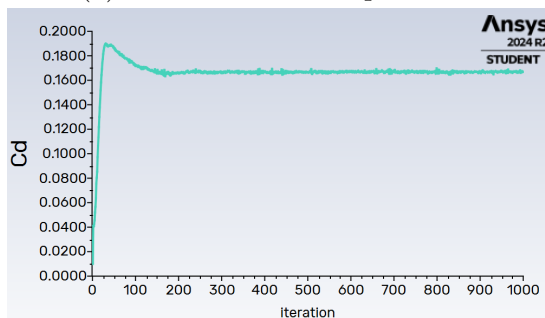
Figura D.21: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 15° .



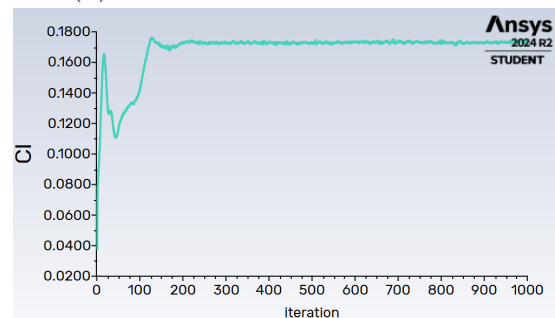
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

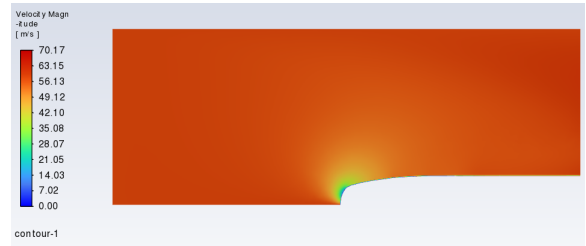


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

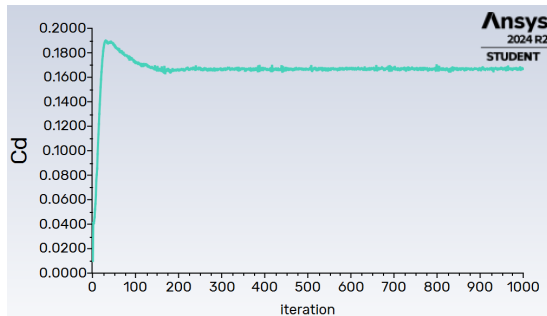
Figura D.22: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 15° .



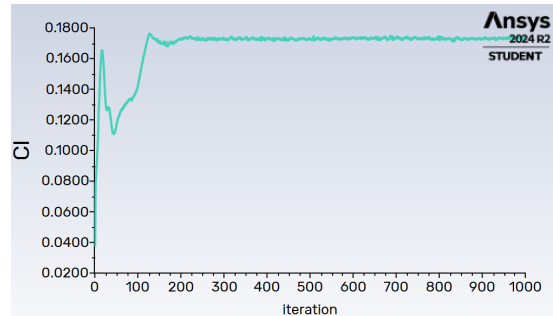
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

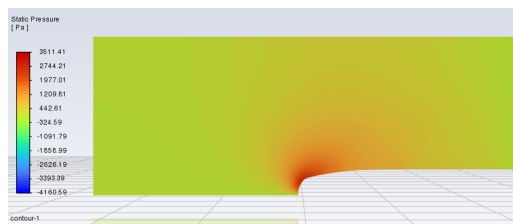


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

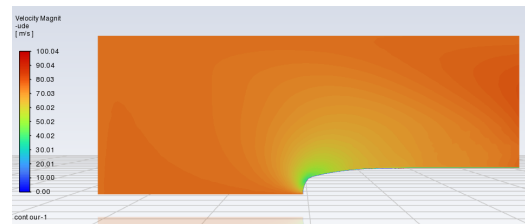


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

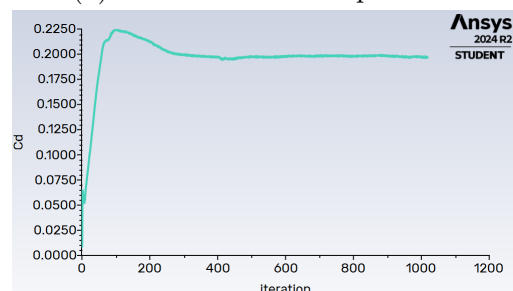
Figura D.23: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 15°.



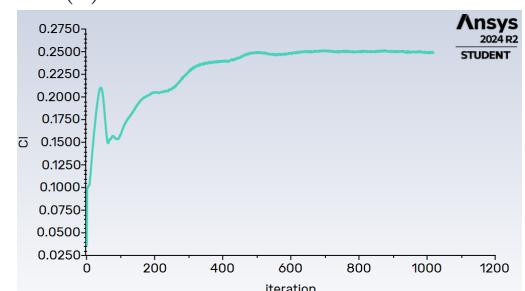
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

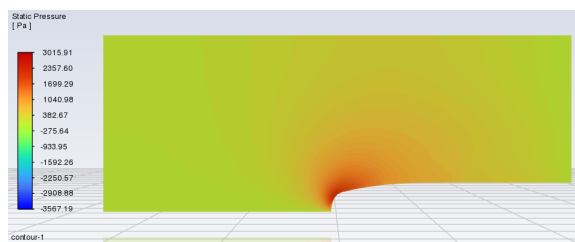


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

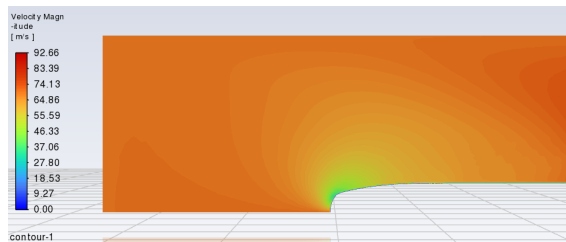


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

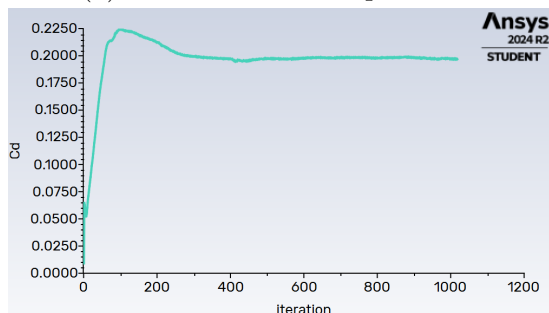
Figura D.24: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 20°.



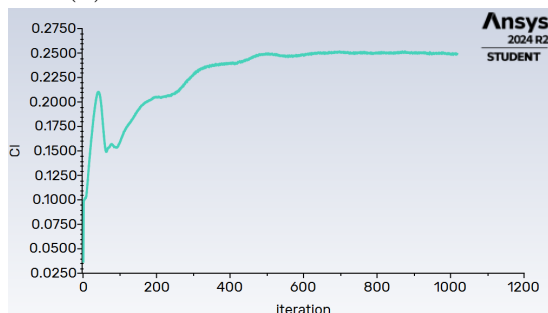
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

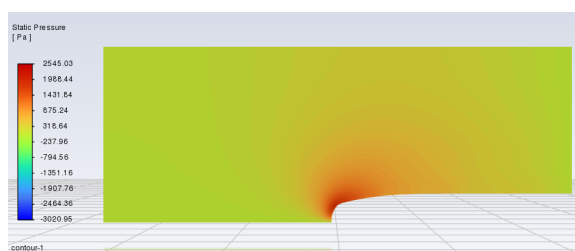


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

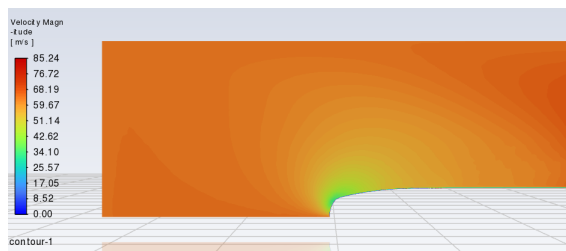


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

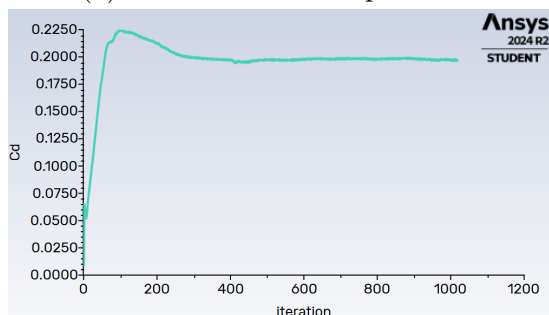
Figura D.25: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 20°.



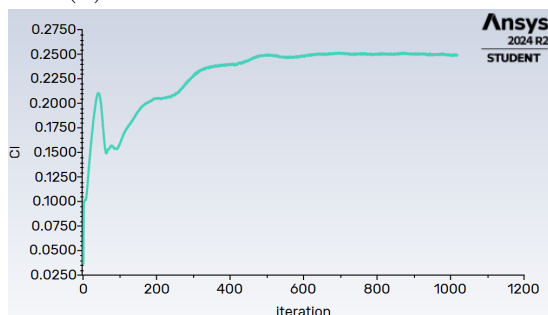
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

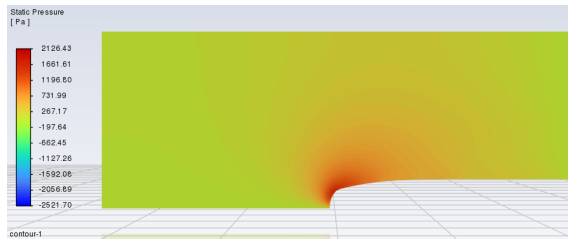


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

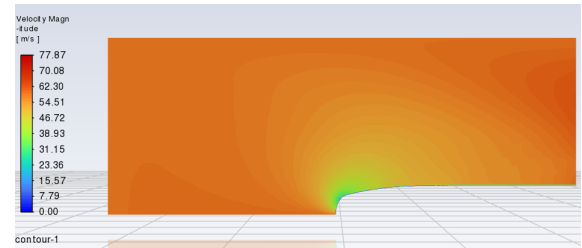


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

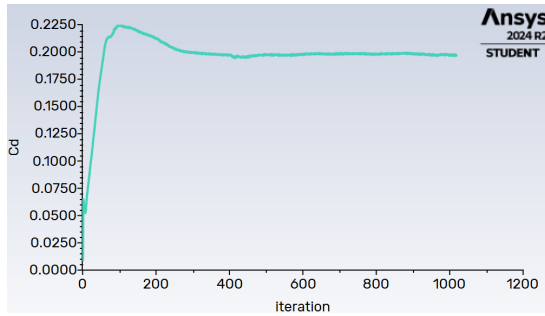
Figura D.26: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 20°.



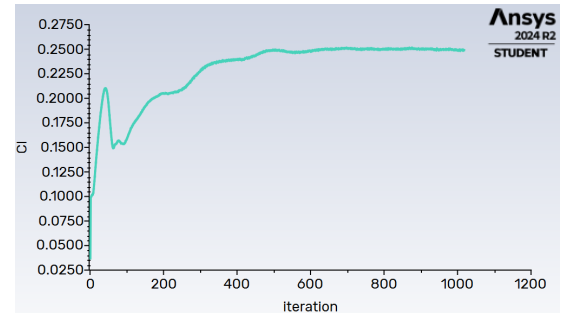
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

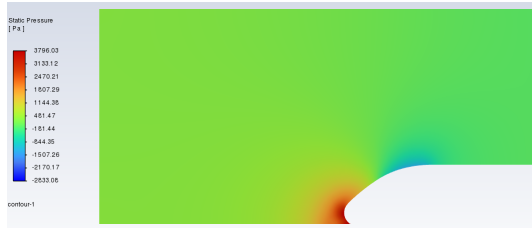
Figura D.27: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 20° .

Anexo E

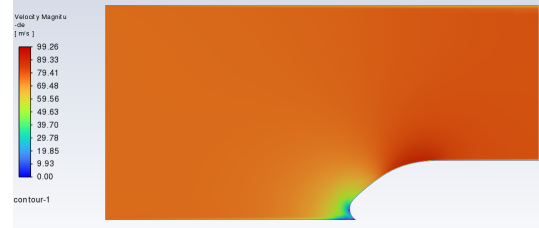
Resultados de las simulaciones del modelo 2 EUROLINK de tren

En este anexo se presentan todos los resultados obtenidos para las simulaciones con Ansys Fluent del flujo de aire sobre el modelo 2 EUROLINK de tren. En primer lugar, presión, velocidad y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación para una incidencia de viento frontal variando la velocidad del viento. En segundo lugar, las mismas variables variando la velocidad del viento y el ángulo de incidencia del mismo sobre el modelo de tren.

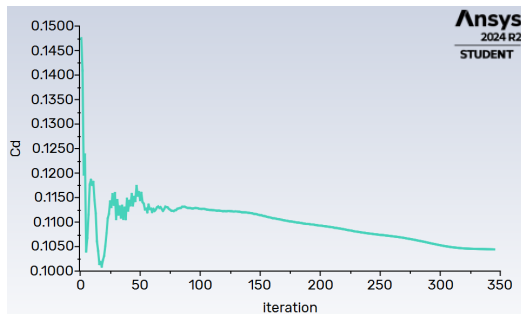
E.1. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación bajo una incidencia frontal del viento, variando la velocidad relativa viento-tren



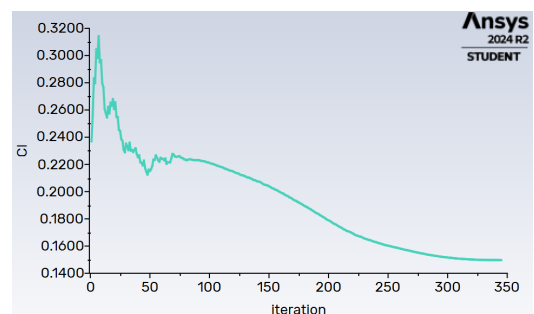
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

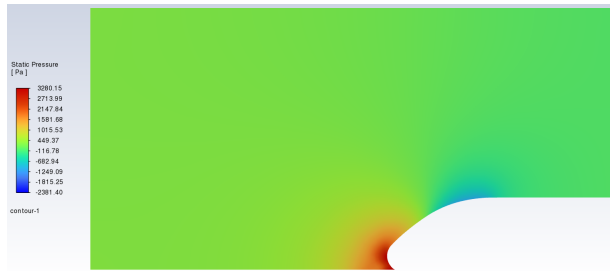


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

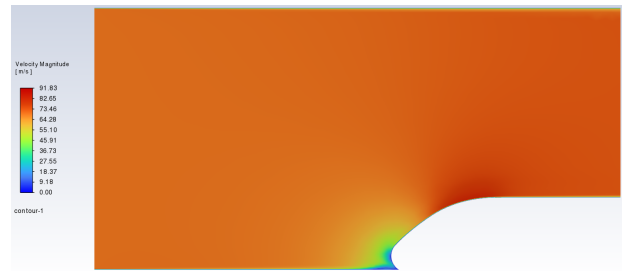


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

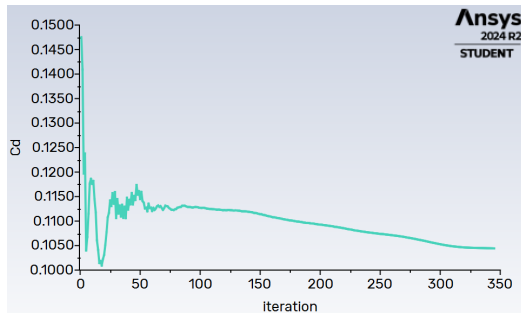
Figura E.1: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 30 km/h.



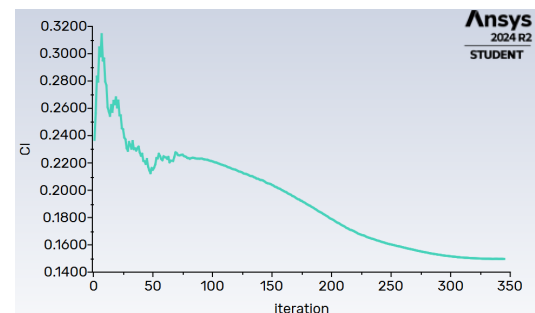
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

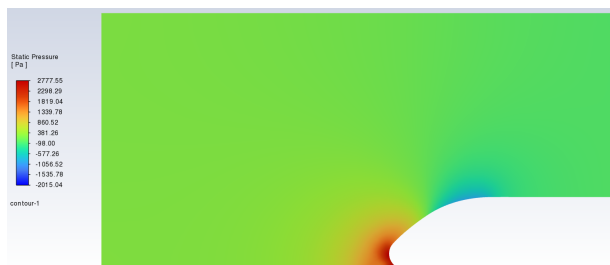


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

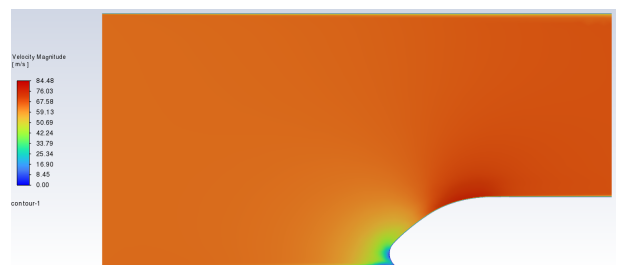


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

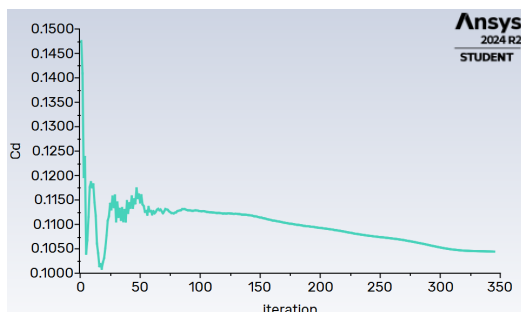
Figura E.2: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 50 km/h.



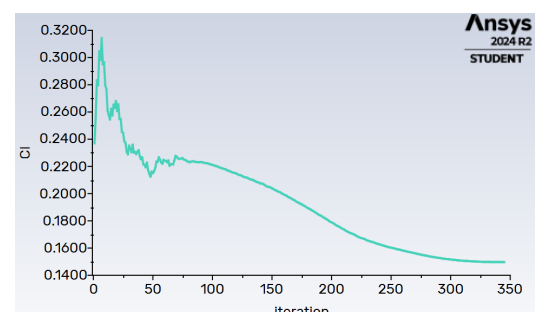
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

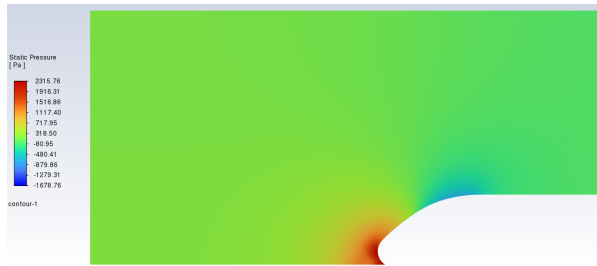


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

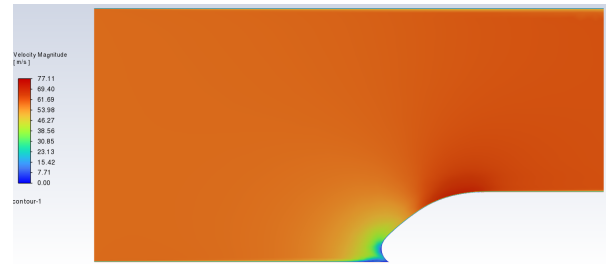


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

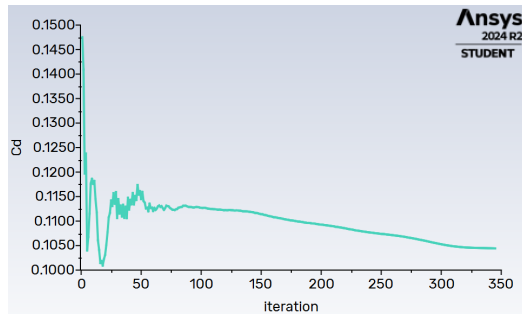
Figura E.3: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 70 km/h.



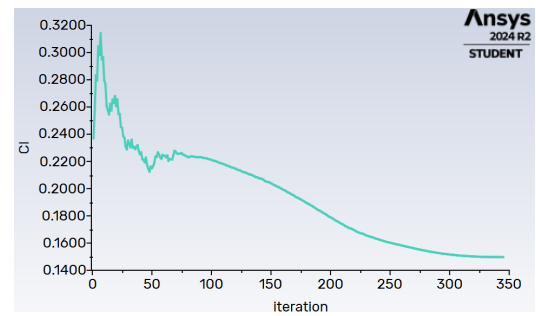
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



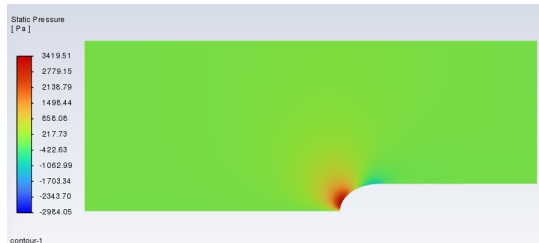
(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



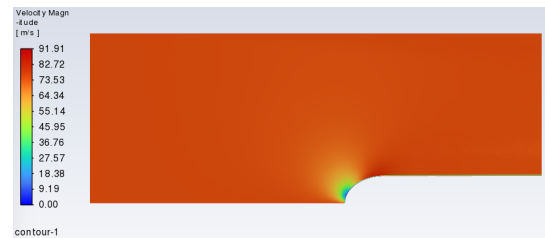
(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

Figura E.4: Resultados numéricos de la simulación correspondiente a la incidencia del viento frontal a 90 km/h.

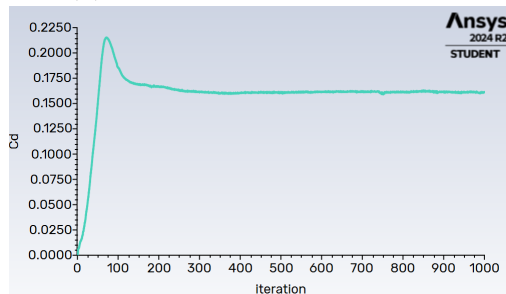
E.2. Resultados numéricos de velocidad, presión y convergencia de los coeficientes de arrastre y sustentación variando el ángulo de incidencia y velocidad del flujo de aire



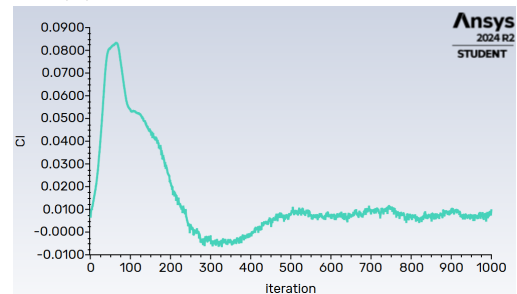
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

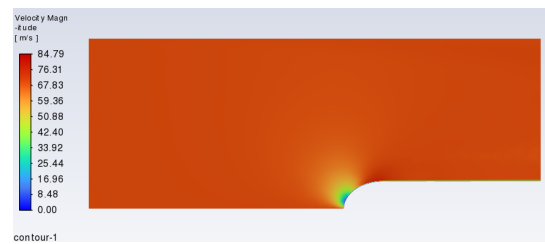


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

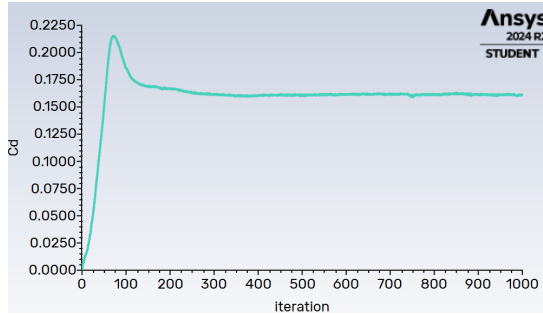
Figura E.5: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 5° .



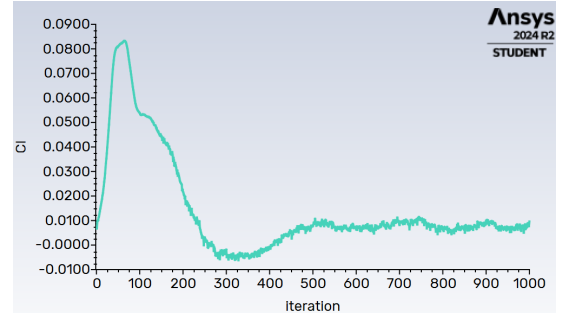
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

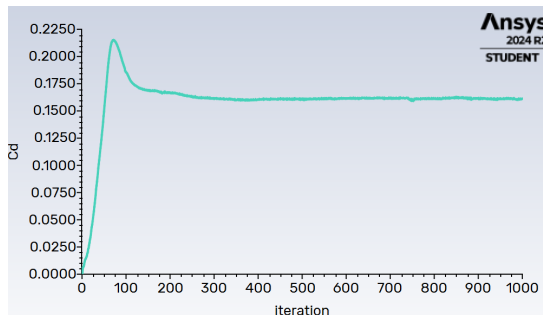
Figura E.6: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 5° .



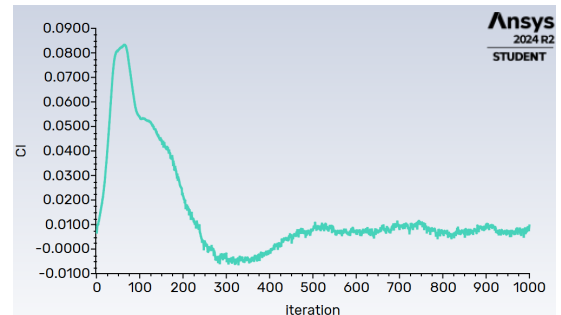
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

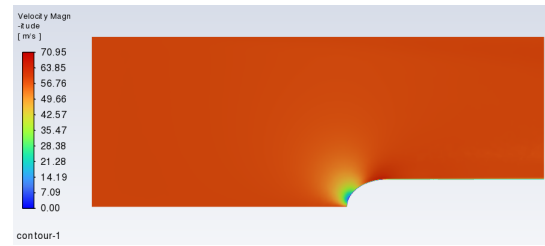


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

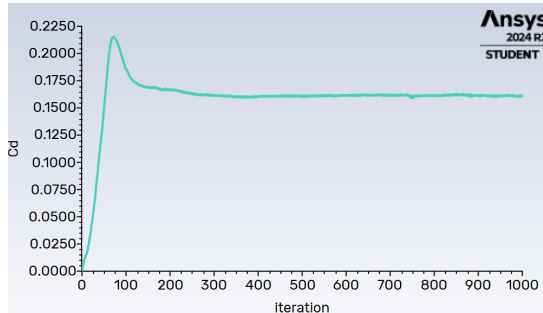
Figura E.7: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 5° .



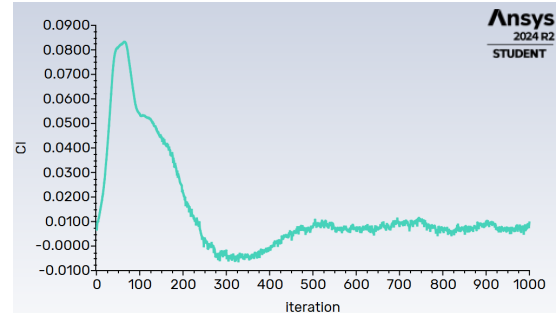
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

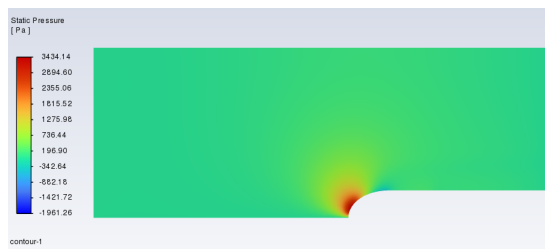


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

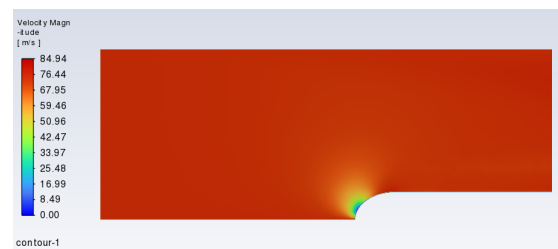


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

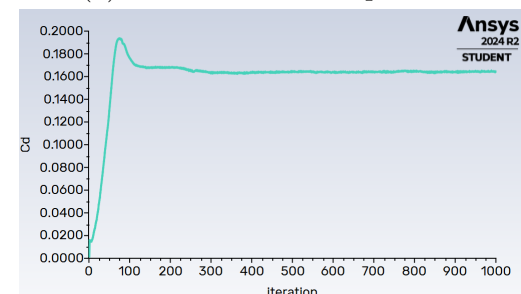
Figura E.8: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 5° .



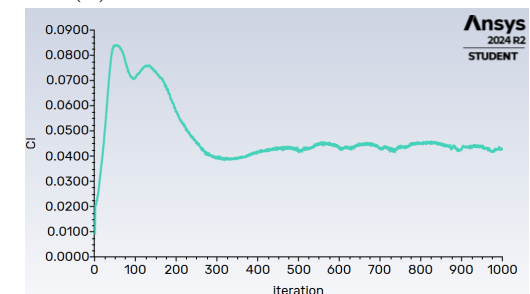
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

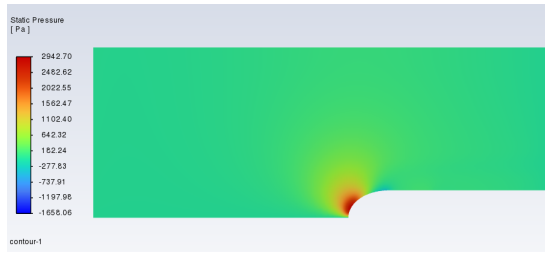


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

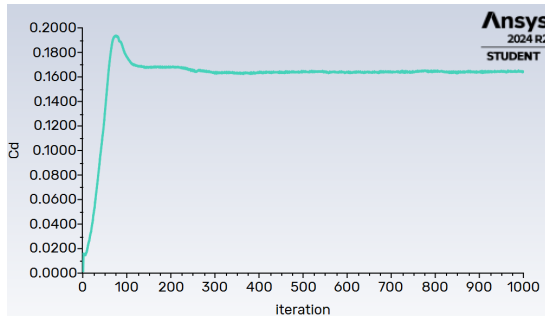
Figura E.9: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 10° .



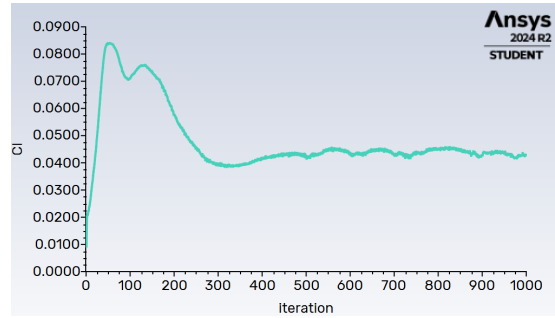
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

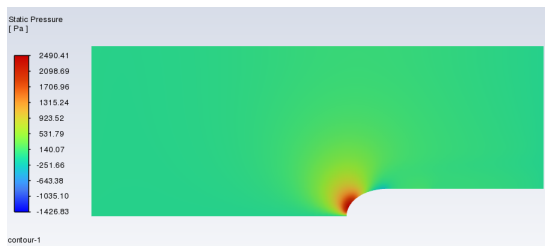


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

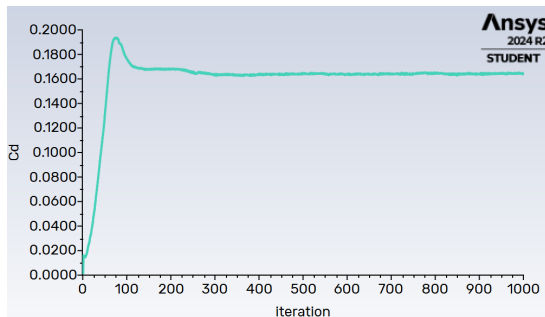
Figura E.10: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 10° .



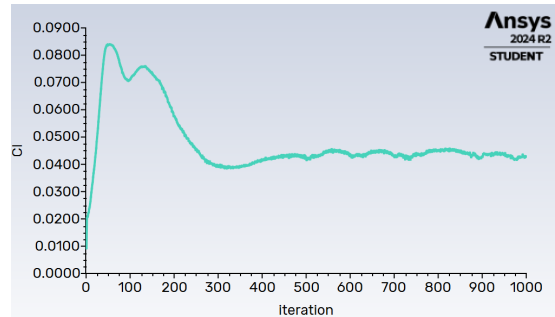
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

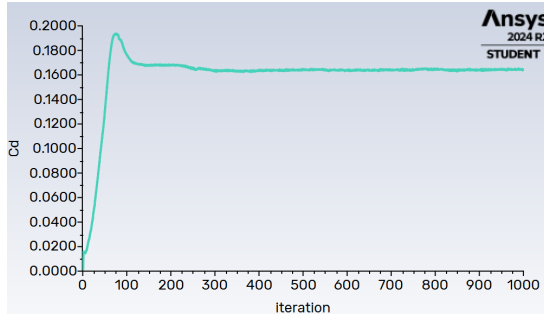
Figura E.11: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 10° .



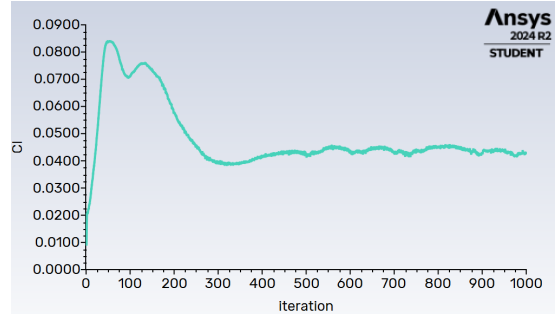
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

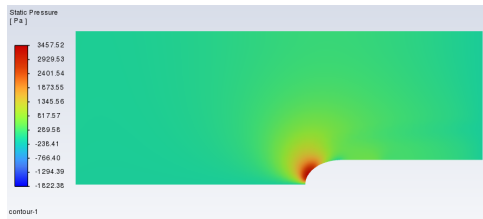


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

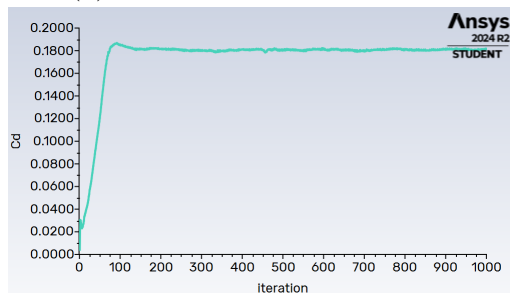
Figura E.12: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 10° .



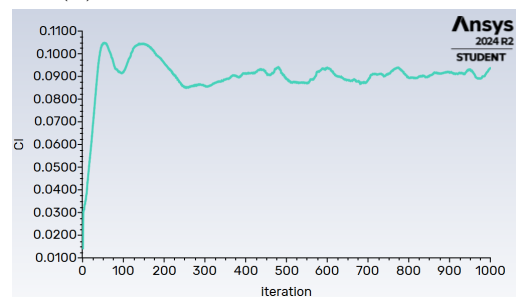
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

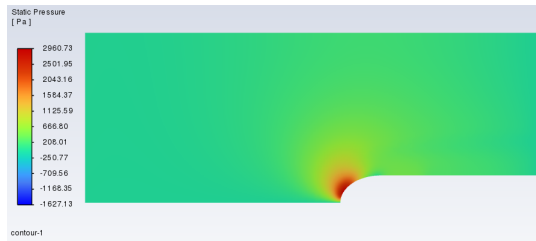


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

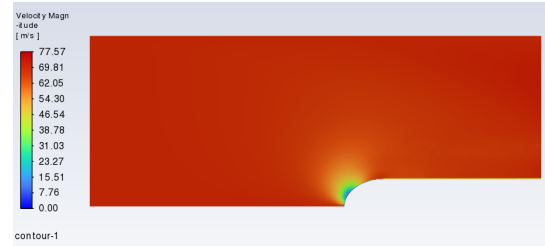


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

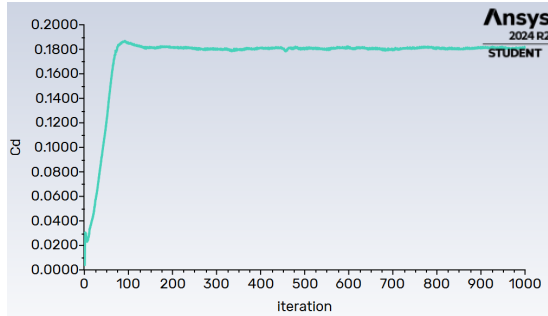
Figura E.13: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 15° .



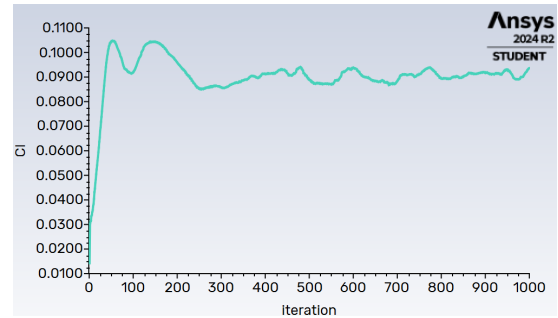
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

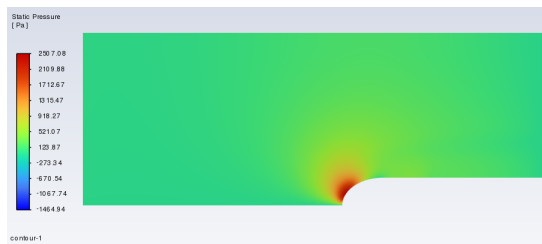


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

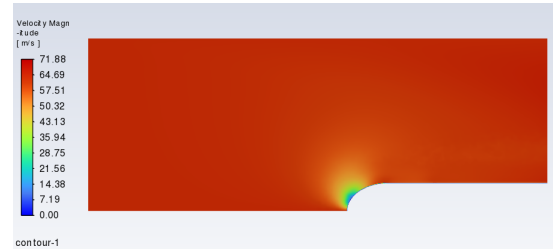


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

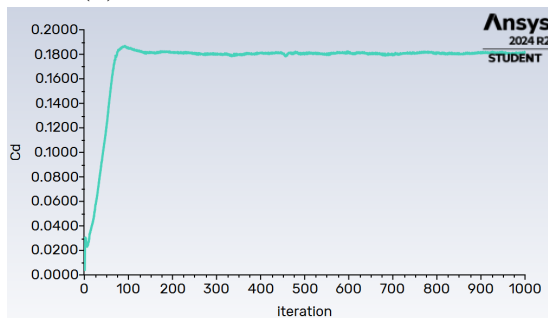
Figura E.14: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 15°.



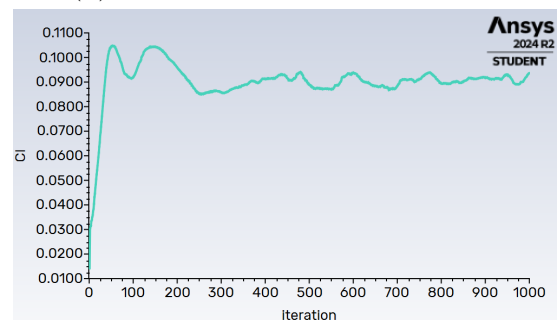
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

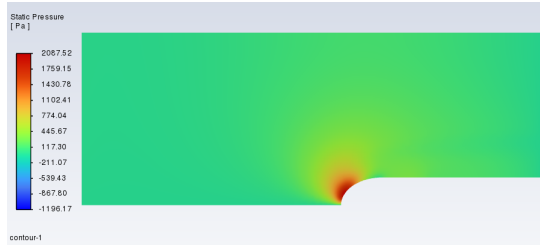


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

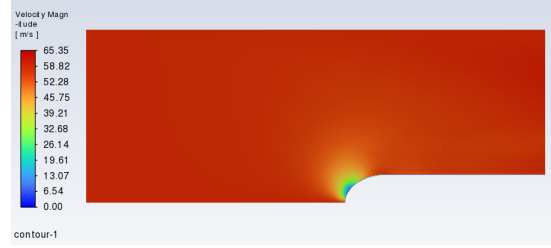


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

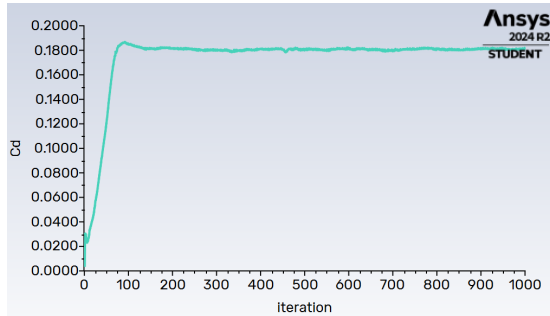
Figura E.15: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 15°.



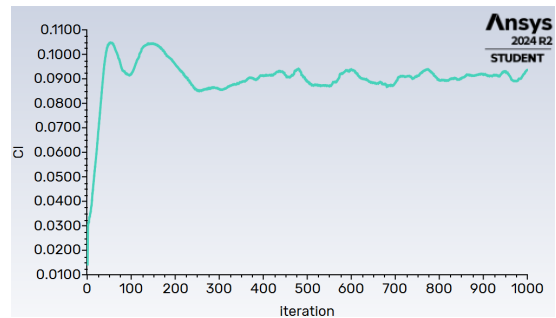
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

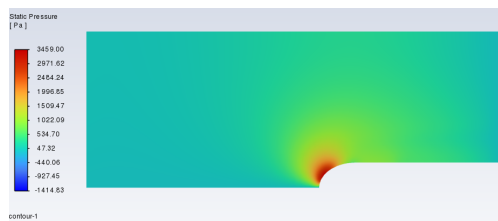


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

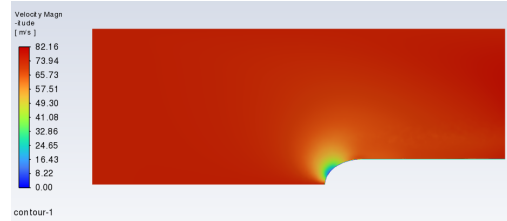


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

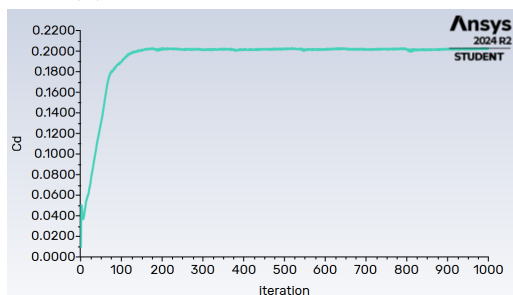
Figura E.16: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 15°.



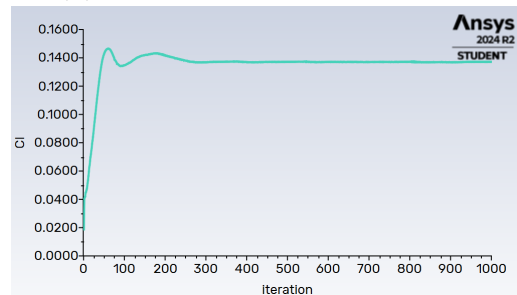
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

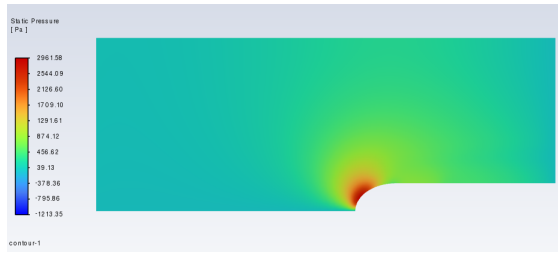


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

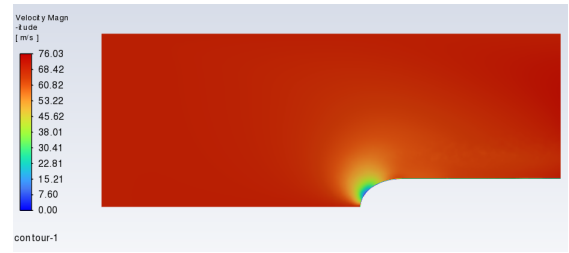


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

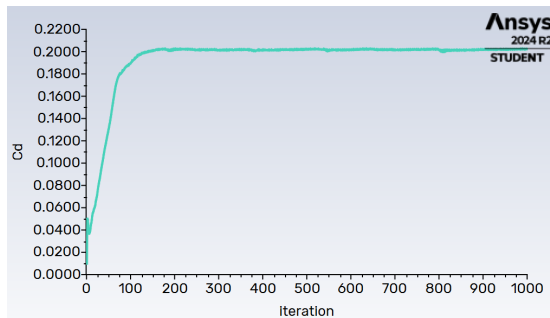
Figura E.17: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 30 km/h y ángulo de incidencia 20°.



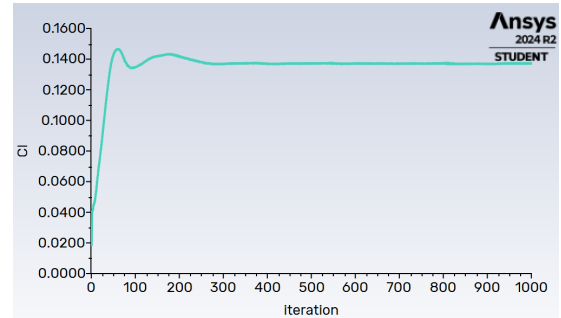
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

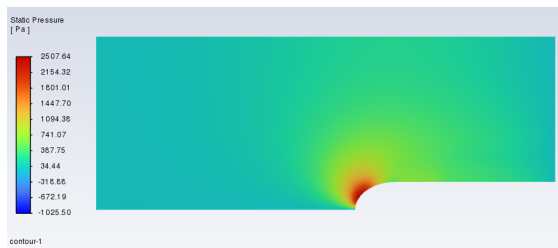


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

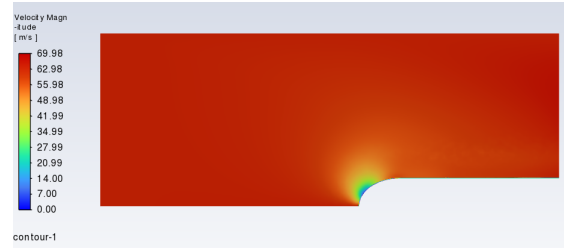


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

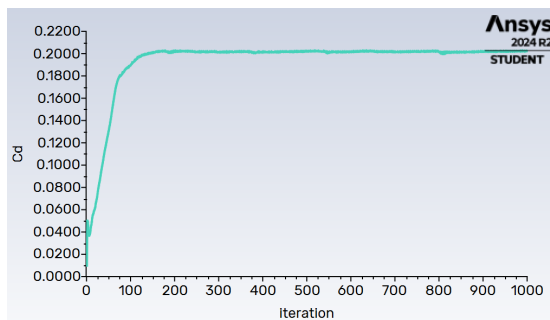
Figura E.18: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 50 km/h y ángulo de incidencia 20° .



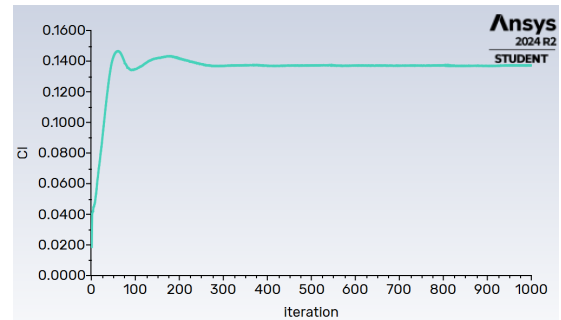
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.

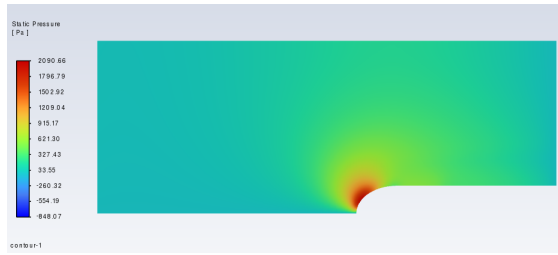


(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.

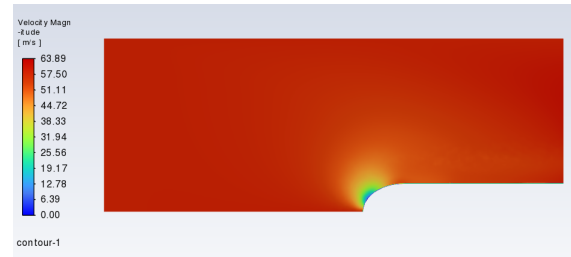


(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

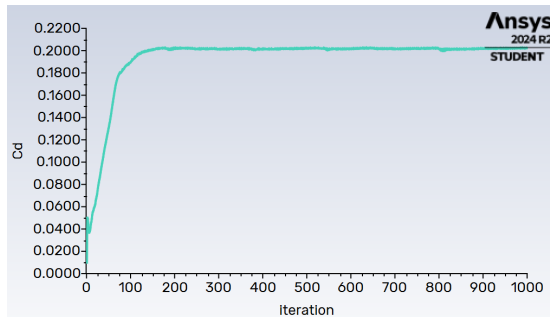
Figura E.19: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 70 km/h y ángulo de incidencia 20° .



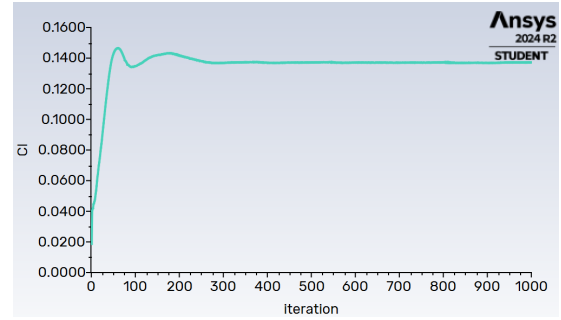
(a) Distribución de la presión.



(b) Distribución de la velocidad.



(c) Evolución del coeficiente de arrastre con el número de iteraciones.



(d) Evolución del coeficiente de sustentación con el número de iteraciones.

Figura E.20: Resultados numéricos de la simulación con un flujo de viento de 90 km/h y ángulo de incidencia 20° .