



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

Escuela Politécnica Superior de Linares

ESTUDIO AERODINÁMICO MEDIANTE SIMULACIÓN DE UN TREN DE CERCANÍAS.

Alumno: Ramón Cartas Del Molino.

Tutor: Mario Miró Barnés, María Victoria Ortega Garrido.

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2023



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Linares

Trabajo Fin de Grado

Escuela Politécnica Superior de Linares

ESTUDIO AERODINÁMICO MEDIANTE SIMULACIÓN DE UN TREN DE CERCANÍAS.

Alumno: Ramón Cartas Del Molino.

Tutor: Mario Miró Barnés, María Victoria Ortega Garrido.

Depto.: Ingeniería Mecánica y Minera

CARTAS DEL
MOLINO
RAMON -
26505520K

Firmado
digitalmente por
CARTAS DEL
MOLINO RAMON -
26505520K
Fecha: 2023.06.21
11:51:15 +02'00'

Junio, 2023

MIRO
BARNES
MARIO -
26219341
P

Firmado
digitalmente por
MIRO BARNES
MARIO -
26219341P
Fecha:
2023.06.21
15:17:27 +02'00'

Índice

Glosario de Figuras.....	5
1-Introducción	8
1.1-Prefacio.....	8
2-Aerodinámica aplicada al transporte ferroviario	9
2.1- Introducción de la aerodinámica al transporte.....	9
2.2-Primeras aplicaciones en sistemas Ferroviarios	13
2.3-Decadas 50-80 primer conocimiento de la aerodinámica.....	16
2.4-Cambio de siglo, Aerodinámica aplicada a trenes de alta velocidad.....	19
3-Elección de la velocidad de simulación.	21
4- Estudio Teórico	21
4.1-Fundamentos teóricos aplicados en el estudio de la simulación.	21
4.1.1-Número de Reynolds.....	21
4.1.2-Coeficiente de presión.....	23
4.1.3-Coeficiente de velocidad.....	23
4.1.4-Flujo Comprensible.....	23
4.1.5-Número de Match	23
4.2-Teoría de Capa Límite	24
5-Desarrollo del Sólido 3D.....	27
5.1-Influencia de forma y modelo de inspiración.	27
5.2-Creación de la forma, Autodesk Inventor Professional.....	29
5.3-Problemas en el modelaje de superficies.	39
6-Validación del Software	40
6.1-Perfil NACA-2412.....	40
6.2-Descripción de los parámetros a simular	42
6.3-Obtención de datos y validación del método.....	43
7-Conceptos iniciales sobre CFD.	56
7.1-Elección del Software Autodesk CFD.....	56
8-Estudio del sólido 3D mediante Autodesk CFD.	57
8.1- Importar el sólido y definición del dominio de control.	57
8.2-Definición de condiciones de contorno.	59
8.3-Creación de la malla computacional.....	60
8.4-Directrices a tener en cuenta para poder simular.....	63
8.5-Elección del solver y parámetros de simulación.	64
9-Obtención de datos tras la simulación.....	67
9.1-Número de Reynolds	67

9.2-Número Mach	67
9.3-Perfil de velocidades.....	67
9.4-Perfil de presiones.	72
10.-Análisis de los datos obtenidos	76
11.- Propuesta de mejora del diseño.....	78
12.-Conclusiones	82
13.-Bibliografía	83
14.-Anexo de Planos.....	84

Glosario de Figuras	
Figura 1:Estudio CFD.....	8
Figura 2:James Watt	9
Figura 3:Máquina de vapor de Watt	9
Figura 4: Benz Patent-Motorwagen.....	10
Figura 5: Camille Jenatzy y La Jamais Contente.....	10
Figura 6: A.L.F.A 40/60 HP Aerodinamica	11
Figura 7: Cadena de montaje Ford model T	11
Figura 8: Rolls Royce Phantom 1925.....	12
Figura 9: Base de Peenemünde, Usedom-Alemania.....	12
Figura 10: Schienenzeppelin en servicio	13
Figura 11: Locomotora de vapor Mallard.....	14
Figura 12: Henry Dreyfuss	14
Figura 13: Locomotora a vapor Mercury	15
Figura 14: Locomotora Mercury en servicio	15
Figura 15:Modelos Alfa Romeo B.A.T	16
Figura 16: Alfa Romeo B.A.T 5	17
Figura 17: Alfa Romeo B.A.T 7	17
Figura 18: Volkswagen XL1	18
Figura 19: Alfa romeo B.A.T 9	18
Figura 20: Shinkansen series 0	19
Figura 21: Primer modelo TVG, TVG-001	20
Figura 22:Comparativa de perfiles diferentes series TVG	20
Figura 23:Red trenes de cercanías Renfe en Andalucía	21
Figura 24: Comparativa flujo laminar-turbulento	22
Figura 25:Comportamiento del flujo con $M < 0.8$	24
Figura 26:Ludwig Prandtl.....	24
Figura 27:Vector de fuerzas en la capa límite	25
Figura 28: Cambio espesor capa limite	26
Figura 29: R-449.....	27
Figura 30:Alvia S-120	28
Figura 31:Menú principal Inventor Professional	29
Figura 32:Primeras cotas de referencia	29
Figura 33: Proceso creación superficies con arcilla de modelaje	30
Figura 34: Extrusión cotas de referencia	30
Figura 35:Primer diseño de formas	30
Figura 36:Primer diseño Perfil del tren	31
Figura 37:Dando diseño parte superior del tren	31
Figura 38:Proceso de creación laterales del tren	32
Figura 39: Proceso de forma cabeza del tren.....	32
Figura 40:Proceso de forma cabeza del tren.....	32
Figura 41: Proceso de forma laterales inferiores	33
Figura 42:Ilustración diferentes ejemplos de diseño	33
Figura 43: Acotado medidas.....	34
Figura 44: Extrusión de los laterales	35
Figura 45: Refinamiento de los laterales	35
Figura 46: Extrusión de las paredes del tren.....	35
Figura 47: Suavizado de formas laterales 1	36

Figura 48: Suavizado de formas laterales 2.....	36
Figura 49: Suavizado de formas laterales 3.....	36
Figura 50: Suavizado de formas laterales 4.....	37
Figura 51: Creación forma aerodinámica posterior	37
Figura 52: Definición forma parte posterior.....	37
Figura 53: Tren renderizado 1	38
Figura 54: Tren renderizado 2	38
Figura 55: Errores al diseñar	39
Figura 56: Detalle menú Inventor.....	41
Figura 57: Proyectado de puntos Perfil NACA	41
Figura 58: Bocetado perfil NACA.....	41
Figura 59: Perfil Naca.....	42
Figura 60: Cd experimental en función del ángulo de ataque	42
Figura 61: Creación de superficie.....	44
Figura 62: Menú principal Autodesk CFD	44
Figura 63: Ventana "Geometry Tools"	45
Figura 64: Menú del objeto Autodesk CFD	45
Figura 65: Propiedades características del Aire	46
Figura 66: Propiedades Características del Aluminio	46
Figura 67: Diagrama aplicación condiciones de contorno	46
Figura 68: Detalle del mallado	47
Figura 69: Perfil de velocidades K-epsilon	48
Figura 70: Perfil presiones K-epsilon.....	49
Figura 71: Perfil velocidades K-omega.....	50
Figura 72: Perfil presiones K-omega.....	51
Figura 73: Perfil velocidades K-omega (Hellsten)	52
Figura 74: Perfil presiones K-omega (Hellsten).....	53
Figura 75: Detalle cálculo del área	54
Figura 76: Tabla comparativa comparación de Solvers	54
Figura 77: Detalle malla refinada	55
Figura 78: Importar el tren.....	57
Figura 79: Creación dominio fluido	58
Figura 80: Detalle volúmenes creados.....	58
Figura 81: Detalle definición de la velocidad de servicio	59
Figura 82: Detalle definición presión de salida	59
Figura 83: Detalle formas de geometría de mallado.....	60
Figura 84: Situación nodos de la malla	60
Figura 85: Malla creada	61
Figura 86: Refinamiento zonas de mallado	61
Figura 87: Detalle mallado del tren	61
Figura 88: Detalle malla zona posterior del tren	62
Figura 89: Detalle malla zona de la cabeza del tren	62
Figura 90: Detalle definición "slip Symmetry"	63
Figura 91: Detalle elección solver	64
Figura 92: Detalle elección del tipo de flujo	64
Figura 93: Detalle elección de la Advección.....	65
Figura 94: Detalle valores de convergencia	66
Figura 95: Detalle de selección de iteraciones	66
Figura 96: Perfil velocidades completo	67
Figura 97: Perfil de velocidades en la zona posterior.....	68

Figura 98:Perfil de velocidades en la zona de la cabeza	68
Figura 99:Trazas de velocidad completo	69
Figura 100:Trazas de velocidad en la zona posterior	69
Figura 101:Detalle trazas de velocidad tren completo	70
Figura 102:Detalle trazas de velocidad sobre la cabeza del tren	70
Figura 103:Detalle trazas de velocidad sobre la luna del tren	71
Figura 104:Perfil de presiones completo	72
Figura 105:Perfil de presiones sobre la zona de la cabeza	72
Figura 106:Trazas de presión sobre el tren.....	73
Figura 107:Detalle trazas de presión tren completo	73
Figura 108:Detalle trazas de presión zona posterior del tren	74
Figura 109:Detalle trazas de presión sobre la cabeza del tren.....	74
Figura 110:Detalle trazas de presión sobre la luna del tren.....	75
Figura 111:Detalle ampliado trazas de velocidad zona posterior del tren.....	76
Figura 112:Detalle ampliado zona delantera del tren.....	77
Figura 113:Detalle modificación aletas	78
Figura 114:detalle frontal modificaciones	78
Figura 115:Detalle marco luna	79
Figura 116:Detalle marco de luna completo.....	79
Figura 117:Detalle trazas velocidad tras las mejoras	80
Figura 118:Ampliacion detalle trazas de velocidad en la zona posterior tras las modificaciones.....	81
Figura 119:Detalle trazas de velocidad frontal tras las modificaciones	81
Figura 120:Tabla detalle mejora.....	82

1-Introducción

1.1-Prefacio

En este trabajo de fin de grado se va a tratar el estudio aerodinámico de un tren de cercanías mediante software de simulación CFD, para ello se va a proceder con una introducción teórica sobre la aerodinámica, sus aplicaciones a lo largo de los años y los cambios que ha supuesto en el mundo ferroviario.

Tras una breve introducción y situación de contexto del trabajo de fin de grado, se intentará aportar una base teórica de fundamentos de fluido mecánica en la que se basa el trabajo el cual se va a desarrollar el estudio de simulación aerodinámica.

Asimismo, después de fundamentarse el estudio teórico abordaremos la parte más creativa del trabajo, el diseño y la realización del sólido 3D, el cual podrá observarse la inclusión de los diferentes programas CAD para sólidos y superficies que se han utilizado para el desarrollo optimo del sólido en la simulación.

Por otro lado, dejando atrás el diseño y creación del sólido, se procederá a introducirse en el estudio CFD (Dinámica computacional de fluidos) desde la elección del software a la validación del software elegido para la simulación y se realizará un primer estudio del sólido mediante el Software CFD elegido.

Siguiendo el orden establecido, se desglosarán y analizarán los datos obtenidos en la primera simulación para intentar evaluar la simulación obtenida, en contra parte se realizará una segunda simulación con diferentes mejoras aerodinámicas acometidas en el sólido.

Por último y no menos importante, se compararán los datos obtenidos de las dos simulaciones realizadas, obteniéndose una conclusión sobre los estudios realizados y cuál será la opción más óptima del “prototipo” ferroviario estudiado.

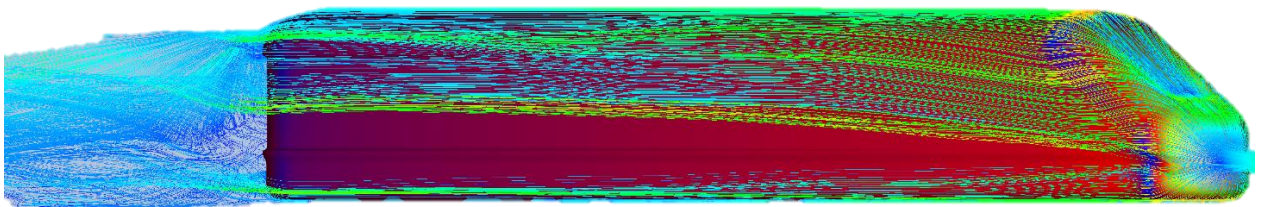


Figura 1: Estudio CFD

2-Aerodinámica aplicada al transporte ferroviario

Se introducirá una breve información de los hitos más importantes que han afectado al desarrollo de la aerodinámica aplicada al transporte.

2.1- Introducción de la aerodinámica al transporte

Durante el siglo XX y finales del siglo XIX el transporte que rodea nuestro día a día empezó a gestarse.

Uno de los primeros pilares que fundamentaron el transporte ferroviario, sería la invención de la máquina de vapor a manos de James Watt. Ésta, aunque en su creación no estaba destinada al movimiento de mercancías, tras verse su potencial empezó a probarse el en transporte de mercancías dando a ilustrar en los libros de historia las inolvidables locomotoras de vapor que tanto hicieron crecer a la vieja Europa.

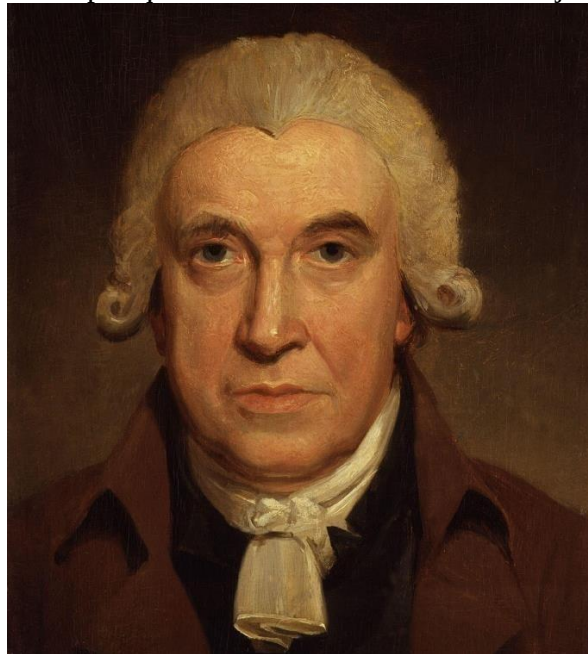


Figura 2:James Watt

Sin olvidarnos, años después de la creación de la máquina de vapor y su puesta en funcionamiento a través de sistema ferroviario en el transporte de mercancías.



Figura 3:Máquina de vapor de Watt

En la ciudad de Mannheim-Alemania, se estaba fraguando una de las patentes más importantes que han cambiado la forma de desplazarse, el automóvil con motor de combustión interna a manos de Karl Friedrich Benz.

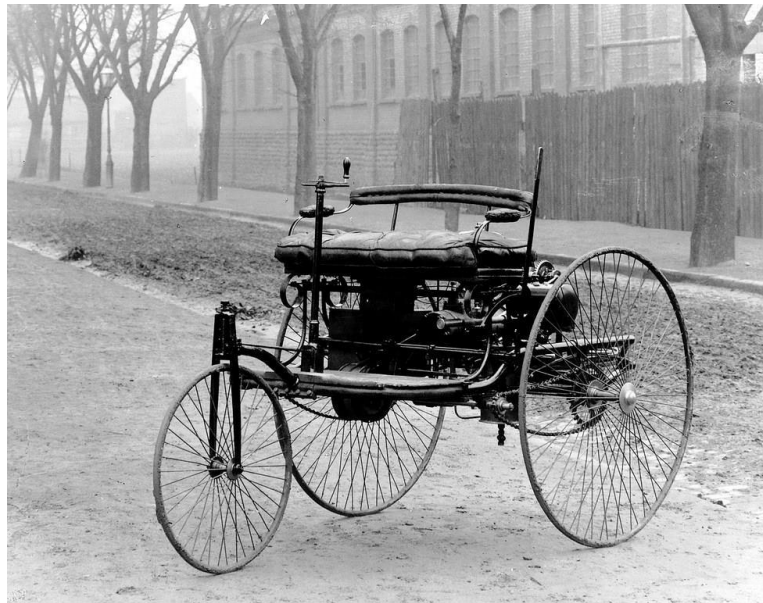


Figura 4: Benz Patent-Motorwagen

A través del coche de combustión interna y el impacto que este desarrolló en las masas, competiciones, rallies, grandes premios...etc. Poco a poco las formas aerodinámicas en los automóviles van tomando forma.

El primer automóvil que consta que incluyó formas aerodinámicas en su carenado, sería expuesto al público en el 1899, denominado como “La Jamais Contente” construido por el fabricante Camille Jenatzy.



Figura 5: Camille Jenatzy y La Jamais Contente

El automóvil, con un diseño en forma de torpedo llegó a alcanzar una velocidad punta de *100 km/h*, este hito para la época fue un gran avance ya que se empezó a vislumbrar las formas aerodinámicas con el rendimiento del automóvil.

Años más tarde, ya entrados en el siglo XX el afamado, aunque en esa época pequeño fabricante Alfa Romeo. En el año 1914 presentó el alfa 40/60 HP Aerodinamica.



Figura 6: A.L.F.A 40/60 HP Aerodinamica

Con un chasis exterior construido con aluminio, sus formas aerodinámicas incluían reminiscencias de la industria aeronáutica.

El carenado exterior que fue construido por el carrocista Castagna, hacía de envoltorio sobre el chasis simulando la forma de un perfil de aviación, con esta geometría de diseño exterior, pudieron poner a prueba el rendimiento del vehículo alcanzando una velocidad punta de *139 km/h* lo cual se batió los récords de velocidad anteriormente establecidos.

Tras el paréntesis tecnológico sucedido por la primera guerra mundial, la inclusión del Model T de Ford y la fabricación en cadena. El automóvil llegó para establecerse como un producto de masas.



Figura 7: Cadena de montaje Ford model T

Los fabricantes debían de ofertar un producto para todos los públicos, con ciertas comodidades y rendimiento, es en este punto donde los fabricantes empiezan a incorporar los diseños aerodinámicos en sus productos.

En este periodo, la implementación de desarrollos aerodinámicos en el carenado de los automóviles no tenía una base teórica probada, los fabricantes implementaban formas suaves, geometrías curvas prevaleciendo la fácil manufactura inspirados en la influencia de la época de *“Los felices años 20”*.



Figura 8: Rolls Royce Phantom 1925

No es hasta los años 30, donde se empiezan a probar los diferentes prototipos tanto de la industria del automóvil como de la aeronáutica en túnel de viento. Con el desarrollo tecnológico acontecido en Alemania tras el estallido de la segunda guerra mundial, en el noreste de Alemania, en la isla de Usedom se creó el primer túnel de viento supersónico para estudios aerodinámicos.

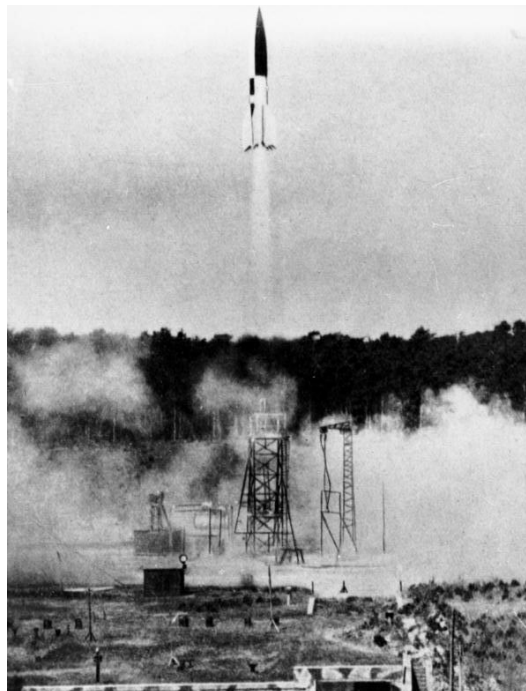


Figura 9: Base de Peenemünde, Usedom-Alemania

2.2-Primeras aplicaciones en sistemas Ferroviarios

Ya entrados en la década de los años 30, la etapa de desarrollo en el sistema ferroviario era más que notable, la mayoría de líneas ferroviarias trabajaban con locomotoras que su velocidad de conexión rondaba los 160km/h . Este aumento de la velocidad estaba acometido por la necesidad del aumento de pasajeros tras la gran depresión y el auge del abandono del entorno rural para la búsqueda de empleo hacia las capitales europeas.

Los ingenieros se llegaron a preguntar en cómo podrían reducir la resistencia que ejercía el aire en la forma que tenían los trenes, la respuesta más obvia era a través de la aerodinámica.

Como se ha puntualizado anteriormente, la aerodinámica era muy influenciada por las corrientes artísticas de la época, de hecho, a lo largo de la historia podemos ver una fuerte conexión entre carrocerías e innovaciones aerodinámicas como Giugiaro, Pininfarina, Bertone y Zagato.

El primer tren aerodinámico que se utilizó para conectar dos ciudades, se puso en servicio en 1931 en Alemania, llamado Schienenzeppelin conectaba la ruta de Berlín-Hamburgo. En sus inicios se desarrolló con propulsión posterior de motor de aerodeslizador el cual, gracias a las palas situadas en la zona posterior de la cabeza motriz, llegaba a alcanzar una velocidad de 230 km/h , una velocidad relativamente muy alta para la época. Posteriormente se diseñó con un sistema de propulsión convencional para reducir costes, el cual pudo alcanzar una velocidad punta más que aceptable de 180 km/h .

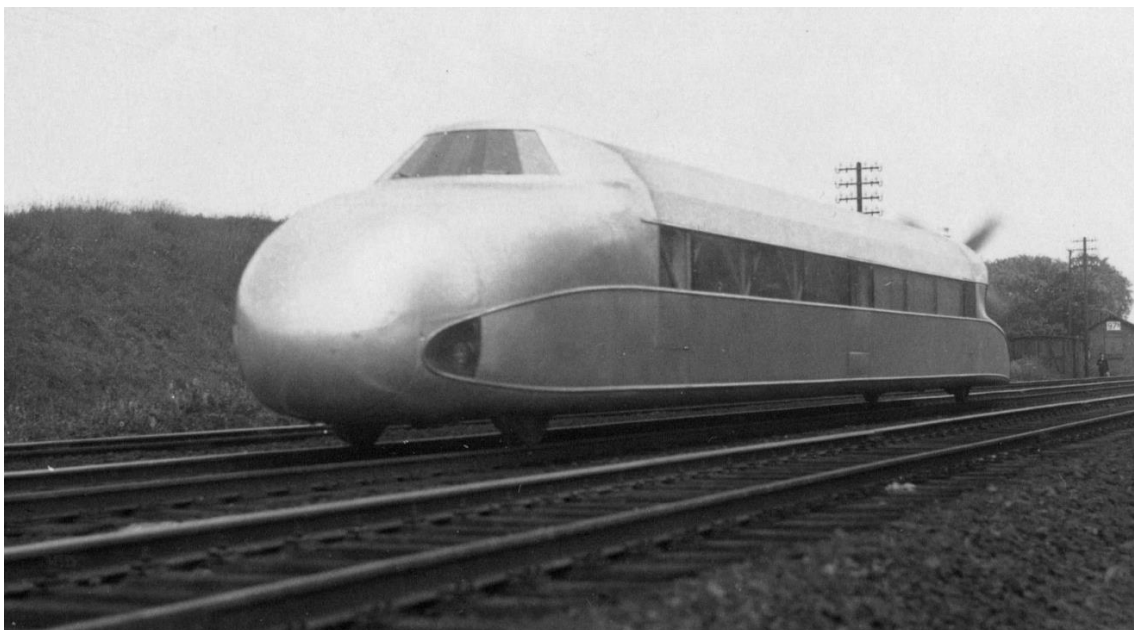


Figura 10: Schienenzeppelin en servicio

A finales de la década en el 1938, situándonos en las islas británicas aparece la locomotora Mallard. Esta locomotora, aunque todavía una locomotora propulsada a vapor marca un precedente en lo que desarrollo aerodinámico se refiere.



Figura 11: Locomotora de vapor Mallard

La continuidad de las curvas y formas aerodinámicas se hacen presentes en la estructura del carenado de la locomotora, con estas implementaciones se consigue obtener una velocidad punta de 203 km/h.

Es cierto que ya se superaban con creces esas velocidades puntas en otros sistemas ferroviarios, pero con otros sistemas de propulsión, el precedente de que una locomotora de propulsión a vapor consiguiera esas mediciones de velocidad sentaba de fundamento a la aerodinámica como una vía de innovación.

A su vez en estados unidos, influenciado por la nueva vertiente artística de la época “Streamline moderne”. La ciudad de Nueva York encarga al diseñador industrial Henry Dreyfuss la remodelación de su parque ferroviario.

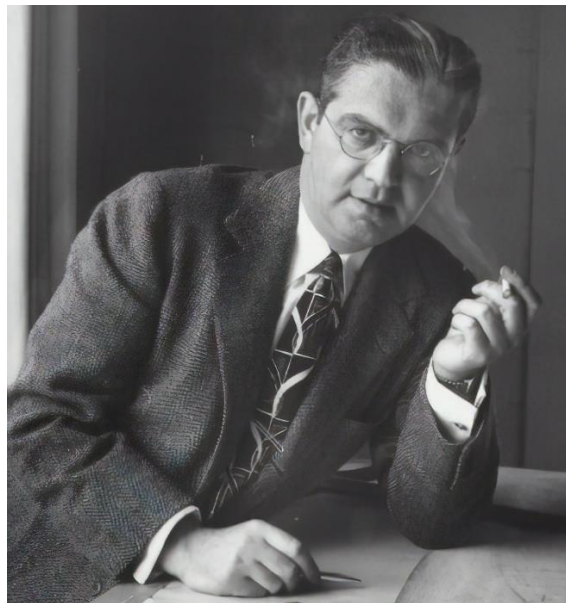


Figura 12: Henry Dreyfuss

Henry Dreyfuss ya era conocido en Estados Unidos por su arte y diseño en la inclusión de elementos cotidianos, de la unión de la compañía central de ferrocarriles de Nueva York y Dreyfuss nace el tren Mercury.



Figura 13: Locomotora a vapor Mercury

La línea de trenes Mercury estuvieron en funcionamiento desde finales del 1938 hasta finales de la década de los 50, este diseño supuso una innovación para el diseño de la época, en sus orígenes su forma de construcción emulando una sola pieza metálica con formas suaves, redondeadas y líneas horizontales tenía como objetivo ocultar la estructura de la locomotora (tuberías, vértices...etc.) y los diferentes elementos que pudieran sobresalir.



Figura 14: Locomotora Mercury en servicio

Aquella forma de cuerpo metálico a simple vista muy aerodinámico, daría como resultado una locomotora con unas mediciones de velocidades entorno 120-130 km/h.

2.3-Decadas 50-80 primer conocimiento de la aerodinámica

A la mitad del siglo XX ya se sabe que el estudio de la aerodinámica, es un estudio fundamental en el desarrollo y fabricación de vehículos, es en estos años donde el estudio de la aerodinámica se normaliza bajo los ensayos de túnel de viento para poder aprovechar el máximo rendimiento del diseño.

A manos de Alfa Romeo en el mundo del automóvil, a finales de la década de los 50 se proyectan una serie de berlinas denominadas B.A.T (Berlinetta Aerodinamica Tecnica) a la casa de diseño Bertone. La idea que tenía en mente Alfa Romeo con la casa Bertone era producir una serie de 3 prototipos conceptuales para estudiar los efectos de arrastre en un automóvil.



Figura 15: Modelos Alfa Romeo B.A.T

La idea era crear el automóvil con menor coeficiente de arrastre (C_d), contruidos sobre el chasis del Alfa Romeo 1900, el primero de estos 3 prototipos fue presentado en el 1953 en el Salón del Automóvil de Turín.

El BAT 5 al ser presentado en público, suscitó bastantes opiniones favorables en su diseño, el diseño se fundamentó en los estudios de aerodinámica fusionando grandes frontales con aletas curvas. Su objetivo de diseño del frontal era eliminar la interrupción del flujo de aire a altas velocidades.



Figura 16: Alfa Romeo B.A.T 5

Consecutivamente dos años más tarde en 1954 y 1955, Alfa romeo presentó los dos siguientes vehículos conceptuales de la serie, el BAT 7 (1954) y el BAT 9 (1955).

El BAT 7, presentado en el Salón del Automóvil de Turín fue el vehículo de la serie que más desarrollo aerodinámico experimentó.

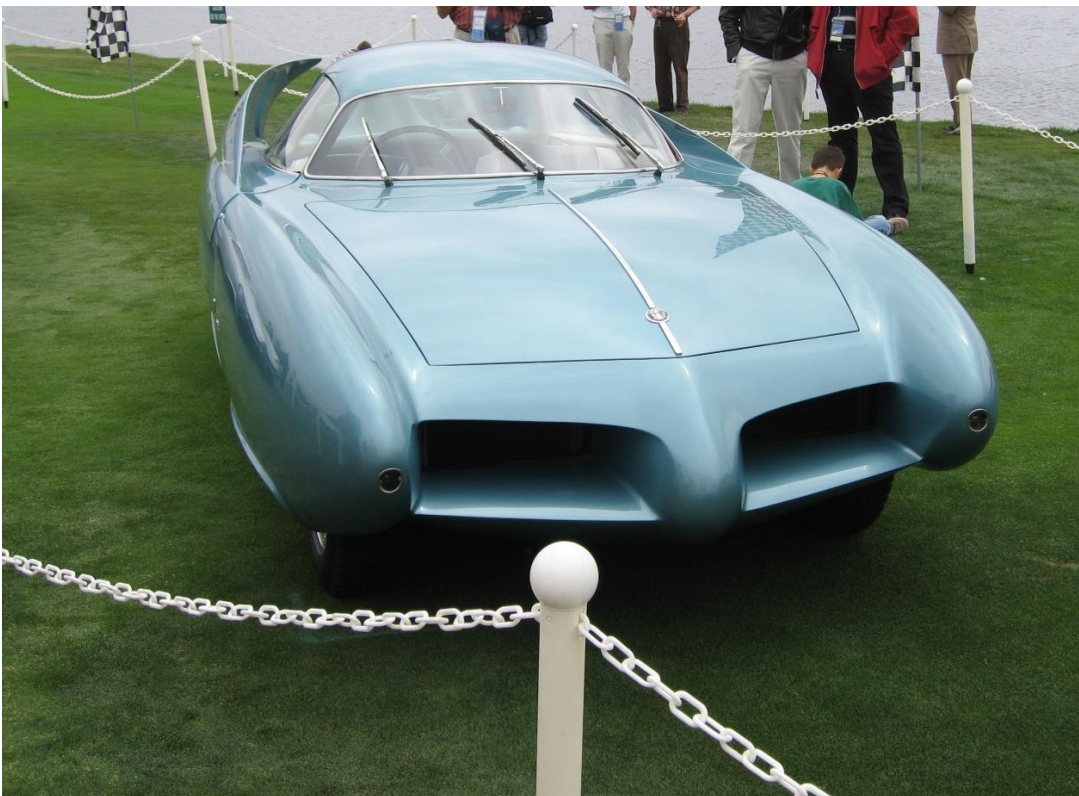


Figura 17: Alfa Romeo B.A.T 7

Se modificó la posición de los faros alojados en el frontal y se pronunciaron de manera considerable las aletas características presentadas en el modelo anterior, tanto es que este diseño influyó el desarrollo del diseño aerodinámico que se llegó a obtener un coeficiente de arrastre (C_d) igual a 0.19. Para hacerse una idea de este valor en esa época,

el Volkswagen XL1(2013) comparte el mismo Coeficiente de arrastre (C_d) que el BAT 7.



Figura 18: Volkswagen XL1

Tristemente cuando el BAT 9 (1955) fue presentado en el Salón del Automóvil de Turín, la idea que tenía en mente Alfa Romeo era producir un vehículo en serie tras ver los avances significativos que habían conseguido en el campo de la aerodinámica, pero debido a un cambio de aires en la compañía todo se quedó archivado en el recuerdo.



Figura 19: Alfa romeo B.A.T 9

En el campo ferroviario, concretamente en la década de los 60 en Japón surge una nueva forma evolucionada que cambiará el transporte ferroviario sin precedentes, la aparición del Shinkasen.

La primera plataforma del Shinkasen, denominada serie 0, entró en servicio en el corredor de Tokaido desde octubre de 1964 hasta 2008 donde se retiraron las ultimas unidades de servicio. La serie 0 combinaba un desarrollo aerodinámico con unos rendimientos excepcionales, en sus formas combinaban formas compactas sin vértices que pudieran erosionar el rendimiento aerodinámico.



Figura 20: Shinkasen series 0

En su diseño se fusionó un frontal de cabeza de flecha redondeada con un deflector para redirigir el flujo de viento hacia los laterales del cuerpo del tren, también en la parte posterior de cada vagón se instalaron pequeñas aletas en el exterior para evitar vorticidad y redirigir el flujo de aire. Con todos estos avances se consiguió una velocidad máxima de servicio en el corredor de Tokaido de 220 km/h. Esta marca fue un precedente en el sector ferroviario en Japón, ya que el Shinkasen estaba propulsado únicamente por electricidad.

2.4-Cambio de siglo, Aerodinámica aplicada a trenes de alta velocidad

Tras la puesta en servicio del Shinkasen en Japón, en Europa se suscitó bastante interés en implementarse el mismo medio de transporte, ya fuera por su efectividad como por su velocidad de servicio.



Figura 21: Primer modelo TVG, TVG-001

El principal país europeo que se embarcó en la innovación y desarrollo de un tren de alta velocidad fue Francia con su denominado TGV (Train à Grande Vitesse), la serie TGV Sud-Est que estuvo en funcionamiento desde 1978 hasta 2021, conectaba la capital del país, París con Lyon.

En la serie TGV como en la mayoría de los diseños de trenes de alta velocidad, el diseño aerodinámico se basa en mantener un perfil lo más bajo posible.

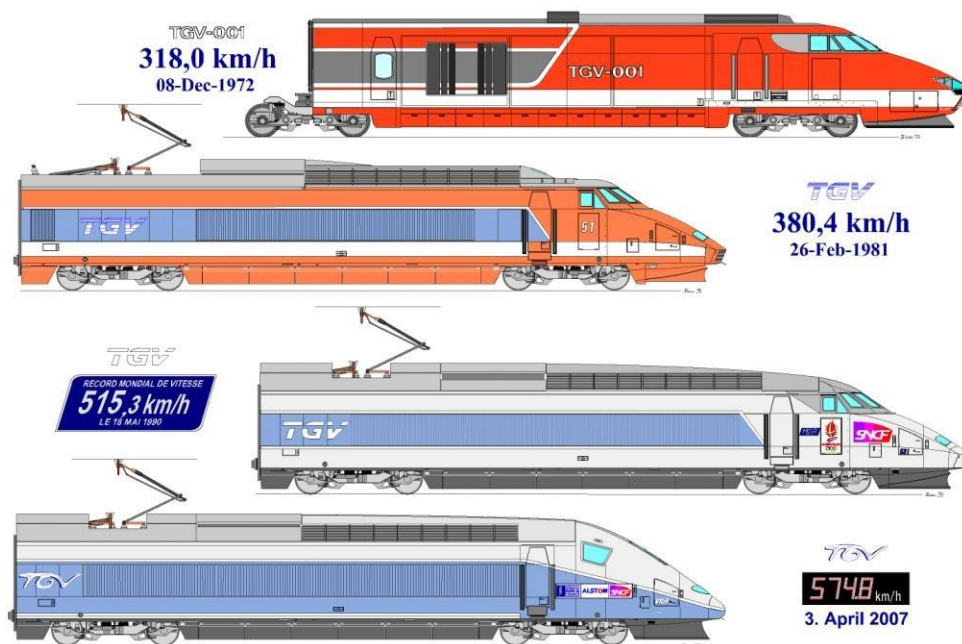


Figura 22: Comparativa de perfiles diferentes series TVG

Como se puede apreciar el frontal del TGV Sud-Est presenta formas anguladas para poder desplazar el aire con el menor arrastre posible, esto se debe a que en estas configuraciones de sistemas la velocidad de servicio se establece en 270 km/h y posteriormente tras una reforma en mitad de su ciclo de vida en 300 km/h .

3-Elección de la velocidad de simulación.

Según la velocidad máxima que facilita Renfe, sus trenes de cercanías tienen una velocidad máxima de servicio de 160 km/h , en concreto el modelo Automotor Eléctrico 449.



Figura 23: Red trenes de cercanías Renfe en Andalucía

Para este trabajo de fin de grado se ha probado con una simulación de velocidad de 120 km/h . Esto se debe, ya que los trenes de cercanías al estar destinados a conectar medias distancia como ciudades dormitorio a no más de 30 km , el rango de velocidad de servicio variará entre $50\text{-}160 \text{ km/h}$, la cual por ese motivo se ha llegado a la conclusión de simular una velocidad intermedia de servicio real.

4- Estudio Teórico

4.1-Fundamentos teóricos aplicados en el estudio de la simulación.

4.1.1-Número de Reynolds.

Uno de los primeros pasos que hay que tener en mente para poder hacer una simulación aerodinámica, es saber con qué flujos se va a trabajar.

La diferencia de elección entre un flujo laminar y un flujo turbulento nos puede diferir de obtener una simulación lo más cercana a la realidad, el Número de Reynolds nos puede ayudar a decidir cuál de los flujos, si laminar o turbulento es mejor para obtener unos resultados óptimos en nuestra simulación.

El Número de Reynolds según su definición describe, es la medida física entre la relación de las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas en un fluido en movimiento, no hace falta decir que esta medida es uno de los parámetros con más relevancia en el campo de la dinámica de fluidos por eso este trabajo de fin de grado se va a tener en cuenta para la valoración de los datos de simulación obtenidos.

El Número de Reynolds mostrado en su forma adimensional nos relaciona el producto de la densidad (ρ), la velocidad del fluido (v), diámetro de la tubería o altura de la sección (d) entre el cociente de la viscosidad dinámica (μ).

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

Según *Ingeniería Fluido mecánica de Paraninfo*(5) para el valor del Número de Reynolds, se puede hacer una clasificación orientativa sobre la naturaleza del flujo que estamos simulando:

-Cuando $Re < 2300$ consideraremos que estamos tratando con un **flujo laminar**.

-Cuando Re obtiene valores intermedios, $2300 < Re < 4000$ consideraremos que estamos tratando con un **flujo transicional**.

-Cuando $Re > 4000$ consideraremos que estamos tratando con un **flujo turbulento**.

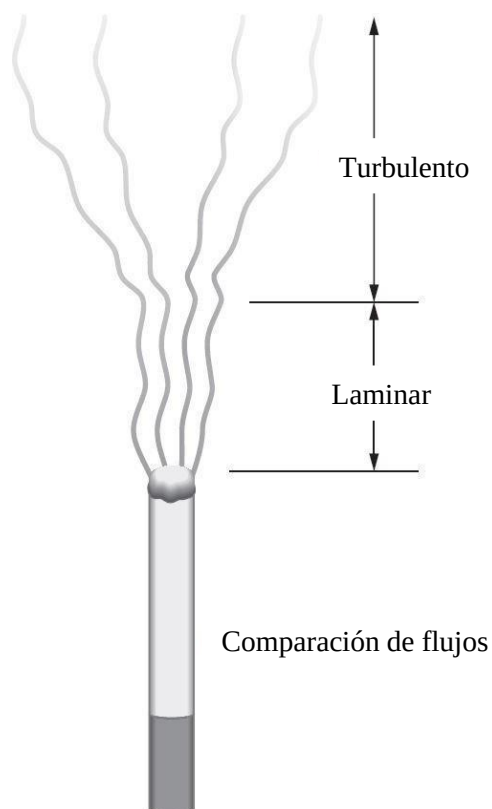


Figura 24: Comparativa flujo laminar-turbulento

4.1.2-Coeficiente de presión

El coeficiente de presión es un número adimensional que nos puede describir la presión relativa de un objeto a través de un dominio de fluido.

Se define como:

$$C_p = \frac{p - p_r}{0.5 \cdot \rho v^2}$$

Donde según *Train Aerodynamics Fundamentals and Application, Elsevier(1)*, Podemos definir p como la presión en la superficie del sólido, p_r como la presión de referencia del sólido (a lo largo del tren).

4.1.3-Coeficiente de velocidad

El coeficiente de velocidad se define como un número adimensional donde en nuestro caso, según *Train Aerodynamics Fundamentals and Application, Elsevier(1)*, asocia el cociente de la componente de velocidad que vamos a estudiar entre la velocidad media del tren

$$C_v = \frac{v_i}{V}$$

Donde decimos que i , es la componente de la velocidad x, y o z a estudiar y V la velocidad media a la que trabaja el tren.

4.1.4-Flujo Comprensible

Definiendo flujo comprensible, es aquel que en condiciones normales presenta variación de volumen, por lo tanto cambios en su densidad (ρ).

Originalmente (depende del propósito y las condiciones de trabajo) los flujos incomprensibles se asocian a los líquidos por su naturaleza y los gases como flujos comprensibles. En este trabajo de fin de grado se ha definido en todo el dominio que actúa sobre el tren, como elemento de simulación el aire.

Se va simular con la velocidad intermedia de 120 km/h esta velocidades va ha repercutir en diversos cambios de presión sobre las paredes del sólido por eso se ha decidido de escoger para esta simulación la caracterización de flujo turbulento.

4.1.5-Número de Match

Se define Número de Match como el cociente entre la velocidad de nuestro objeto de referencia (v_o) y la velocidad del aire (v_a)

$$M = \frac{v_o}{v_a}$$

Una de las maneras de clasificar y subdividir los diferentes flujos aerodinámicos, es basándonos en la distinción del Número de Match, según

Fundamentos de Aerodinamica de MCgrawhill(4), el Número de Match (M) puede dividirse en 3 grupos diferentes:

- Flujo subsónico, si $M < 1$
- Flujo sónico, si $M = 1$
- Flujo supersónico, si $M > 1$

El cual en este trabajo de fin de grado se van a tratar con valores de $M < 1$ al estar simulando con velocidades por debajo de la velocidad del sonido.

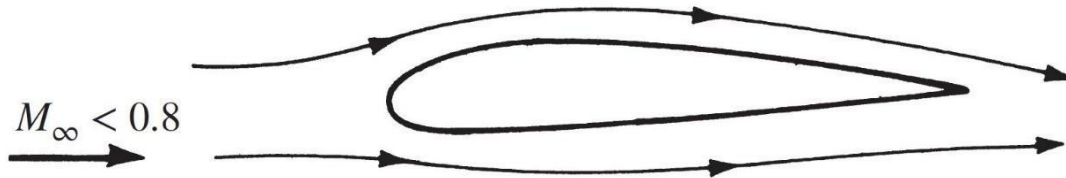


Figura 25:Comportamiento del flujo con $M < 0.8$

Generalmente se considera flujo subsónico los flujos que proyectan líneas de influencia sobre el objeto suaves, sin desarrollar discontinuidades. Para cuerpos esbeltos se puede considerar que si el número de Match (M) está entre los valores $1 > M > 0.8$ se sitúa el flujo en un flujo subsónico.

4.2-Teoría de Capa Límite

En 1904 el ingeniero y físico alemán Ludwig Prandtl planteó por primera vez la teoría de capa límite en el campo de la aerodinámica.



Figura 26:Ludwig Prandtl

El concepto teórico que supuso Prandtl, estableció un gran avance sobre el análisis aerodinámico de sólidos, desde este momento se empezaron a tratar las regiones de dominio fluido alejadas del cuerpo como fluidos no viscosos, ya que no actuaban sobre la superficie del sólido y por lo tanto no proporcionaban fricción, en cambio a la fina región inmediatamente adyacente que hacía de envolvente sobre el sólido, la definiría como fluido con carácter viscoso en la cual se incluyen efectos disipativos.

Esa fina región la denominaría Capa límite y en sus estudios planteó los efectos de continuidad del flujo que hacen efecto sobre el sólido a estudiar.

En función del Número de Reynolds, ya mencionado anteriormente, la capa límite se puede clasificar como laminar o turbulenta al igual que el flujo.

Generalidades que se pueden dar en la capa límite:

- Cuando la capa límite tiene un espesor muy delgado, siempre se cumplirá que el espesor δ será mucho menor que la distancia al inicio de la superficie a estudiar(x).

- El espesor, aumentará con tendencia hacia abajo, cumpliéndose siempre que $\delta \ll x$.

- El contorno de velocidades de la capa límite, satisfecerá la condición de no-slip(*deslizamiento*) en la pared.

- Siempre habrá que considerar los esfuerzos cortantes sobre la superficie del sólido a estudiar.

- Las streamlines (*líneas de corriente de flujo*) que albergan en el interior de la capa límite, se considerarán paralelas a la superficie del sólido.

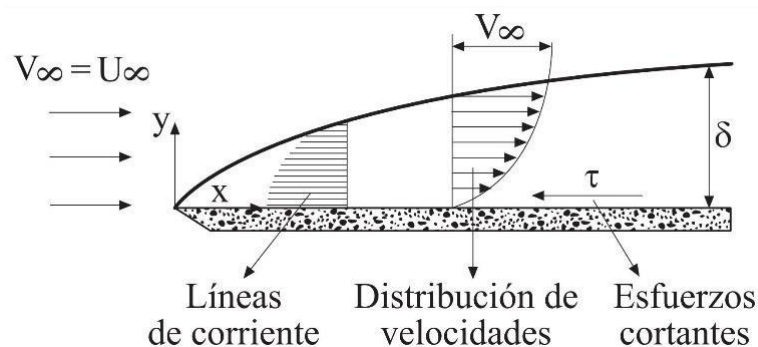


Figura 27: Vector de fuerzas en la capa límite

Entre los efectos que ejerce la capa límite sobre el flujo, se debe destacar la desviación de las streamlines (*líneas de corriente de flujo*). A su vez, el caudal másico circundante a la zona donde reside la capa límite decrece, ya que la velocidad del fluido

en ese punto de la superficie es menor a la que subsiste fuera de los dominios de la capa límite.

Para poder determinar estos dos efectos, se va a exponer el concepto de espesor de desplazamiento, que se puede expresar como la distancia que se desplazan las streamlines (líneas de corriente de flujo) debido a la existencia de la capa límite.

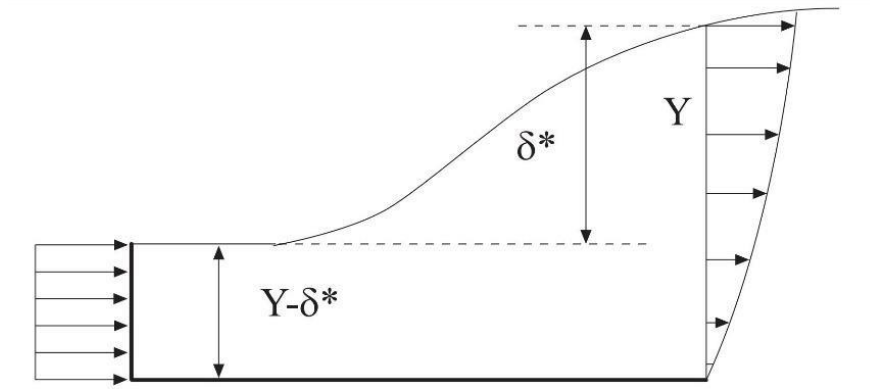


Figura 28: Cambio espesor capa limite

Procediendo a realizar un balance de masa a partir del flujo sin perturbaciones y el flujo que abarca los dominios de la capa límite, se obtiene:

$$\int_0^y \rho u dy = \int_0^{y-\delta^*} \rho V_\infty dy$$

$$\int_0^y u dy = V_\infty (y - \delta^*)$$

$$\delta^* = y - \int_0^y \frac{u}{V_\infty} dy = \int_0^y dy - \int_0^y \frac{u}{V_\infty} dy = \int_0^y \left(1 - \frac{u}{V_\infty}\right) dy$$

Sabiendo que $u = V_\infty$ para valores de $y \geq \delta$, se deduce:

$$\delta^* = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{V_\infty}\right) dy$$

Expresión que define el espesor del desplazamiento de la capa límite a partir de la distribución de velocidades que actúa en la sección de un sólido dado.

5-Desarrollo del Sólido 3D

Se intentará desglosar un desarrollo detallado de la creación del solido 3D(tren) mediante técnicas CAD.

5.1-Influencia de forma y modelo de inspiración.

Cuando pensamos en la forma de un tren nos pueden venir a la cabeza diferentes formas, entre ellas debemos escoger la que a simple vista pueda diseñarse con los medios finitos de partida que se dispongan, tanto de forma computacional como de experiencia adquirida en las diferentes asignaturas de diseño que nos aporta el grado.

Las influencias de la forma para el desarrollo de cualquier prototipo vienen dadas por la función/funciones que van a desarrollar y la inspiración del diseñador, en este caso el estudiante de ingeniería.

Para poder desarrollar una idea clara sobre qué tipo de diseño se quería plasmar en el diseño CAD, se procedieron a visualizar los diferentes diseños actuales de trenes que hay en el mercado ferroviario. En una forma coincidían todos, se desprendían de formas angulosas y vértices, suavizando sus aristas lo máximo posible. Esto se debe en gran parte a que la mayoría de fabricantes ferroviarios, sea Talgo, CAF,Almston ...etc. han incluido un meticuloso estudio aerodinámico en sus diseños para reducir lo máximo posible el coeficiente de arrastre (C_d) de sus productos.

En concreto el primer diseño que se va a simular, se ha basado sobre todo en dos conceptos de trenes actualmente en servicio a manos de RENFE.

-Automotor Eléctrico 449 (R-449)

-Alvia S-120

Se van a proceder a exponer las respectivas características técnicas y de desarrollo de forma aerodinámica que acontece a cada modelo.

El automotor Eléctrico 449 o en su forma abreviada R-449, esta serie de vehículos ferroviarios ha sido fabricada por el fabricante CAF, inicialmente fue proyectada para renovar la flota de media distancia de RENFE.



Figura 29: R-449

La velocidad máxima de servicio de este tren según valores de la ficha técnica proporcionada por RENFE es de 160 km/h, con una aceleración media entre 0 y 160 km/h de 0.30 m/s².

Sobre la forma y diseño aerodinámico, podemos citar la información que incluye RENFE en su ficha técnica: *“En su imagen exterior dominan las líneas curvas, incluyendo un testero con perfil aerodinámico, un ventanal corrido a lo largo de todo el tren, carenados en el techo y faldones para cubrir el bajo bastidor”*.

Se ha de decir que tanto el material de construcción del carenado exterior y la estructura interna, están íntegramente construidas con Aluminio.

Sobre el Alvia S-120, se puede hablar de un vehículo con más desarrollo tanto tecnológico como aerodinámico.

El Alvia S-120 comenzó su trayectoria de servicio en 2006, este tren a diferencia del R-449 es un tren que trabaja en conexiones de alta velocidad, de hecho su velocidad máxima de servicio según ficha técnica de RENFE va desde los 220 km/h hasta los 250 km/h(según el ancho de vía).



Figura 30:Alvia S-120

Construido por el fabricante CAF pero con motor propulsor del fabricante Alstom, en su construcción se han utilizado dos tecnologías para aportar rigidez y reducir peso de la cabina como el uso de aleaciones ligeras de aluminio para la estructura de la cabina y la inclusión de resinas fenólicas para el revestimiento de techo y paredes.

En concreto, el desarrollo aerodinámico proporcionado por el fabricante CAF, citando la descripción técnica que realiza RENFE en su ficha técnica: *“Su diseño tiene en cuenta conceptos aerodinámicos y de resistencia al avance...Los costados tienen una ligera curvatura para mejorar la estética”*.

En definitiva, como podemos apreciar tras exponer la información que nos proporciona RENFE en sus fichas técnicas se puede decir que los dos trenes parten de un estudio aerodinámico, pero al acercarse a los regímenes de la alta velocidad estas incorporaciones se hacen más notables.

5.2-Creación de la forma, Autodesk Inventor Professional.

Teniendo en mente el tren que se quiere diseñar, se va a comenzar con la creación del sólido en Autodesk Inventor Professional.

En este paso, lo primero que se va a intentar explicar con breves pinceladas será el menú de inicio del software de simulación 3D ya que aunque el programa es muy intuitivo se deben de tener ciertos conceptos claros para acometer el diseño de la forma más optima posible.

Al inicio de éste nos encontraremos con el primer menú del programa, que a simple vista, en la barra superior estarán albergadas todas las herramientas que podemos utilizar para el diseño mecánico de sólidos.

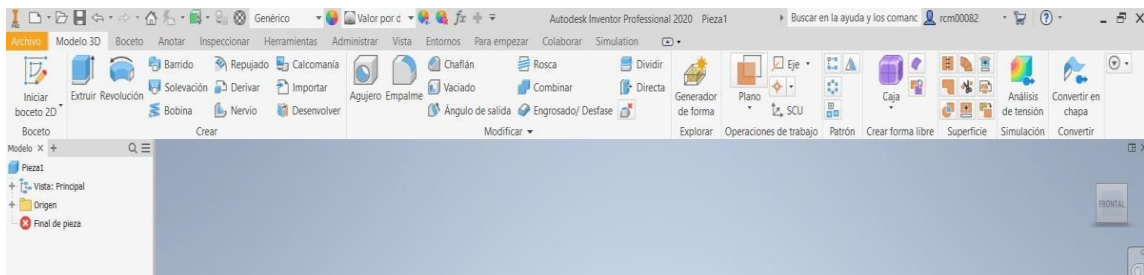


Figura 31:Menú principal Inventor Professional

En este trabajo de fin de grado, sobre todo se va a centrar en los menús superiores de boceto, modelo 3D y anotación.

Uno de los primeros pasos con la que se ha procedido en el diseño, es con una forma muy básica bocetando unas dimensiones básicas de largo y altura que tendrá el sólido.



Figura 32:Primeras cotas de referencia

Las medidas son orientativas, según respetando los diferentes largo y altura de los trenes actuales.

A continuación, se creará un sólido con las dimensiones dadas anteriormente, la idea de la creación de este sólido es utilizarlo como si fuera una base de arcilla para poder modelarlo a nuestro criterio.



Figura 33: Proceso creación superficies con arcilla de modelaje

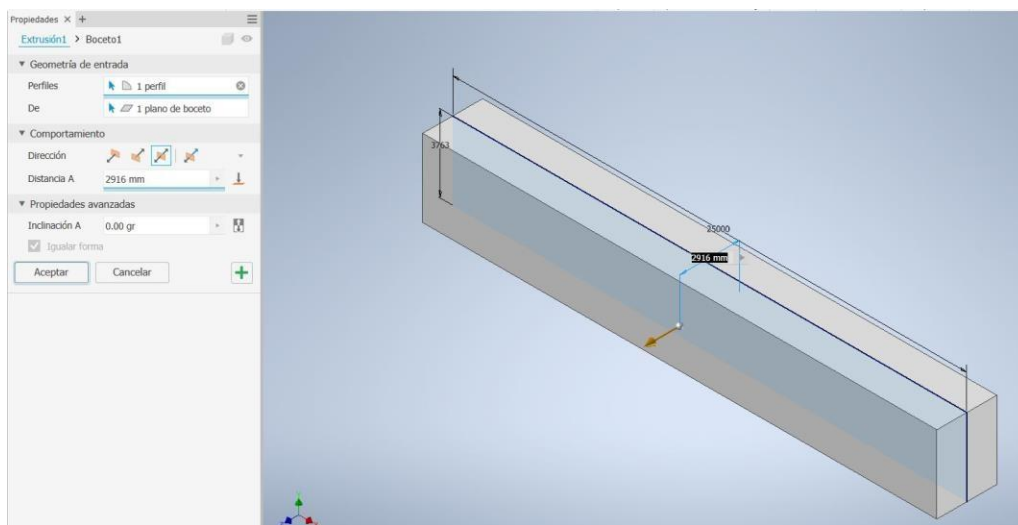


Figura 34: Extrusión cotas de referencia

El siguiente paso a partir de este punto, será empezar con el modelaje de la forma del tren con las influencias ya mencionadas anteriormente.

Lo primero a lo que se intentará dar forma, será al diseño redondeado característico del Alvia S-120.

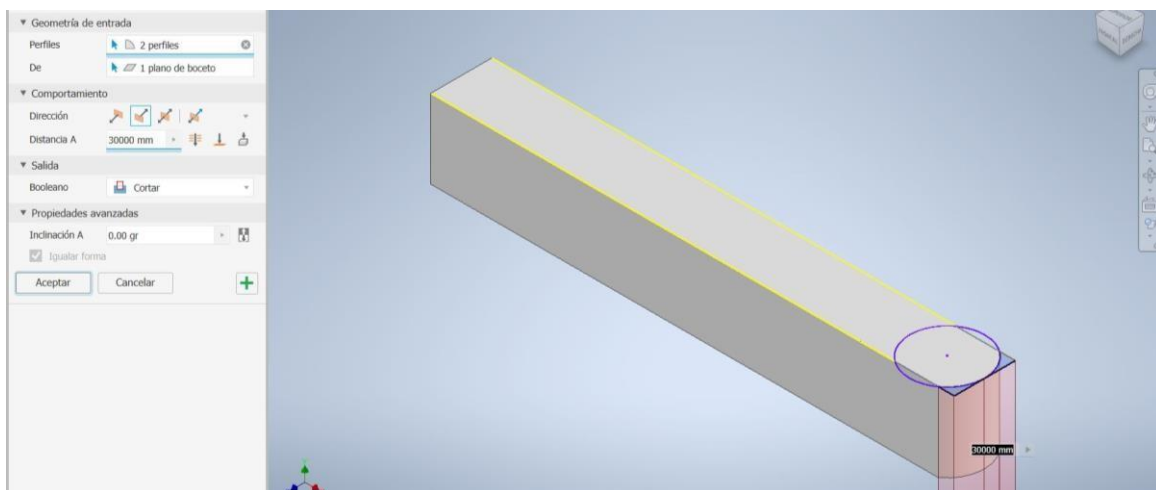


Figura 35: Primer diseño de formas

Para intentar darle forma, se ha hecho uso de la herramienta *extrusión*, la cual en este caso su función reside en extraer y eliminar material para poder adquirir las formas de diseño.

En el siguiente paso, también se utilizará la herramienta *extrusión*, la cual ayudará a seguir eliminando material para esta vez darle forma a la inclinación de la cabeza motriz.

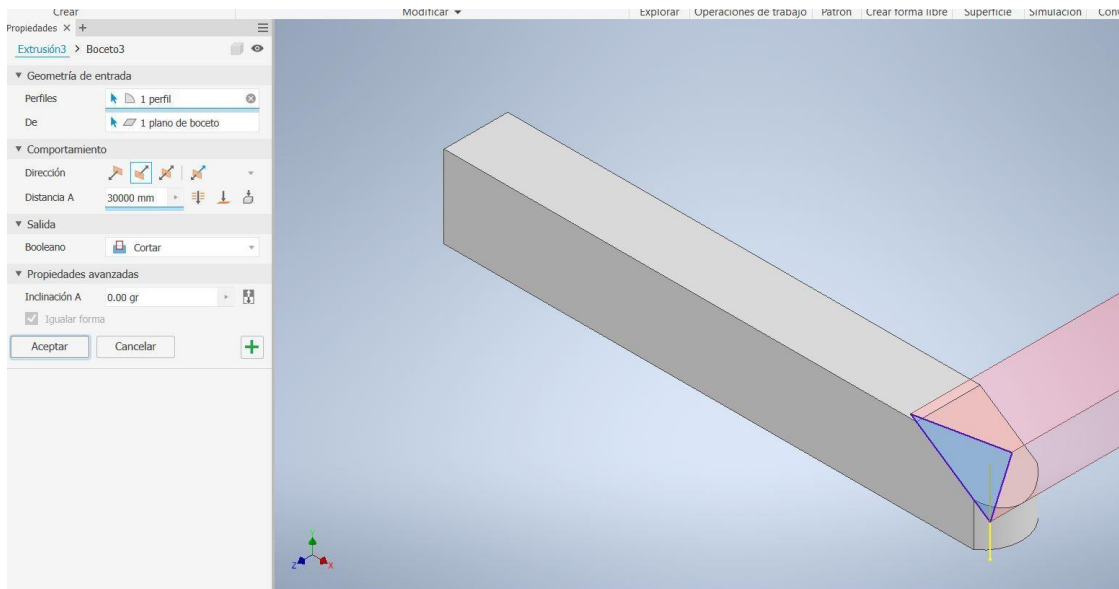


Figura 36:Primer diseño Perfil del tren

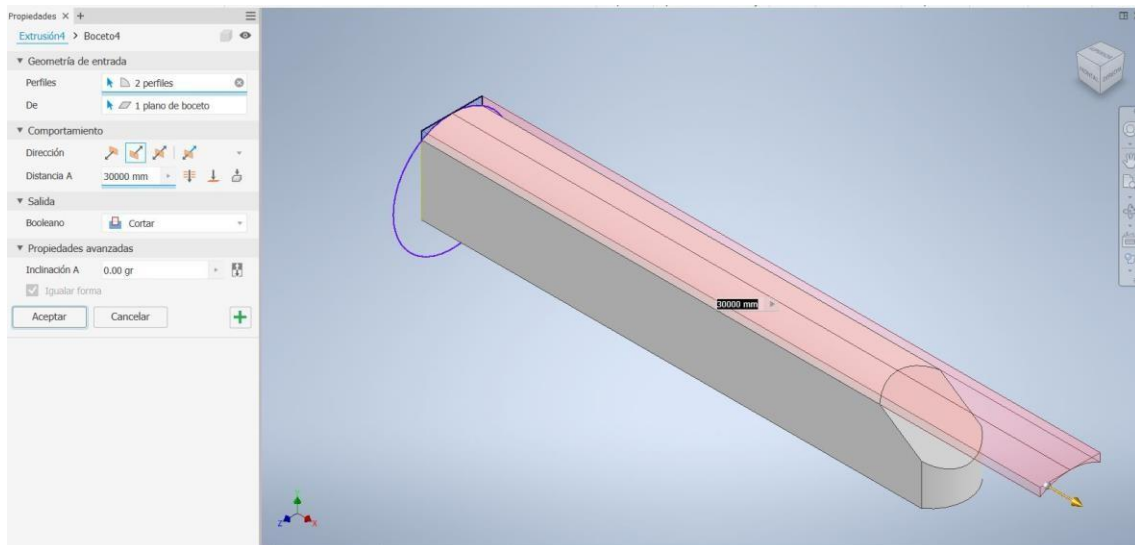


Figura 37:Dando diseño parte superior del tren

Como se puede apreciar en los pasos brevemente explicados, si se tiene un conocimiento extenso del programa y la forma en mente que se quiere conseguir, las acciones de desarrollo a través de Inventor profesional pueden darse con bastante facilidad.

A partir de los pasos acometidos anteriormente, se tiene una forma muy básica de lo que sería el diseño de un tren, quedaría darle un toque de refinamiento de superficies para incrementar la calidad de los detalles y forma del vehículo ferroviario.

Se utilizará la herramienta del menú modelo 3D *empalme*, esta herramienta se puede utilizar con mucha versatilidad, en este caso se ha utilizado para el desarrollo de las superficies, aunque en sus orígenes se defina para redondear vértices.

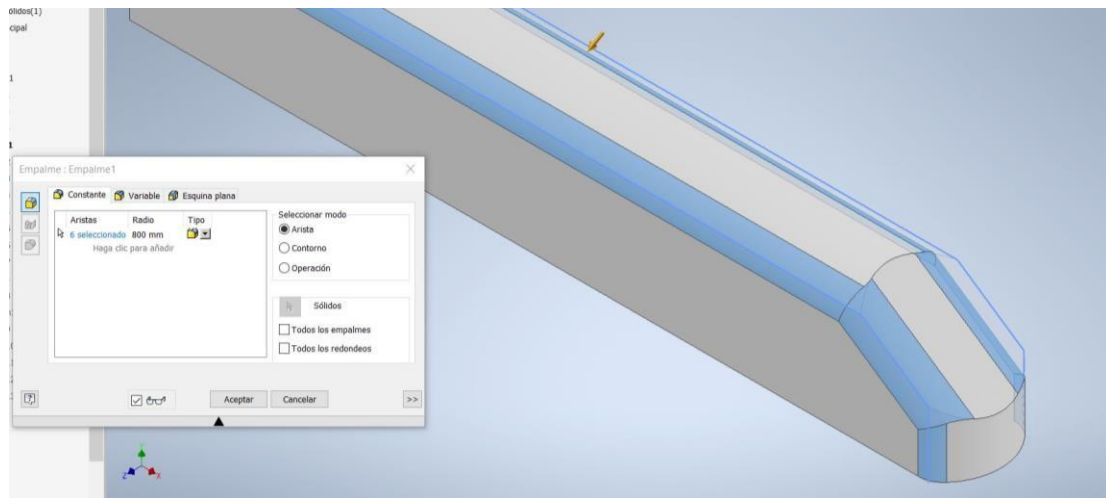


Figura 38:Proceso de creación laterales del tren

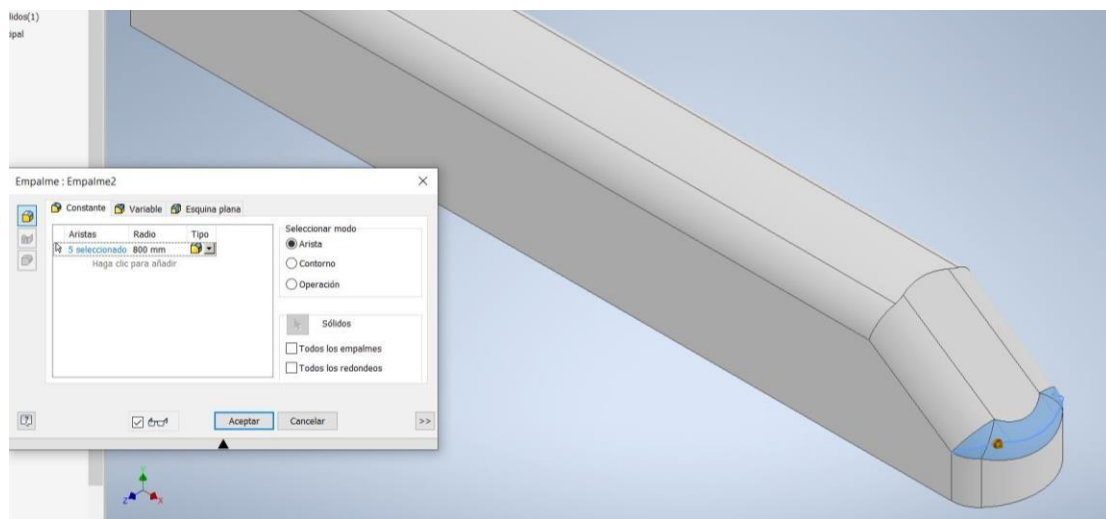


Figura 39: Proceso de forma cabeza del tren

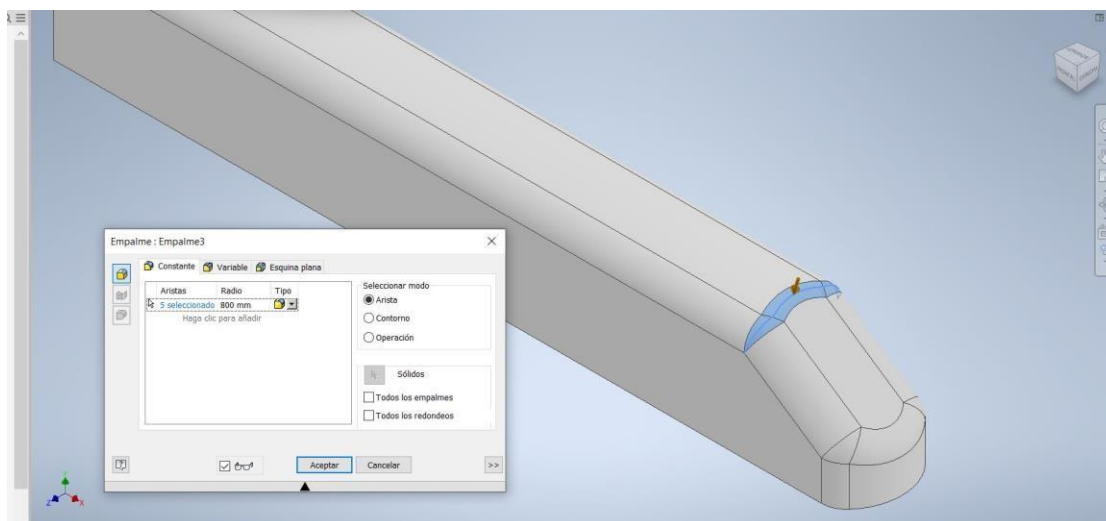


Figura 40:Proceso de forma cabeza del tren

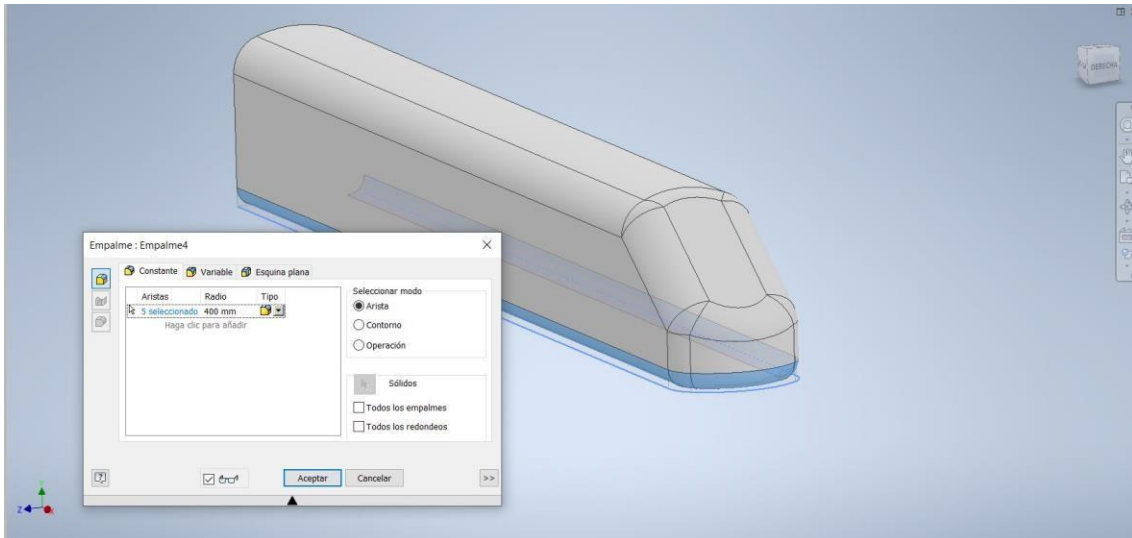


Figura 41: Proceso de forma laterales inferiores

Básicamente, tras hacer el uso de la herramienta empalme y su optima aplicación se consiguen unas formas muy definidas y optimas de modelado de superficie.

En los siguientes pasos se van a incrementar el desarrollo de modelaje en la superficie, para intentar modelar el tren de una forma esbelta con similitudes a los diferentes diseños que hay en producción.

Una parte fundamental es el cristal de la luna delantera, muy característico a simple vista en cualquier diseño de tren actual.



Figura 42: Ilustración diferentes ejemplos de diseño

A través de las diferentes herramientas ya mostradas, se procederá a realizar un diseño trapezoidal, el cual va a dar forma de luna delantera del tren.

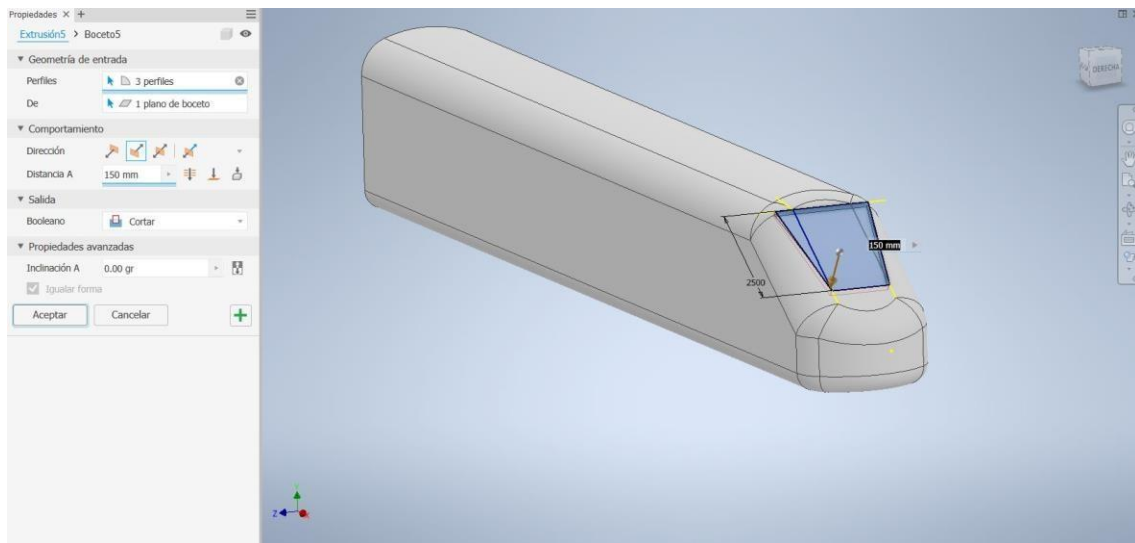
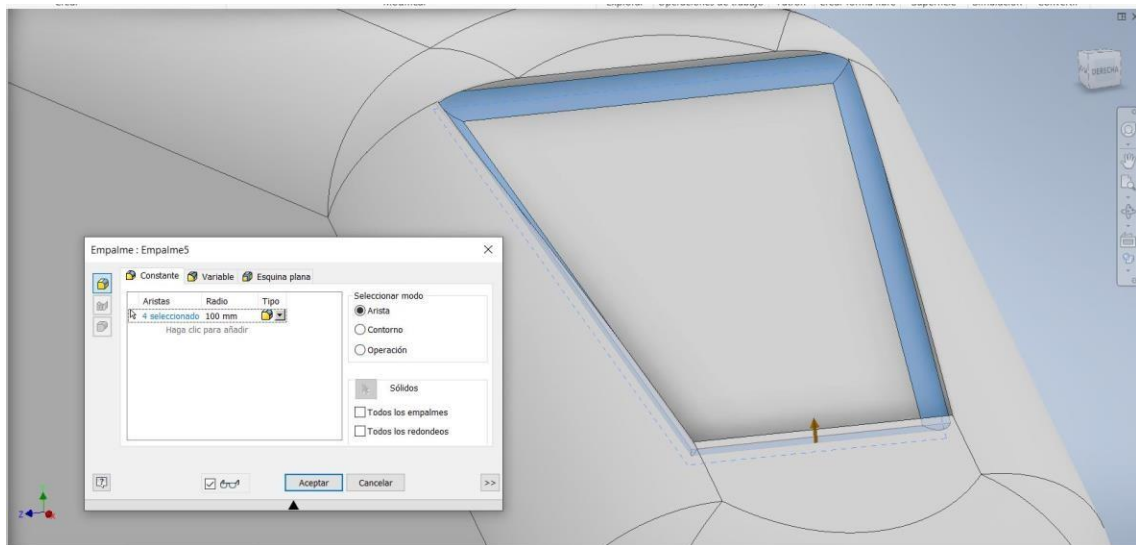


Figura 43: Acotado medidas

Y a través de la herramienta empalme se van a suavizar los bordes de los marcos donde se aloja el cristal , para intentar evitar que dichas zonas tenga un perfil aerodinámico alto.



El tren en su forma básica está definido y podríamos comenzar con la simulación. Antes de comenzar con la simulación se ha querido refinar la forma de los laterales del tren, ya que como ha quedado constancia anteriormente, en manos del diseño se buscan las formas más aerodinámicas posibles.

Se procede a exponer como se ha intentado dar forma aerodinámica a los laterales del mismo.

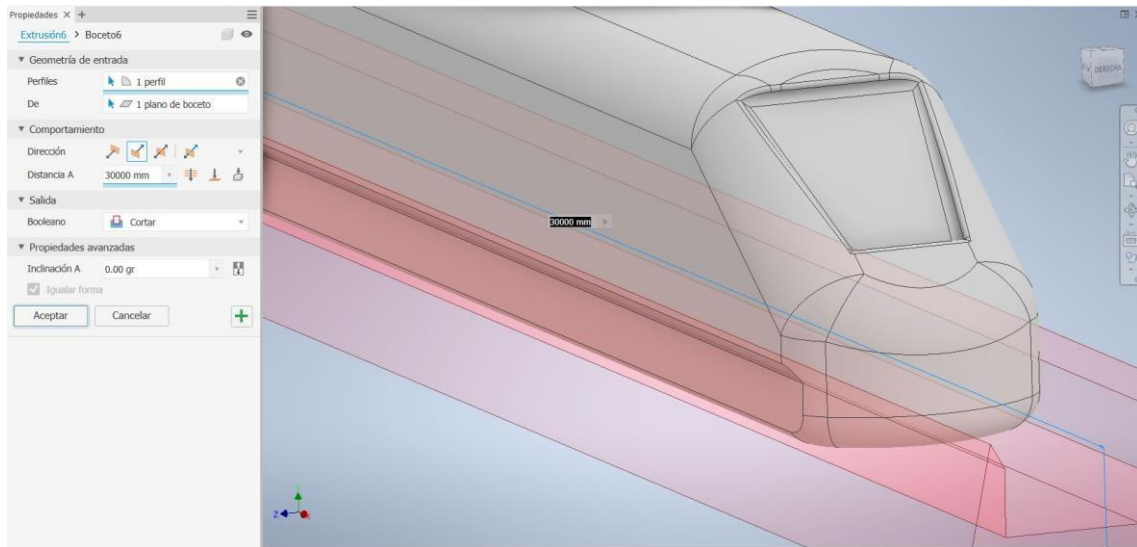


Figura 44: Extrusión de los laterales

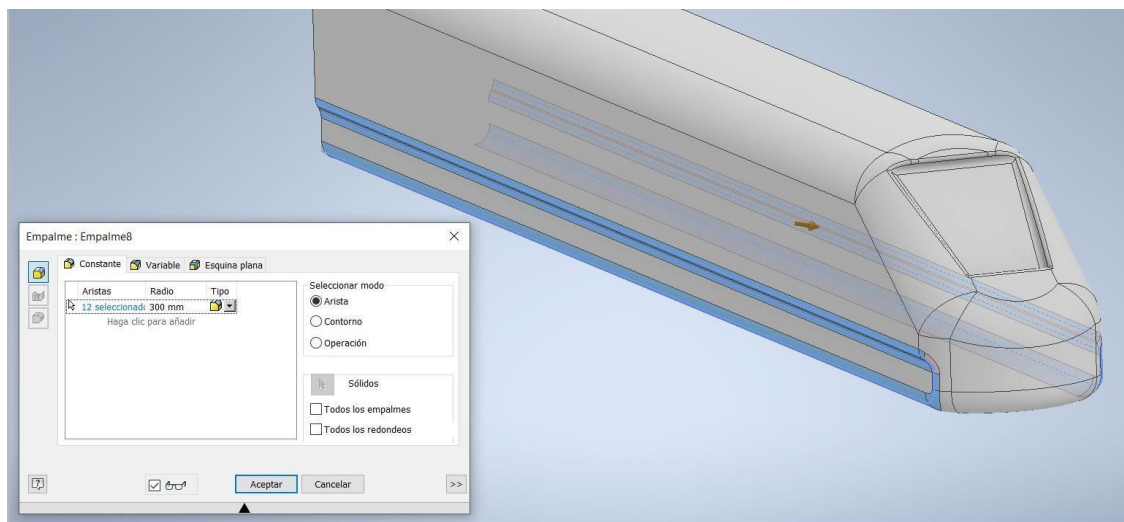


Figura 45: Refinamiento de los laterales

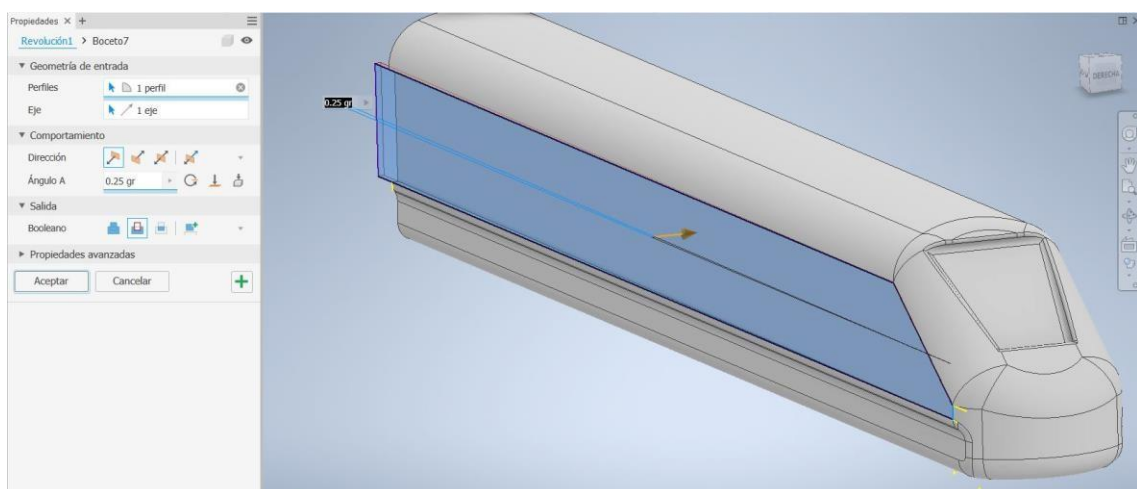


Figura 46: Extrusión de las paredes del tren

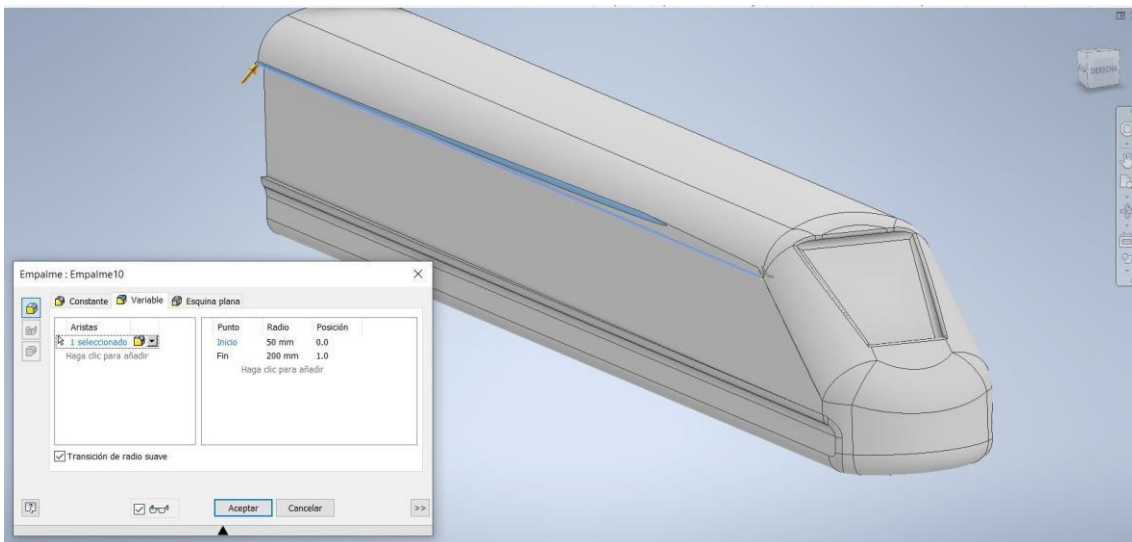


Figura 47: Suavizado de formas laterales 1

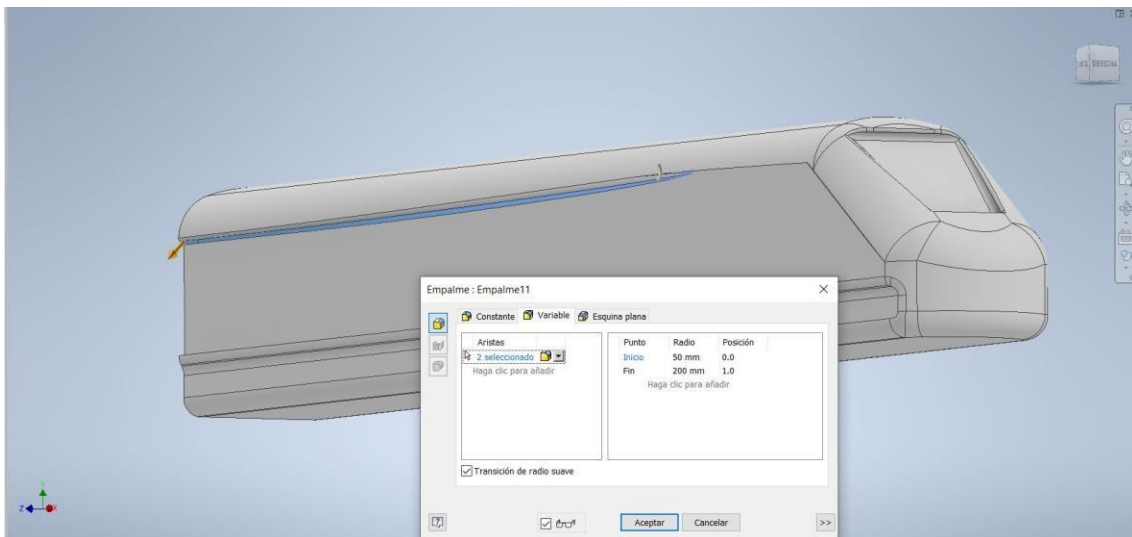


Figura 48: Suavizado de formas laterales 2

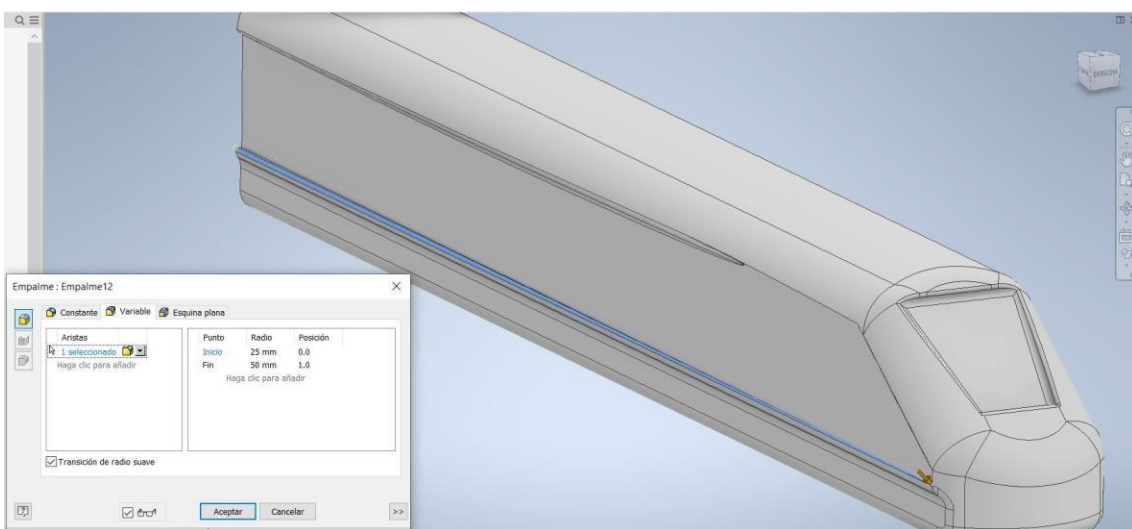


Figura 49: Suavizado de formas laterales 3

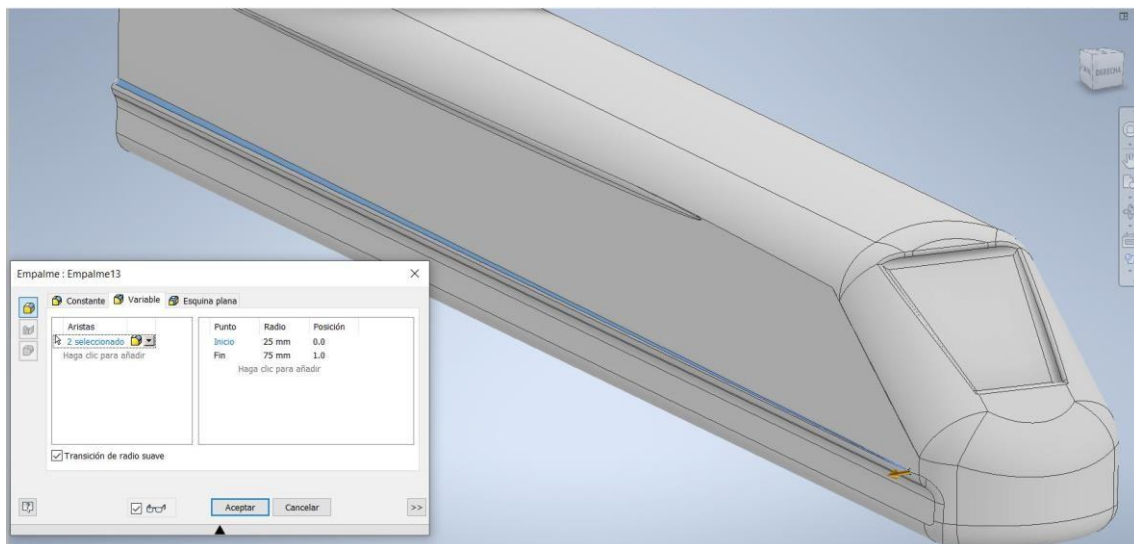


Figura 50: Suavizado de formas laterales 4

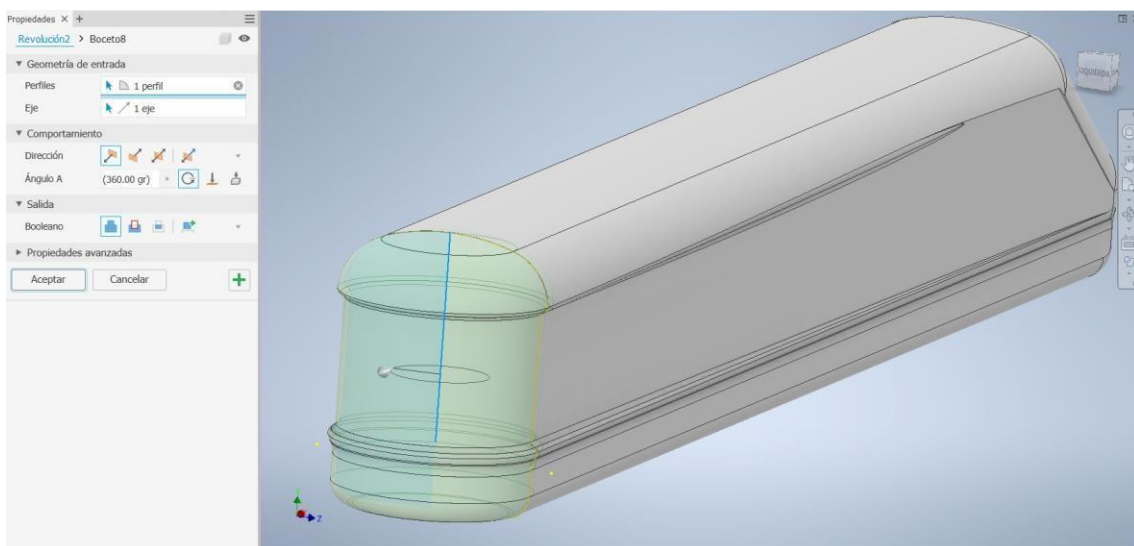


Figura 51: Creación forma aerodinámica posterior

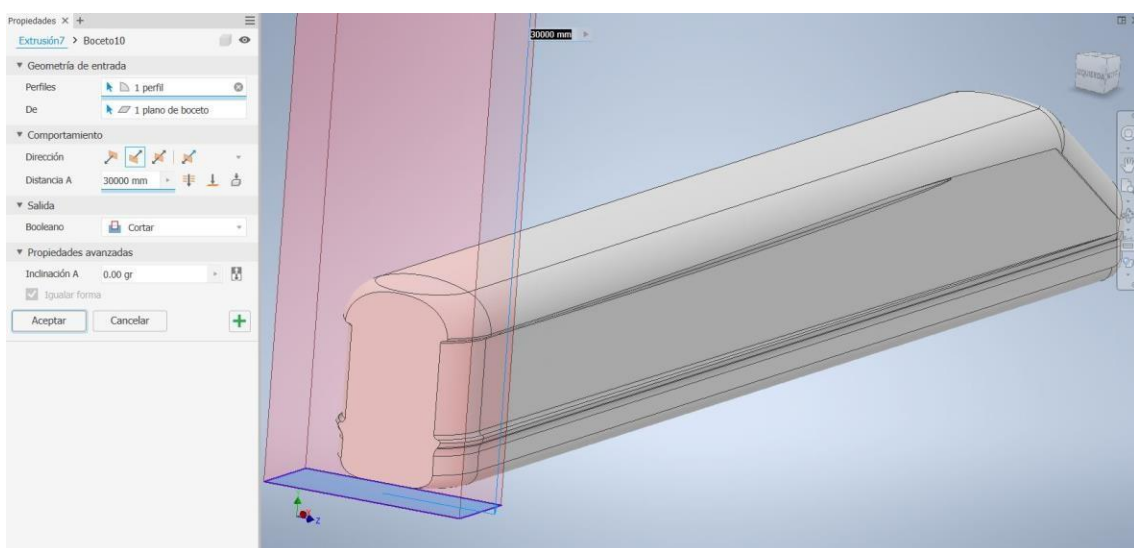


Figura 52: Definición forma parte posterior

Para concluir con el diseño CAD, se van a proceder a exponer el diseño renderizado de algunas vistas finales en perspectiva del tren.

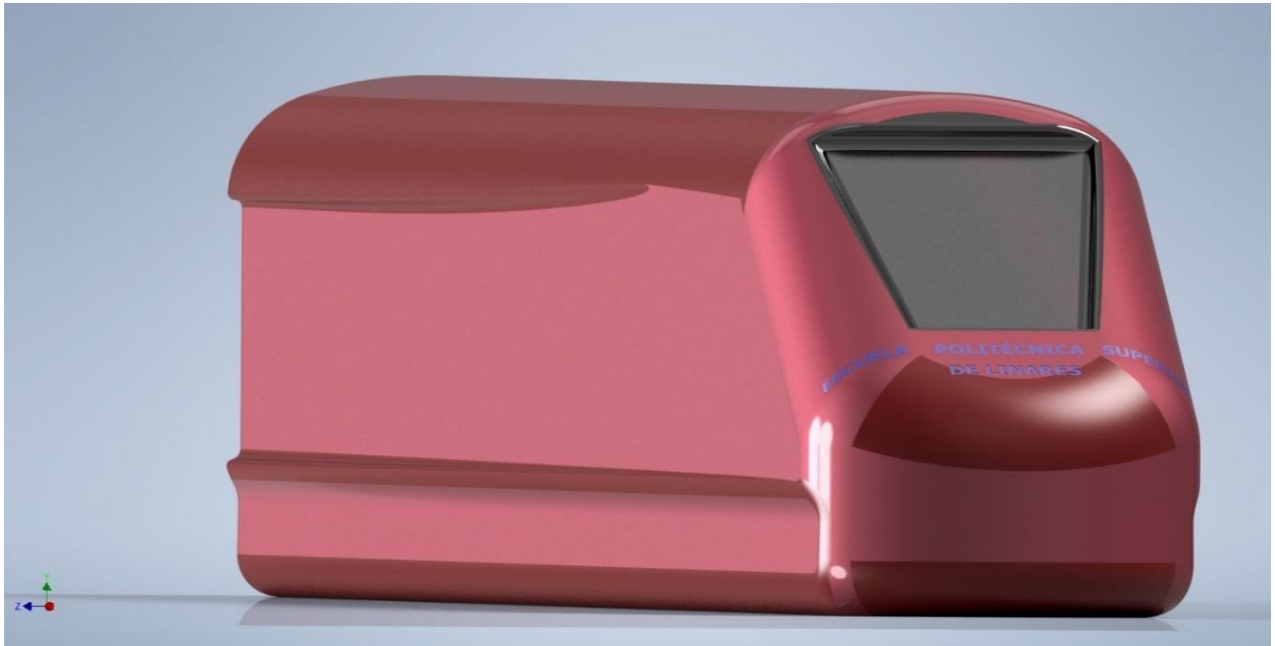


Figura 53: Tren renderizado 1

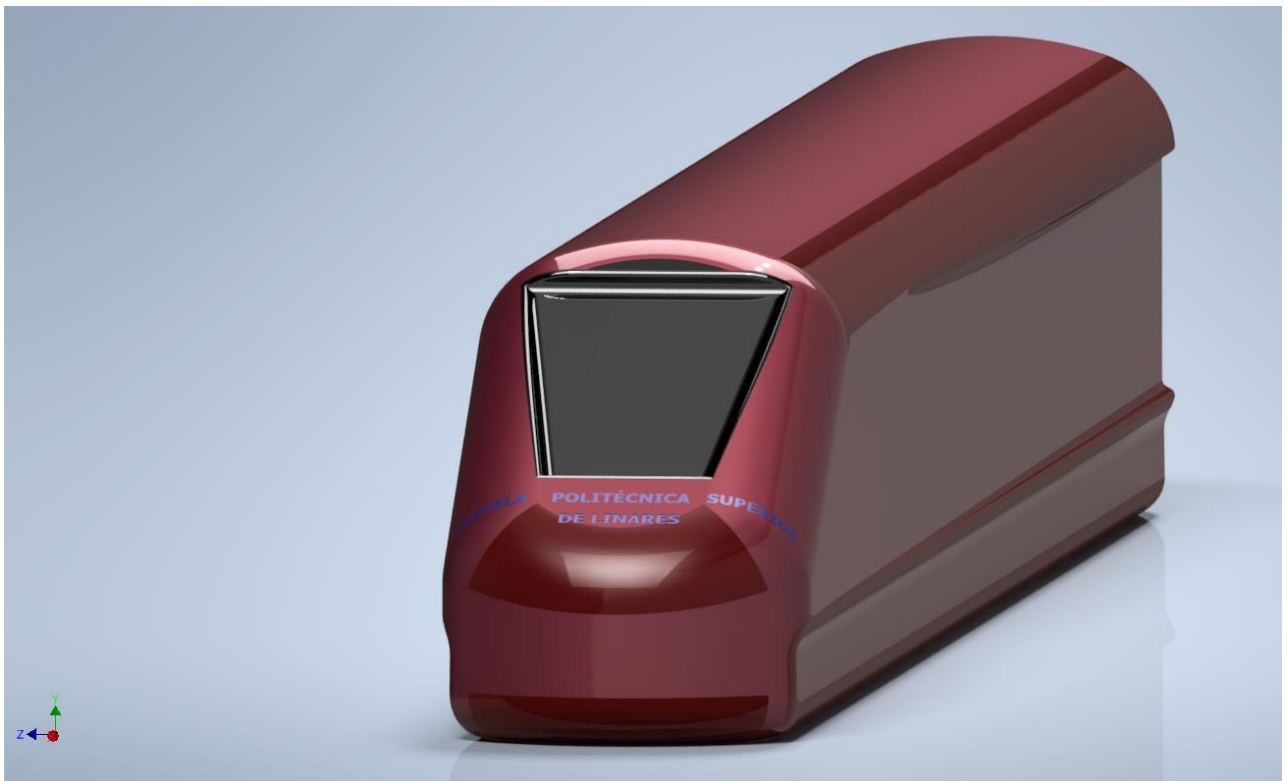


Figura 54: Tren renderizado 2

5.3-Problemas en el modelaje de superficies.

Un punto a tener muy en cuenta para el modelado de sólidos que van a utilizarse en un estudio de elementos finitos, sea aplicado a fluidos computacionales o a estudios mecánicos, es evitar la creación de aristas perdidas.

¿Qué quiere decir evitar la creación de aristas pérdidas?. Son aristas las cuales no siguen la forma del diseño del modelo, se deben a una planificación sucia de la creación de forma del sólido.

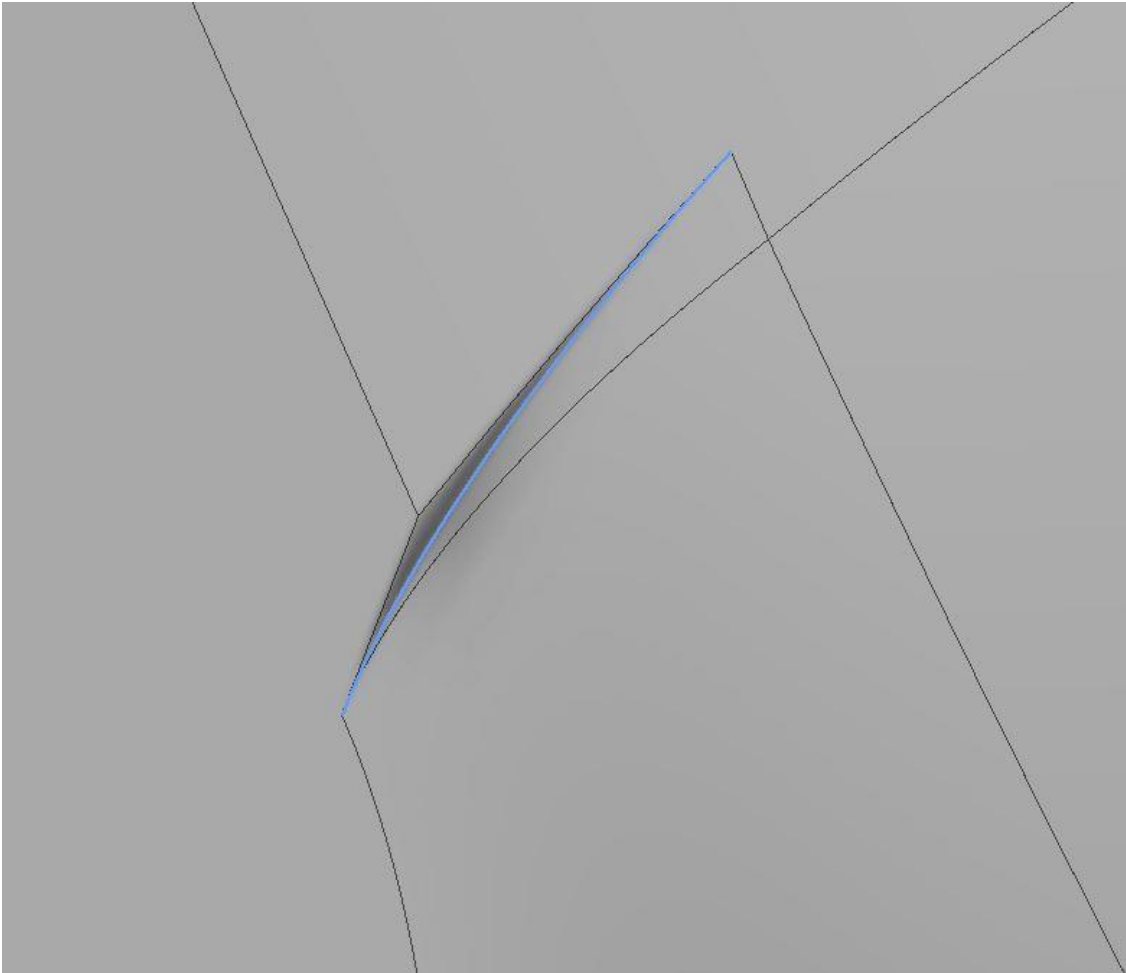


Figura 55:Errores al diseñar

Es muy importante evitar este tipo de imperfecciones en el dibujo 3D ya que, al mallar de forma automática o manual, estas aristas serán concentradores de nodos los cuales darán una malla muy pobre o lo que suele pasar en la mayoría de los casos es que el programa no deje crear la malla y de error.

6-Validación del Software.

Para la validación del software se ha procedido a basarse en el estudio de validación que se realizó en el trabajo de fin de grado de la Escuela Politécnica Superior de Linares del estudiante *Juan José García Escobar, Diseño y posterior estudio aerodinámico de un alerón trasero de un automóvil de competición*(2).

En el cual, para poder validar el software de simulación, el estudiante realizó la simulación de un perfil aerodinámico NACA-2412, aplicando los mismos parámetros que el estudiante aplicó a su simulación, pero en nuestro caso a través del software Autodesk CFD intentaremos replicar los resultados y por consiguiente la validación de nuestro software de simulación para las posteriores pruebas con el sólido 3D

6.1-Perfil NACA-2412.

En esta validación de datos, el sólido a simular será tal y como nos describe *Juan José García Escobar en Diseño y posterior estudio aerodinámico de un alerón trasero de un automóvil de competición*(2) (Airfoiltools, s.f.), un perfil aerodinámico NACA-2412.

Lo primero de todo será crearlo en Inventor profesional, al final y al cabo se necesitará un sólido para simular.

El perfil NACA, en su definición parte del siguiente desarrollo:

$$y_c = \begin{cases} \frac{m}{p^2} (2px - x^2), & \text{donde } 0 \leq x \leq p \\ \frac{m}{(1-p)^2} ((1-2p) + 2px - x^2), & \text{donde } p \leq x \leq 1 \end{cases}$$

Sabiendo que m es la inclinación máxima (inicio del perfil) y p es donde está situada la inclinación máxima.

De todos modos, existen diferentes aplicaciones web donde aportan un desarrollo de un perfil NACA-2412 y lo más importante que pueda exportarse para el uso en un software CAD.

En este caso se ha decidido por utilizar la versátil aplicación *airfoiltools.com*(7) ya que deja exportar un archivo tipo Excel, ya que a través de la opción *puntos* disponible en Inventor profesional se puede importar el archivo Excel sin ningún tipo de problema.



Figura 56: Detalle menú Inventor

Asimismo, tras importar el documento Excel en Inventor, este lo leerá sin ningún problema y proyectará los puntos clave para el diseño del perfil NACA.



Figura 57: Proyectado de puntos Perfil NACA

A continuación, utilizando la herramienta esplines del menú de bocetos 2D se unirán los puntos de manera sencilla obteniendo un perfil NACA completamente funcional y cerrado.

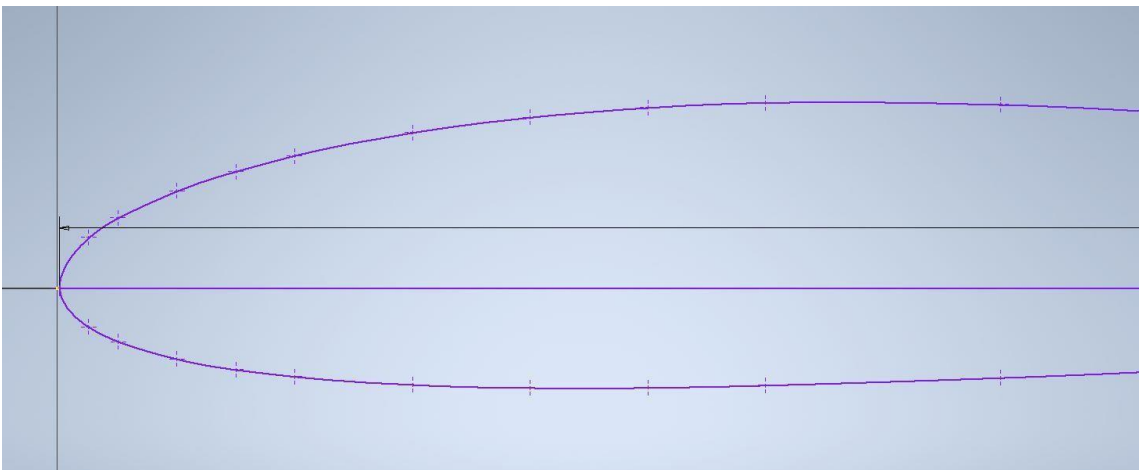


Figura 58: Bocetado perfil NACA

Por último paso se procederá a utilizar la herramienta extrusión del menú modelado 3D para caracterizar el boceto de perfil NACA 2D como sólido para poder simular a través de él y obtener los resultado que se esperan.

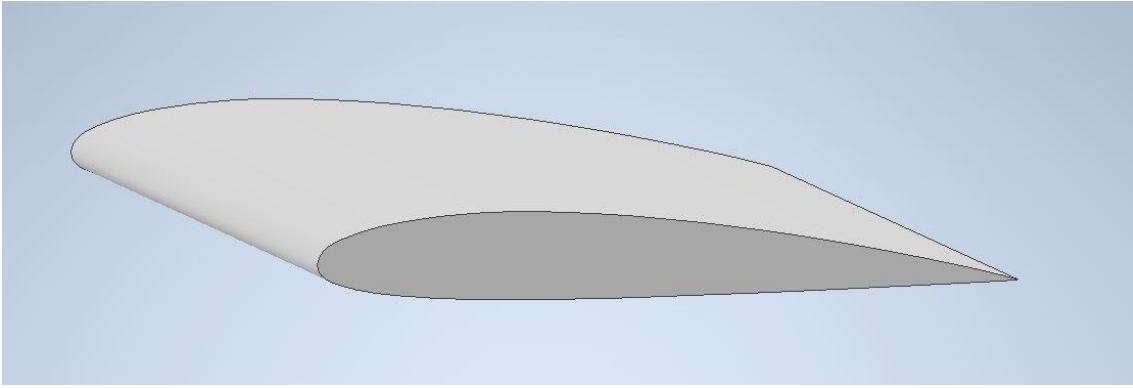


Figura 59: Perfil Naca

6.2-Descripción de los parámetros a simular.

En este punto se va a proceder a exponer los parámetros de entrada para desarrollar la simulación del perfil NACA-2412. Antes de todo se va a obtener el coeficiente de arrastre experimental para un perfil NACA-2412.

Para ello, se utilizaran las tablas de estudios experimentales incluidas en *Theory of Wing Sections*, Ira H. Abbot(8).

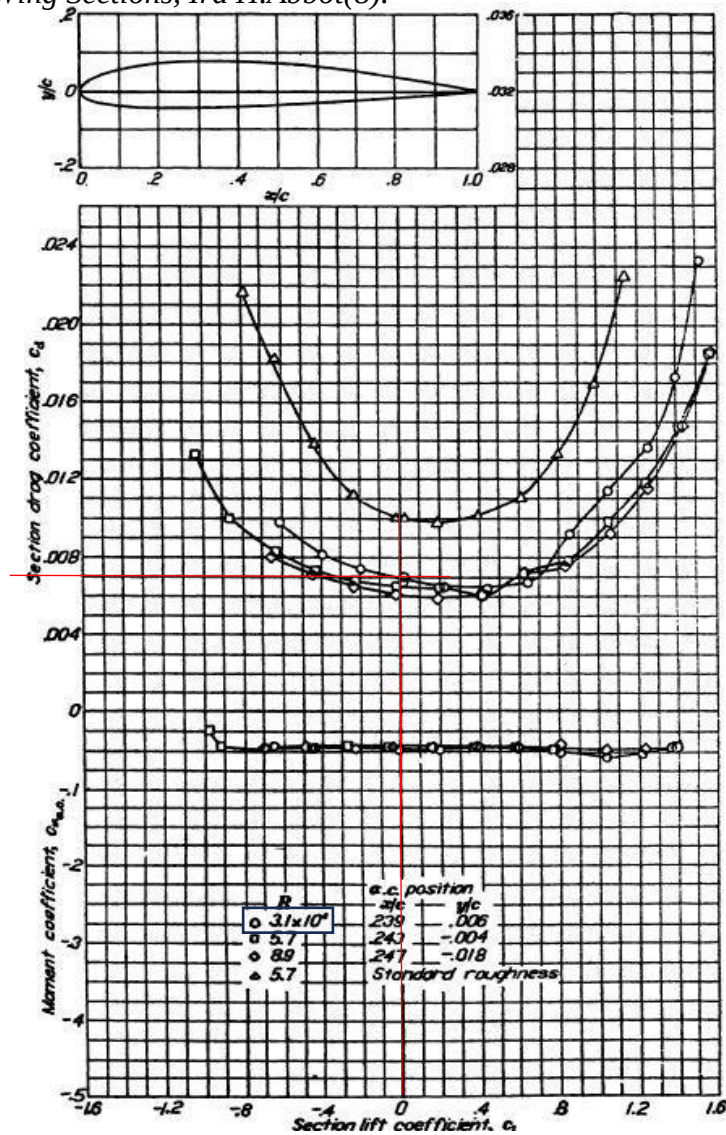


Figura 60: C_d experimental en función del ángulo de ataque

Donde procederemos a obtener el C_d , eligiendo como Numero de Reynolds $3.1 \cdot 10^6$ y al tener un ángulo de ataque de 0° , siguiendo las líneas trazadas en la gráfica, obtendremos un coeficiente de arrastre $C_d \cong 0.007$.

Teniendo claro el valor de C_d y sabiendo el Numero de Reynolds procederemos a obtener la velocidad de simulación según la fórmula:

$$v = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot c}$$

Donde se define:

v : velocidad de simulación en m/s

Re : Número de Reynolds

ρ : densidad del aire kg/m^3

μ : viscosidad dinámica $Pa \cdot s$

c : longitud de la cuerda en m

$$v = \frac{3.1 \cdot 10^6 \times 1.817 \cdot 10^{-5}}{1.2047 \times 1} = 46.756 \text{ m/s}$$

Con estos datos obtenidos de la recopilación de ensayos experimentales, en el siguiente punto se intentará demostrar la validez del software Autodesk CFD en función de la aplicación de los diferentes solvers que proporciona.

6.3-Obtención de datos y validación del método.

Autodesk CFD en contra de otros softwares de simulación, depende mucho de la acción del usuario sobre éste, a qué se refiere esto:

El software, en lo único que nos va ayudar en la simulación es en cargar el objeto de simulación, sea sólido 3D o superficie 2D y en la creación de la malla. Los demás parámetros y usos que acometa el software deben de estar supervisados bajo el criterio del usuario, siguiendo estas pautas y algunos consejos que nos proporciona la guía técnica del programa en sus tutoriales, obtendremos una óptima simulación o en todo caso será una simulación pobre que no se asemejará a lo simulado experimentalmente.

Para realizar la simulación, al querer obtener valores los más precisos posibles, utilizaremos una simulación en 2D, para poder ahorrar en coste computacional y poder optimizar la malla lo más fina posible.

A través de Inventor profesional obtendremos la siguiente configuración.

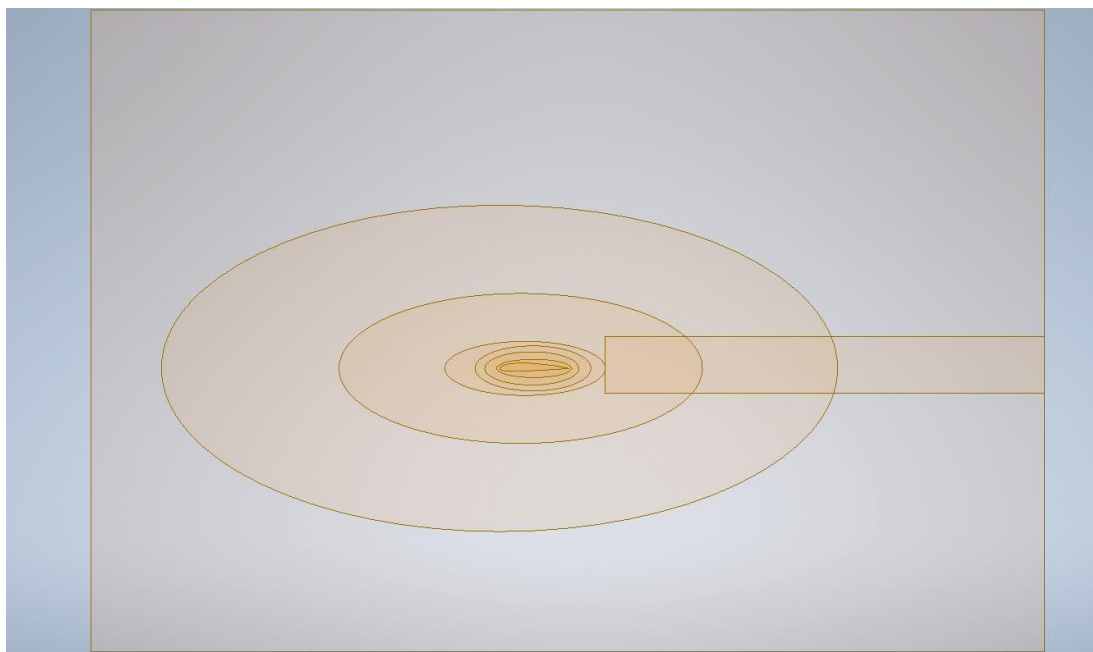


Figura 61: Creación de superficie

En la zona central tenemos el perfil NACA-2412, según las especificaciones definidas anteriormente, luego se ha procedido a realizar una serie de elipsoides que envuelven el perfil para facilitar el mallado y poder afinar la malla en esas áreas con un detalle más fino.

Teniendo creada la superficie de trabajo, se procederá a cargarla en Autodesk CFD.

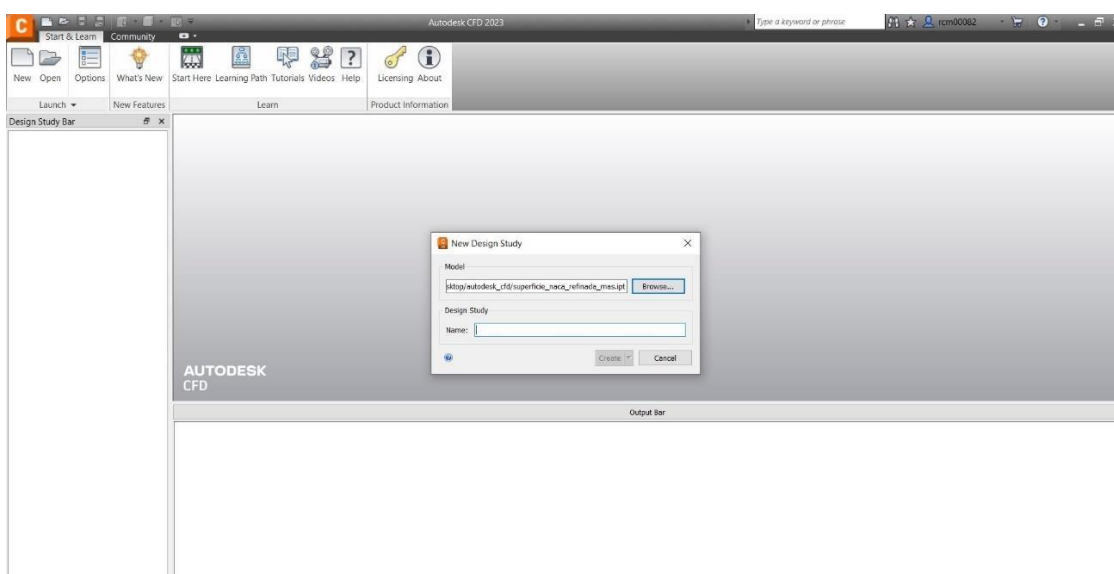


Figura 62: Menú principal Autodesk CFD

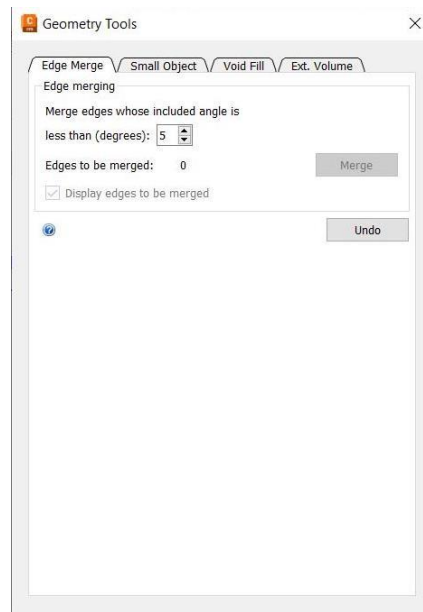


Figura 63: Ventana "Geometry Tools"

Tras importar la superficie, siempre al abrir una nueva geometría aparecerá la herramienta *Geometry Tools*, la cual ayuda a eliminar ejes, crea del dominio fluido o llamado en el argot de la simulación “*box domain*” y la eliminación de pequeños sólidos (en caso de un 3D) que en la creación puedan desarrollar problemas para la realización de la malla.

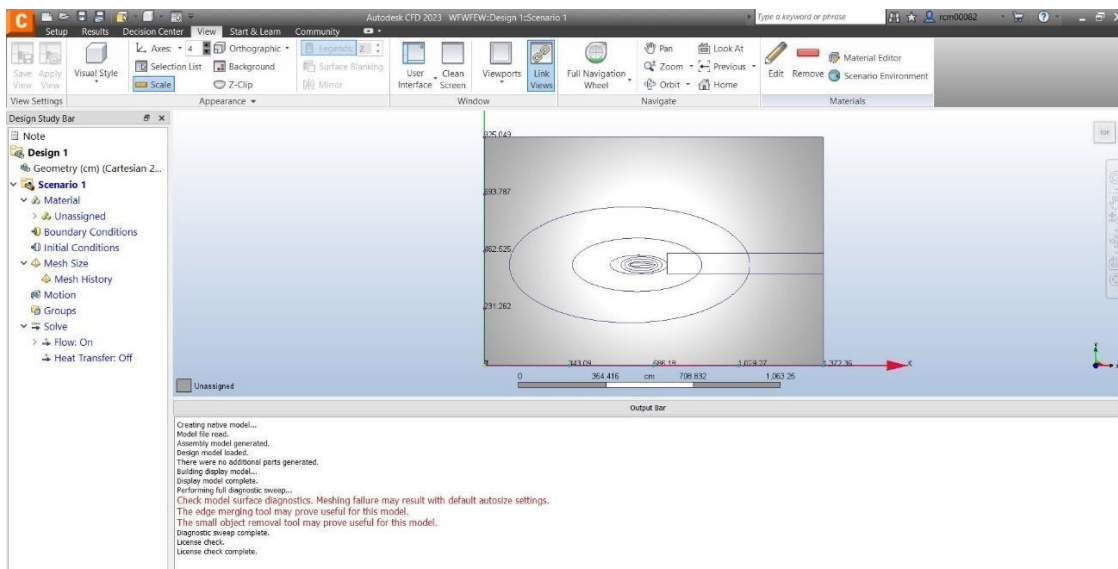


Figura 64: Menú del objeto Autodesk CFD

El siguiente paso, será definir los materiales con los cuales se va a trabajar en la simulación.

Se ha utilizado como material para el perfil NACA-2412 aluminio y para el dominio de simulación aire, con sus respectivas densidades proporcionadas por el programa.

Figura 65:Propiedades características del Aire

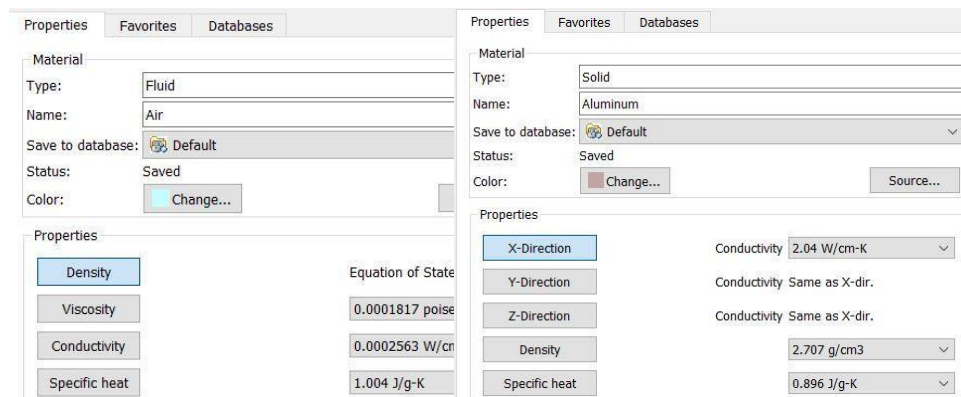


Figura 66:Propiedades Características del Aluminio

El siguiente paso con el que se procederá, será con la definición de las condiciones de contorno de la simulación.

En este paso se han seguido los consejos expuestos en los tutoriales de autodesk ya que se indica que para una simulación con dominio exterior de flujo y flujo incomprensible se debe de proceder de la siguiente manera:

Para problemas de flujo compresible subsónico e incompresible con entradas subsónicas, las condiciones de límite de velocidad y presión se aplican en el límite de campo lejano.

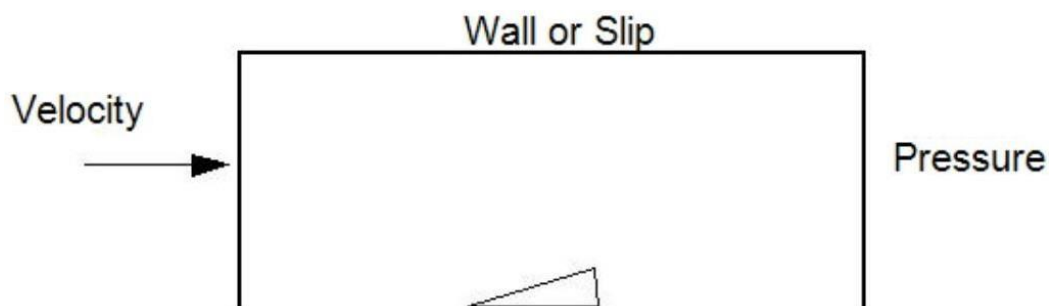


Figura 67:Diagrama aplicación condiciones de contorno

Esto quiere decir que en nuestro caso de simulación del perfil NACA-2412 utilizaremos los bordes para definir las condiciones de contorno iniciales como:

- Velocidad: 46.756 m/s.
- Presión: 0 Pa.

Con estas condiciones aplicadas en los bordes tendremos definidas las condiciones de contorno de la simulación.

Como último paso antes de seleccionar el solver crearemos la malla, la cuál será mallada con diferente tamaño de germen para obtener un resultado lo más optimo cercano de la capa límite del perfil NACA.

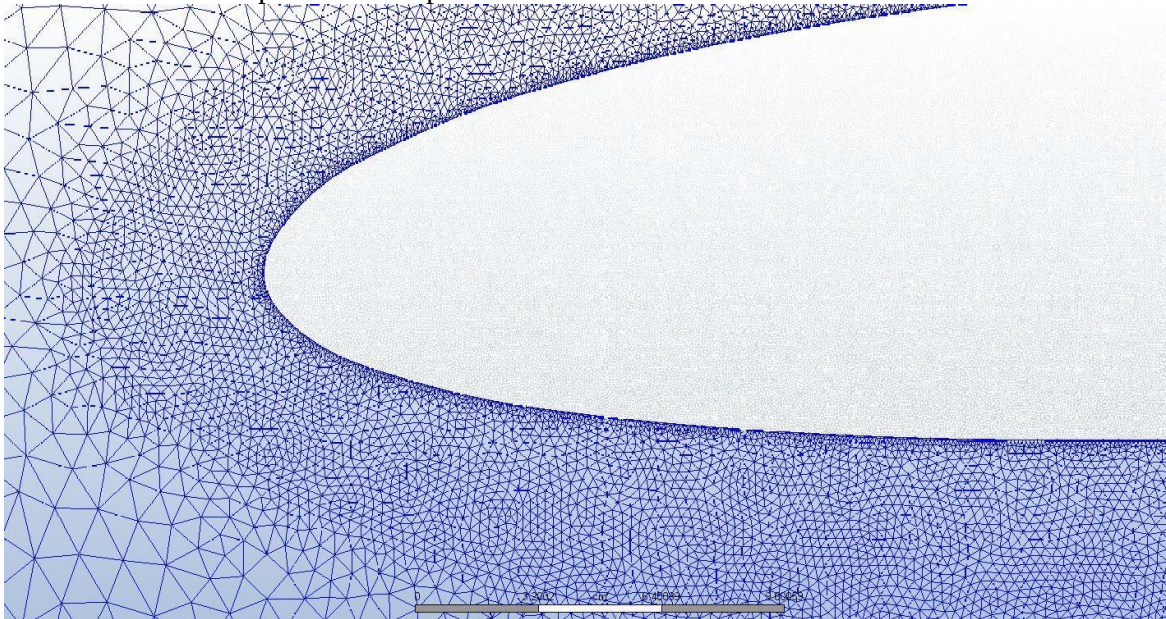


Figura 68:Detalle del mallado

Se han procedido a simular diferentes solvers disponibles en el software, para poder concluir cual es el que mejor resultados nos aporta en función del coeficiente de arrastre C_d .

Se simularán los solvers:

- $K - \epsilon$ *epsilon*($k - \epsilon$): es un solver general de múltiples aplicaciones, modelo de configuración por defecto de la mayoría de Softwares CFD.

- $SST K - \omega$ *omega*($SST k - \omega$): solver de uso específico cuando se tienen simulaciones con regiones de pared, muy óptimo para simulaciones de aerodinámica externa.

- $SST K - \omega$ *RC(Hellsten)*: Solver derivado de $k - \omega$, el cual se han obtenido resultados aproximados con superficies que albergan flujos con curvaturas convexas.

A continuación, se expondrán los diferentes perfiles de velocidades y presiones obtenidos para cada solver.

$-K - \epsilon(k - \epsilon)$:

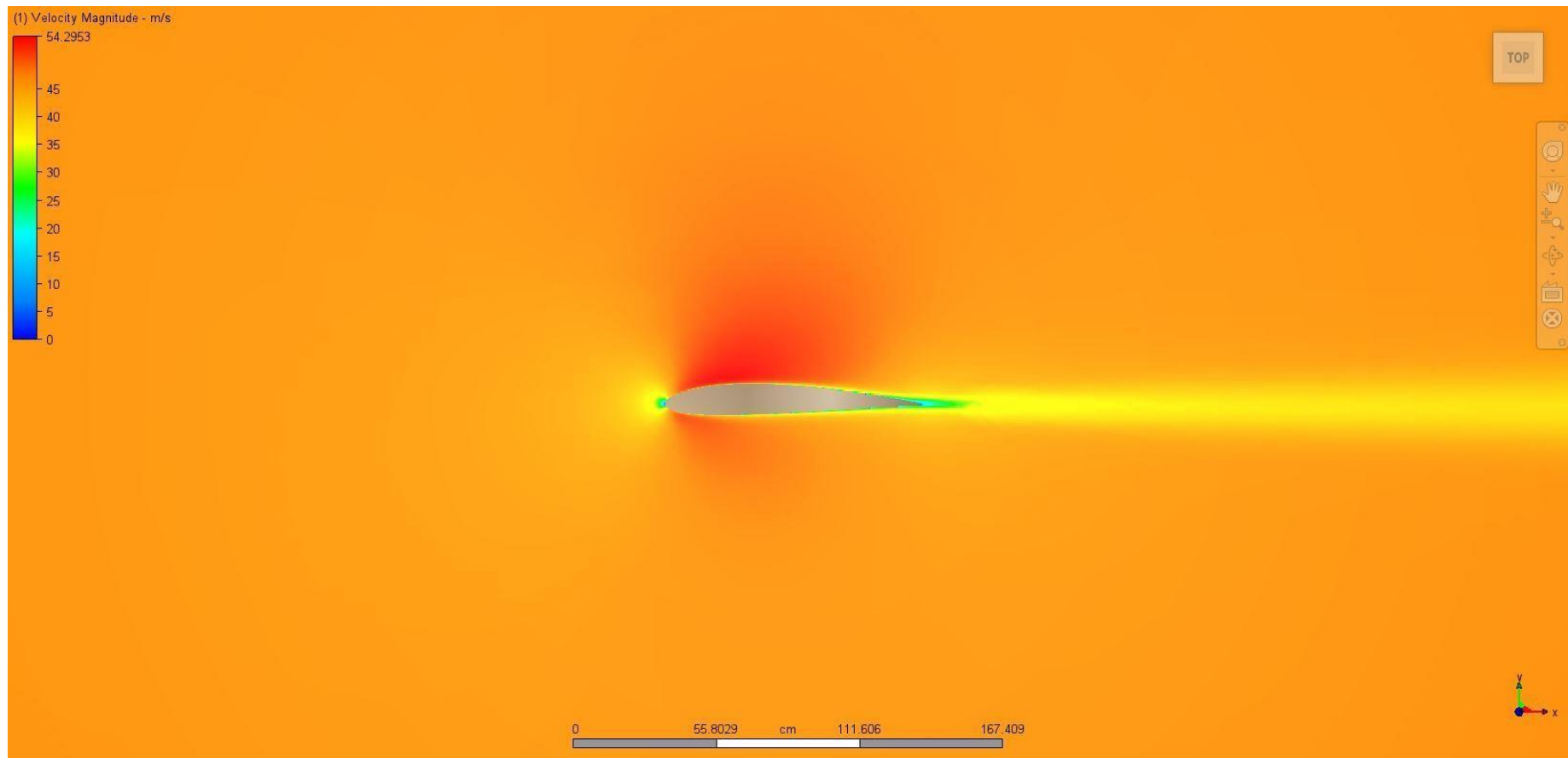


Figura 69: Perfil de velocidades K-epsilon

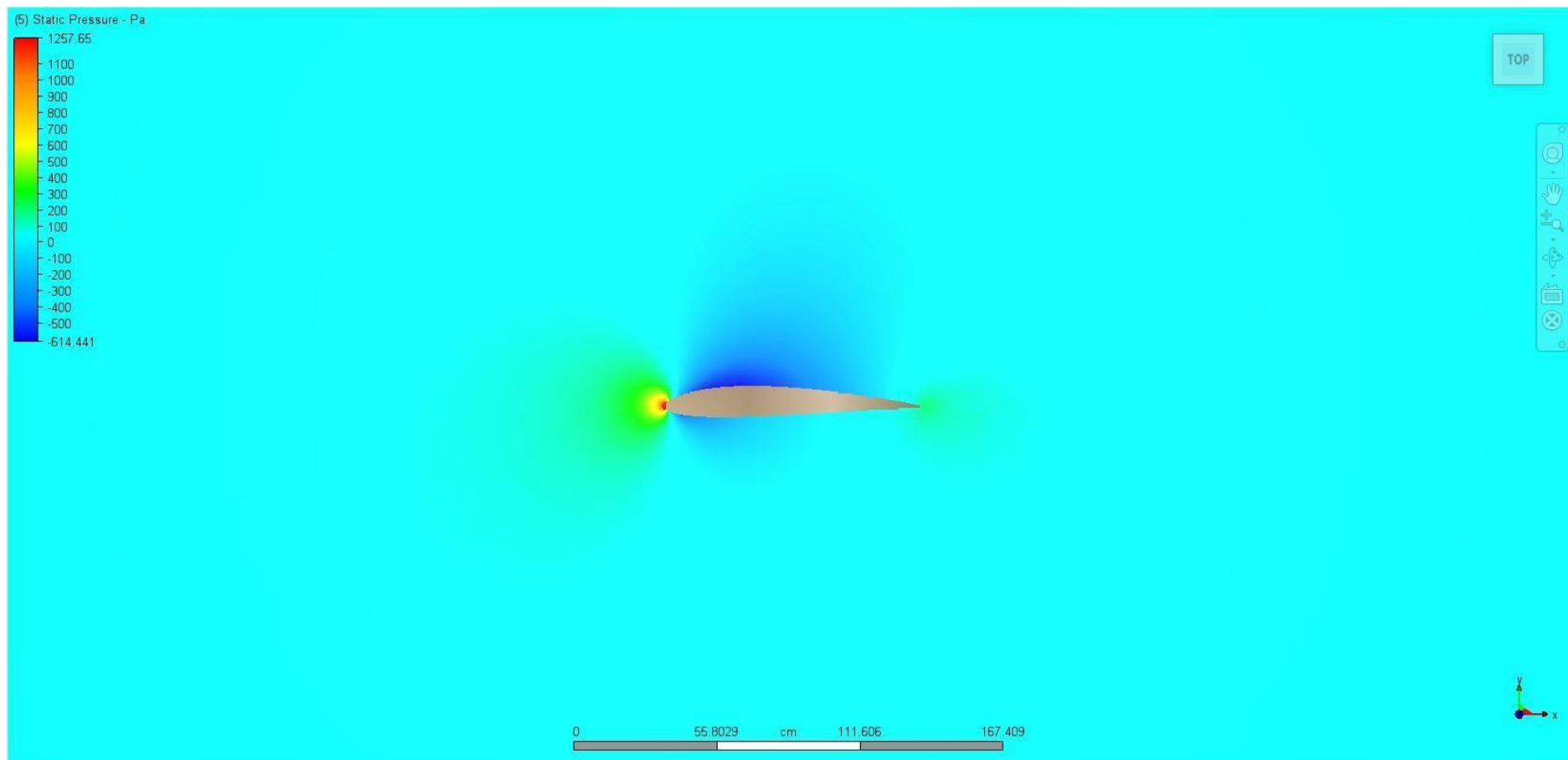


Figura 70: Perfil presiones K-epsilon

$-SST\ K - \omega(SST\ k - \omega)$:

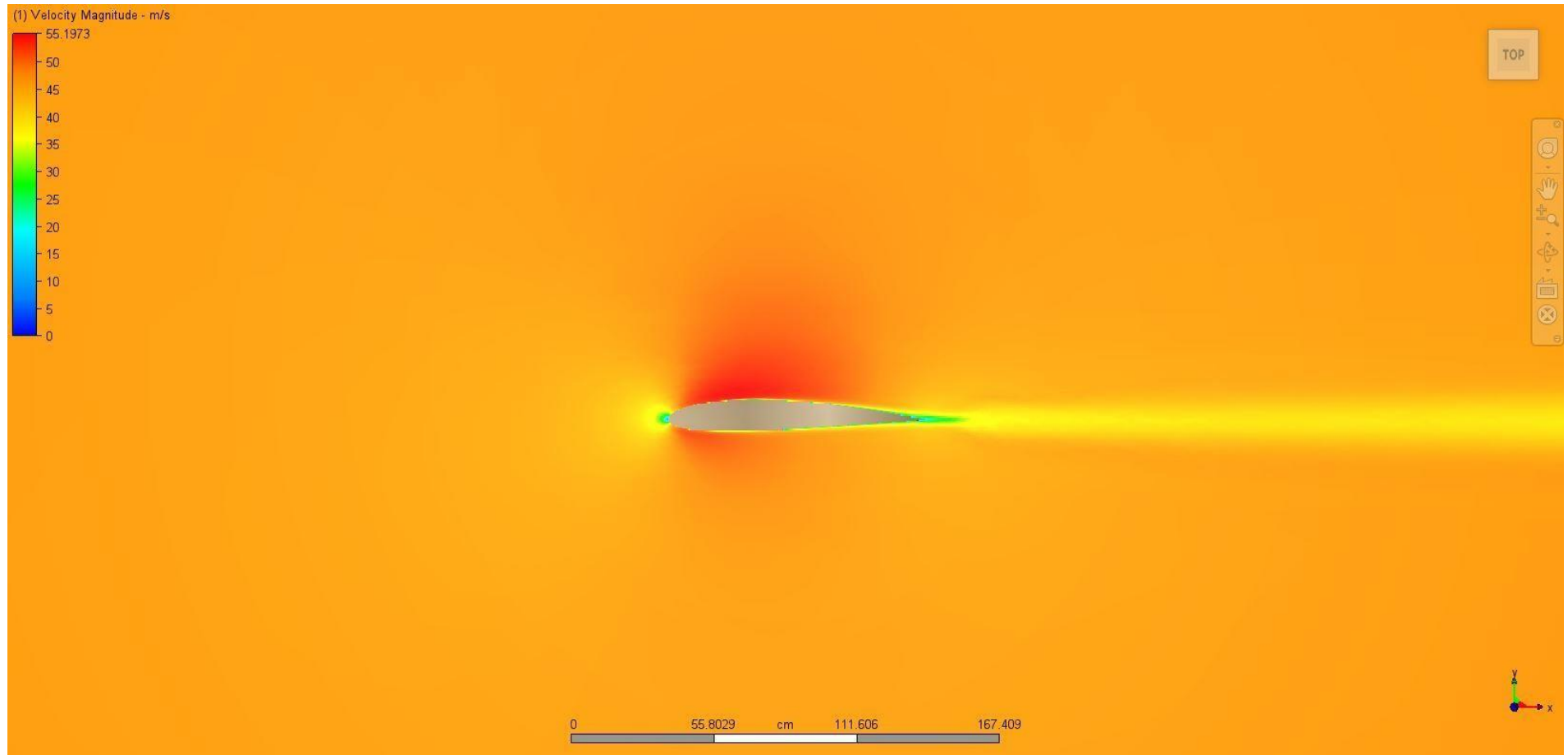


Figura 71: Perfil velocidades K-omega

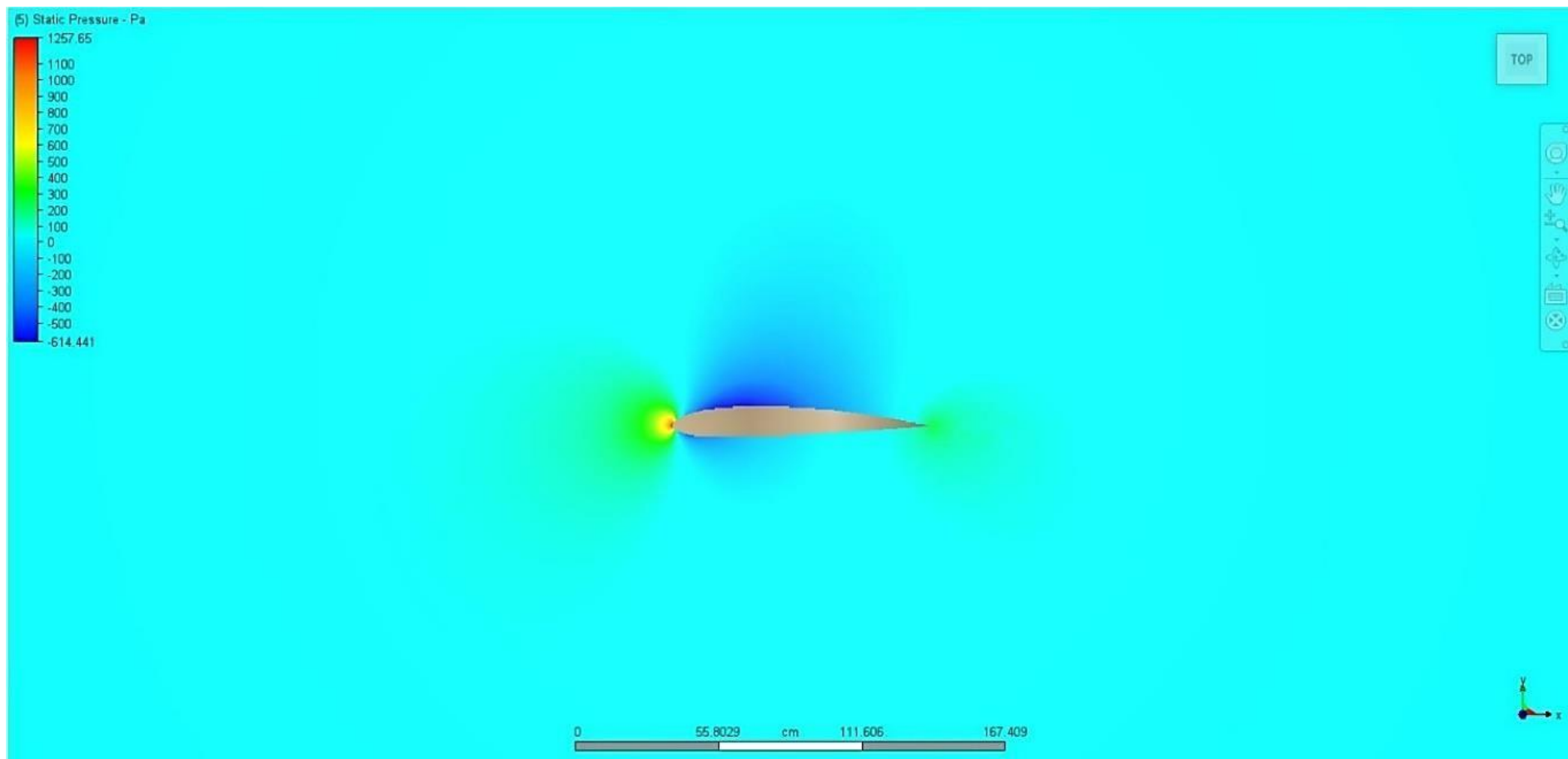


Figura 72: Perfil presiones K-omega

-SST K – omega RC(Hellsten):

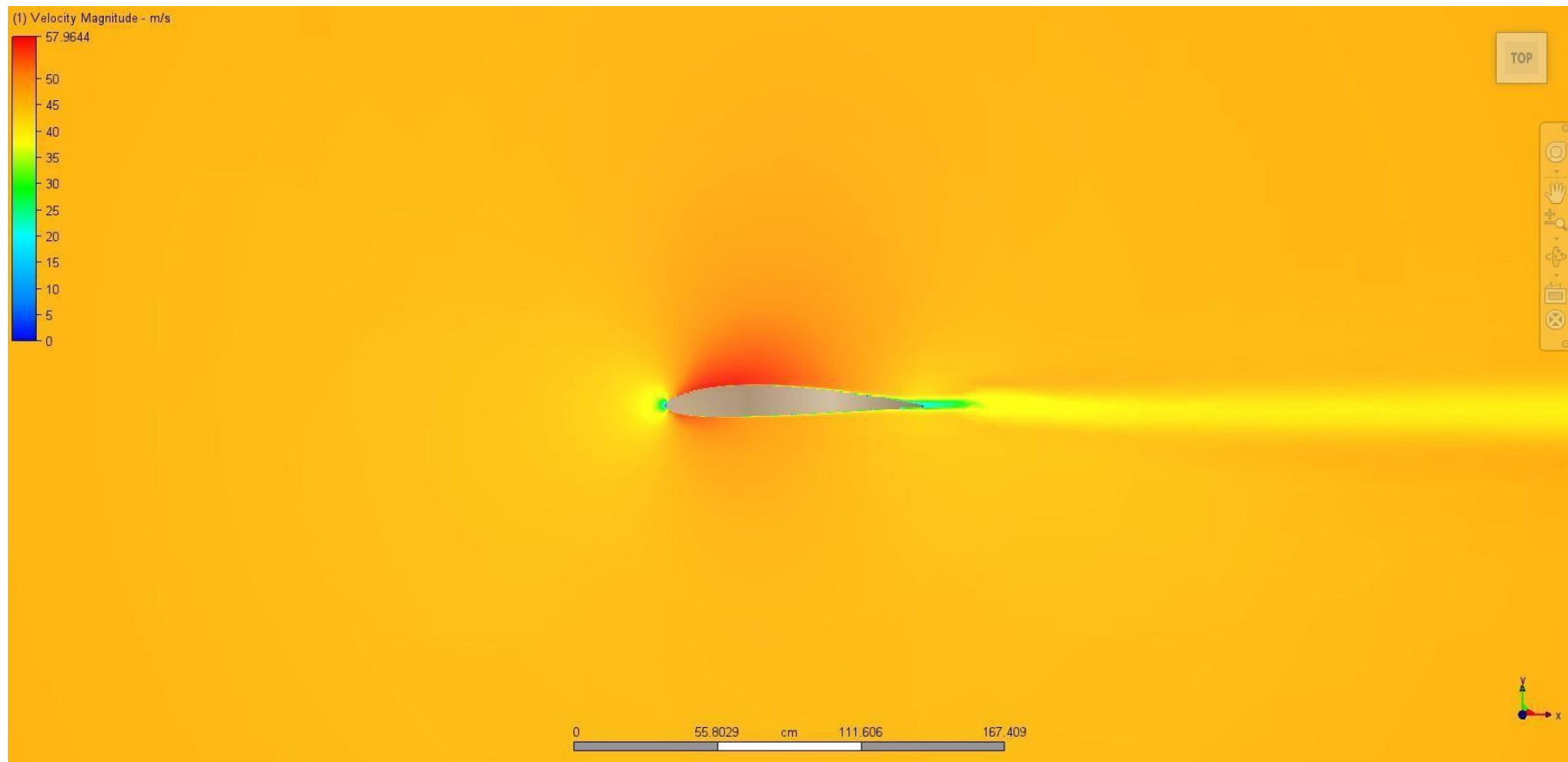


Figura 73: Perfil velocidades K-omega (Hellsten)

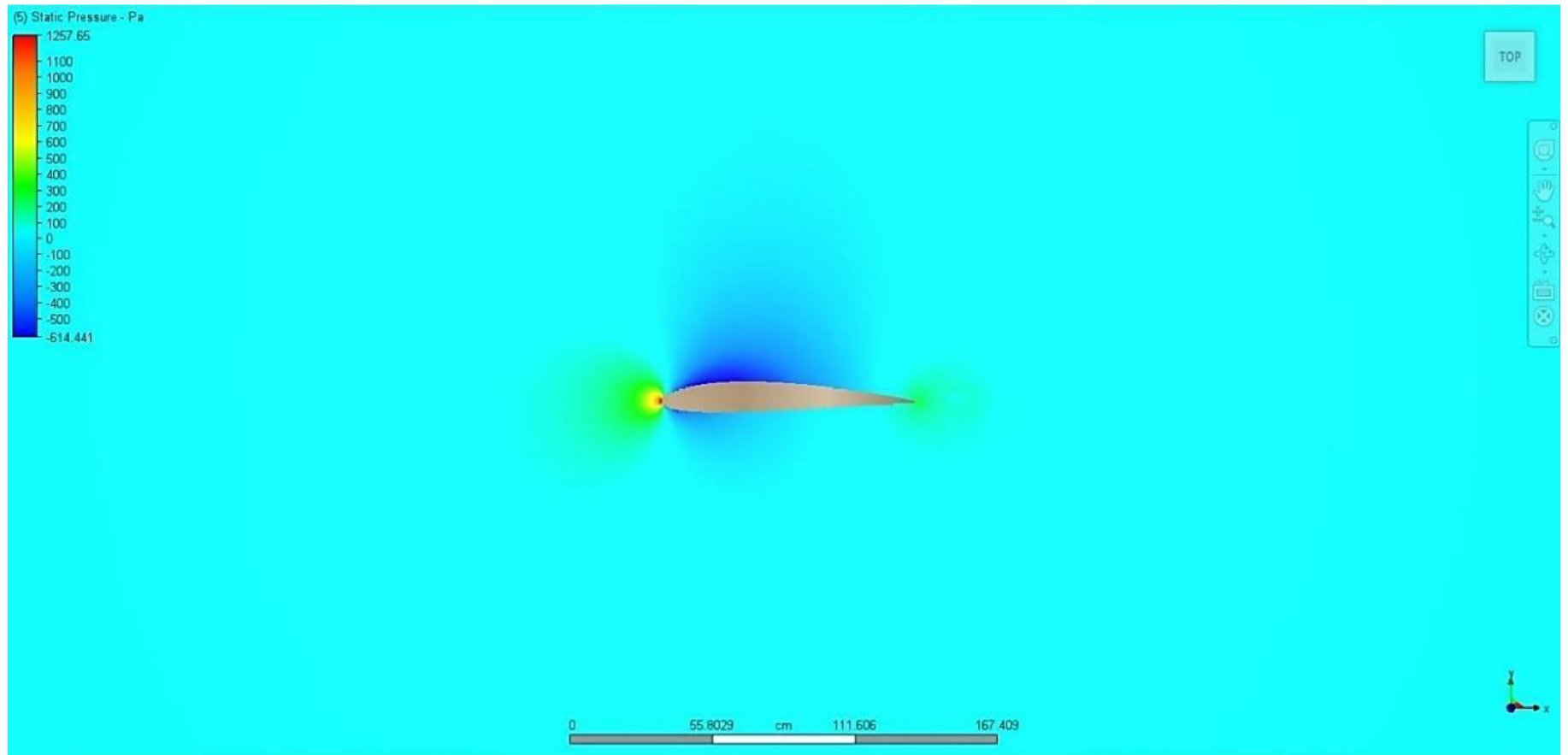


Figura 74: Perfil presiones K-omega (Hellsten)

Asimismo, para el cálculo del coeficiente de arrastre C_d en Autodesk procederemos a seguir la siguiente fórmula:

$$C_d = \frac{2 \cdot F_d}{\rho \cdot v^2 \cdot A}$$

Donde las variables se definen como:

- F_d : Fuerza de arrastre (N)
- A : Área transversal del perfil (m^2)
- v : velocidad del fluido (m/s)
- ρ : densidad del aire (kg/m^3)

Como incógnitas tendremos el área del perfil A y la fuerza de arrastre F_d pero se podrán obtener fácilmente, el área nos la proporcionará Inventor Professional gracias a la herramienta *medir*:

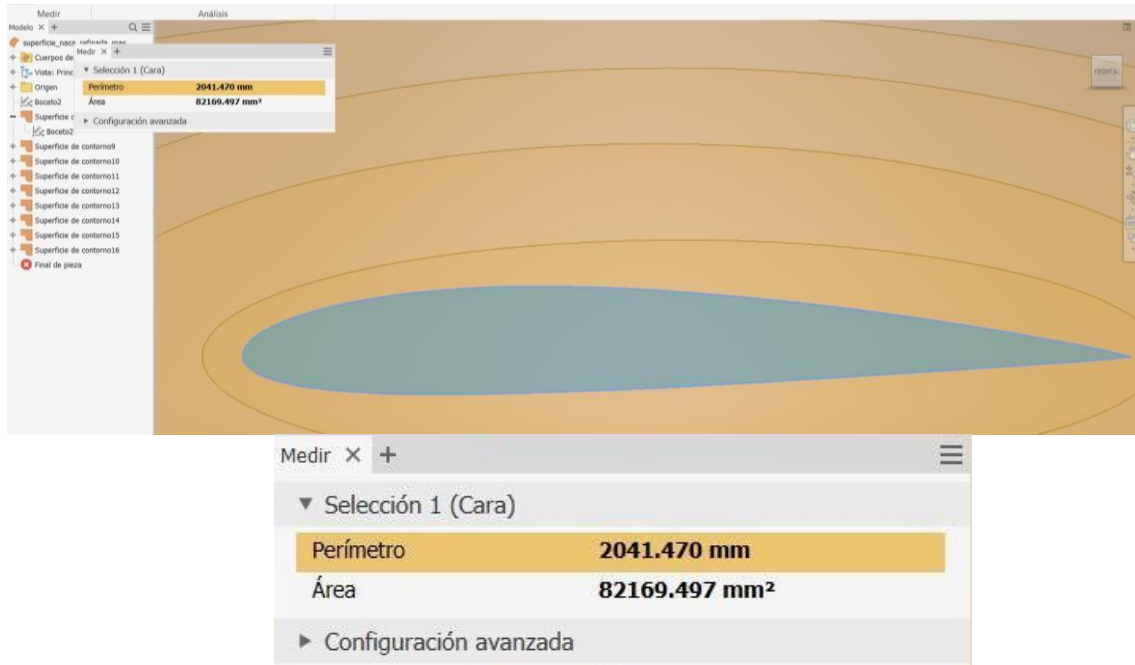


Figura 75:Detalle cálculo del área

La fuerza de arrastre será proporcionada por Autodesk CFD a continuación, se mostrará una tabla comparativa con los diferentes solvers y el error absoluto que han desarrollado respecto del modelo teórico-experimental.

solver	F_d (N)	Area (m^2)	Viscosidad (Pa)	Reynolds	ρ (kg/m^3)	v (m/s)	C_d	Error absoluto
teórico-experimental	0.75741218	8.22E-02	1.817E-05	3.10E+06	1.2047	46.756	0.007	
k-omega-hellstein	0.725958	8.22E-02	1.817E-05	3.10E+06	1.2047	46.756	0.0067093	4.15%
k-omega	0.731	8.22E-02	1.817E-05	3.10E+06	1.2047	46.756	0.0067559	3.49%
k-epsilon	0.683627	8.22E-02	1.817E-05	3.10E+06	1.2047	46.756	0.00631808	6.48%

Figura 76:Tabla comparativa comparación de Solvers

Como se puede observar, el solver basado en $SST\ K - \omega$ ha sido el que menos error absoluto ha acumulado, por ende, este solver será el que utilizaremos para desarrollar la simulación aerodinámica del tren.

También se ha de remarcar que el error absoluto es producido en medida por el solver elegido y sobre todo por la disposición y tamaño de malla, en este caso se ha creado una malla con los elementos más finos posibles respecto al coste computacional finito que puede permitirse un estudiante de ingeniería, si se redujera la malla computacional el resultado será más aproximado al teórico-experimental.

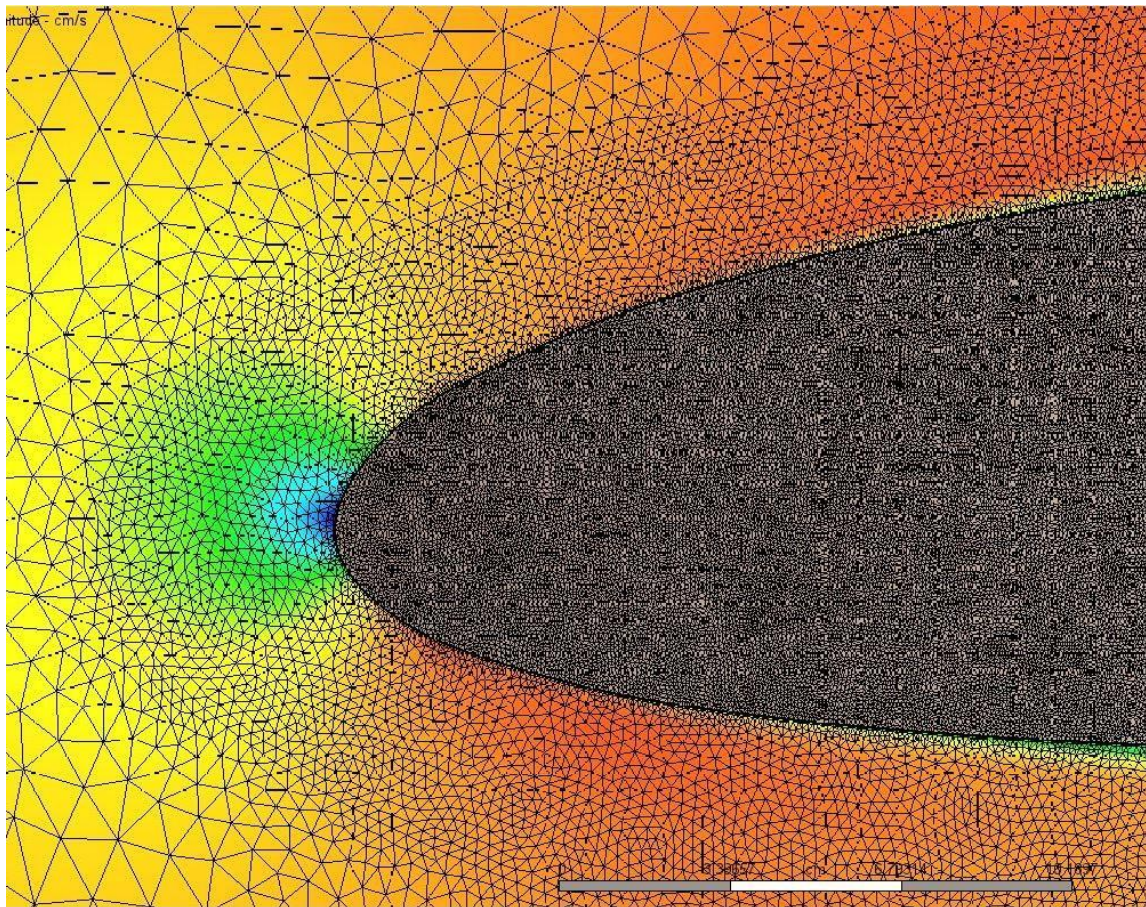


Figura 77:Detalle malla refinada

7-Conceptos iniciales sobre CFD.

Se ha querido tratar en este punto siete el porque de la elección del software de simulación, sus ventajas y desventajas frente al software más popular en la industria.

7.1-Elección del Software Autodesk CFD

Para realizar un estudio de simulación, el software de trabajo que se elija es uno de principales pasos a lo que se debe de proceder.

En un principio se evaluaron dos programas de simulación CFD para la realización de este trabajo:

-Ansys Fluent-Workbench.

-Autodesk CFD.

Cualquier ingeniero que se vaya a decidir por el campo de estudio de la Simulación aerodinámica, se puede orientar por el Software de simulación Ansys, ya que es uno de los más utilizados en la industria, sobre todo en el caso de un estudiante de ingeniería de la escuela de lineares ya que en el plan de estudios tenemos una asignatura que nos da unas nociones de iniciación. Pero con todo pronóstico se descartó la idea original de utilizar ANSYS Fluent en opción de Autodesk CFD.

Se van a proceder a discutir la diferentes ventajas e inconvenientes los cuales ha hecho que la balanza se decaiga sobre el Software de simulación Autodesk CFD.

-Interfaz, en un programa no solo de simulación sino de cualquier ámbito ingenieril, creo que el acceso de usuario a una interfaz clara y concisa que ayude al ingeniero en este caso describir y caracterizar las entradas, salidas, condiciones de contorno...etc que van actuar en la simulación.

Ansys Fluent, la versión de la que se pudo interactuar en la asignatura Simulación de Flujos Industriales, es la versión 16 lanzada al público en el 2015, la cual está muy desactualizada tanto en procedimientos como en características de otros softwares competidores, en cambio Autodesk aparte de ofrecer la última versión a los estudiantes por el convenio entre universidades, parte del diseño de interfaz de Autocad tipo “Microsoft Word” la cual es considerablemente muy intuitiva.

-Compatibilidad software CAD con software de simulación, uno de los grandes inconvenientes de Ansys Fluent es poder trasladar el archivo CAD del solido a su interfaz para en pasos posteriores poder mallarlo, ya que según qué programa de diseño que utilicemos tendremos que exportar el sólido a archivos de visualización neutros perdiendo calidad y características en nuestro diseño.

En cambio, al utilizar Autodesk CFD al pertenecer al mismo creador de Software de Autodesk, permite importar cualquier archivo procedente de Inventor profesional, Alias, Fusion 360...etc.

-Calidad de simulación, por ultimo y no menos importante, este ha sido una de las características que han influido más en la decisión de utilizar Autodesk CFD ha sido el tamaño de la malla o dominio de fluido.

Ansys en su versión de estudiante sólo permite simular malla de dominio fluido con no más de 512.000 elementos/nodos, en cambio Autodesk CFD no impone límites para la creación de malla, las mallas con las que se van a simular contienen alrededor de 6.000.000 de nodos/elementos, bastante más envergadura de las que nos permitiría Fluent.

También se ha de remarcar que uno de los inconvenientes que tiene Autodesk CFD es el increíble costo computacional que necesita para poder desarrollar la simulación, ya que para procesar cada millón de elementos que requiere sólo la malla de la simulación, se necesitará por cada millón de elementos acceder a 2Gb de RAM disponibles, si partimos de una malla aproximadamente entre 4 millones y 6 millones de elementos las cifras hablan por sí solas.

Se deja en constancia que el estudiante tuvo que incrementar la RAM a 32Gb en su equipo personal para poder realizar el estudio de simulación en este trabajo de fin de grado.

8-Estudio del sólido 3D mediante Autodesk CFD.

En los puntos que suceden se intentará explicar el proceso de simulación que se ha seguido hasta la obtención de datos.

8.1- Importar el sólido y definición del dominio de control.

Igual que se ha importado el perfil NACA se procederá a importar el tren, pero esta vez será un sólido 3D como ya hemos comentado anteriormente.

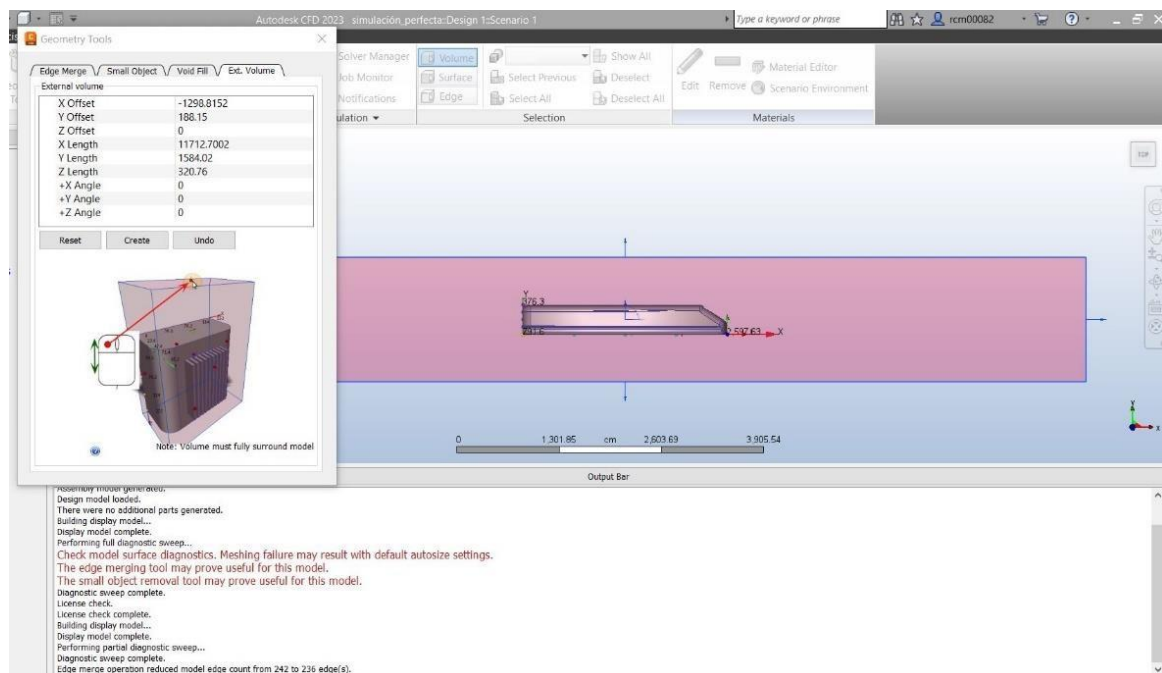


Figura 78: Importar el tren

Igual que para la superficie, se utilizará la herramienta *Geometry tools* para crear el dominio de fluido, hay diferentes formas de crear el dominio de fluido, pero en este trabajo se ha utilizado este tipo ya que de forma intuitiva puede ser la más fácil de utilizar.

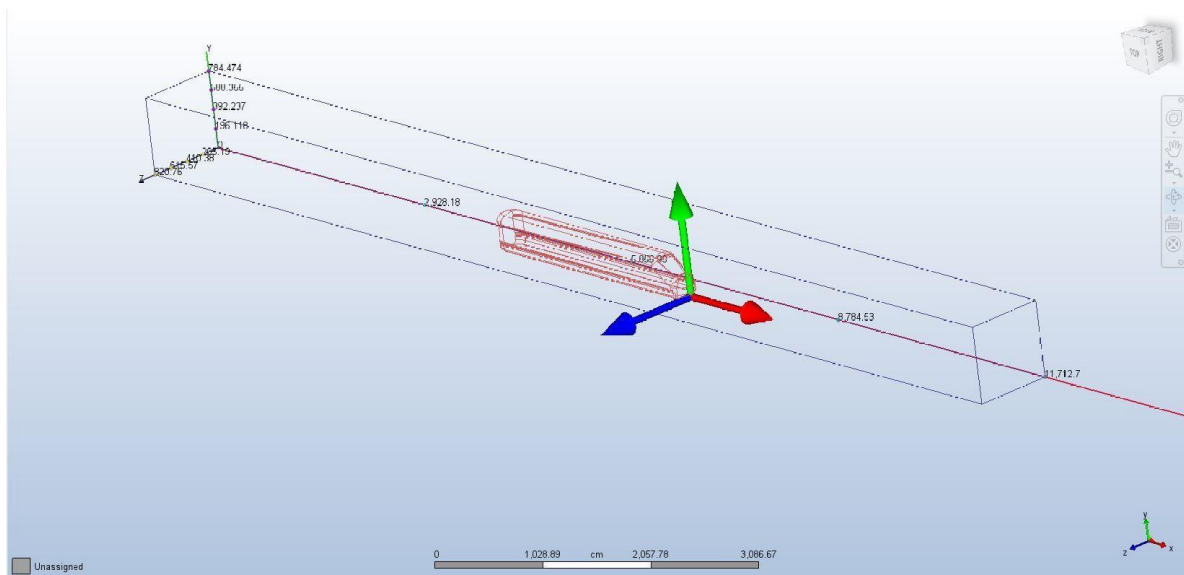


Figura 79: Creación dominio fluido

Aplicando diferentes medidas tanto al ancho y el alto de la caja, se creará la caja que vemos mas arriba que envuelve al sólido 3D y donde trabajará el aire en la simulación.

Creándose dos partes en nuestra simulación, la primera el sólido importado y la segunda la caja con el dominio de control.

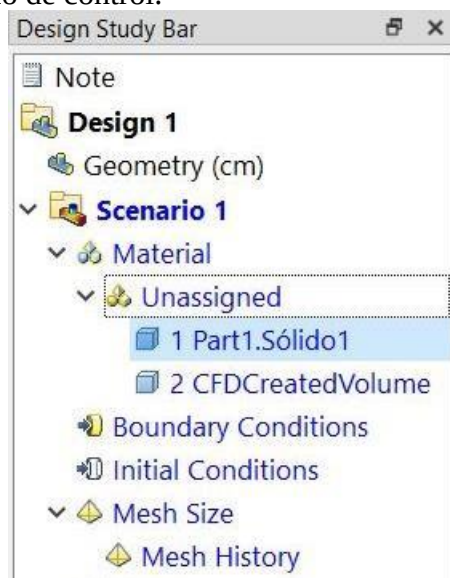


Figura 80:Detalle volúmenes creados

8.2-Definición de condiciones de contorno.

A continuación, se procederá a la asignación de los materiales y las condiciones de contorno para la realización de la simulación.

Igual que en el perfil NACA, se utilizará como materiales el aluminio para la superficie del tren y el aire para el dominio de la caja que envuelve al tren.

Para la condición de contorno de velocidad, se definirá en la pared paralela que proyecta con el frente del tren, básicamente se selecciona la pared y el mismo software la reconoce para abrir un menú donde se deben de incluir los valores y en todo momento te dibuja una flecha sobre la cara que se está definiendo la velocidad para que no haya confusión en el sentido de ésta.

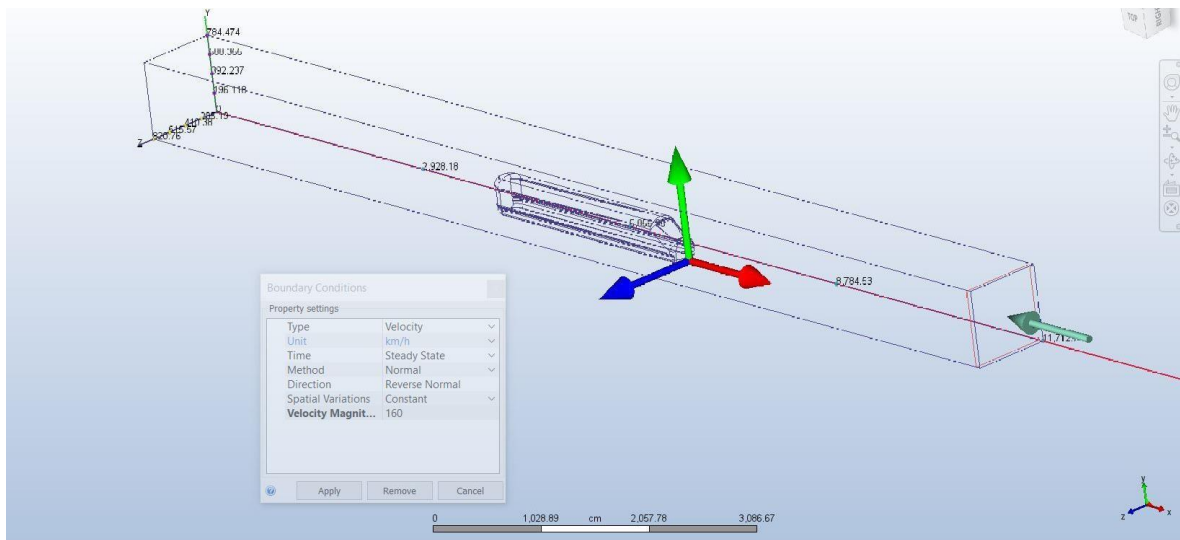


Figura 81:Detalle definición de la velocidad de servicio

Para la condición de presión se hará exactamente igual, pero en este caso se seleccionará la cara de la caja paralela que pega a la parte posterior del tren.

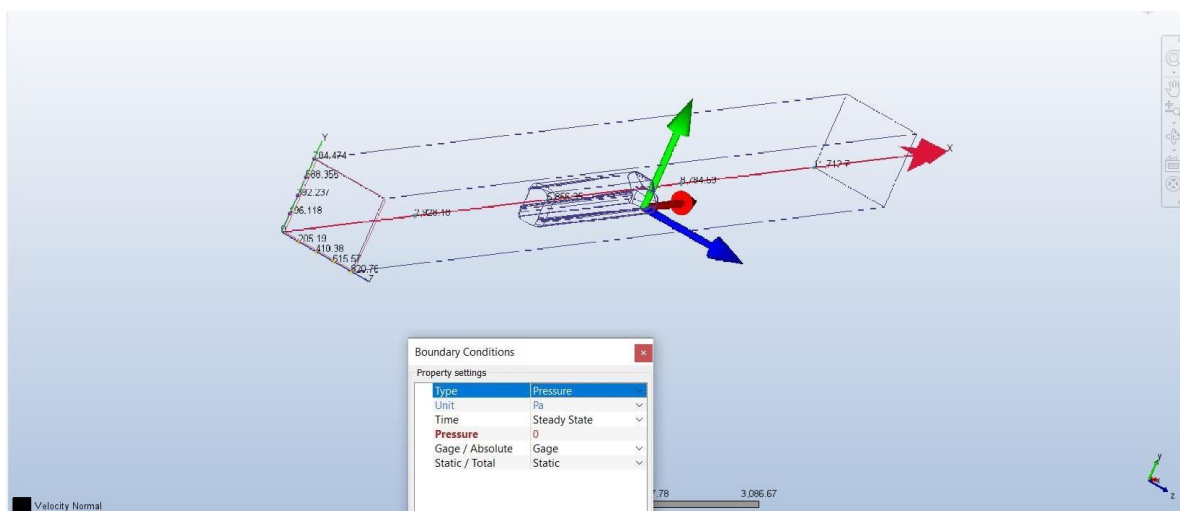


Figura 82:Detalle definición presión de salida

Y como se puede observar en la imagen se definirá como 0 Pa.

8.3-Creación de la malla computacional.

Ya que se va a simular un sólido 3d, la malla por lo tanto a diferencia de una simulación en 2d que se malla la superficie, en este caso se tendrán que mallar el volumen que encapsula al sólido.

Autodesk CFD en el menú de mallado, tiene la opción de mallado automático por el propio programa, el cual es muy versátil para obtener mallados de volumen acuerdo a un costo computacional discreto.

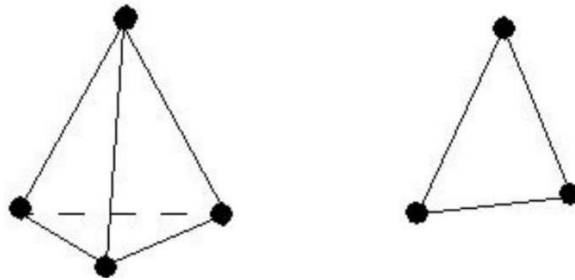


Figura 83:Detalle formas de geometría de mallado

Este software realiza la acción de mallado a través de triángulos para mallado de superficies 2d y tetraedros para mallados de volúmenes/sólidos 3D.

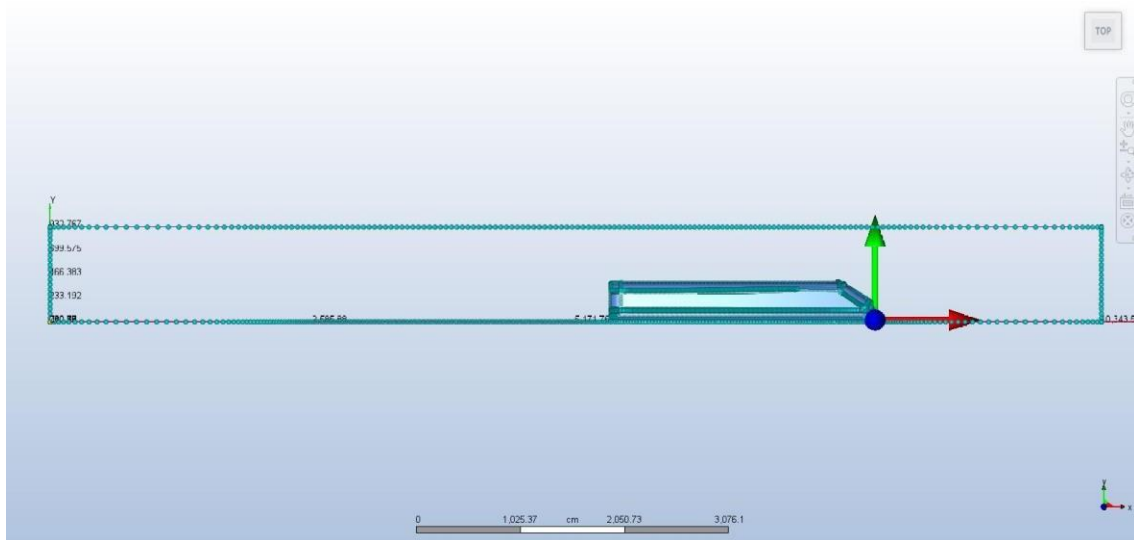


Figura 84:Situación nodos de la malla

Tras mallar de forma automática tanto el volumen exterior del tren como la superficie del tren, quedará un resultado de malla tal como se va a mostrar a continuación.

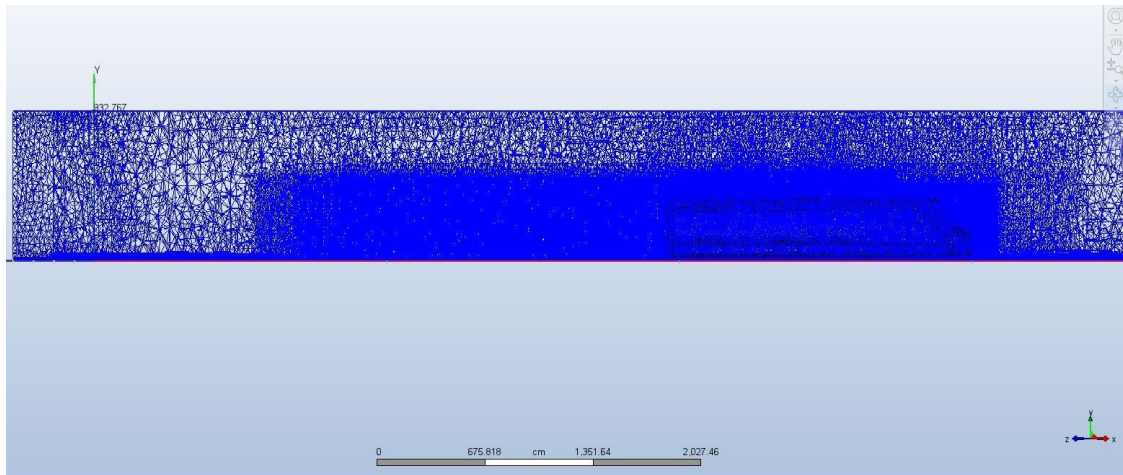


Figura 85:Malla creada

Se ha procedido a añadir en diferentes partes del tren, diferentes mallados con tetraedros de diferente volumen para obtener unos datos más precisos en esos puntos de la simulación, los cuales serán los puntos de más interés del tren (punta del tren, curvatura entre la cabeza del tren y el techo y la parte posterior del tren).

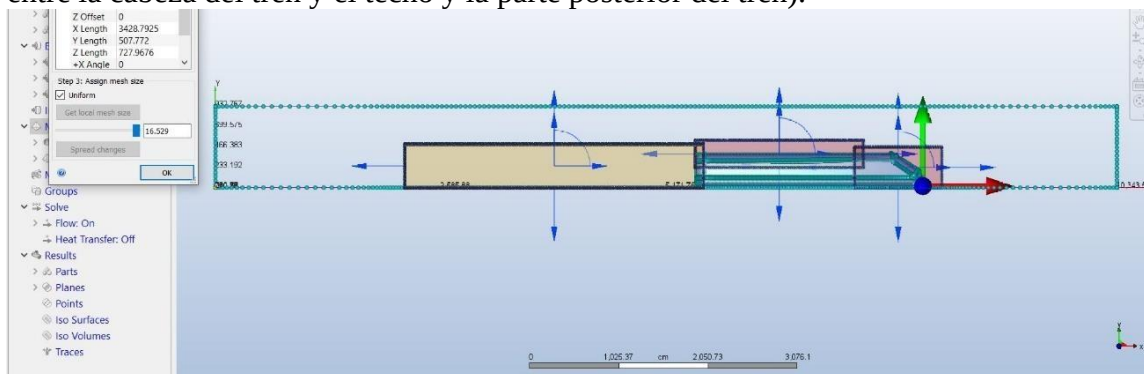


Figura 86:Refinamiento zonas de mallado

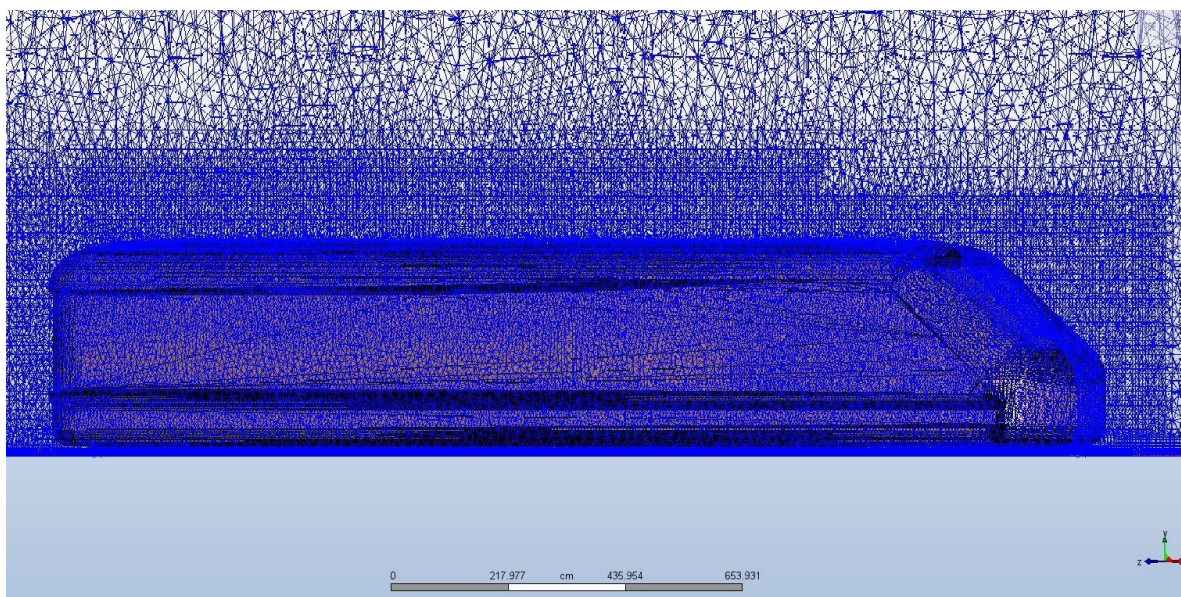


Figura 87:Detalle mallado del tren

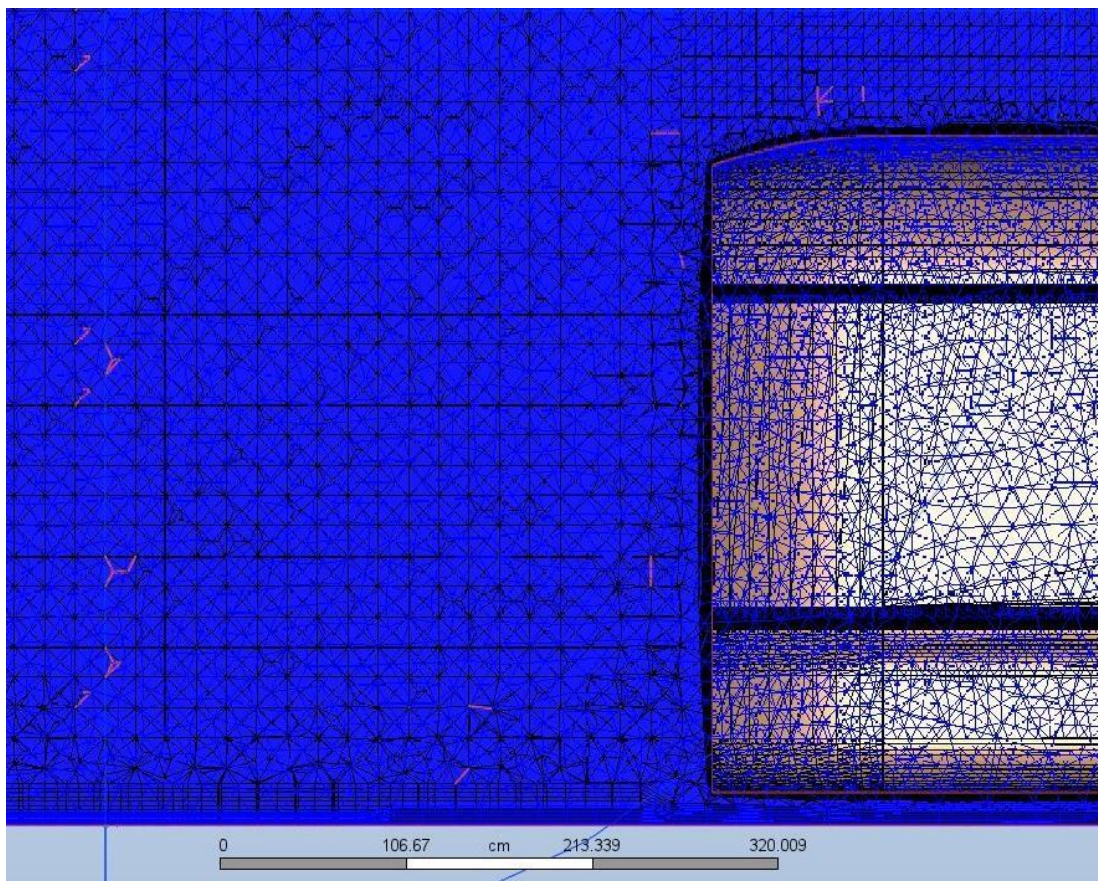


Figura 88:Detalle malla zona posterior del tren

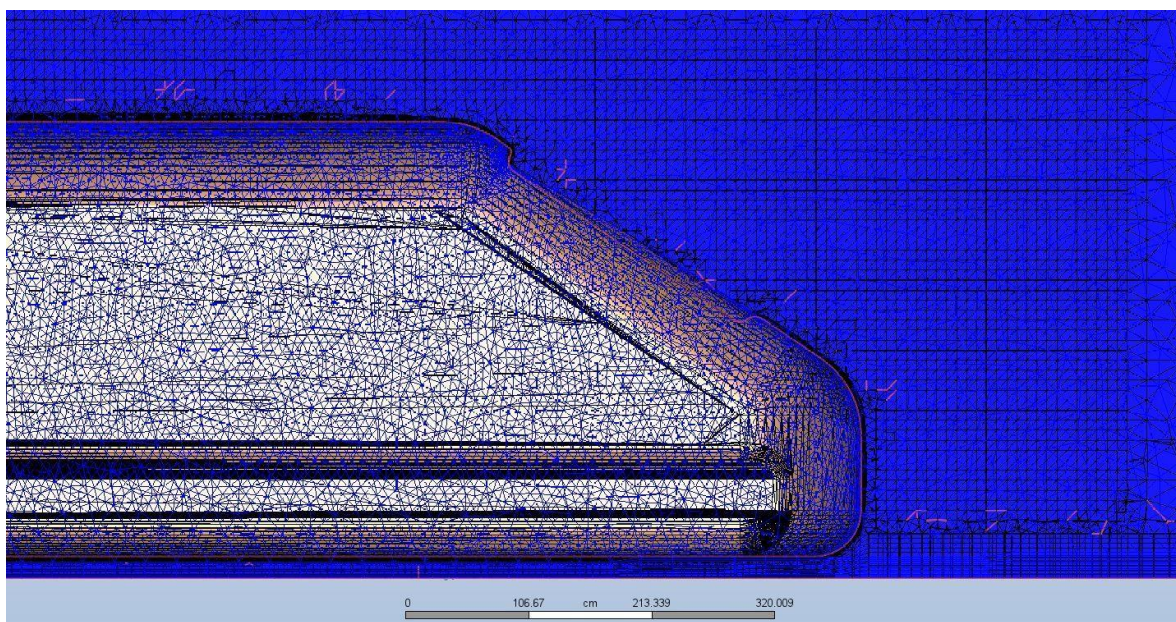


Figura 89:Detalle malla zona de la cabeza del tren

8.4-Directrices a tener en cuenta para poder simular.

Una de las definiciones que hay que tener muy en cuenta antes de la realización de la simulación es el volumen de control.

Para realizar una simulación con garantías de resultados óptimos, se debe de crear un dominio de control de 5-10 veces la cuerda del sólido, si por algún motivo(coste computacional, tamaño de RAM, procesador...etc) no se pudiera aplicar esas longitudes al dominio, se debe de aplicar a todas las paredes del dominio que no sean ni entradas ni salidas de variables a estudiar la opción de Slip-Symmetry.

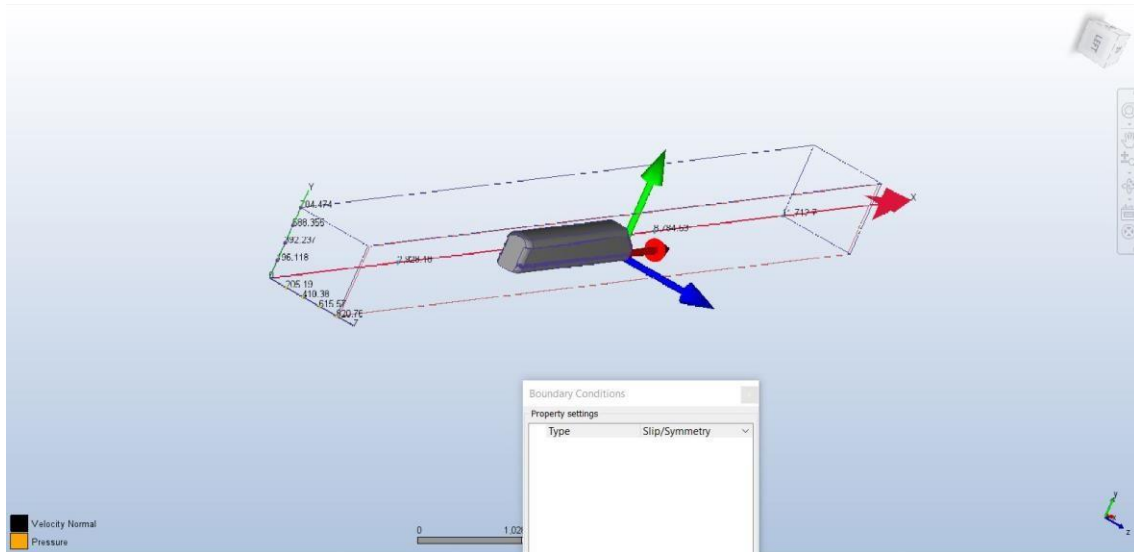


Figura 90:Detalle definición "slip Symmetry"

Esta definición aplicada a una pared, tiene como función dejar fluir el flujo entre la pared sin que se marque como límite de frontera en la simulación.

8.5-Elección del solver y parámetros de simulación.

Como se ha desglosado en el punto 7, cuando se ha validado el software, se simulará con el solver *SST K – omega*(*SST k – ω*).

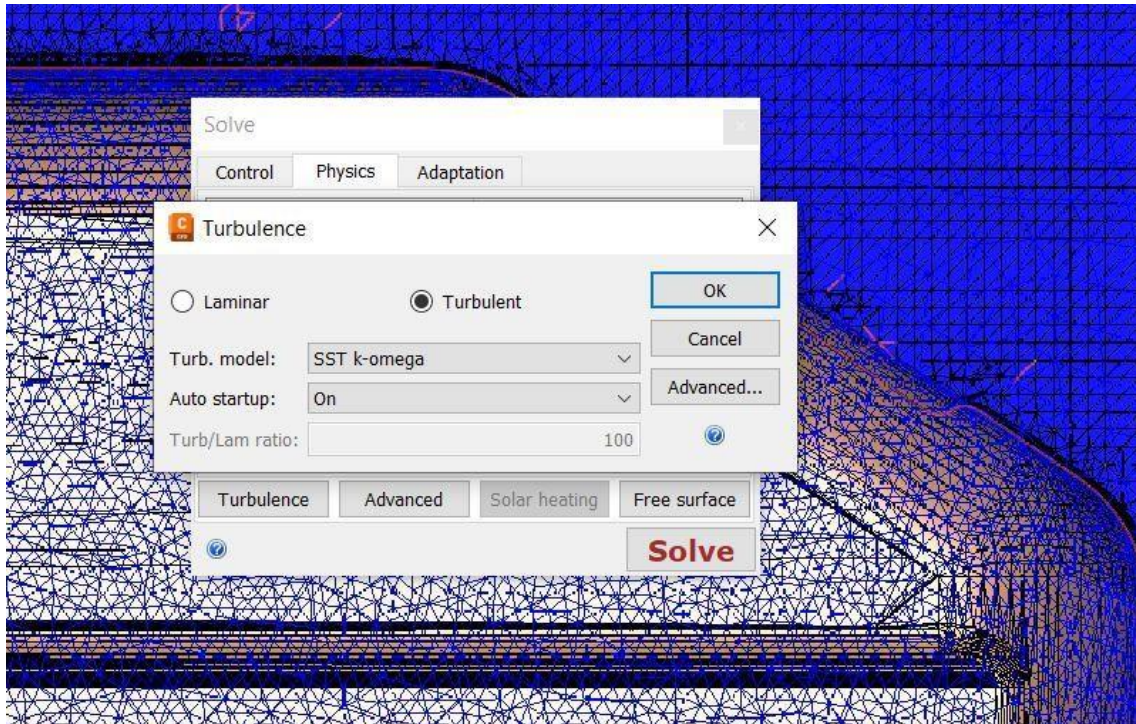


Figura 91:Detalle elección solver

También, se seleccionará por definición del estudio que se va a realizar, flujo turbulento por defecto.

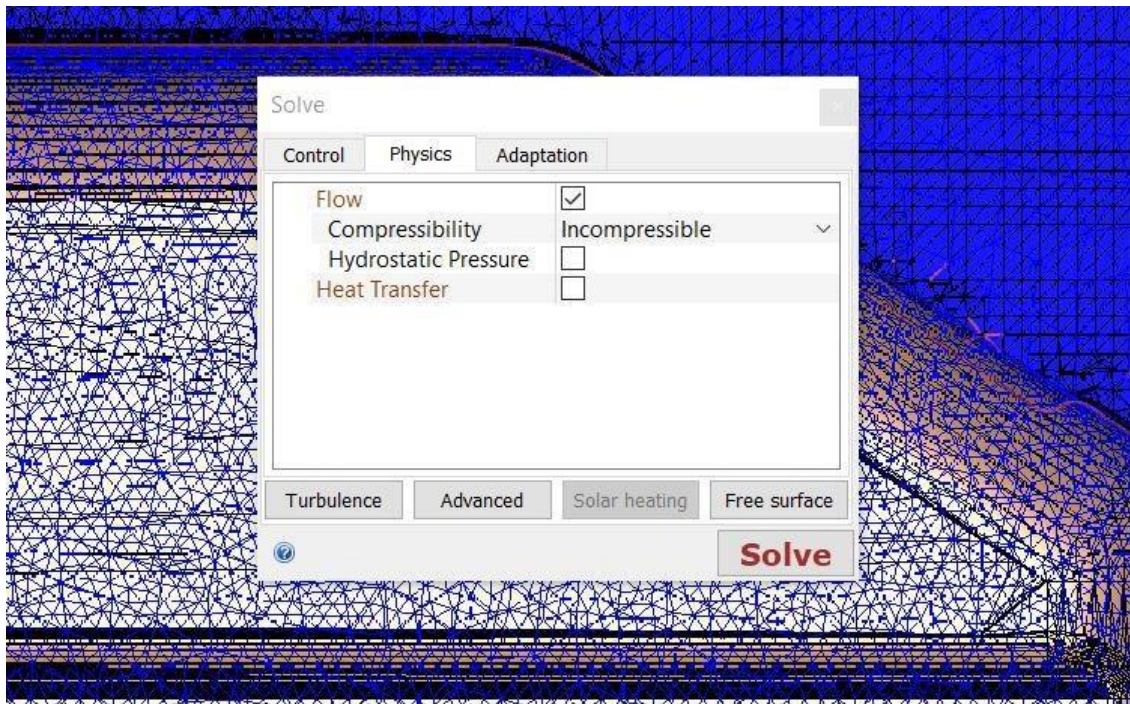


Figura 92:Detalle elección del tipo de flujo

Sobre el fluido, se ha seleccionado incomprensible, este se ha seleccionado de esta forma ya que Autodesk CFD nos propone realizar una prueba rápida de simulación, la cual si el numero de mach $M < 0.3$ nos sugiere utilizar flujo incomprensible ya que el coste computacional será menor y los resultados no variarán significativamente.

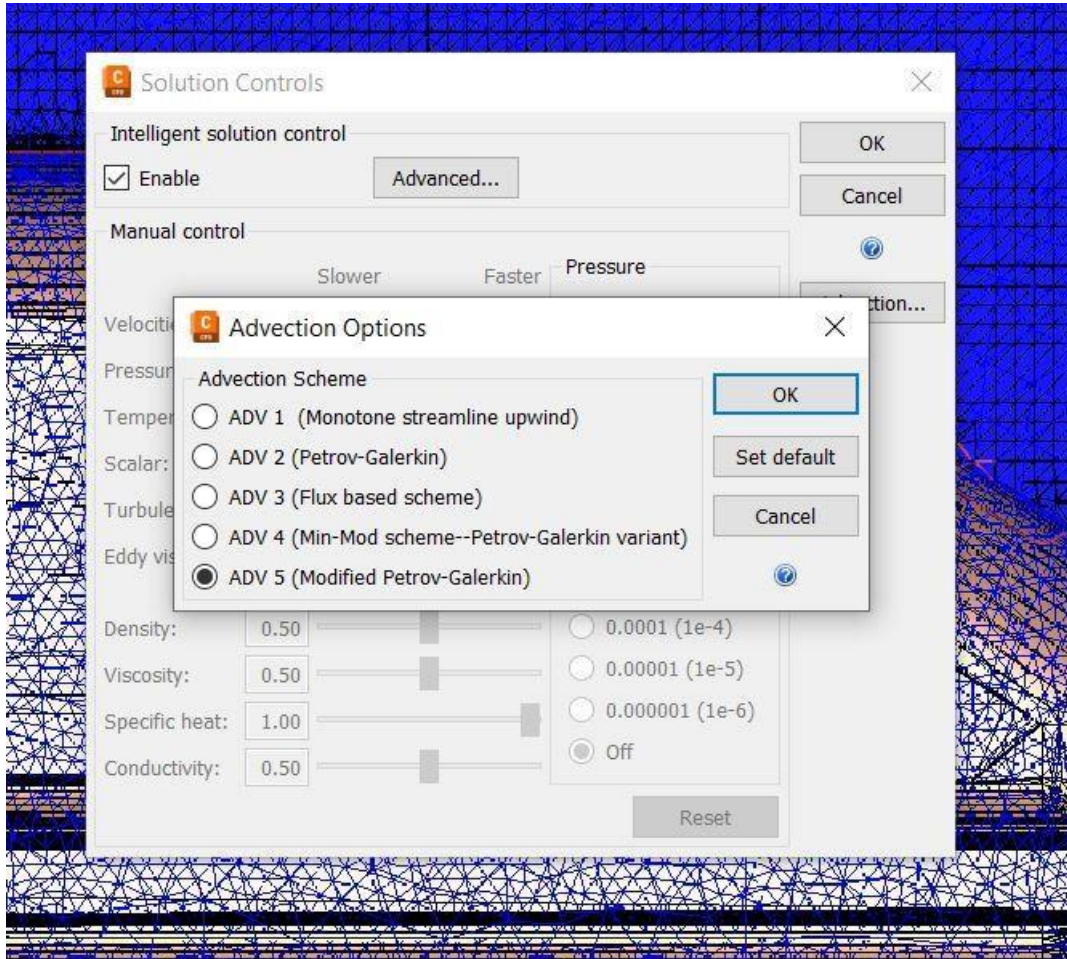


Figura 93:Detalle elección de la Advección

Autodesk CFD deja seleccionar para las simulaciones cinco tipos de advección, para esta simulación escogeremos la que nos proporciona por defecto (Modified Petrov-Galerkin), esta advección es la que Autodesk recomienda en las simulaciones ya que con esta configuración es como han obtenido las mejores aproximaciones de resultados.

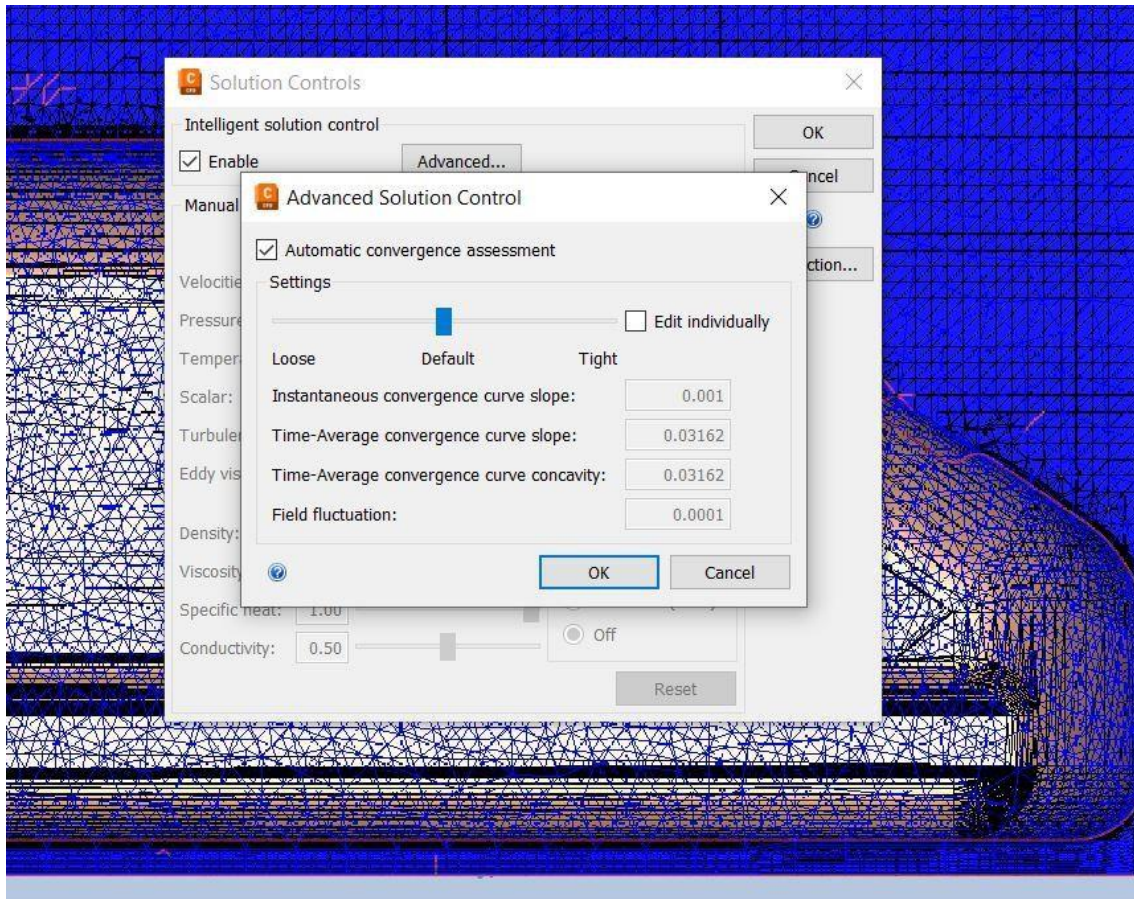


Figura 94:Detalle valores de convergencia

Otro punto a destacar son los criterios de convergencia, Autodesk CFD proporciona un menú donde se pueden interactuar con ellos, aunque para esta simulación va a permanecer los proporcionados por defecto.

Por último y para concluir el menú de la configuración del solver, aparecerá una ultima ventana para seleccionar la simulacion del caso, si se va a desarrollar en estado constante o en estado transicional(*Steady, Transient*).Tambien se podran elegir las iteraciones en las que va a trabajar la simulación y una pestaña para elegir en que opción se va a simular el estudio, si con el propio ordenador del usuario o una opción de nube de Autodesk para licencias fuera del ámbito académico.

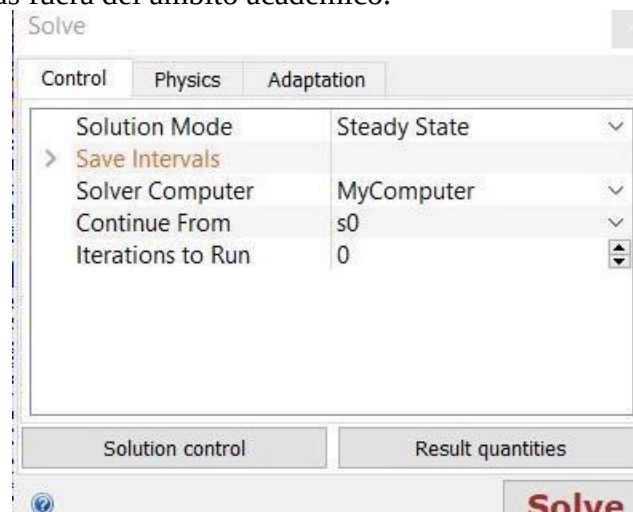


Figura 95:Detalle de selección de iteraciones

9-Obtención de datos tras la simulación.

Se van a mostrar los diferentes datos obtenidos durante la simulación.

9.1-Número de Reynolds.

Número de Reynolds obtenido tras la convergencia:

$$Re = 1.81051 \cdot 10^7$$

9.2-Número Mach

Número Mach obtenido tras la convergencia:

$$M = 0.0867969$$

9.3-Perfil de velocidades.

A través de un plano que ha “dividido” el sólido se ha permitido la obtención de un perfil de velocidades.

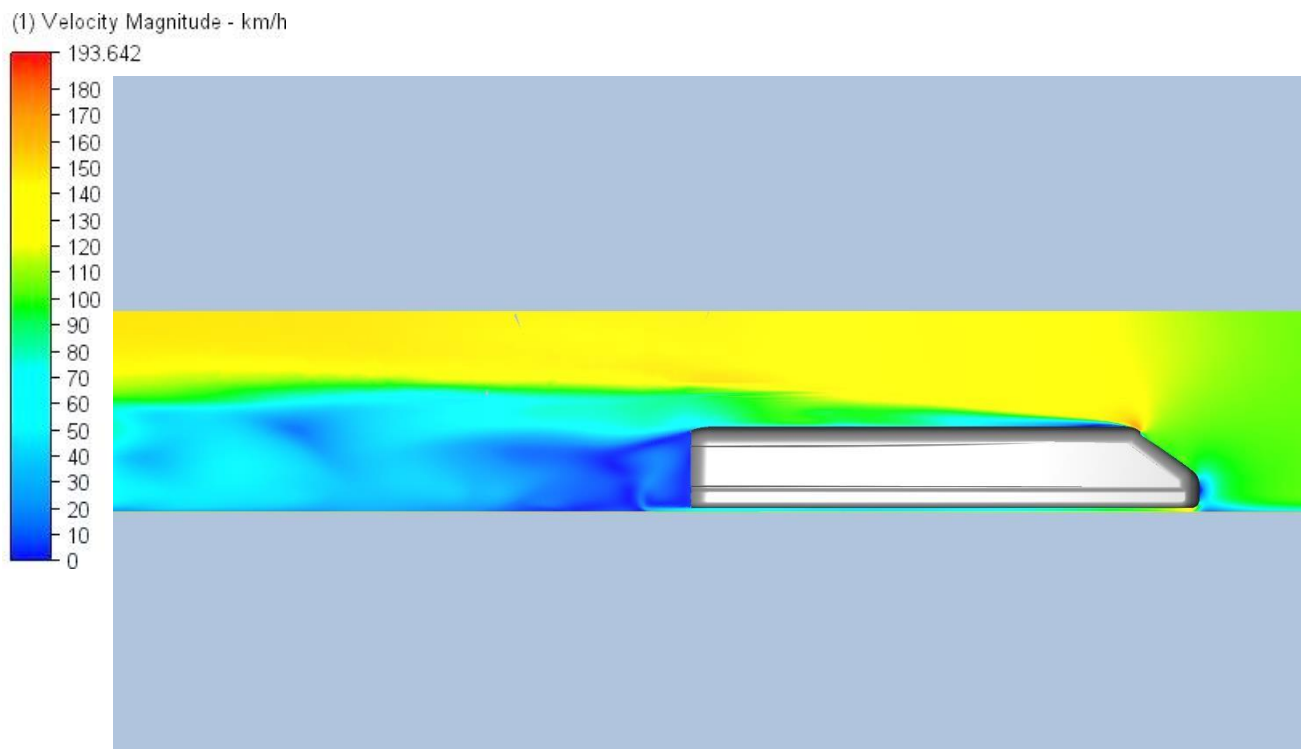


Figura 96: Perfil velocidades completo

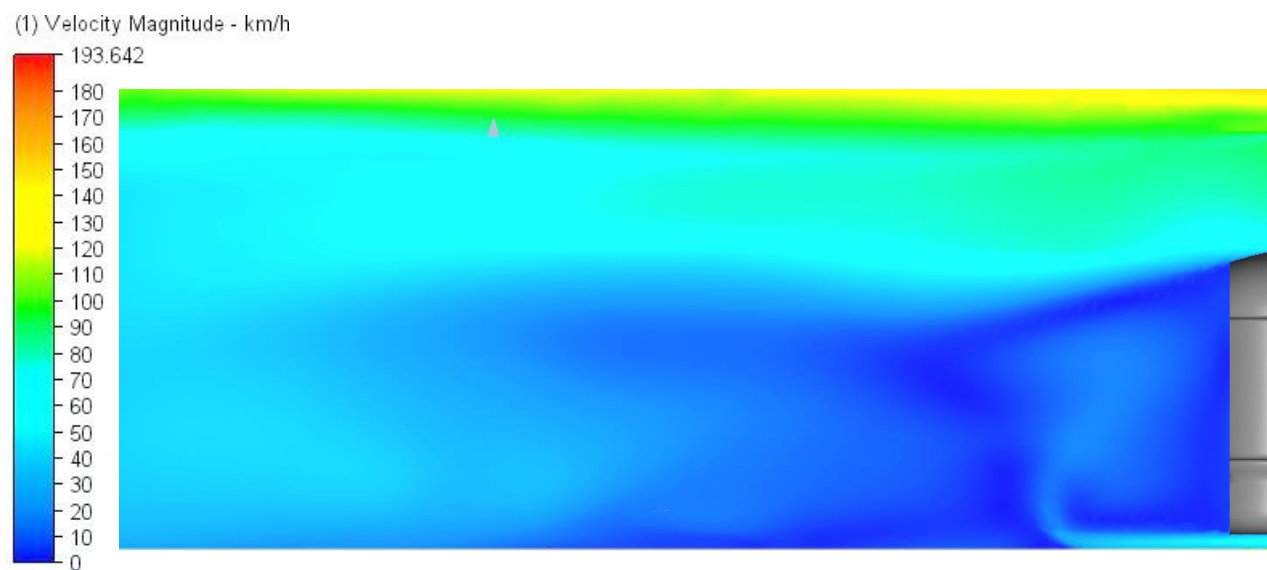


Figura 97: Perfil de velocidades en la zona posterior

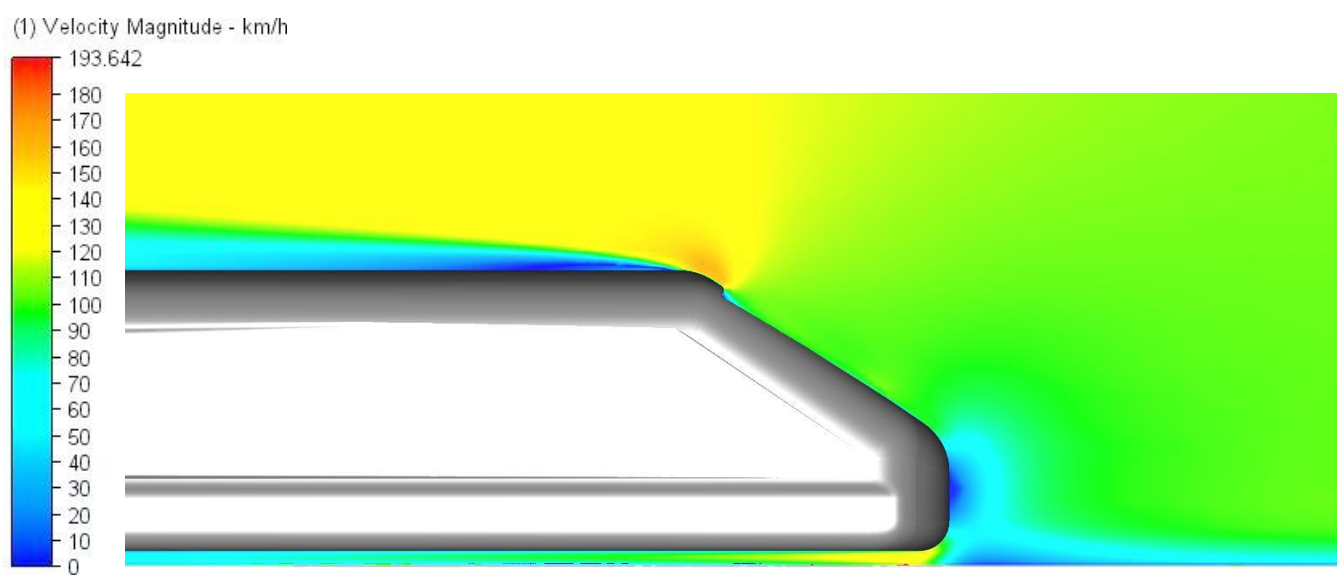


Figura 98: Perfil de velocidades en la zona de la cabeza

También se han obtenido trazas de velocidad, para percibir mejor el movimiento que el flujo hace sobre la superficie del tren.

(1) Velocity Magnitude - km/h

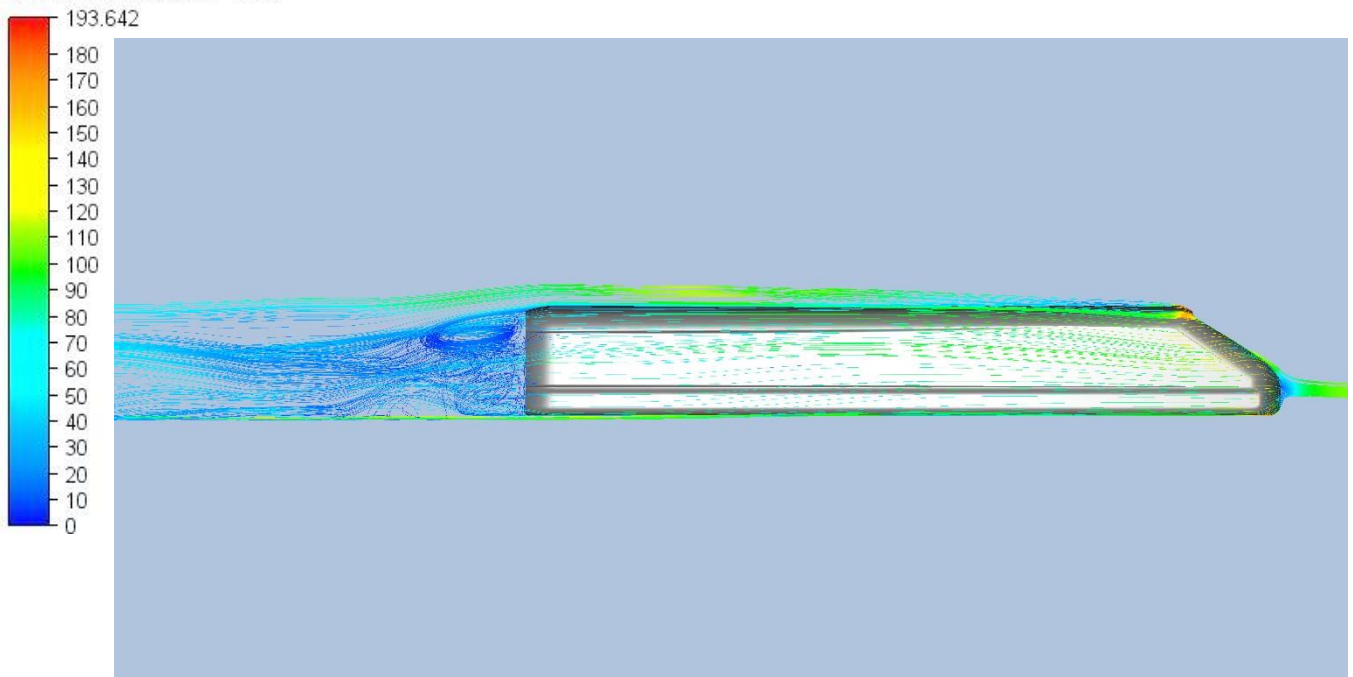


Figura 99: Trazas de velocidad completo

(1) Velocity Magnitude - km/h

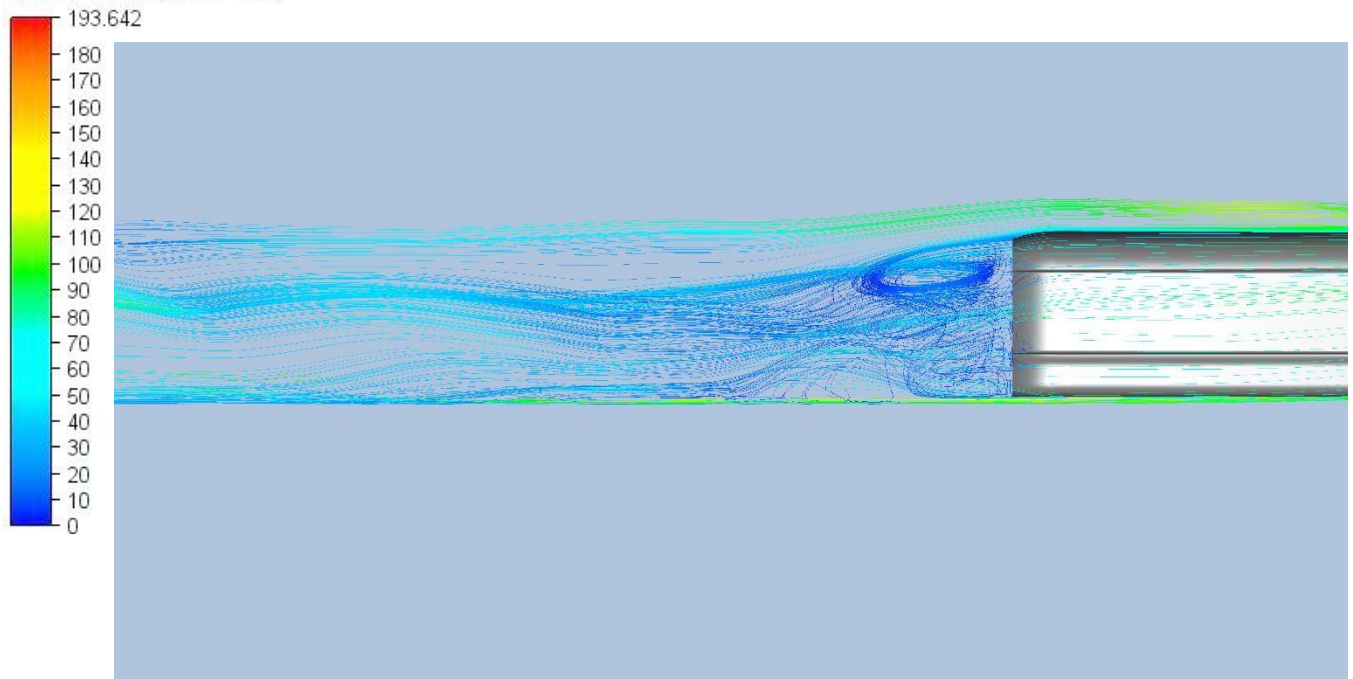


Figura 100: Trazas de velocidad en la zona posterior

(1) Velocity Magnitude - km/h

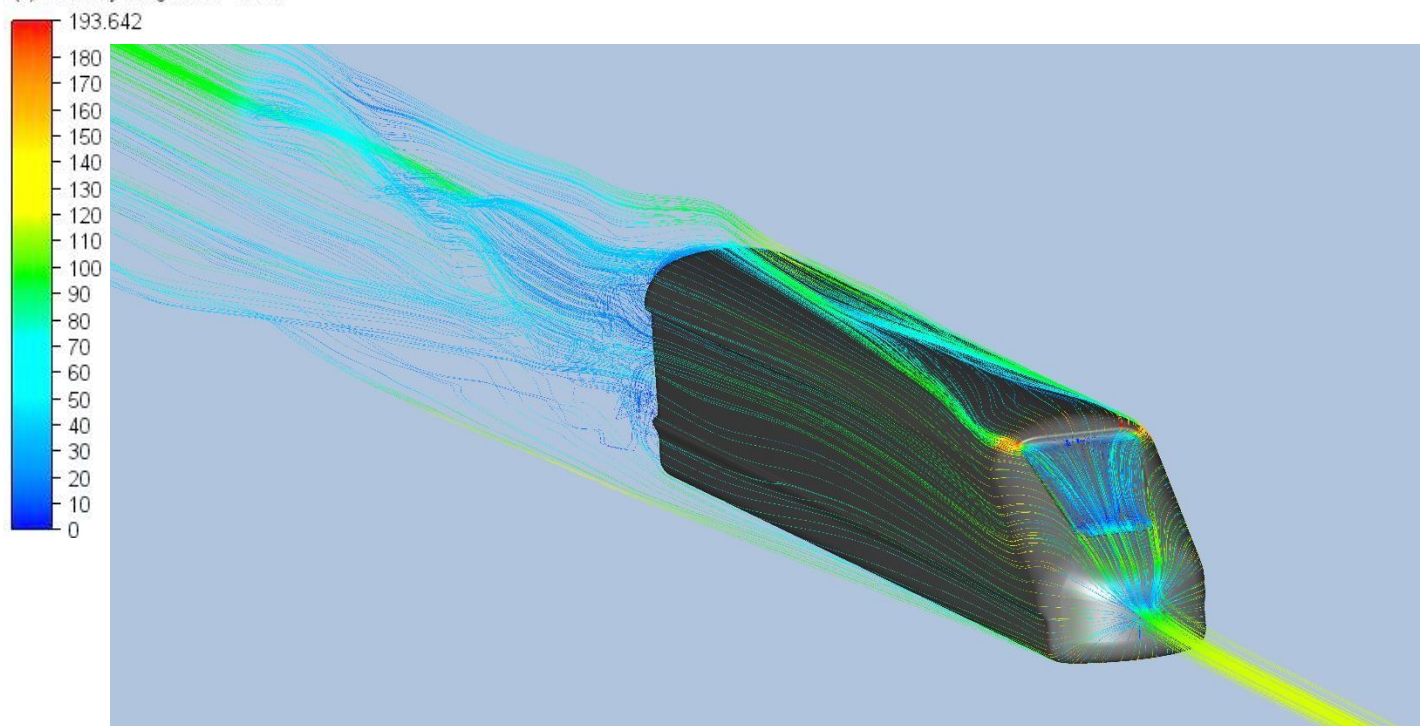


Figura 101:Detalle trazas de velocidad tren completo

(1) Velocity Magnitude - km/h

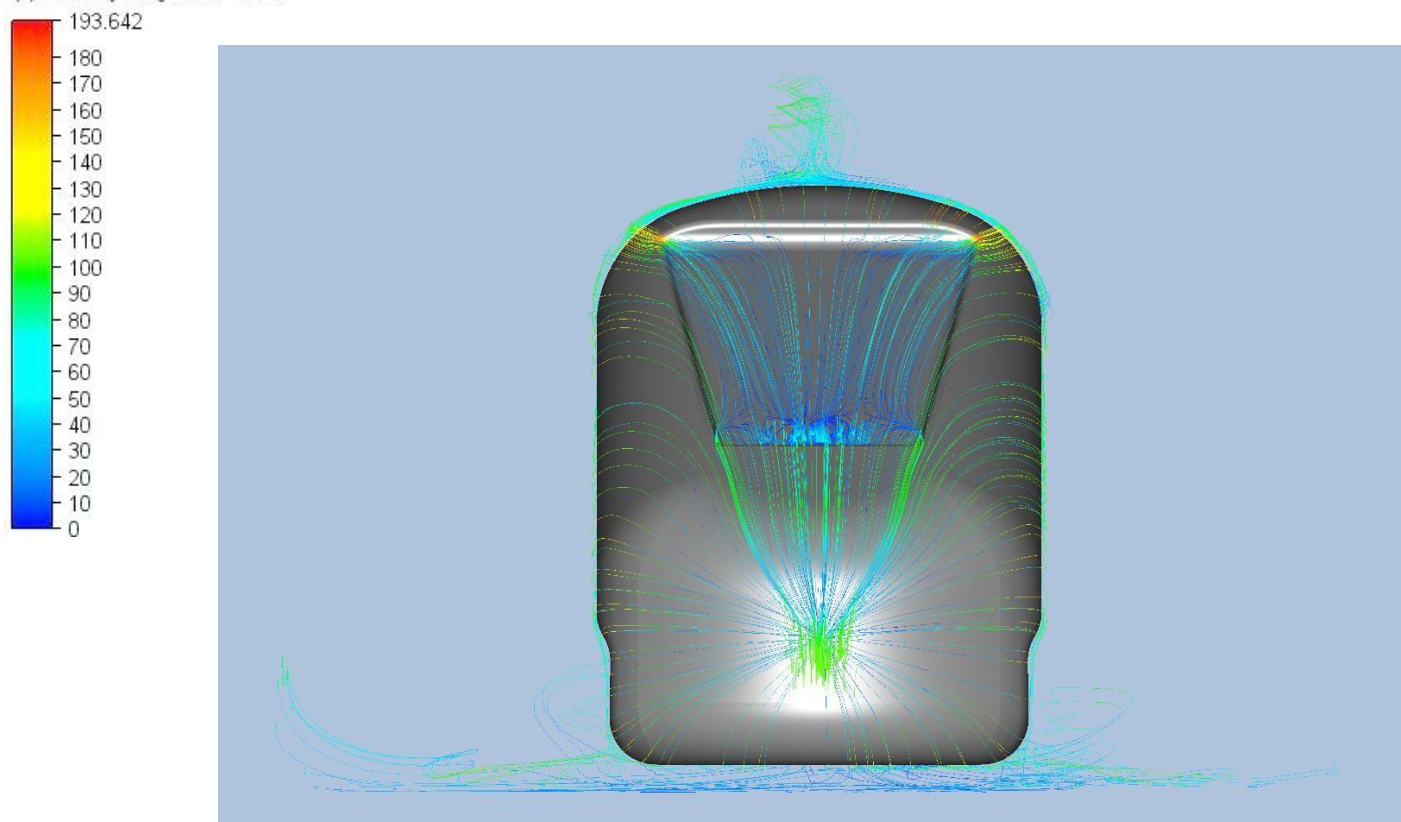


Figura 102:Detalle trazas de velocidad sobre la cabeza del tren

(1) Velocity Magnitude - km/h

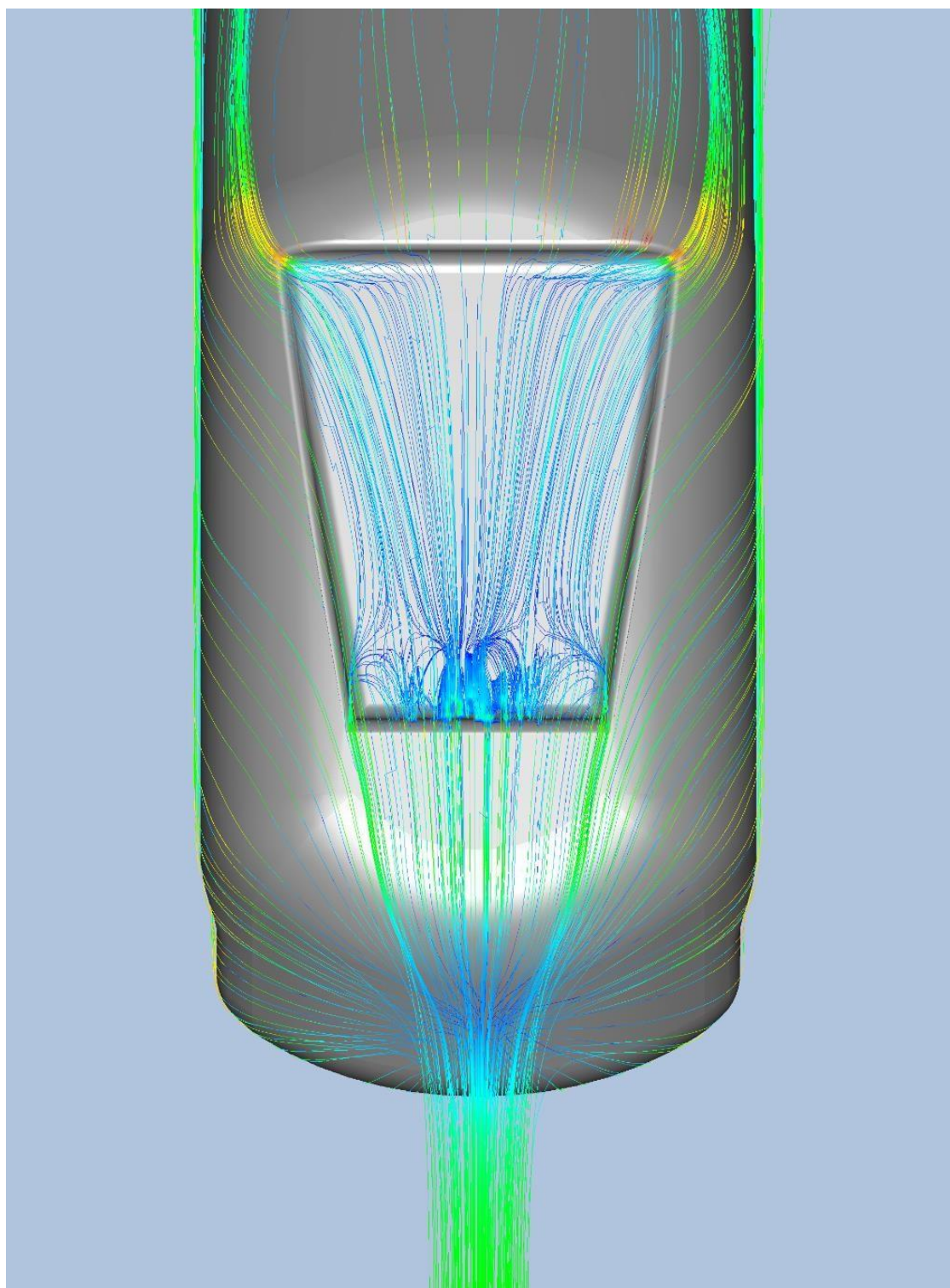
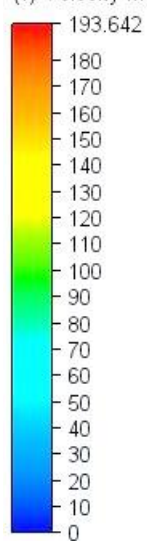


Figura 103:Detalle trazas de velocidad sobre la luna del tren

9.4-Perfil de presiones.

Igual que para la velocidad, se ha creado un plano para ver el contorno de presiones alrededor del tren.



Figura 104: Perfil de presiones completo



Figura 105: Perfil de presiones sobre la zona de la cabeza

(5) Static Pressure - Pa

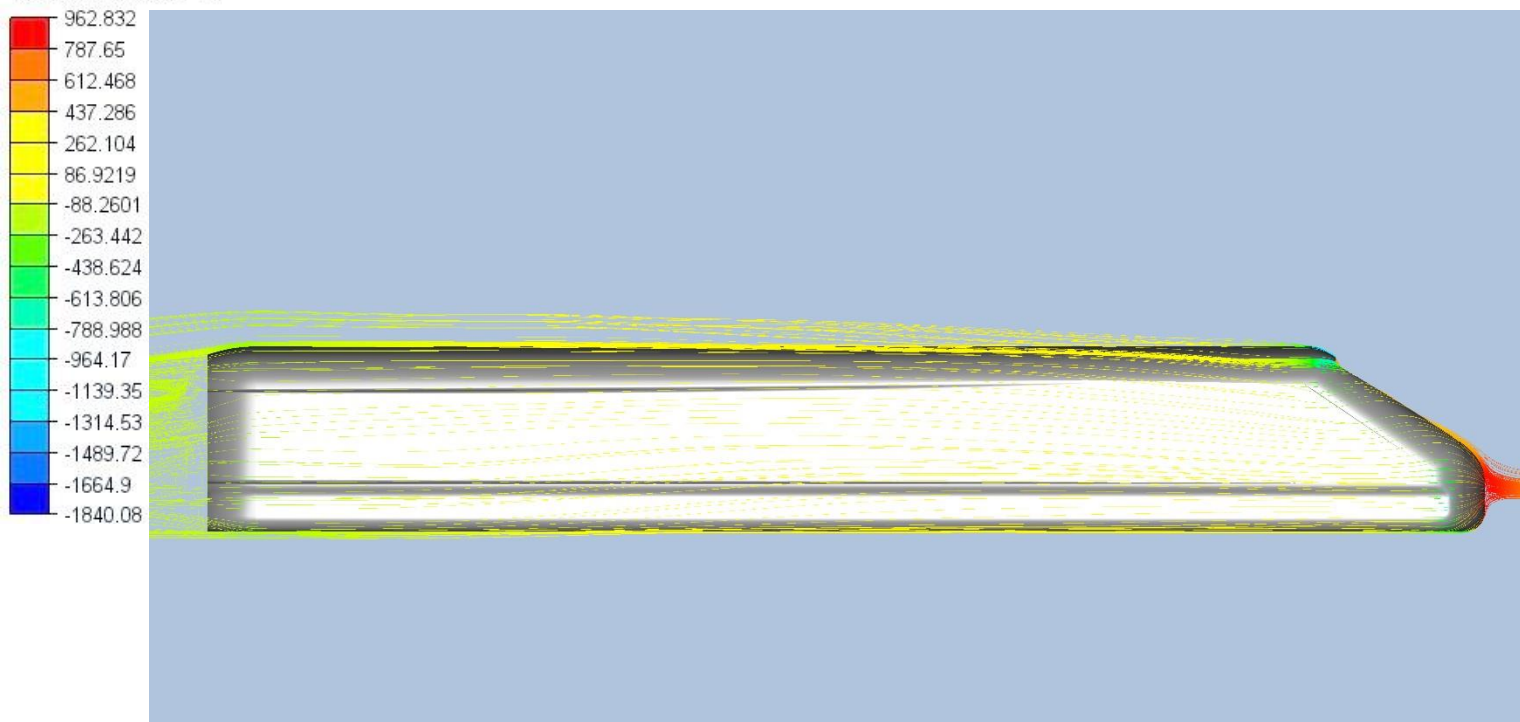


Figura 106:Trazas de presión sobre el tren

(5) Static Pressure - Pa

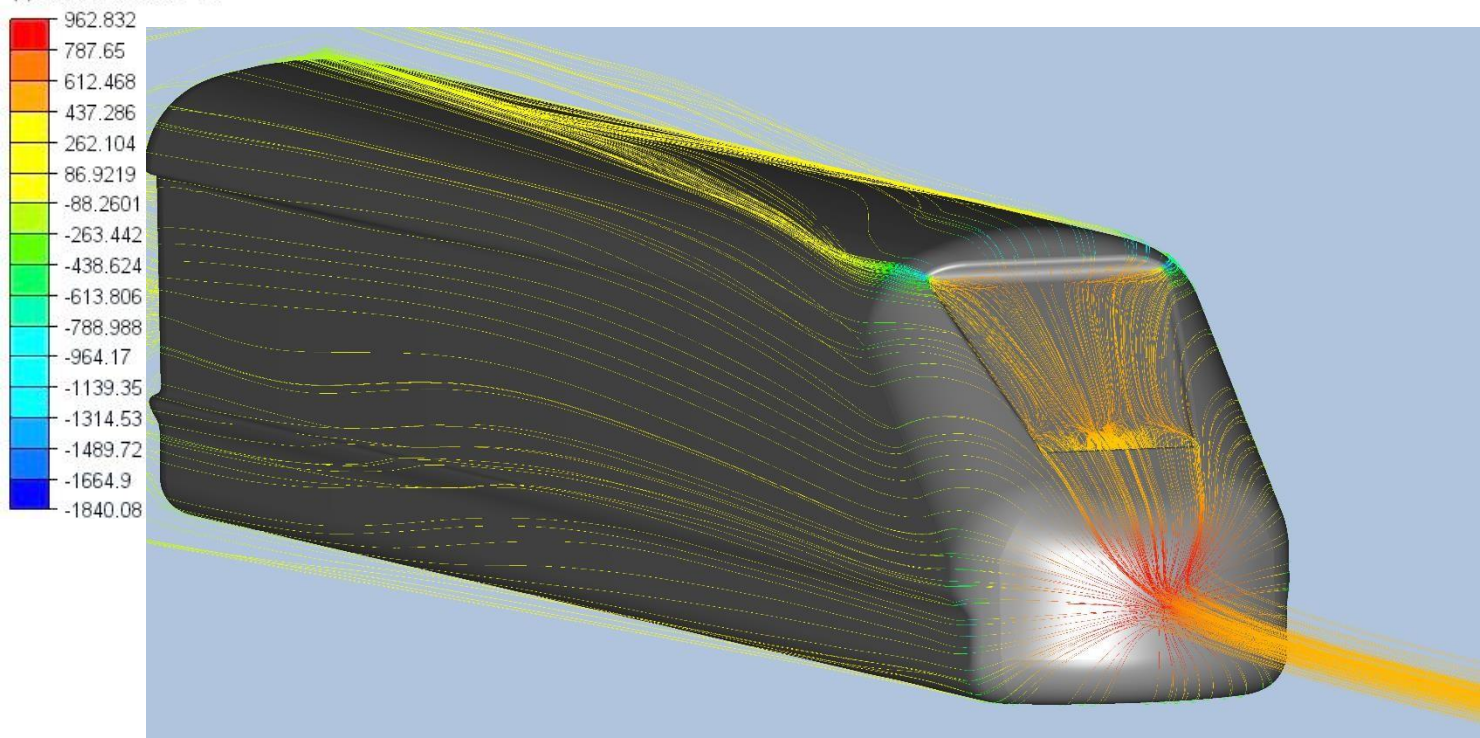


Figura 107:Detalle trazas de presión tren completo

(5) Static Pressure - Pa

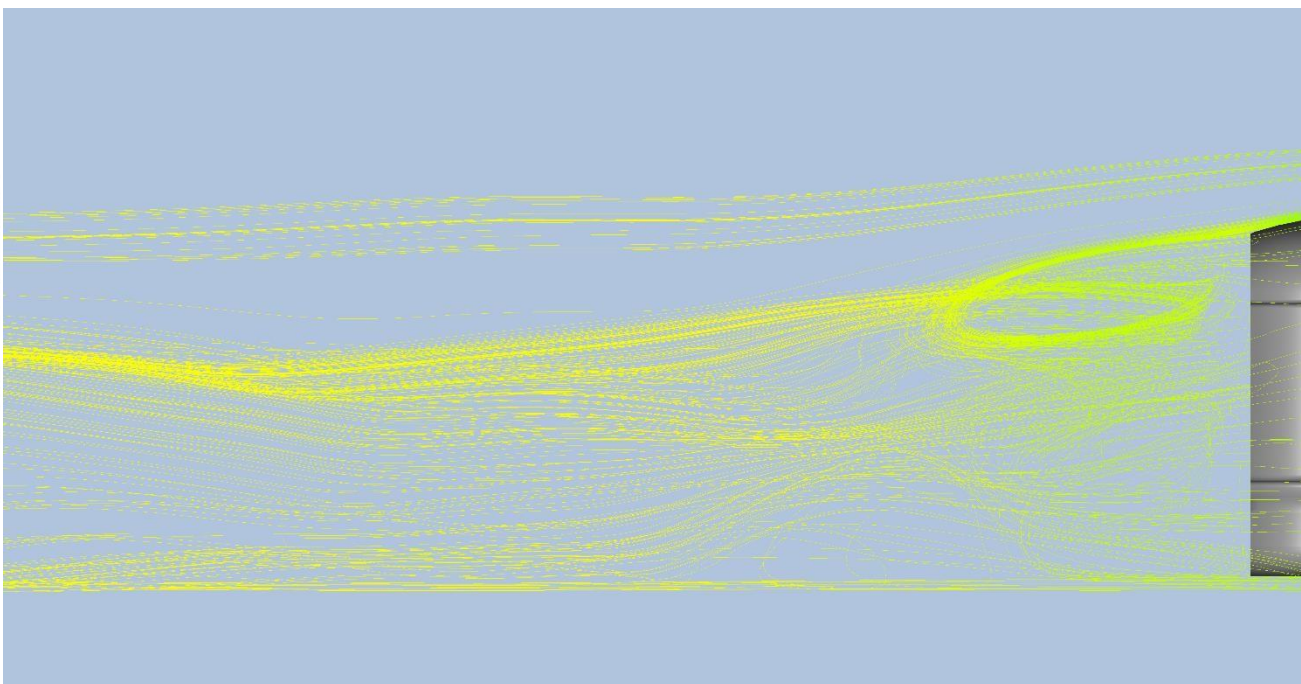
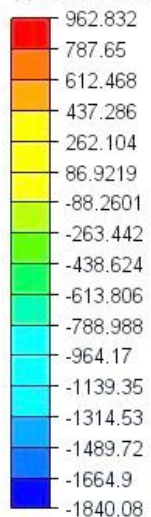


Figura 108:Detalle trazas de presión zona posterior del tren

(5) Static Pressure - Pa

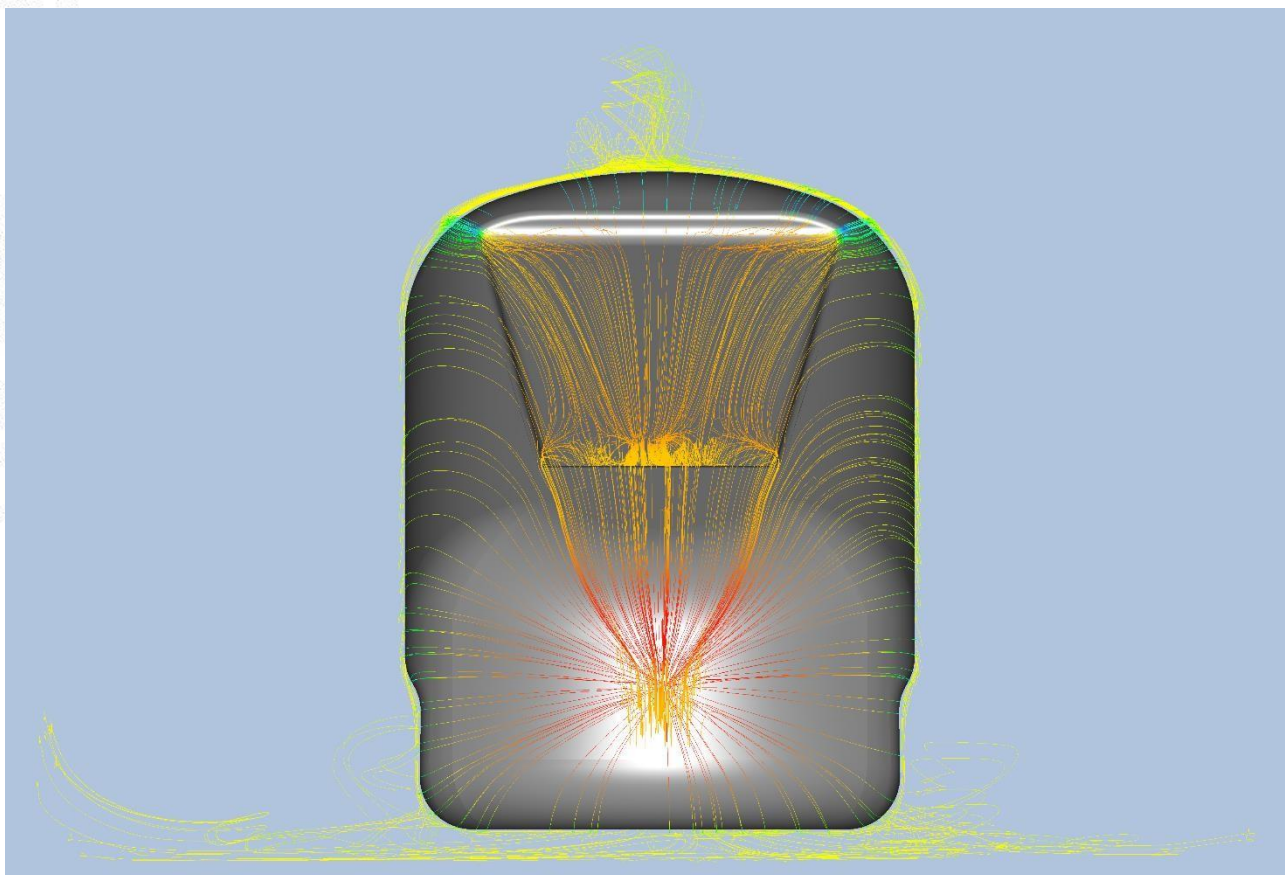


Figura 109:Detalle trazas de presión sobre la cabeza del tren

(5) Static Pressure - Pa

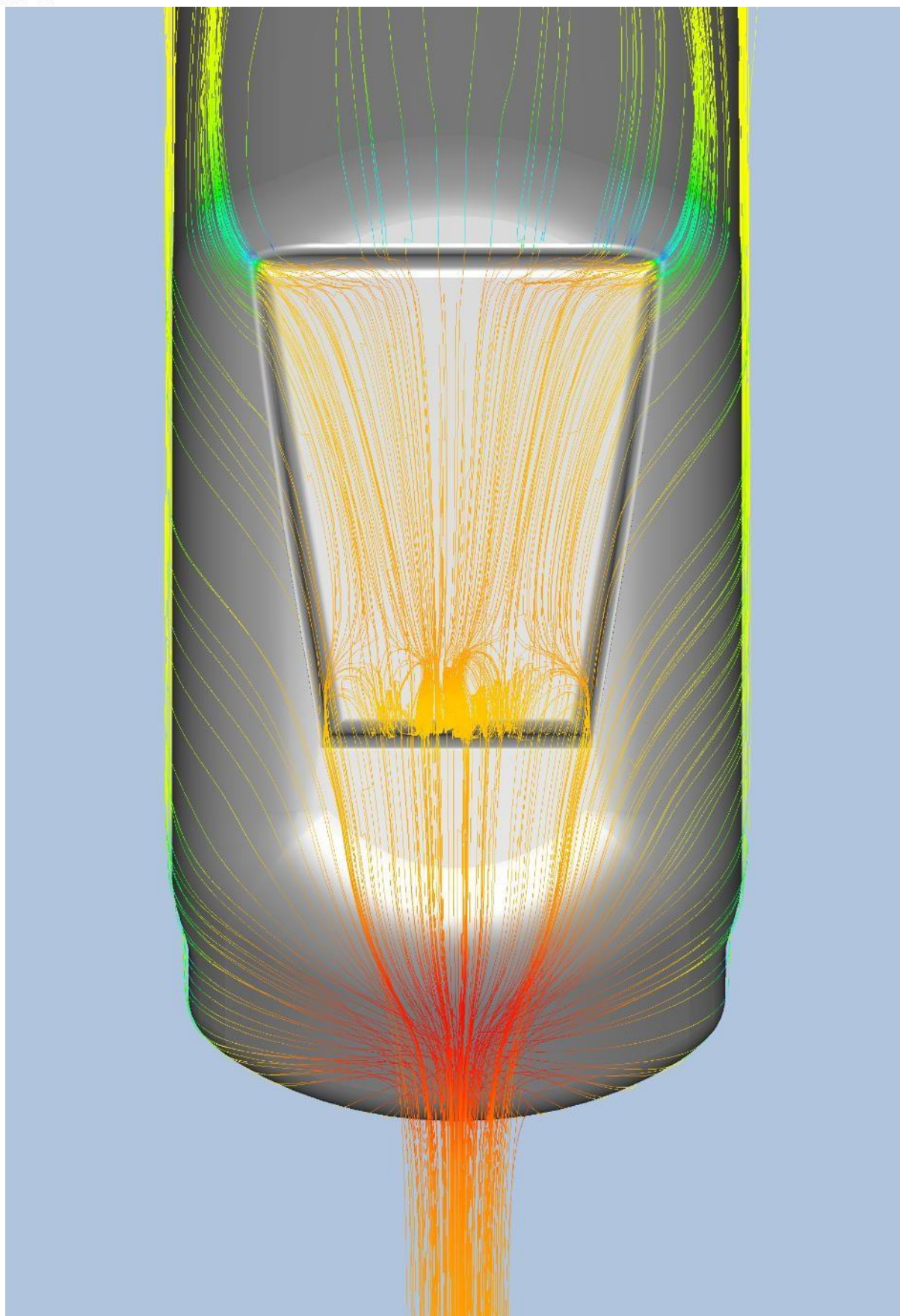


Figura 110:Detalle trazas de presión sobre la luna del tren

10.-Análisis de los datos obtenidos

Tras exponer los diferentes perfiles de resultados para presión y velocidad, se ha podido ver como actuaría el flujo de aire a través de la superficie del tren.

El primer dato que se va a analizar será el Numero de Reynolds ¿Qué nos puede aportar este dato?, ¿Para qué valores de Reynolds debemos guiarnos para este tipo de simulaciones?. A continuación, vamos a intentar desglosar la coherencia de este valor de Reynolds.

En la primera simulación del solido 3D, se obtuvo un valor de Reynolds:

$$Re = 1.81051 \cdot 10^7$$

Para validar este valor de Número de Reynolds, se va a citar el estudio realizado en *Train Aerodynamics Fundamentals and Applications*.⁽¹⁾ donde se puntualiza sobre valores de Número de Reynolds estudiados.

Básicamente se da a entender que, para simulaciones de flujos a través de trenes con dimensiones reales estudiados en túnel de viento, los valores del Número de Reynolds, se darán entre unos valores ($\approx 10^6 - 10^7$), volviendo al valor obtenido del Reynolds proporcionado es de $1.81051 \cdot 10^7$ el cual al estar dentro de los limites establecidos estudiados en túneles de viento, se da por un valor correcto y validado según los estudios experimentales.

Otros de los puntos que se van a analizar, será el estudio de las turbulencias surgidas tanto en la cola del tren, como en el frontal de la cabeza del tren.

Primero se analizarán las turbulencias de la cola:

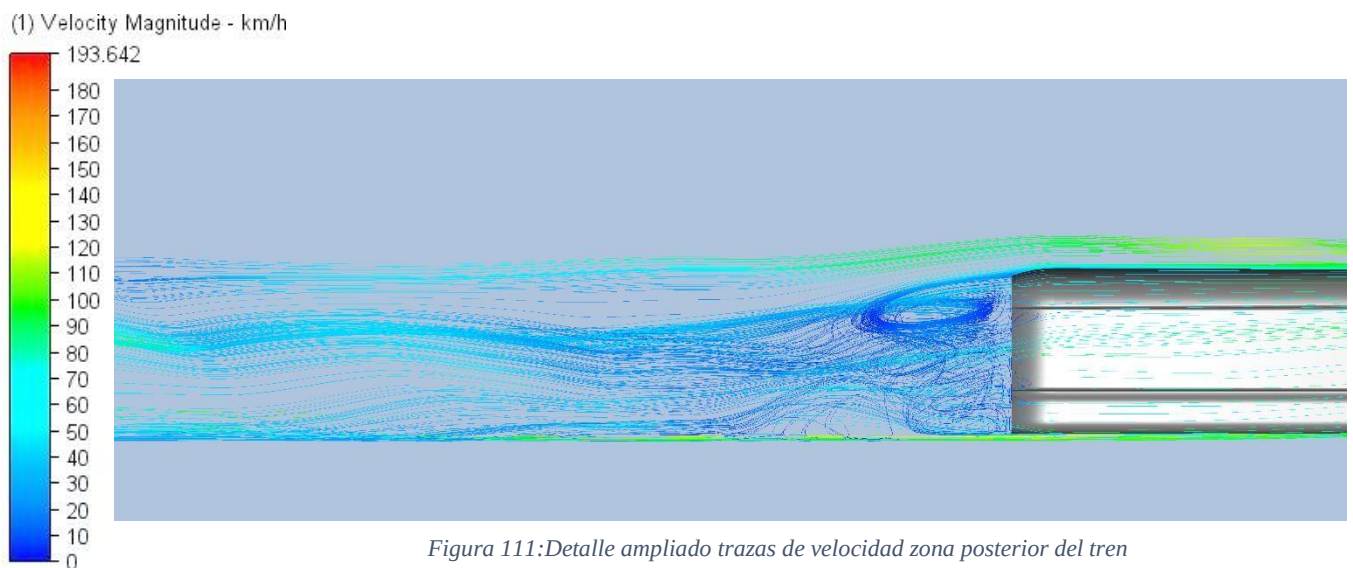


Figura 111:Detalle ampliado trazas de velocidad zona posterior del tren

Como se puede observar, hay una gran acumulación de vórtices en la parte posterior del tren, aparte de reducir la velocidad del flujo en esa parte del tren, se incrementa el flujo turbulento inestable, el cual se intenta evitar para conseguir un rendimiento aerodinámico eficiente.

Con cierta similitud ocurre con el fontal de la cabeza del tren.

(1) Velocity Magnitude - km/h

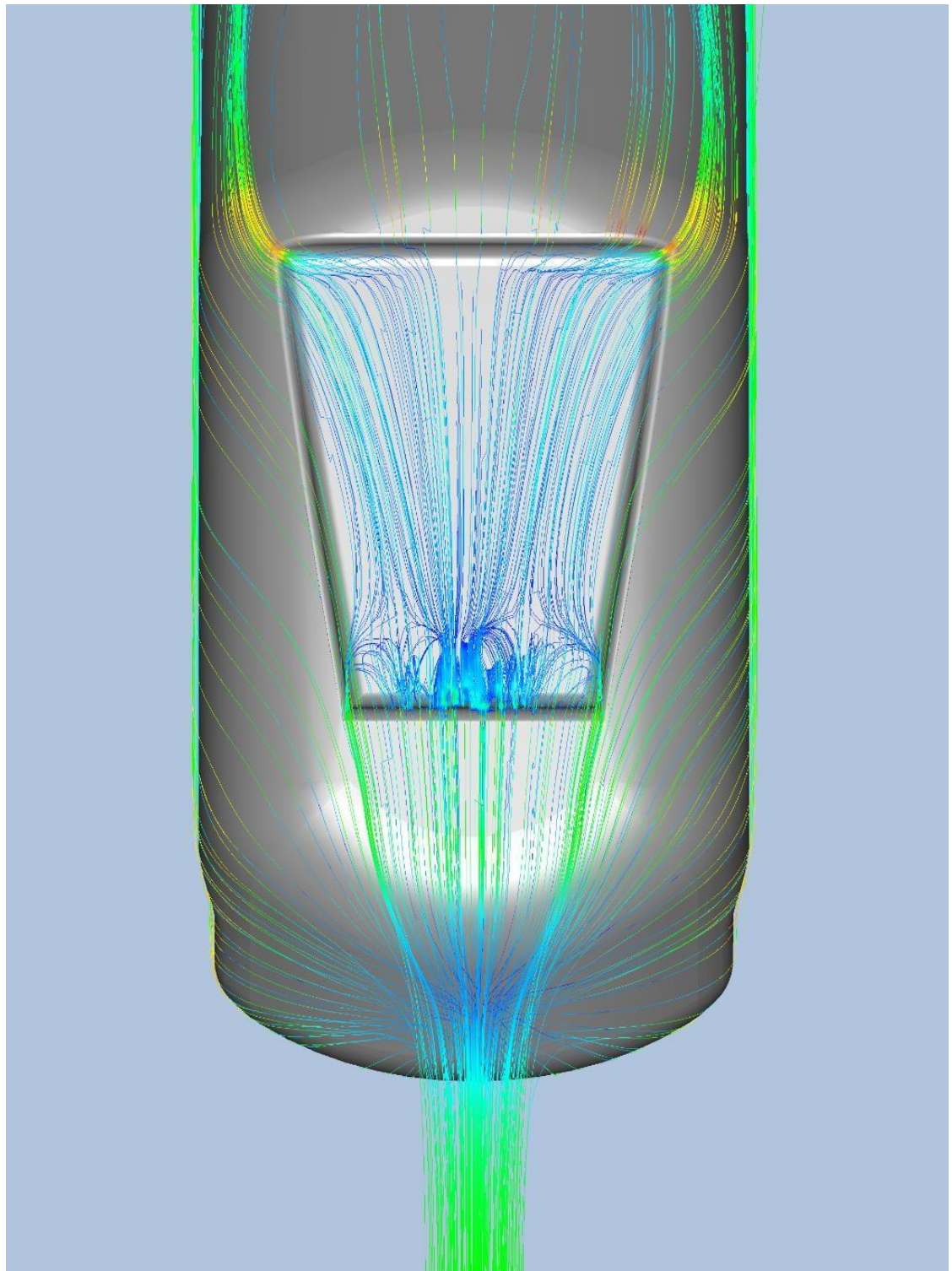
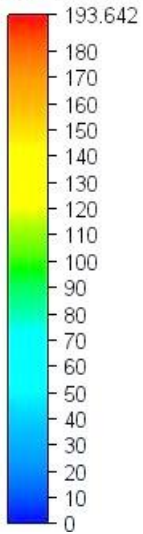


Figura 112:Detalle ampliado zona delantera del tren

Se puede observar que se crea una basta turbulencia a la entrada del perfil de lo que simula la luna del tren, por lo que surgirá un deceso de velocidad y un incremento de la presión en todo lo que sería la superficie de la luna, esto nos está dando a entender defectos en el diseño y posibles correcciones para una versión que sea más eficiente aerodinámicamente hablando.

11.- Propuesta de mejora del diseño.

Como se ha podido apreciar en el punto anterior, se pueden realizar algunos cambios en la superficie del tren para que sea más aerodinámicamente eficiente.

Las principales mejoras que se realizarán estarán situadas en el la cabeza del tren.

11.1-Inclusión de formas y elementos aerodinámicos.

Para el frontal del tren, se van a diseñar una especie de aletas para redirigir el flujo hacia los laterales.

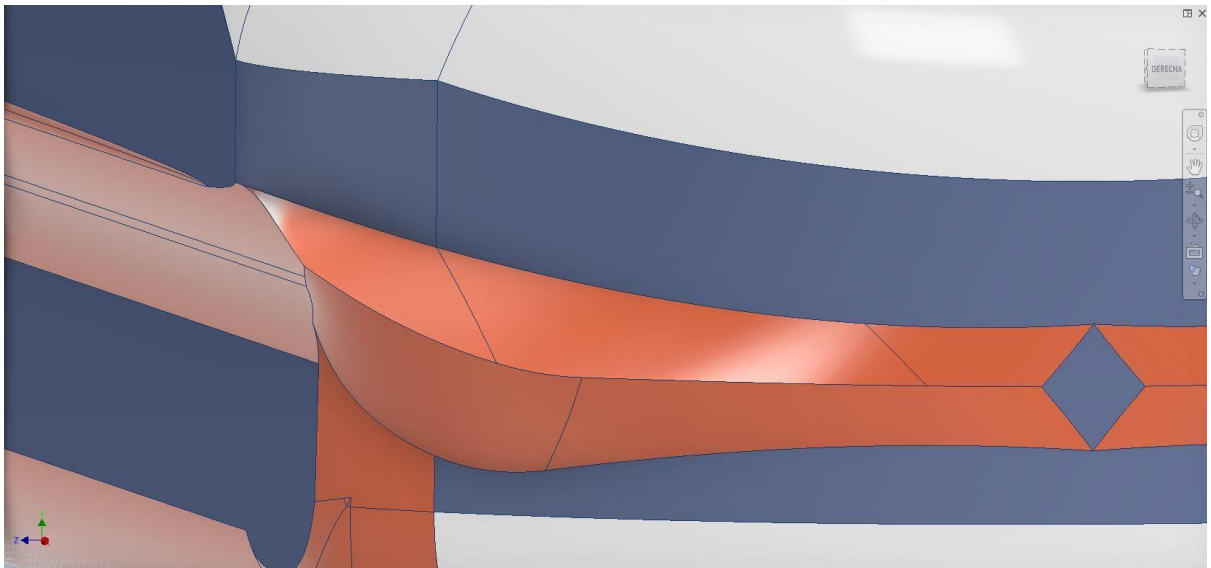


Figura 113:Detalle modificación aletas

Estas serán diseñadas, como es lógico simétricamente en ambos lados del tren.

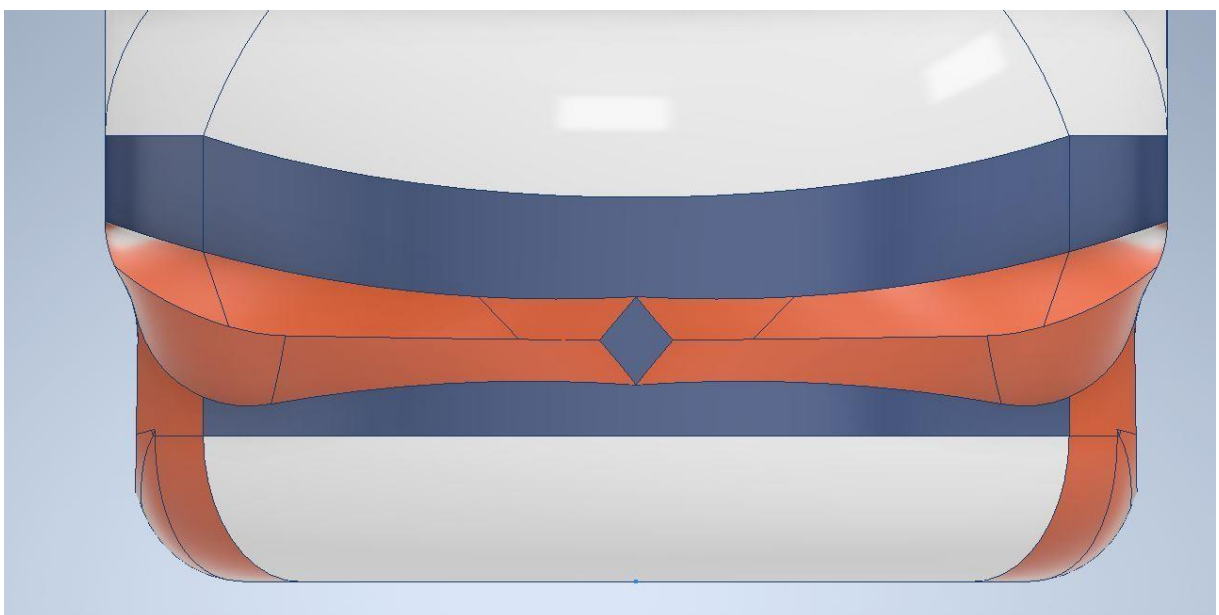


Figura 114:detalle frontal modificaciones

Aplicando estas formas, lo que se quiere lograr es canalizar de alguna forma el flujo de aire que pasa a través de la nariz.

Para la zona que hemos observado antes, donde va alojada la luna del tren, se ha optado por suavizar los laterales.

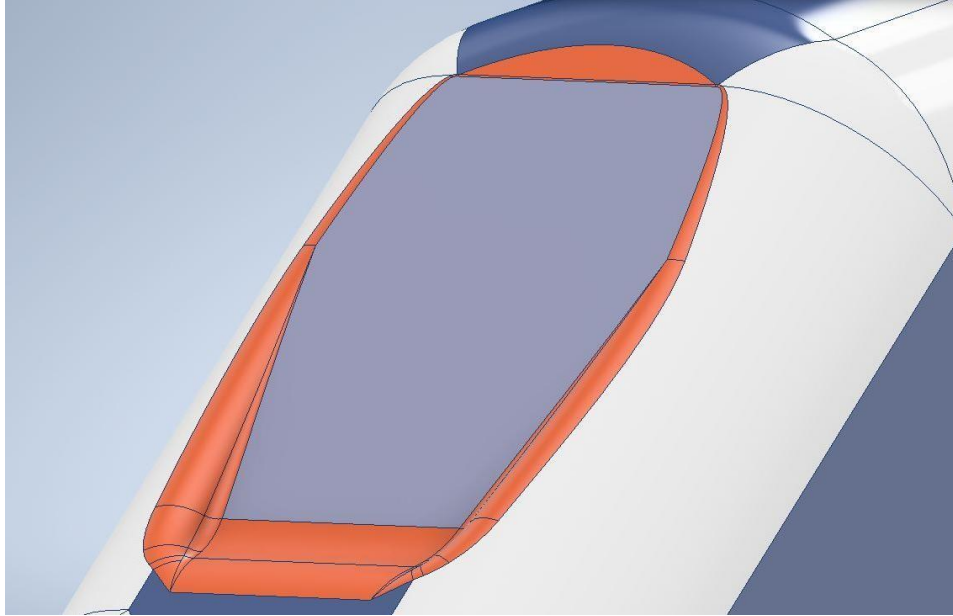


Figura 115:Detalle marco luna

También, aparte de suavizar los bordes del marco de la luna, se ha querido seguir un diseño lineal con el tren, sin que aparezca el mentón superior donde se creaba un concentrador de presiones.

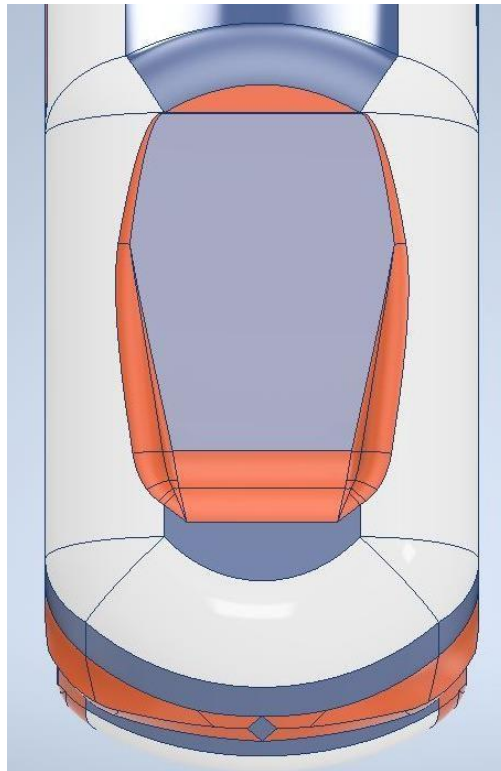


Figura 116:Detalle marco de luna completo

Tras realizar la simulación, se puede decir que las modificaciones implementadas en la superficie del tren, han dado una notable mejora.

Por ejemplo, en Número de Reynolds y Mach obtenido, su valor ha sido parcialmente menor.

$$Re = 1.25137 \cdot 10^7$$

$$M = 0.0795766$$

Esto quiere reflejar, que se ha reducido en cierta manera el flujo turbulento que actuaba sobre la superficie del tren.

Abordando el flujo turbulento, siguiendo el esquema de trazas de velocidad, se puede apreciar que el flujo es más lineal.

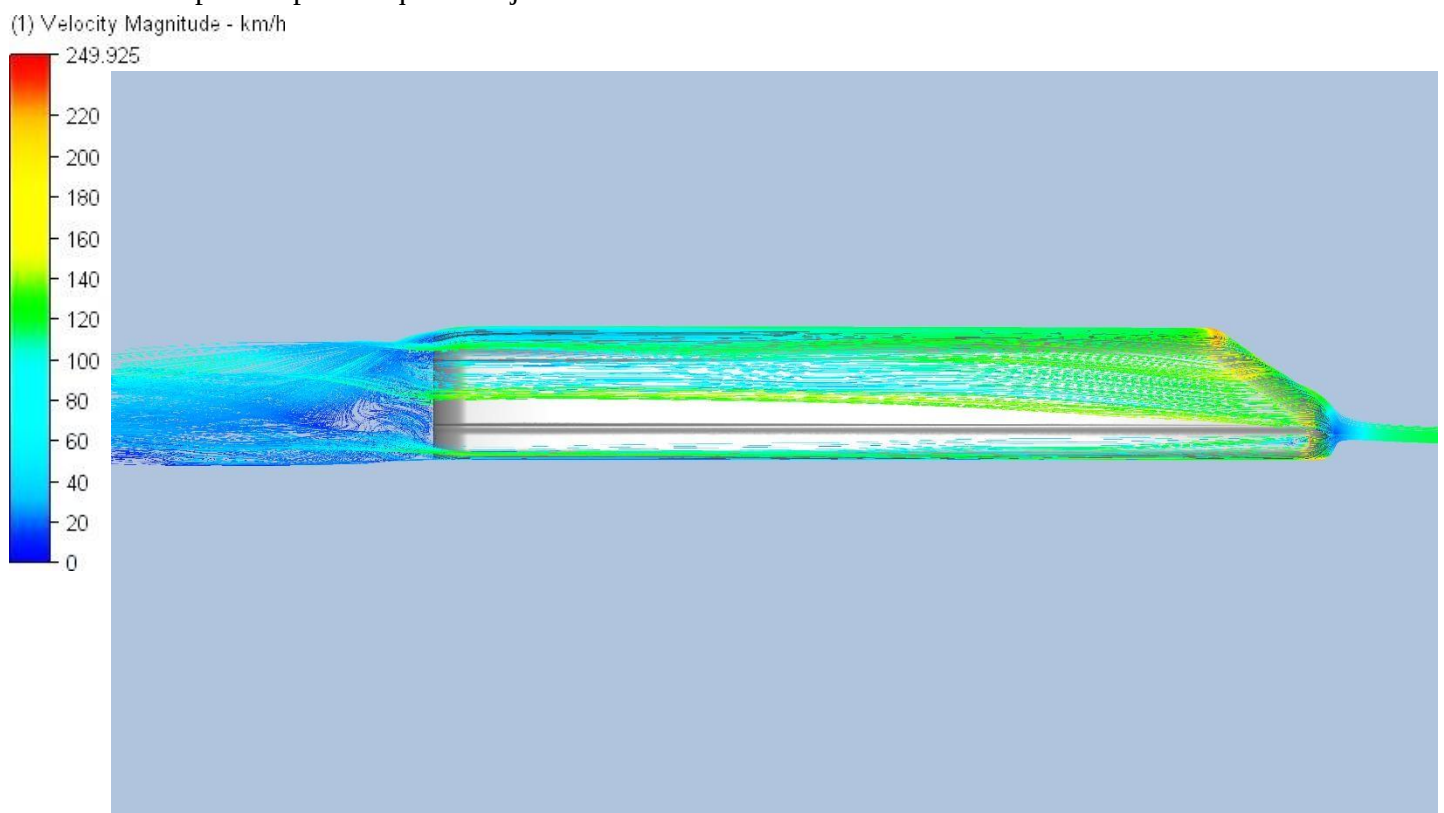


Figura 117:Detalle trazas velocidad tras las mejoras

No se crean turbulencias en la parte superior del tren, como pasaba en la primera simulación realizada.

Respecto en las turbulencias de la cola, se puede ver un cambio muy significativo entre la primera simulación y esta segunda simulación con las mejoras aplicadas.

Aunque se siguen apreciando turbulencias inevitables, se puede ver una linealidad en el flujo sin producir vórtices significantivos como se podían apreciar en la primera simulación realizada.

(1) Velocity Magnitude - km/h

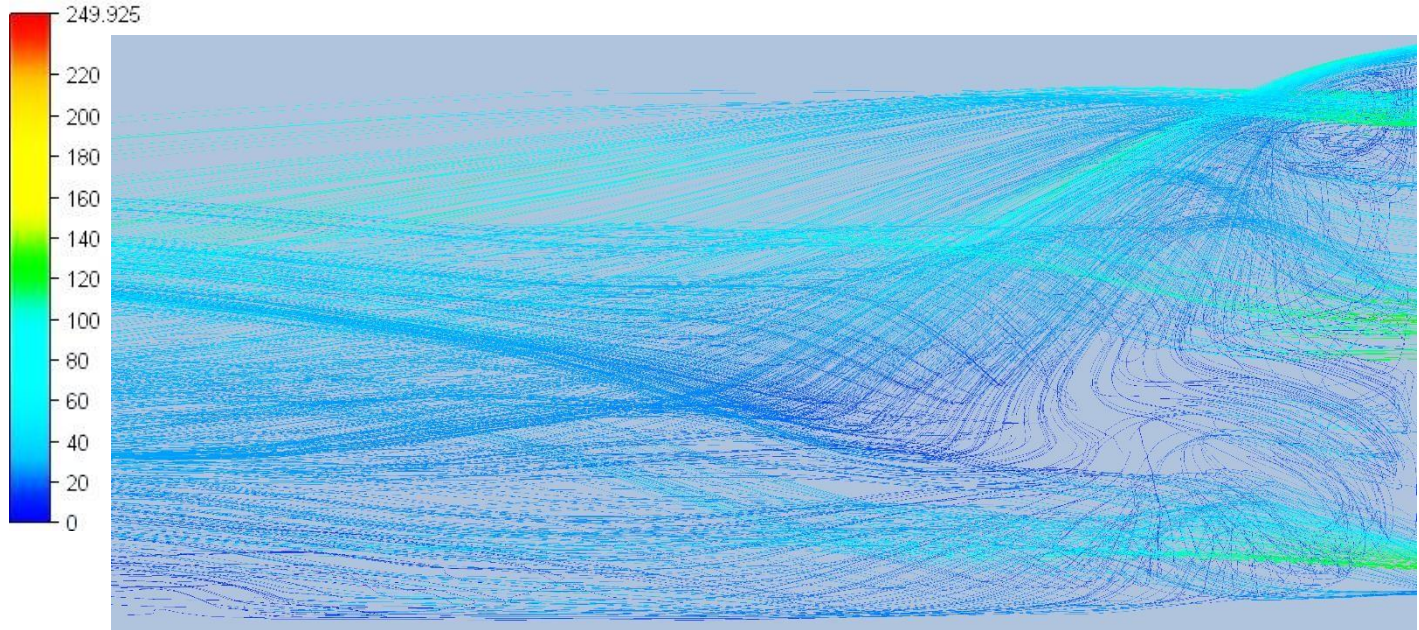


Figura 118:Ampliacion detalle trazas de velocidad en la zona posterior tras las modificaciones

Por último en la cabeza del tren, respectivamente en la parte de lo que representa la luna delantera, el flujo recorre linealmente toda la superficie sin tener cambios bruscos de dirección como ocurría en la primera simulación.

(1) Velocity Magnitude - km/h

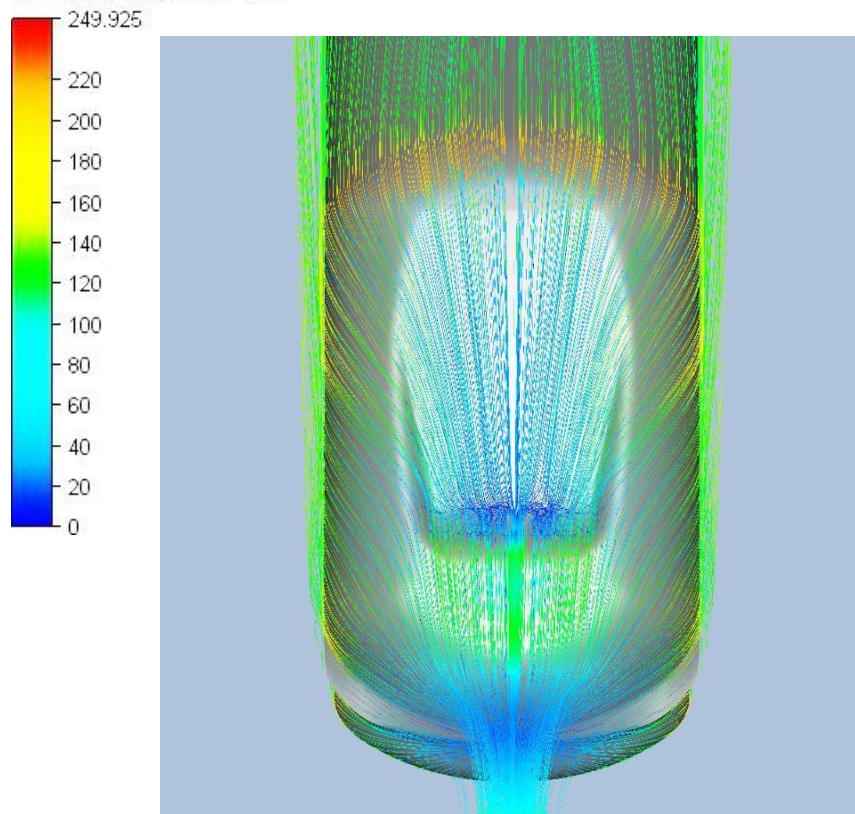


Figura 119:Detalle trazas de velocidad frontal tras las modificaciones

También en la parte inferior de la luna se siguen creando unas turbulencias, pero como se pueden apreciar, en medida son inferiores que en la primera simulación, por consiguiente las modificaciones han sido efectivas.

12.-Conclusiones

Simulación de flujos o simulación de fluidos computacional es la disciplina que ha abarcado todo el estudio que se ha realizado en el trabajo de fin de grado presente.

Como se ha podido apreciar en todos los puntos que se han ido desarrollando anteriormente, la simulación CFD puede llegar a ser una herramienta muy versátil. Para darse cuenta del tamaño de la herramienta que se está poniendo en valor, se va a poner en una comparativa los resultados obtenidos de Número de *Reynolds* y *Mach*

	Primera simulación	Segunda simulación	% Mejora
Número de Reynolds	18105100.00	12513700.00	30.8830109
Número de Mach	0.0867969	0.0795766	8.31861507

Figura 120: Tabla detalle mejora

Descifrando lo que indica la tabla superior que se ha aportado, se han podido observar mejoras tanto en Números de Reynolds como en Mach y una de las cosas más importantes, se han podido obtener estos datos sin realizar un costo en prototipos en escala real o simulaciones en túneles de viento, aunque como bien se basa la ingeniería no hay que descartar ni afirmar un estudio simulado o teórico hasta que no se hacen pruebas de laboratorio.

El ahorro de materiales, ensayos y tiempos de puesta en marcha con las herramientas de CFD no tiene punto de comparación y es lo que se puede verse actualmente en la industria automovilística, aeronáutica...etc.

Sobre esas ideas se ha querido realizar y basar este trabajo de fin de grado, en un intento de hacer un estudio integral aerodinámico combinando la simulación de flujos CFD a un vehículo con cierta aerodinámica, en este caso un tren de cercanías. Se ha dispuesto a desentrañar los pasos, los inconvenientes, las ventajas y los resultados obtenidos mediante los softwares CFD.

Asimismo, se ha podido apreciar mediante los perfiles de presiones, velocidades y trazas aportadas mediante las simulaciones realizadas. Que se han obtenido diferentes puntos críticos de presión, puntos de remanso, zonas de turbulencias y superficies fallidas aerodinámicamente hablando, todos estos datos aplicando un concepto estrictamente teórico serían muy complicados de valorar sino es por las herramientas de simulación.

También no se pueden olvidar las técnicas CAD en este estudio, se ha podido observar que aunque se esté realizado un estudio de simulación de flujos, la utilidad de uso y manejo deben de aplicarse de una manera óptima para desarrollar un trabajo eficiente y correcto a cara de los softwares de simulación.

Por último para concluir, la intención de realizar este tipo de trabajo de fin de grado ha sido motivada por la diferenciación y la creatividad de ideas que se han podido desarrollar entre los estudios que se suelen presentar de trabajos de fin de grado en el ámbito de la ingeniería mecánica.

13.-Bibliografía.

Chris Baker, T. J. (2019). *Train Aerodynamics Fundamentals and Applications*. Elsevier.(1)

García Escobar, J. J. (2016). *Diseño y Posterior Estudio Aerodinámico de un Alerón Trasero de un Automovil de Competición*.(2)

Grañó, J. M. (2012). *Mecánica de fluidos. Breve introducción teórica con problemas resueltos*. Iniciativa digital politécnica.(3)

John D. Anderson, J. C. (2023). *Fundamentals of Aerodynamics*. Mc Graw Hill.(4)

M. Vera Coello, I. I. (s.f.). *Ingeniería Fluidomecánica*. Paraninfo.(5)

Wikipedia, a. d. (s.f.). *Wikipedia Commons*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org>(6)

Airfoiltools. (s.f.). Obtenido de <http://airfoiltools.com/>.(7)

H.Abbot, I. (1959). *Theory of Wing Sections*. Dover Publications.(8)

