UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO – CHILE

"ANÁLISIS AERODINÁMICO EN CFD PARA LA REDUCCIÓN DEL ARRASTRE EN UN AUTO SOLAR"

MATIAS ALONSO NORAMBUENA ABACA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: DR. OLIVIER SKURTYS
PROFESOR CORREFERENTE: DR. MAURICIO OSSES

ENERO 2019

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por el apoyo que me brindaron en todos mis años de estudio y por la motivación para continuar en los momentos más difíciles, a mis padres Hugo y Olivia; a mis hermanas Carolina y Andrea; a mi hermano Hugo y su familia en España a los que les envío un abrazo a la distancia; y a mis sobrinas Camila y Natalia.

Agradezco a mis amigos del colegio con los que mantengo una larga amistad, a mis amigos de la universidad y amigos que he conocido en estos últimos años.

También quiero agradecer a mi profesor correferente Dr. Mauricio Osses y al fundador y ex director del proyecto Ergon Rodrigo Pereira, por entregarme el material y la ayuda para comenzar a desarrollar mi trabajo de título; y finalmente a mi profesor guía Dr. Olivier Skurtys por su disposición y tiempo para resolver mis dudas, y entregarme los conocimientos necesarios para mi vida profesional.

Resumen

PALABRAS CLAVE: *Auto solar, perfil alar, carrera solar, coeficiente de arrastre, ANSYS,* $k - \omega$ *SST, flujo turbulento.*

Desde el año 2009 la ONG "La ruta solar" ha sido la encargada de organizar la carrera solar atacama en el norte de Chile, con un total de cuatro versiones realizadas hasta la fecha y una próxima para el mes de octubre, siendo esta última la más larga y difícil de todas, con un total de 2500 kilómetros desde Santiago a Arica separada por etapas. Entre las categorías de autos solares se encuentran la de Híbridos y Evolución. En la primera categoría el automóvil funciona con energía solar fotovoltaica y humana, mientras que en la segunda solo se utiliza energía solar. En la carrera participan equipos de diversos países y universidades, entre los que se encuentra la universidad Federico Santa María con el auto solar Ergon para la categoría evolución.

El año 2010 el equipo Ergon construyó el primer prototipo del auto solar participando el año 2012 en la carrera solar de atacama y siendo premiado ese mismo año por LAN por su innovadora aerodinámica. Posteriormente el año 2014 se construyó el segundo prototipo, con una mejora aerodinámica realizada por el mismo equipo. Con ninguno de los dos prototipos se ha logrado alcanzar el podio y es por esta razón que se ha propuesto realizar una nueva mejora aerodinámica.

En este proyecto se busca reducir el arrastre producido por el viento en contra y viento lateral en el auto solar Ergon. Mediante el uso de la herramienta de CFD ANSYS Fluent, se realiza un análisis de la fuerza de arrastre y distribución de presión verificando los sectores más críticos.

Luego de realizar el análisis al modelo original, se estudia el comportamiento del fluido y se plantean mejoras para reducir el arrastre. Se proponen dos mejoras y se comparan con los datos obtenidos de la simulación del modelo original para verificar si se logra dicha reducción. Finalmente, se presentarán las conclusiones del trabajo realizado.

Abstract

Since 2009, the NGO "La ruta solar" has been responsible for organizing the Atacama solar race in the north of Chile, with a total of four versions made to date and one for the month of October, the latter being the Longest and most difficult of all, with a total of 2,500 kilometers from Santiago to Arica separated by stages. Among the categories of solar cars are Hybrids and Evolution. In the first category, the car is powered by photovoltaic and human solar energy, while in the second category only solar energy is used. The race involves teams from different countries and universities, including Federico Santa María University with the Ergon solar car for the evolution category.

In 2010 the Ergon team built the first prototype of the solar car participating in the year 2012 in the solar race of Atacama and was awarded that same year by LAN for its innovative aerodynamics. Later, in 2014, the second prototype was built, with an aerodynamic improvement made by the same team. With neither of the two prototypes it has been possible to reach the podium and it is for this reason that a new aerodynamic improvement has been proposed.

This project seeks to reduce the drag produced by the wind against and lateral wind in the Ergon solar car. Through the use of the ANSYS Fluent CFD tool, an analysis of the drag force and pressure distribution is carried out, verifying the most critical sectors.

After carrying out the analysis in the original model, the behavior of the fluid is studied and improvements are proposed to reduce the drag. Two improvements are proposed and compared with the simulation data of the original model to verify if this reduction is achieved. Finally, the conclusions of the work carried out will be presented.

Índice general

Agradecimientos I

Resumen II

Abstract III

Descripción del problema 1

Objetivos 2

1. Objetivo General 2
2. Objetivos Específicos 2

Marco Teórico 3

1.1. ¿Qué es una carrera solar? 3
1.1.1 Carrera Solar Atacama 3
1.2. Componentes del auto solar Ergon 2018 9
1.3. Definición de Perfil alar 11
1.4. Esfuerzos cortantes y fluidos newtonianos 12
1.5. Fuerza de arrastre 14
1.6. Downforce 17
1.7. Coeficientes Aerodinámicos 17
1.7.1 Coeficiente de Arrastre 17
1.7.2 Coeficiente de Presión 18
1.8. Ecuaciones de Navier-Stokes 19
1.9. Flujo turbulento 20
1.10. Modelos de turbulencia 21
1.10.1 Modelo de turbulencia $\mathbf{k-\omega\ SST}$ 22
1.11. Ley de Pared 23

Metodología 27

2.1. Programas utilizados 28
2.1.1 Autodesk Inventor 28
2.1.2 ANSYS Fluent 30

2.1.3 ANSYS ICEM CFD ... 32
2.2. Normas de diseño para la carrera ... 34
2.3. Configuración del modelo ... 36
2.3.1 Dominio de la simulación Precursora ... 36
2.3.2 Dominio de las simulaciones en 3d ... 37
2.3.3 Dominio de las simulaciones en 2d de las secciones longitudinales ... 38
2.3.4 Dominio de las simulaciones en 2d de las secciones transversales ... 40
2.4. Generación de la malla ... 41
2.4.1 Malla de la simulación Precursora ... 41
2.4.2 Malla de las Simulaciones en 3d ... 42
2.4.3 Malla de los perfiles 2d del modelo ... 43
2.5. Condiciones de borde ... 44
2.5.1 Condiciones de borde de la simulación precursora ... 44
2.5.2 Condiciones de borde de las simulaciones en 2d ... 45
2.6. Configuración de ANSYS Fluent ... 46
Análisis y resultados ... 49
3.1. Validación de las funciones de pared ... 49
3.2. Simulación del modelo original ... 50
3.2.1 Simulación de los perfiles transversales del modelo original ... 52
3.2.2 Simulación del perfil longitudinal del modelo original ... 58
3.3. Primera propuesta de mejora del modelo ... 62
3.4. Segunda propuesta de mejora del modelo ... 70
3.4.1 Simulación de los perfiles transversales del modelo mejorado ... 74
3.4.2 Simulación de los perfiles longitudinales del modelo mejorado ... 86
3.4.3 Análisis Cuantitativo de la segunda propuesta de mejora ... 90
Conclusiones ... 93
Bibliografía ... 95
Anexo A ... 98
Marco Teórico ... 98
A.1 Operadores matemáticos ... 98

Anexo B 99

ANSYS Fluent 99

B.1 Algoritmo segregado 99

Anexo C 101

Valores de Y+ 101

C.1 Valores de Y+ de los perfiles transversales del modelo original. 101

C.2 Valores de Y+ del perfil longitudinal del modelo original. 103

C.3 Valores de Y+ de los perfiles transversales del modelo mejorado. 104

C.4 Valores de Y+ de los perfiles longitudinales del modelo mejorado. 106

C.5 Valor de Y+ del perfil longitudinal invertido del modelo original. 107

Anexo D 108

Mallas 108

D.1 Mallas de los perfiles transversales del modelo original 108

D.2 Mallas de los perfiles longitudinales del modelo original 111

D.3 Mallas de los perfiles transversales del modelo mejorado 112

D.4 Mallas de los perfiles longitudinales del modelo mejorado 115

Índice de Figuras

Figura 1.1: Recorrido de la primera versión de la Carrera Solar Atacama [2]. 4
Figura 1.2: Recorrido de la segunda versión de la Carrera Solar Atacama [2]..... 5
Figura 1.3: Recorrido de la tercera versión de la Carrera Solar Atacama [2]. 6
Figura 1.4: Recorrido 2016 de la Carrera Solar Atacama, modalidad Evolución e Híbridos [2]. 7
Figura 1.5: Recorrido para octubre del 2018 de la Carrera Solar Atacama [2]. 8
Figura 1.6: Motor NGM SCM-150. 9
Figura 1.7: Auto Solar Ergón sin la cúpula del piloto [3]. 10
Figura 1.8: Perfil alar obtenido a partir de un corte transversal en un ala [4]..... 11
Figura 1.9: Geometría de un perfil alar [4]. 12
Figura 1.10: Deformación de un elemento de fluido [5]..... 13
Figura 1.11: Cuerpos de tipo “bluff body” y “streamlined body” con sus valores de coeficiente de arrastre [7]. 16
Figura 1.12: Carga aerodinámica en perfil invertido [8]. 17
Figura 1.13: Velocidad adimensional en función de la distancia adimensional a la pared. 25
Figura 2.1: Proceso de creación de un cubre rueda en 3d a partir de 2 curvas de base superior e inferior y una curva para trazar el camino entre ellas, utilizando la herramienta “loft”..... 29
Figura 2.2: Mitad de un cubre ruedas, obtenido mediante el uso de la herramienta “loft”..... 29
Figura 2.3: Interfaz gráfica del software ANSYS Fluent..... 31
Figura 2.4: Detalle de la interfaz gráfica del software ANSYS Fluent..... 32
Figura 2.5: Modelo simplificado en 3 dimensiones del Auto Solar Ergón, realizado con el software Autodesk Inventor. 34
Figura 2.6: Esquema del *Auto Solar Ergón.* 35
Figura 2.7: Esquema del *Auto Solar Ergón.* 35
Figura 2.8: Dominio de la simulación precursora. (Figura no a escala real). 36

Figura 2.9: Dominio de la malla en 3d. 37
Figura 2.10: Dominio de la malla en 3d, vista en dirección del flujo. 38
Figura 2.11: Perfiles longitudinales del auto solar. 39
Figura 2.12: Dominio de los perfiles longitudinales. 39
Figura 2.13: Perfiles transversales del auto solar. 40
Figura 2.14: Dominio de los perfiles transversales. 40
Figura 2.15: Detalle de la malla de la simulación precursora donde se aprecia el refinamiento cerca de la pared. 42
Figura 2.16: Malla en 3d proyectada sobre 3 paredes del dominio y el modelo. 42
Figura 2.17: Detalle de la malla en 3d. 43
Figura 3.1: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles transversales del modelo original. 51
Figura 3.2: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles longitudinales del modelo original. 52
Figura 3.3: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original. 53
Figura 3.4: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original. 53
Figura 3.5: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original. 54
Figura 3.6: Coeficiente de presión alrededor del perfil T1 del modelo original. 55
Figura 3.7: Coeficiente de presión alrededor del perfil T2 del modelo original. 55
Figura 3.8: Coeficiente de presión alrededor del perfil T3 del modelo original. 56
Figura 3.9: Vectores de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original. 56
Figura 3.10: Vectores de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original. 57
Figura 3.11: Vectores de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original. 57
Figura 3.12: Magnitud de velocidad alrededor del perfil L1 del modelo original. 59
Figura 3.13: Coeficiente de presión alrededor del perfil L1 del modelo original. 59
Figura 3.14: Coeficiente de arrastre Cd versus ángulo de ataque (alfa) para un perfil NACA 23015 [5]. 63
Figura 3.15: Configuración actual del perfil alar con un ángulo de ataque de -1° y configuración propuesta con perfil alar invertido y ángulo de ataque de 0°. 64

Figura 3.16: Magnitud de velocidad alrededor del perfil L1 del modelo original (A) y del perfil L1 invertido, con ángulo de ataque de 0° (B). 65
Figura 3.17: Coeficiente de presión alrededor del perfil L1 del modelo original (A) y del perfil L1 invertido, con ángulo de ataque de 0° (B). 66
Figura 3.18: Comparativa del coeficiente de arrastre de las fuerzas de presión de la configuración actual y de la configuración propuesta. 67
Figura 3.19: Comparativa de la fuerza de arrastre total de la configuración actual y de la configuración propuesta. 67
Figura 3.20: Comparativa del coeficiente de sustentación de la configuración actual y de la configuración propuesta. 68
Figura 3.21: Comparativa de la fuerza de sustentación de la configuración actual y de la configuración propuesta. 69
Figura 3.22: Modelo mejorado del Auto Solar Ergón. 70
Figura 3.23: Vista frontal del modelo original (A) y el modelo mejorado (B). 71
Figura 3.24: Vista lateral del modelo original (A) y el modelo mejorado (B). 72
Figura 3.25: Vista isométrica del modelo original (A) y el modelo mejorado (B). 72
Figura 3.26: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles transversales del modelo mejorado. 73
Figura 3.27: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles longitudinales del modelo mejorado. 74
Figura 3.28: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original (A) y del perfil T1 del modelo mejorado (B). 75
Figura 3.29: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original (A) y del perfil T2 del modelo mejorado (B). 76
Figura 3.30: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original (A) y del perfil T3 del modelo mejorado (B). 77
Figura 3.31: Coeficiente de presión alrededor del perfil T1 del modelo original (A) y del perfil T1 del modelo mejorado (B). 79
Figura 3.32: Coeficiente de presión alrededor del perfil T2 del modelo original (A) y del perfil T2 del modelo mejorado (B). 80

Figura 3.33: Coeficiente de presión alrededor del perfil T3 del modelo original (A) y del perfil T3 del modelo mejorado (B). 81
Figura 3.34: Vectores de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original (A) y del perfil T1 del modelo mejorado (B). 83
Figura 3.35: Vectores de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original (A) y del perfil T2 del modelo mejorado (B). 84
Figura 3.36: Vectores de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original (A) y del perfil T3 del modelo mejorado (B). 85
Figura 3.37: Magnitud de velocidad alrededor de los perfiles L1 del modelo original (A), L1 del modelo mejorado (B) y L2 del modelo mejorado (C). 87
Figura 3.38: Coeficiente de presión alrededor de los perfiles L1 del modelo original (A), L1 del modelo mejorado (B) y L2 del modelo mejorado (C). 88
Figura 3.39: Comparativa de los coeficientes de arrastre por presión de los perfiles longitudinales y transversales del modelo original y del modelo mejorado. 90
Figura 3.40: Comparativa de la fuerza de arrastre de los perfiles longitudinales y transversales del modelo original y del modelo mejorado. 91
Figura 4.1: Esquema del ciclo del algoritmo segregado [16]. 100
Figura 4.2: Valores de Y+ alrededor del perfil T1 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X. 101
Figura 4.3: Valores de Y+ alrededor del perfil T2 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X. 102
Figura 4.4: Valores de Y+ alrededor del perfil T3 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X. 102
Figura 4.5: Valores de Y+ alrededor del perfil L1 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X. 103
Figura 4.6: Valores de Y+ alrededor del perfil T1 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X. 104
Figura 4.7: Valores de Y+ alrededor del perfil T2 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X. 105

Figura 4.8: Valores de Y+ alrededor del perfil T3 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X. 105
Figura 4.9: Valores de Y+ alrededor del perfil L1 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X. 106
Figura 4.10: Valores de Y+ alrededor del perfil L2 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X. 107
Figura 4.11: Valores de Y+ alrededor del perfil L1 invertido del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X. 107
Figura 4.12: Malla del perfil T1 del modelo original..... 108
Figura 4.13: Detalle de la malla del perfil T1 del modelo original. 108
Figura 4.14: Malla del perfil T2 del modelo original..... 109
Figura 4.15: Detalle de la malla del perfil T2 del modelo original. 109
Figura 4.16: Malla del perfil T3 del modelo original..... 110
Figura 4.17: Detalle de la malla del perfil T3 del modelo original. 110
Figura 4.18: Malla de los perfiles L1 y L2 del modelo original. 111
Figura 4.19: Detalle de la malla de los perfiles L1 y L2 del modelo original. 111
Figura 4.20: Malla del perfil T1 del modelo mejorado. 112
Figura 4.21: Detalle de la malla del perfil T1 del modelo mejorado. 112
Figura 4.22: Malla del perfil T2 del modelo mejorado. 113
Figura 4.23: Detalle de la malla del perfil T2 del modelo mejorado. 113
Figura 4.24: Malla del perfil T3 del modelo mejorado. 114
Figura 4.25: Detalle de la malla del perfil T3 del modelo mejorado. 114
Figura 4.26: Malla del perfil L1 del modelo mejorado. 115
Figura 4.27: Detalle de la malla del perfil L1 del modelo mejorado. 115
Figura 4.28: Malla del perfil L2 del modelo mejorado. 116
Figura 4.29: Detalle de la malla del perfil L2 del modelo mejorado. 116
Figura 4.30: Malla del perfil invertido L1 del modelo original. 116
Figura 4.31: Detalle de la malla del perfil invertido L1 del modelo original. 117

Descripción del problema

En este trabajo de título se busca analizar y mejorar el desempeño aerodinámico de un auto solar, específicamente del proyecto “Ergón”. Este proyecto consiste en diseñar y construir un modelo de automóvil que sea capaz de funcionar con la energía proveniente de los rayos solares, mediante el uso de celdas fotovoltaicas. En 2010 se inició el diseño del primer prototipo y cuya tecnología abarca áreas como: aerodinámica, análisis estructural, ciencia de materiales, electrónica de potencia, sistema de comunicación remota, mecánica automotriz, entre otras y que le permitieron participar en la carrera Solar Atacama 2012, donde fue reconocido por LAN por su innovadora aerodinámica [1]. La velocidad máxima alcanzada es de 75 km/h, lo que dista mucho de su principal rival, el equipo Tokai de Japón, con un modelo que alcanza una velocidad máxima de 150 km/h. El 2014 se construyó el segundo prototipo con una mejora aerodinámica, alcanzado una velocidad máxima de 100 km/h. Para su construcción se utilizó fibra de carbono con el método de infusión con la ayuda de la empresa ASMAR. A finales de ese mismo año, el equipo Ergón participó en la carrera solar de Atacama alcanzando el 5to lugar.

Mediante el uso de la herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD), se pretende mejorar la aerodinámica del último prototipo, analizando el comportamiento del flujo alrededor de su geometría y proponiendo nuevos modelos.

Objetivos

1. Objetivo General

Obtener un modelo en tres dimensiones del auto solar “Ergón” y realizar un análisis aerodinámico con la herramienta de dinámica de fluidos computacional, verificando los sectores más críticos y proponiendo mejoras en su geometría.

2. Objetivos Específicos

- Obtener el modelo del auto solar en formato CAD y simplificar su geometría, retirando elementos que no serán parte del análisis de mejora.
- Verificar la factibilidad de realizar el análisis CFD en 3d según el tiempo y recursos disponibles e implementar en el peor de los casos una solución en 2d.
- Someter el modelo a un flujo de viento en contra y de viento cruzado utilizando el software ANSYS CFD, obteniendo los coeficientes aerodinámicos y distribución de presión.
- Analizar los resultados obtenidos y proponer mejoras en la geometría para reducir el coeficiente de arrastre.
- Realizar las mismas pruebas del modelo original en la nueva geometría.
- Analizar los resultados obtenidos con la mejora y presentar las conclusiones.

Capítulo 1

Marco Teórico

1.1. ¿Qué es una carrera solar?

Se conoce como vehículo o auto solar a aquel vehículo que funciona totalmente con energía eléctrica proveniente de la radiación solar. Son creados por equipos de ingenieros de distintas universidades del mundo para competir en carreras solares, siendo las más destacadas la World Solar Challenge de Australia, The North American Challenge en Estados Unidos y la carrera solar de Atacama en Chile, siendo esta última la primera carrera solar de Latino América. En el caso de la Universidad Federico Santa María, el equipo multidisciplinario de estudiantes de ingeniería participó en la carrera solar de Atacama con el auto solar Ergón en los años 2012 y 2014 con sus primer y segundo prototipo.

1.1.1 Carrera Solar Atacama

La carrera solar atacama (CSA) realizada en Chile cuenta con las categorías de autos Híbridos y Evolución. En la primera categoría el automóvil funciona con energía solar fotovoltaica y humana, mientras que en la segunda solo se utiliza energía solar [2].

En el año 2011 se creó la primera versión de la carrera solar de atacama con las categorías Híbridos y Evolución, cubriendo un trayecto de 1060 kilómetros en 3 etapas de un día cada una entre Iquique y Antofagasta, teniendo como ganador al equipo Antakari de la categoría Evolución y a Los Andes Mining Parts en la categoría Híbridos. El mapa del recorrido es presentado en la Figura 1.1.

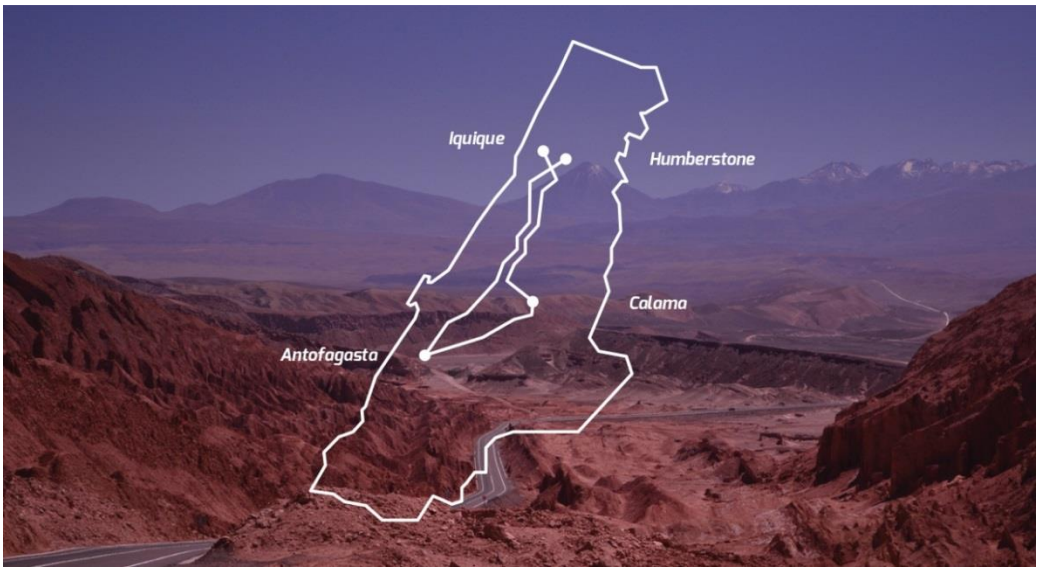


Figura 1.1: Recorrido de la primera versión de la Carrera Solar Atacama [2].

La segunda versión se realizó el año 2012 con un total de 4 etapas separadas por día, con un recorrido total de 1200 km ganando nuevamente en la categoría Evolución el equipo Antakari. En la categoría Híbridos el equipo ganador fue ACAPOMIL de la Academia Politécnica Nacional. Las etapas se dividieron de la siguiente forma:

1.- Humberstone – Calama.
2.- Calama – Toconao – San Pedro de Atacama.
3.- Calama – Baquedano.
4.- Salitrera Chacabuco – Humberstone.

En la Figura 1.2 se presenta el mapa de las 4 etapas del recorrido.

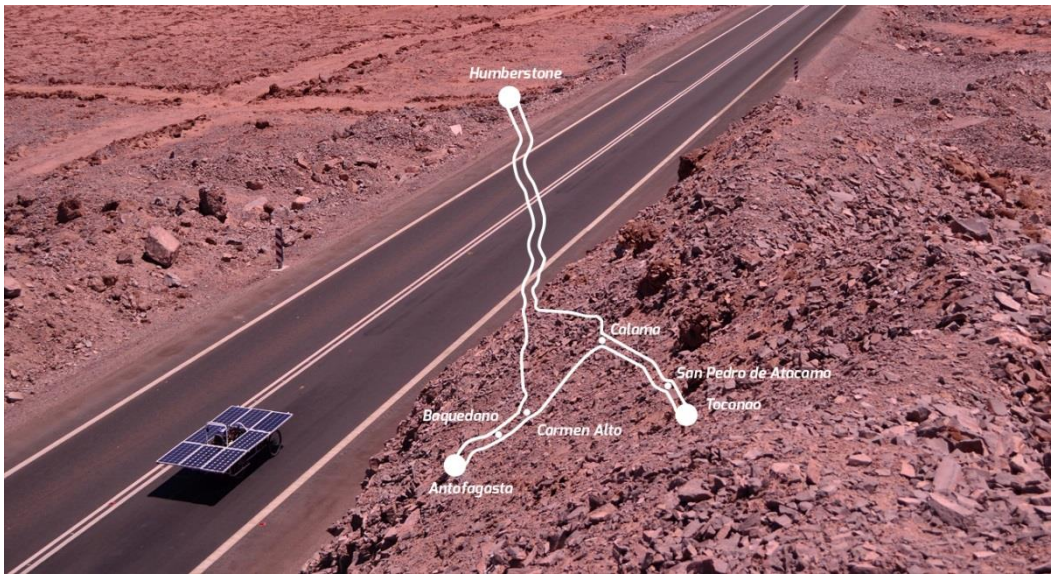


Figura 1.2: Recorrido de la segunda versión de la Carrera Solar Atacama [2].

En el año 2014 se realizó la tercera versión de la carrera, esta vez en el parque el Loa en Calama y con un recorrido total de 1400 km como se aprecia en la Figura 1.1. El propósito de los organizadores de la carrera de utilizar este parque fue el de poner a prueba la logística y comunicación en los equipos, además de que el público pudiera apreciar de mejor forma la carrera. El ganador de la categoría Evolución fue el equipo Tokai, dos veces campeón del mundo, mientras que en la categoría Híbridos el ganador fue el equipo chileno Geminis Eco Racing Team.

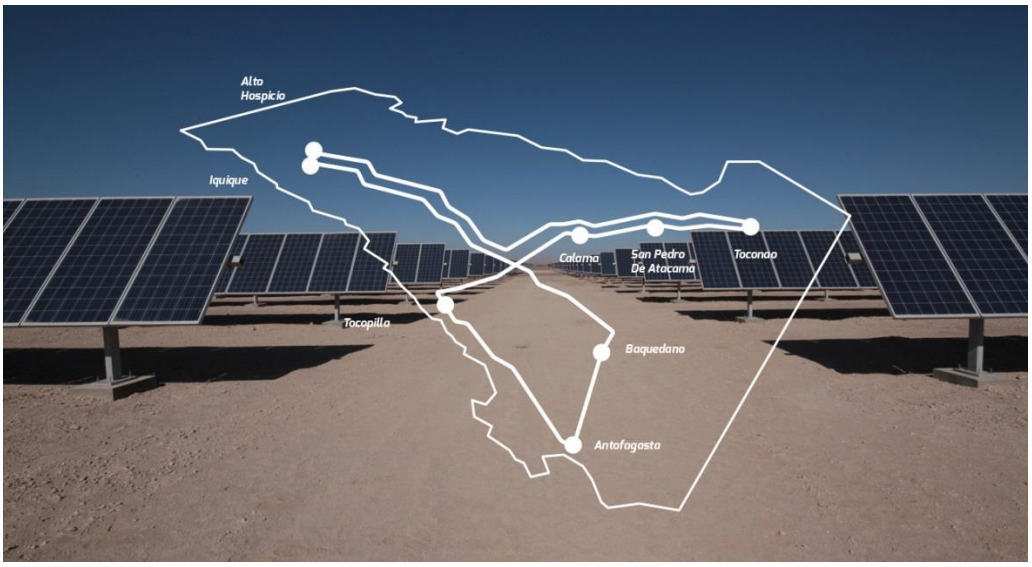


Figura 1.3: Recorrido de la tercera versión de la Carrera Solar Atacama [2].

El año 2016 se realizó la cuarta versión con un recorrido total de 2300 km repartidos en 3 regiones, con un total de 5 etapas como se muestra en la Figura 1.3. El ganador de la categoría Evolución fue el equipo Chileno Solar Kan, mientras que en la categoría Híbridos fue el equipo Bolivia. Las etapas fueron distribuidas de la siguiente forma:

1.- Iquique – Calama.

2.- Calama – Toconao – Calama – San Pedro de Atacama.

3.- Sierra Gorda – Diego de Almagro.

4.- Diego de Almagro – Antofagasta.

5.- Antofagasta – Pozo Almonte.

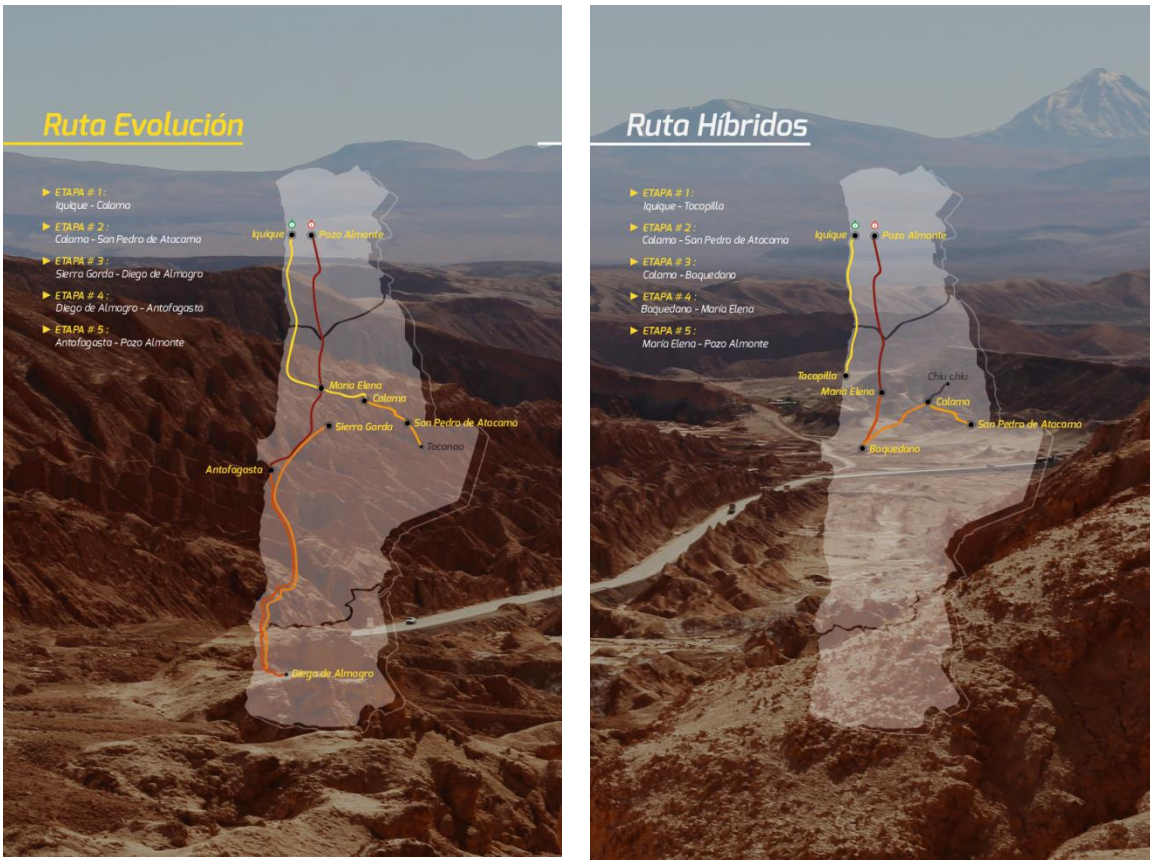


Figura 1.4: Recorrido 2016 de la Carrera Solar Atacama, modalidad Evolución e Híbridos [2].

La próxima carrera solar de Atacama se tiene planificada para octubre del año 2018, la cual será la más larga hasta el momento con un total de 2500 kilómetros de Santiago a Arica como se aprecia en la Figura 1.5.

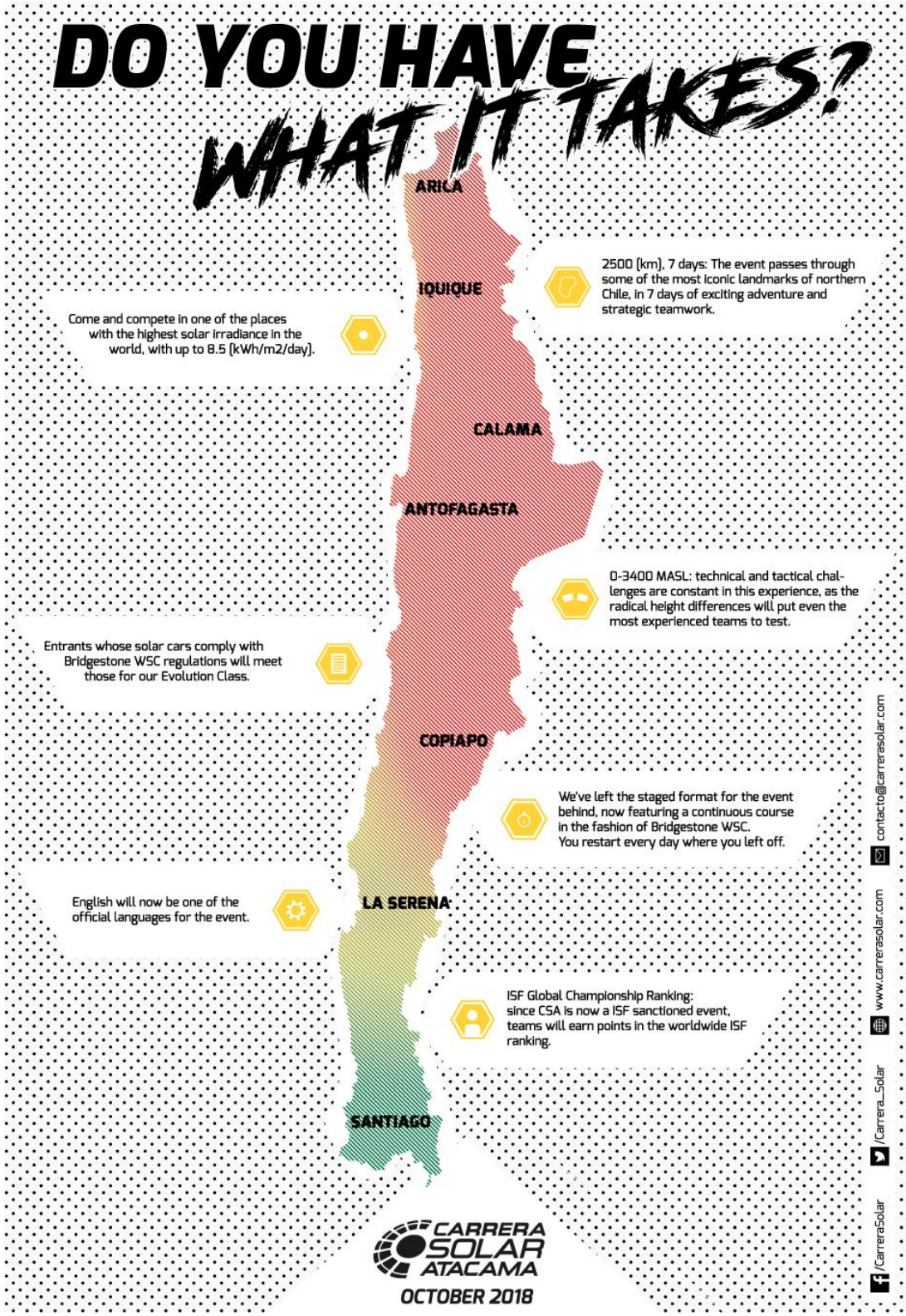


Figura 1.5: Recorrido para octubre del 2018 de la Carrera Solar Atacama [2].

1.2. Componentes del auto solar Ergon 2018

Uno de los principales objetivos de las carreras de autos solares es la de demostrar la viabilidad de la construcción y funcionamiento de un automóvil, sin la necesidad de utilizar combustibles fósiles. Para cumplir este objetivo es necesario aprovechar al máximo la energía solar optimizando todos los aspectos y componentes del automóvil.

- Sistema Eléctrico

Entre los componentes del sistema eléctrico se encuentra el motor, el banco de baterías, el acelerador y el panel de instrumentación. Posee un sistema de freno regenerativo que transforma la energía cinética en energía eléctrica.

En la Figura 1.6 se presenta el motor NGM de imanes permanentes, el cual entrega una potencia de 3,5[kW]. Posee un diseño de alta eficiencia que reduce el peso y mejora el desempeño térmico para evitar el sobrecalentamiento.

Figura 1.6: Motor NGM SCM-150.

Sobre la superficie del auto solar se encuentran 6 $[m^2]$ de paneles fotovoltaicos monocristalinos de 22% de eficiencia que transforman la irradiación solar en energía eléctrica y en el interior, un sistema de almacenamiento de 350 baterías de litio.

- Cuerpo Aerodinámico

El diseño del perfil alar y de los cubre ruedas fueron realizados considerando el coeficiente de arrastre, la carga aerodinámica o "Downforce" encargada de mantener el auto en contacto con el suelo y el espacio necesario para ubicar los componentes electrónicos y el piloto de forma óptima. Entre los distintos perfiles alares posibles para la construcción del auto solar se seleccionó el perfil alar E. Bambino 7. Los aspectos aerodinámicos del diseño fueron analizados por el equipo Ergon utilizando la herramienta de CFD, probando distintos tipos de perfil alar y distintos ángulos de ataque para su posterior construcción. En la Figura 1.7 se presenta el auto solar sin la cúpula del piloto.

Figura 1.7: Auto Solar Ergón sin la cúpula del piloto [3].

- Chasis, suspensión y neumáticos

Las ruedas GH Craft de 16 pulgadas de diámetro son fabricadas en fibra de carbono y aluminio en forma de panal, logrando buena resistencia y durabilidad. Este tipo de ruedas son diseñadas para utilizarse con neumáticos Michellin de medidas 95/80 R16, creadas especialmente para autos solares. Al igual que las ruedas, el chasis está construido en fibra de carbono.

1.3. Definición de Perfil alar

Se entiende por perfil alar a la sección transversal que se obtiene al cortar un ala de forma transversal, como se muestra en la Figura 1.8:

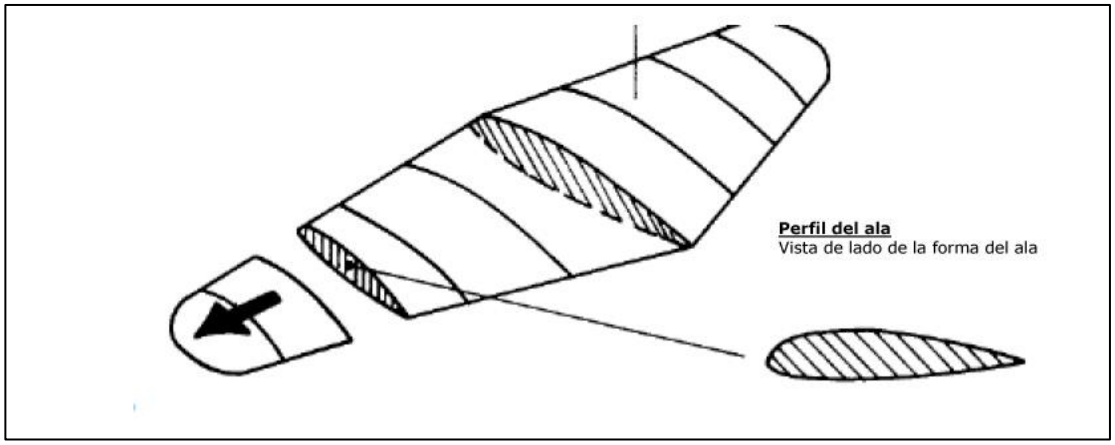


Figura 1.8: Perfil alar obtenido a partir de un corte transversal en un ala [4].

Los perfiles alares poseen una geometría de tipo “stremlined” que reduce la fuerza de arrastre por diferencias de presión y aumentan la sustentación o “lift”. Las fuerzas de arrastre y tipos de geometría se verán más adelante en la sección 1.5. El Comité Asesor Nacional para la Aeronáutica NACA ha sido uno de los organismos más importantes para el desarrollo de la aeronáutica, ya que muchos de sus estudios sobre perfiles alares aún se utilizan en la actualidad.

Para trabajar en el análisis aerodinámico de un auto solar, es necesario conocer ciertas definiciones utilizadas en aeronáutica referentes a los perfiles alares, ya que muchas

partes de estos autos poseen este tipo de geometría, en el caso del Ergón, el cuerpo y los cubre ruedas. Estas definiciones se muestran en la Figura 1.9:

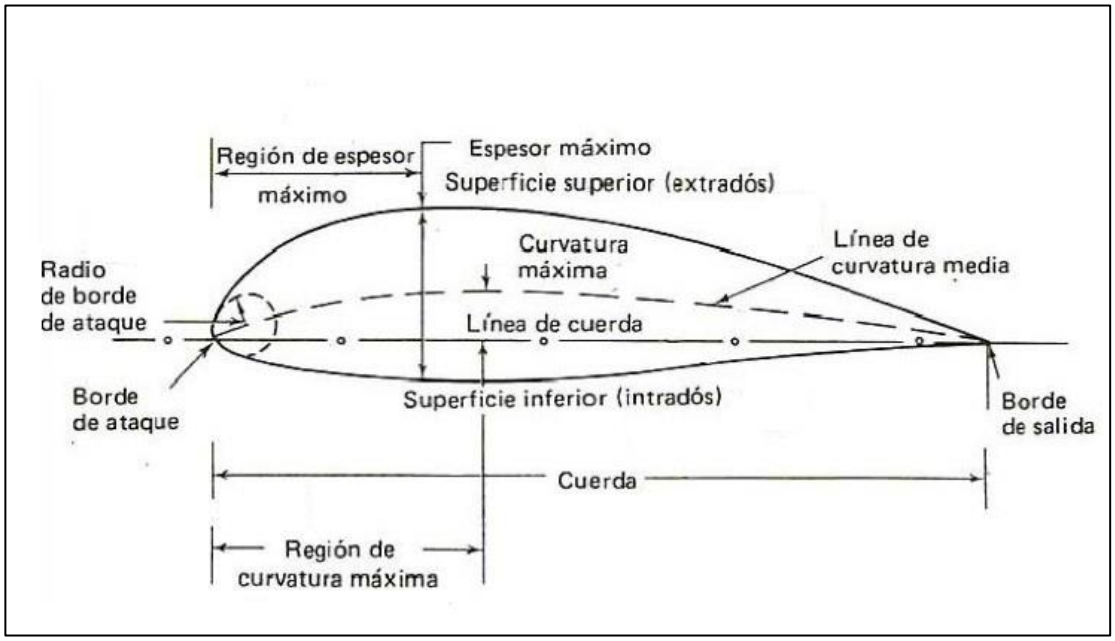


Figura 1.9: Geometría de un perfil alar [4].

1.4. Esfuerzos cortantes y fluidos newtonianos

Para definir los esfuerzos cortantes en un fluido es útil comparar lo que sucede en el caso de los sólidos. Los esfuerzos en un sólido se generan cuando éste sufre una deformación elástica, mientras que en los fluidos los esfuerzos se generan producto de la viscosidad. Por lo tanto, si los sólidos son elásticos, los fluidos son viscosos [5].

Considerar un elemento de fluido de altura δy entre dos placas infinitas. A la placa superior se le aplica una fuerza δF_x en un tiempo δt. La placa se desplaza a una velocidad δu y sufre una deformación con un ángulo $\delta \alpha$ como se muestra en la Figura 1.10:

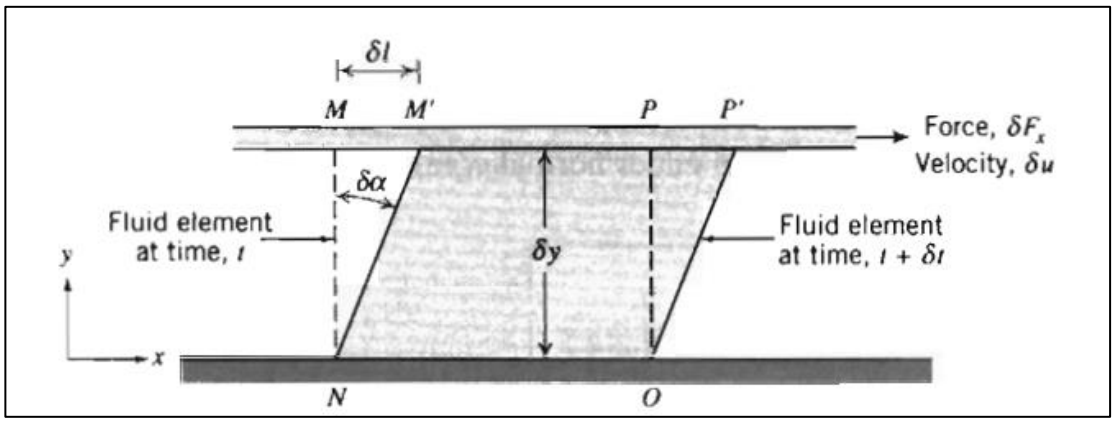


Figura 1.10: Deformación de un elemento de fluido [5].

La taza de deformación del elemento de fluido viene dado por:

$$Taza\ de\ deformación = \lim_{\delta t \to 0} \frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{d\alpha}{dt} \tag{1.1}$$

Considerando la distancia $\delta l = \delta u\ \delta t$ y de forma alternativa para ángulos pequeños la relación $\delta l = \delta y\ \delta \alpha$, se pueden igualar las expresiones anteriores y así obtener la siguiente ecuación:

$$\frac{\delta \alpha}{\delta t} = \frac{\delta u}{\delta y} \tag{1.2}$$

Aplicando el límite a ambos lados de la igualdad se obtiene:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{du}{dy} \tag{1.3}$$

Finalmente, se define la taza de deformación como:

$$Taza\ de\ deformación = \frac{du}{dy} \tag{1.4}$$

En un fluido Newtoniano los esfuerzos cortantes serán directamente proporcionales a la taza de deformación, mientras que en los fluidos no Newtonianos la proporcionalidad anterior no se cumple. Entre los fluidos Newtonianos se encuentran el aire, el agua y el aceite en condiciones normales, mientras que en los fluidos no Newtonianos se encuentran el shampoo, la maicena y la miel.

A partir de la ecuación (1.4) y la constante de proporcionalidad μ llamada viscosidad dinámica, se define la ley de viscosidad de Newton:

$$\tau_{xy} = \mu \frac{du}{dy} \tag{1.5}$$

Donde τ_{xy} corresponde al esfuerzo cortante ejercido sobre un elemento de fluido.

Es posible determinar los esfuerzos cortantes viscosos en la pared τ_w, específicamente en la subcapa viscosa evaluando la variable $y = 0$ como se muestra en la ecuación (1.6). (Para ver más información sobre las subcapas y ley de pared, ver la sección 1.11).

$$\tau_w = \mu \left.\frac{du}{dy}\right|_{y=0} \tag{1.6}$$

1.5. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre o arrastre aerodinámico posee dos componentes:

$$Arrastre\ Total = Arrastre\ por\ presión + Arrastre\ por\ Viscosidad$$

En su forma integral se representa de la siguiente forma:

$$D = \iint_S p\hat{n}ds + \iint_S \tau\hat{t}ds \tag{1.7}$$

Dónde $\hat{n}$ y $\hat{t}$ representan el vector normal y tangencial a la superficie respectivamente. Los términos p y τ representan la presión y el esfuerzo cortante viscoso sobre la superficie respectivamente [6].

En general un cuerpo de tipo “bluff body” posee predominancia de arrastre por presión, teniendo como ejemplo figuras cilíndricas, esféricas o planas que no están completamente rodeadas por las líneas de corriente del flujo. Aguas abajo existen zonas de separación de la capa límite y recirculación.

En los cuerpos de tipo “streamlined” o rodeados por las líneas de corriente del flujo, el arrastre predominante es de tipo viscoso, teniendo como ejemplo los autos de carrera y aeronaves. Las líneas de corriente tienden a converger aguas abajo.

En la Figura 1.11 se muestran algunos ejemplos de estos 2 tipos de cuerpos, teniendo como único ejemplo de cuerpo tipo “streamlined” al perfil alar.

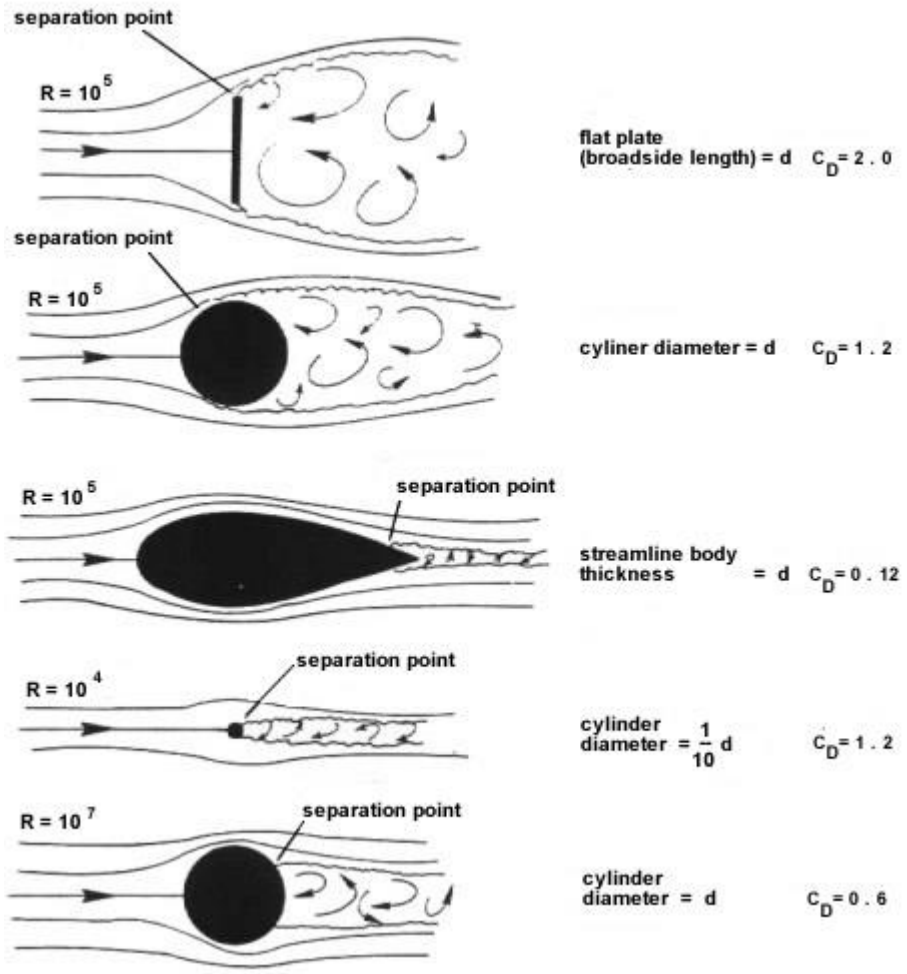


Figura 1.11: Cuerpos de tipo “bluff body” y “streamlined body” con sus valores de coeficiente de arrastre [7].

En particular se trabajará para disminuir la fuerza de arrastre provocada por las diferencias de presión entre dos puntos, modificando la geometría y las zonas donde se generen puntos de estancamiento del fluido, sin cambiar de forma radical las dimensiones originales.

1.6. Downforce

La carga aerodinámica o más conocida como “downforce” en inglés, corresponde a la fuerza opuesta a la sustentación y que apunta hacia el suelo. Es utilizada comúnmente en el mundo de los autos de carrera, ya que se busca aumentar esta última para mejorar el agarre de los neumáticos con el suelo y doblar de forma más eficiente en las curvas.

Para lograr generar esta fuerza, los autos de carrera poseen alerones similares a los utilizados en aeronáutica, pero dispuestos en posición invertida como se muestra en la Figura 1.12:

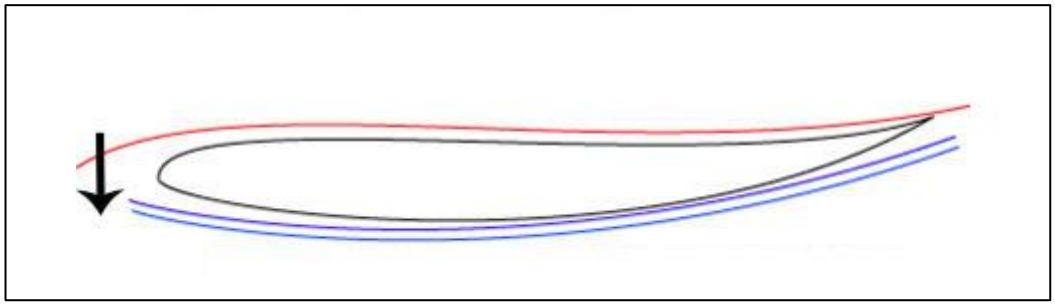


Figura 1.12: Carga aerodinámica en perfil invertido [8].

1.7. Coeficientes Aerodinámicos

1.7.1 Coeficiente de Arrastre

A la hora de comparar distintos modelos geométricos es útil usar el coeficiente de arrastre, el cual se describe con la siguiente ecuación:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \tag{1.8}$$

Dónde F_D representa la fuerza de arrastre sobre el objeto, ρ la masa específica, V la velocidad del flujo y A el área proyectada por el objeto.

1.7.2 Coeficiente de Presión

Otro número adimensional utilizado en aerodinámica es el coeficiente de presión, que corresponde a la diferencia entre la presión estática local y la presión estática del flujo libre, adimensionalizando esta diferencia con la presión dinámica del flujo libre. El coeficiente de presión se define como:

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2} \tag{1.9}$$

Dónde p representa a la presión estática en algún punto alrededor del cuerpo, p_∞, ρ_∞ y V_∞ corresponden a la presión estática, la densidad del fluido y la velocidad del flujo libre respectivamente. De los valores de C_p se pueden deducir dos casos importantes:

- $C_p = 0$ La presión estática local es igual a la presión estática en el flujo libre.
- $C_p = 1$ La presión estática local es igual a la presión de estancamiento.

Dado que el flujo utilizado en este trabajo es considerado incompresible por su baja velocidad, el valor de C_p nunca será mayor a 1.

1.8. Ecuaciones de Navier-Stokes

Para modelar el flujo de estudio, es necesario conocer las ecuaciones fundamentales que se aplicaran a cada volumen de control, obtenidas de las leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento. Estas ecuaciones serán resueltas considerando un flujo incompresible, es decir que en cada punto la velocidad será inferior a la velocidad del sonido en el aire [9]. Así, las ecuaciones quedan expresadas como se muestra a continuación:

- Conservación de masa

$$\mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\nabla} = 0 \tag{1.10}$$

- Conservación de la cantidad de movimiento

$$\rho \frac{d\boldsymbol{V}}{dt} = \rho \mathbf{g} - \boldsymbol{\nabla} \mathrm{p} + \mu \boldsymbol{\nabla}^2 \boldsymbol{V} \tag{1.11}$$

Donde $\boldsymbol{V}$ representa el campo de velocidad, ρ la densidad del fluido, $\mathbf{g}$ la aceleración de gravedad que depende del sistema de coordenadas, p la presión y μ la viscosidad dinámica. Para más información sobre los operadores nabla $\boldsymbol{\nabla}$ y laplaciano $\boldsymbol{\nabla}^2$, ver la sección A del anexo.

Para las ecuaciones anteriores no se pueden obtener soluciones analíticas, por lo que es necesario utilizar métodos numéricos. Los métodos de discretización buscan reemplazar las soluciones exactas de las ecuaciones diferenciales parciales (EDP) en un dominio continuo, por un resultado aproximado en un dominio discreto [10]. El software comercial Fluent utiliza como método de resolución los volúmenes finitos, el cual consiste en dividir el dominio en volúmenes de control, a los que se les aplicaran las ecuaciones definidas previamente.

1.9. Flujo turbulento

En muchos de los casos de estudio de flujos reales es difícil encontrar un régimen laminar,

Entre las características de los flujos turbulentos se encuentran:

- Una distribución espacial muy irregular junto con su evolución temporal
- Son esencialmente tridimensionales
- Son muy complejos, ya que poseen una gran disparidad en sus escalas de longitud características y de tiempo.
- Debido a la gran sensibilidad con las condiciones iniciales y su irregularidad, los flujos son casi aleatorios y la simulación con las ecuaciones de Navier-Stokes resulta muy costosa.
- Son disipativos, ya que una vez generada la turbulencia es necesario un suministro constante de energía para mantenerla, de lo contrario la turbulencia decae.
- El transporte de masa, cantidad de movimiento y energía se ven amplificados por las fluctuaciones existentes en la turbulencia.

Los flujos turbulentos también se caracterizan por tener un valor del número de Reynolds suficientemente grande, de tal forma que las fuerzas inerciales sean predominantes sobre las fuerzas viscosas en el flujo. Es posible definir este número adimensional, utilizando un significado físico [11]:

$$Re = \frac{Fuerzas\ inerciales}{Fuerzas\ viscosas} \tag{1.12}$$

En el caso opuesto, cuando se tiene un número de Reynolds suficientemente bajo las fuerzas viscosas serán predominantes y el flujo será de tipo laminar.

También es posible escribir la ecuación (1.12) de una forma más conveniente para determinar el régimen del flujo como se muestra en la ecuación (1.13):

$$Re = \frac{VL}{\nu} \tag{1.13}$$

Donde V y L representan la velocidad y longitud características, ρ la densidad del fluido y ν la viscosidad cinemática.

Para trabajar con los flujos turbulentos es necesario utilizar herramientas de modelado y simulación numéricas. En ingeniería son ampliamente utilizados los modelos basados en RANS cuando se requieren análisis cualitativos, que corresponden a las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas. Cada modelo proporciona distintos niveles de descripción y distintos niveles de costos en términos de procesamiento.

1.10. Modelos de turbulencia

Entre los modelos de turbulencia más simples se encuentran los modelos algebraicos, donde la "turbulent eddy viscosity" o viscosidad turbulenta de los torbellinos es aproximada por una función algebraica del espacio, tiempo y características simples del flujo promedio [10]. La aplicación de estos modelos es simple pero la precisión de los valores de longitud de mezcla l_m y viscosidad turbulenta de los torbellinos es limitada.

Los modelos de dos ecuaciones se obtienen como solución la velocidad y la escala de longitud turbulenta utilizando dos ecuaciones de transporte por separado. La principal

ventaja de estos modelos, es que no requieren una especificación de la longitud de mezcla[1] l_m como pre-condición.

Los modelos de turbulencia más utilizados en aerodinámica son:

- Realizable $\mathrm{k} - \epsilon$
- SST $\mathrm{k} - \omega$
- Spalart-Allmaras

Es importante destacar que no existe un modelo que reproduzca fielmente el comportamiento del flujo turbulento y la calidad de los resultados dependen de la elección correcta del modelo.

1.10.1 Modelo de turbulencia $\mathbf{k} - \boldsymbol{\omega}$ SST

En un estudio realizado en la Escuela Politécnica de Montreal [12] publicado en el año 2011, se compararon cuatro modelos de turbulencia para verificar cual es el más preciso al momento de estudiar flujos bidimensionales alrededor de un perfil alar con distintos ángulos de ataque. Se analizaron los modelos $k - \varepsilon\, RNG$, $k - \omega\, SST$, Spalart-Allmaras y RSM (Reynolds stress model). Se encontró que el modelo menos indicado es el modelo RSM y el más indicado, el modelo $k - \omega\, SST$, ya que este último puede trabajar con la disipación turbulenta y representa mejor el flujo de corriente al compararlo con el resultado experimental [13].

El modelo $k - \omega$ de Wilcox, es uno de los modelos de turbulencia más utilizados, el cual incluye un término de energía cinética turbulenta $\boldsymbol{k}$ y un término de disipación específica $\boldsymbol{\omega}$. Este último término es utilizado para determinar las escalas de turbulencia. Entre las ventajas de este modelo se encuentra la precisión del

[1] La longitud de mezcla del modelo de Prandtl plantea que un torbellino turbulento desplaza una partícula de fluido a una distancia l_m.

tratamiento cerca de la pared con gradientes de presión adversos y flujos complejos, especialmente en aerodinámica. Entre las desventajas se encuentra el problema de sensibilidad de las soluciones para $\boldsymbol{k}$ **y** $\boldsymbol{\omega}$ en regiones fuera de la capa límite o en el flujo libre, donde los esfuerzos cortantes por viscosidad no son significativos. Para solucionar este problema, se modificó el modelo anterior para dar lugar al modelo $k - \omega\, SST$. Este modelo fue creado por Menter [14], y la idea es combinar las ventajas del modelo original de Wilcox con las del modelo $k - \varepsilon$, utilizando una función de mezcla que permite ocupar el modelo $k - \omega$ en regiones cercanas a la pared y el modelo $k - \varepsilon$ en el flujo libre, con constantes de modelamiento diferentes a las originales.

Las características del modelo de Menter permiten trabajar con flujos complejos con gradientes de presión adversos y perfiles alares, obteniendo resultados más precisos que los entregados por el modelo de Wilcox.

1.11. Ley de Pared

En un flujo turbulento es importante describir el comportamiento cerca de la pared con un modelo y parámetros de proximidad adecuados, ya que es en esta zona donde se producen fenómenos de arrastre. En la capa límite turbulenta se pueden diferenciar tres sub-capas. En la sub-capa más próxima a la pared predominan los efectos de la viscosidad y el flujo es laminar. La capa exterior es totalmente turbulenta y predominan los esfuerzos turbulentos más que la viscosidad molecular. Entre estas dos capas existe una capa intermedia donde dominan de igual forma los efectos de la turbulencia y los efectos de la viscosidad molecular [15].

Realizando un análisis adimensional, se puede determinar la velocidad de fricción a la pared u_t en función del esfuerzo cortante τ_w a la pared, calculado a partir del campo de velocidad promedio, y la densidad del fluido ρ con la siguiente ecuación:

$$u_t = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{1.14}$$

Utilizando el término anterior u_t de velocidad de fricción, la distancia "y" a la pared y la viscosidad cinemática ν, se define la distancia adimensional a la pared y^+con la siguiente ecuación:

$$y^+ = \frac{u_t y}{\nu} \tag{1.15}$$

Otra variable adimensional que se debe introducir en el análisis de turbulencia es la velocidad adimensional u^+ en función del perfil de velocidad promedio $u(y)$ y la velocidad de fricción u_t, representada por:

$$u^+ = \frac{u}{u_t} \tag{1.16}$$

En la subcapa laminar que es la más próxima a la pared, donde las fluctuaciones turbulentas son nulas, la velocidad adimensional es igual a la distancia adimensional a la pared, es decir $u^+ = y^+$. En la subcapa turbulenta, el comportamiento de la velocidad adimensional es de tipo logarítmico y su ecuación es la siguiente:

$$u^+ = \frac{1}{k}\ln(y^+) + C \tag{1.17}$$

Donde k corresponde a la constante de Von Kármán con k = 0,41 y C una constante empírica con valor $C = 5{,}45$ según el manual de Ansys.

Estas dos zonas mencionadas anteriormente se muestran en la Figura 1.13, observándose una zona intermedia de transición donde no existe un modelo analítico para predecir el comportamiento del flujo.

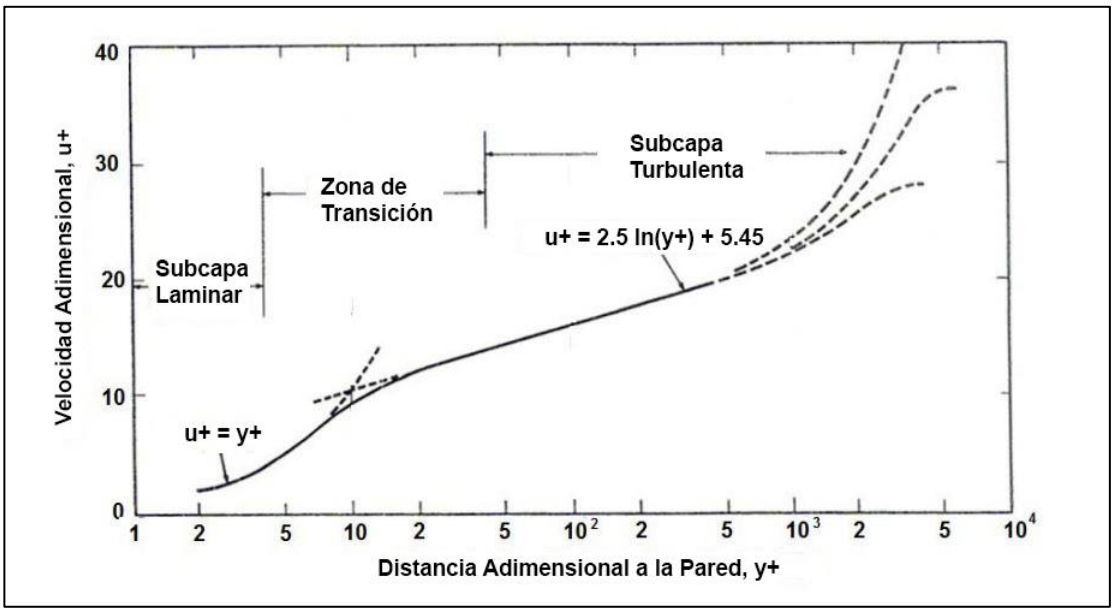


Figura 1.13: Velocidad adimensional en función de la distancia adimensional a la pared.

Observando la figura anterior se pueden determinar de manera aproximada los límites de las 3 zonas de transición del flujo cercano a la pared:

- Subcapa viscosa: $0 < y^+ < 5$
- Zona de transición: $5 < y^+ < 70$
- Subcapa turbulenta: $70 < y^+$

El modelo de turbulencia $k - \omega\ SST$ utiliza por defecto el tratamiento mejorado de pared o "Enhanced Wall Treatment", el cual consiste en combinar la ecuación lineal de $u^+ = y^+$ con la ecuación logarítmica $u^+ = \frac{\ln(y^+)}{k} + C^+$ de forma que la transición entre ellas sea suave. El programa Ansys agrupa estas dos ecuaciones en una sola de la siguiente forma:

$$u^+ = e^{\Gamma} u^+_{lam} + e^{\frac{1}{\Gamma}} u^+_{turb} \tag{1.18}$$

Con la función de mezcla Γ esta dada por:

$$\Gamma = -\frac{a(y^+)^4}{1 + by^+} \tag{1.19}$$

Donde $a = 0{,}01$ y $b = 5$.

La función Γ asegura que el comportamiento del perfil de velocidad sea asintótico cuando los valores de y^+ caen en el rango de $3 < y^+ < 10$ en la región de transición.

Para trabajar con los modelos de turbulencia $k - \omega$, en la guía de Ansys Fluent se recomienda que los valores de y^+ deben ser cercanos a 1 [16], de esta forma se logran representar los efectos de la subcapa laminar.

Capítulo 2

Metodología

Para desarrollar el análisis aerodinámico del auto solar se debe trabajar con distintas herramientas en cada etapa, siendo la principal ANSYS Fluent, la que permite realizar simulaciones de CFD y obtener los valores de velocidad, presión y diversos coeficientes utilizados en aerodinámica.

Como primer acercamiento, se obtienen los documentos y modelos en 3d de los trabajos previos realizados por el equipo Ergon. El software utilizado para trabajar en esta etapa es Autodesk Inventor, que posee más herramientas de modelado en 3d que ANSYS Desing Modeler. El modelo 3d original se simplifica y se utiliza en la creación del dominio para utilizarlo posteriormente en la confección de la malla. De no ser factible realizar las simulaciones en 3d, se crearan diversos dominios en 2d cortando el modelo original en secciones longitudinales y secciones transversales, nombrándolos con la letra “L” y “T” respectivamente. Para simplificar el posterior trabajo de mallado, se decide trabajar solo con el “ala” del vehículo. El software Autodesk Inventor también será utilizado para realizar las mejoras del modelo original y su dominio.

Previo a la simulación del modelo, es necesario realizar una simulación precursora que permita reducir el tiempo de procesamiento y cálculo, creando un dominio más pequeño en la simulación principal. Los distintos parámetros de turbulencia y velocidad son exportados y utilizados posteriormente en la simulación del modelo.

Posteriormente, con el software ANSYS ICEM CFD se crea la malla de la simulación precursora y del modelo original, este último se crea a partir del dominio generado en 3d.

Las diversas mallas generadas son utilizadas en el software ANSYS Fluent para obtener las variables y parámetros deseados del modelamiento del flujo.

En esta sección se explicarán los detalles de los programas utilizados, los dominios y mallas generadas para los casos en 2d y 3d, las condiciones de contorno y parámetros de entrada.

2.1. Programas utilizados

2.1.1 Autodesk Inventor

El software Autodesk Inventor es un modelador de sólidos en 3d que posee una interfaz gráfica con variadas opciones de visualización de la geometría y herramientas de diseño. La creación de una geometría en 3d comienza con un esquema en 2d desde uno de los planos del eje coordenado, pudiendo realizar figuras en extrusión o solidos de revolución. La creación de dominios y modelos en 2d y 3d resulta más sencilla que en el programa de ANSYS, ya que posee más herramientas y mejores opciones de visualización.

Se destaca entre las diversas opciones de creación, la herramienta “loft”, la que permite crear complejas figuras con curvas pronunciadas. Para utilizarla es necesario crear 2 curvas en 2d con la herramienta “sketch” y otra curva adicional para trazar el camino deseado entre las 2 curvas. En la Figura 2.1 y la Figura 2.2 se muestra el proceso de creación de uno de los cubre ruedas del auto solar y el resultado obtenido.

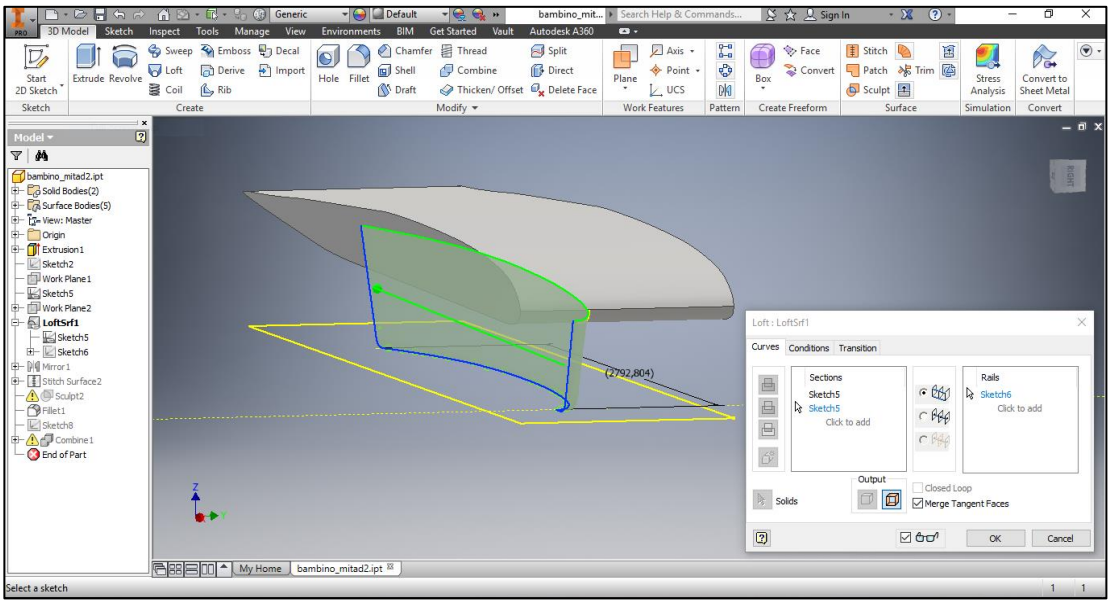


Figura 2.1: Proceso de creación de un cubre rueda en 3d a partir de 2 curvas de base superior e inferior y una curva para trazar el camino entre ellas, utilizando la herramienta “loft”.

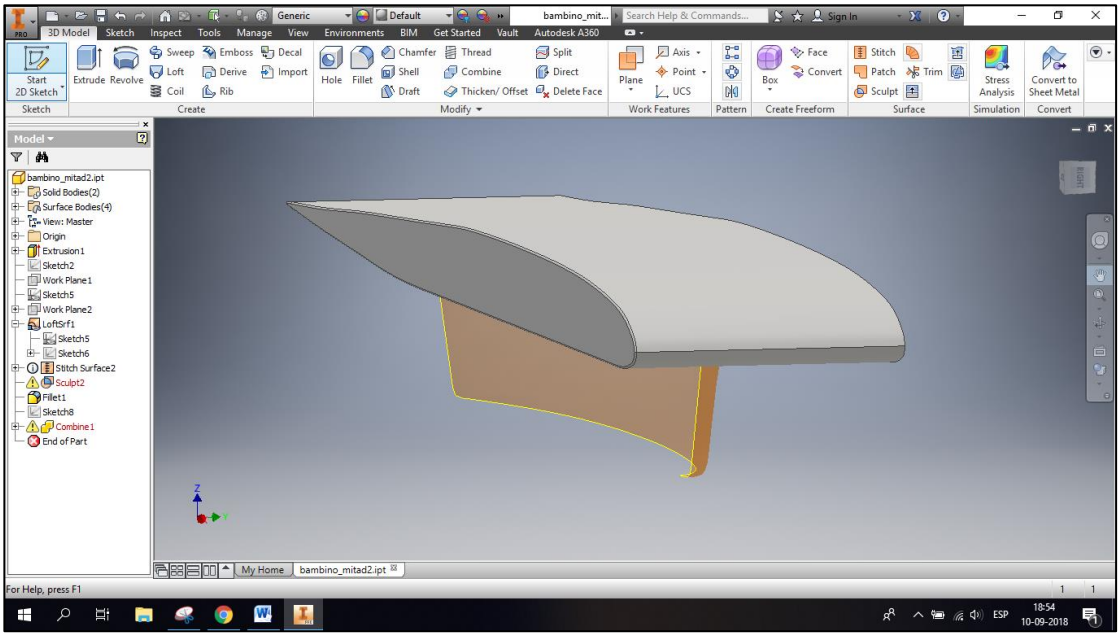


Figura 2.2: Mitad de un cubre ruedas, obtenido mediante el uso de la herramienta “loft”.

La figura obtenida corresponde a la mitad del cubre ruedas, la que se completa posteriormente con la herramienta “mirror”.

2.1.2 ANSYS Fluent

Para la simulación CFD se ha utilizado el software ANSYS Fluent, el cual es ampliamente utilizado en ingeniería gracias a la capacidad de simular distintos fenómenos físicos con transferencia de calor o flujos complejos transientes.

Entre los formatos de malla aceptados se encuentran GAMBIT, GeoMesh y PreBFC. Además, dentro de las herramientas de ANSYS se incorporan dos generadores de mallas llamados ANSYS Meshing y ANSYS ICEM CFD.

La precisión de las soluciones puede ajustarse a simple o doble, dependiendo de la geometría, el fenómeno simulado o el tipo de malla. En algunos casos, los resultados obtenidos con precisión simple pueden ser poco precisos y generar problemas de convergencia, por lo que es necesario utilizar la modalidad de precisión doble.

Entre las diferentes formas de procesamiento se tiene la más sencilla con un solo procesador y luego las diferentes configuraciones para trabajar con múltiples procesadores en paralelo en un solo computador o conectados en una red [17].

En la Figura 2.3 se presenta la pantalla principal de ANSYS Fluent con el árbol de decisiones al lado izquierdo y la malla generada con anterioridad en la parte derecha.

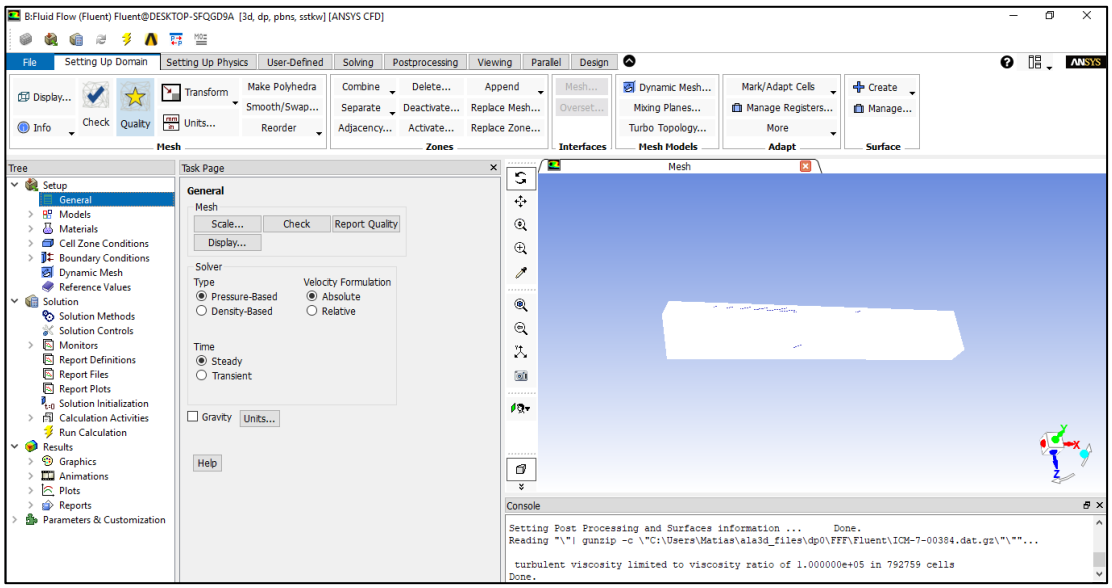


Figura 2.3: Interfaz gráfica del software ANSYS Fluent.

Entre las opciones disponibles del árbol de decisiones se encuentran las configuraciones generales con las herramientas de diagnóstico de malla, la selección del algoritmo basado en la presión o densidad y las opciones entre flujo estacionario o transiente. En las opciones de modelo se pueden seleccionar los modelos de turbulencia con cada una de sus variables y a continuación los materiales y fluidos utilizados en la simulación, los parámetros de las condiciones de contorno, los métodos de solución con los diversos métodos de acoplamiento de presión y discretización espacial, la selección de los valores residuales de convergencia, los métodos de inicialización de variables y la cantidad de iteraciones o pasos de tiempo dependiendo del tipo de simulación. El detalle de las opciones es presentado en la Figura 2.4.

También es posible obtener gráficos y reportes de los resultados obtenidos, pero en este caso se utilizará el programa ANSYS CFD-Post.

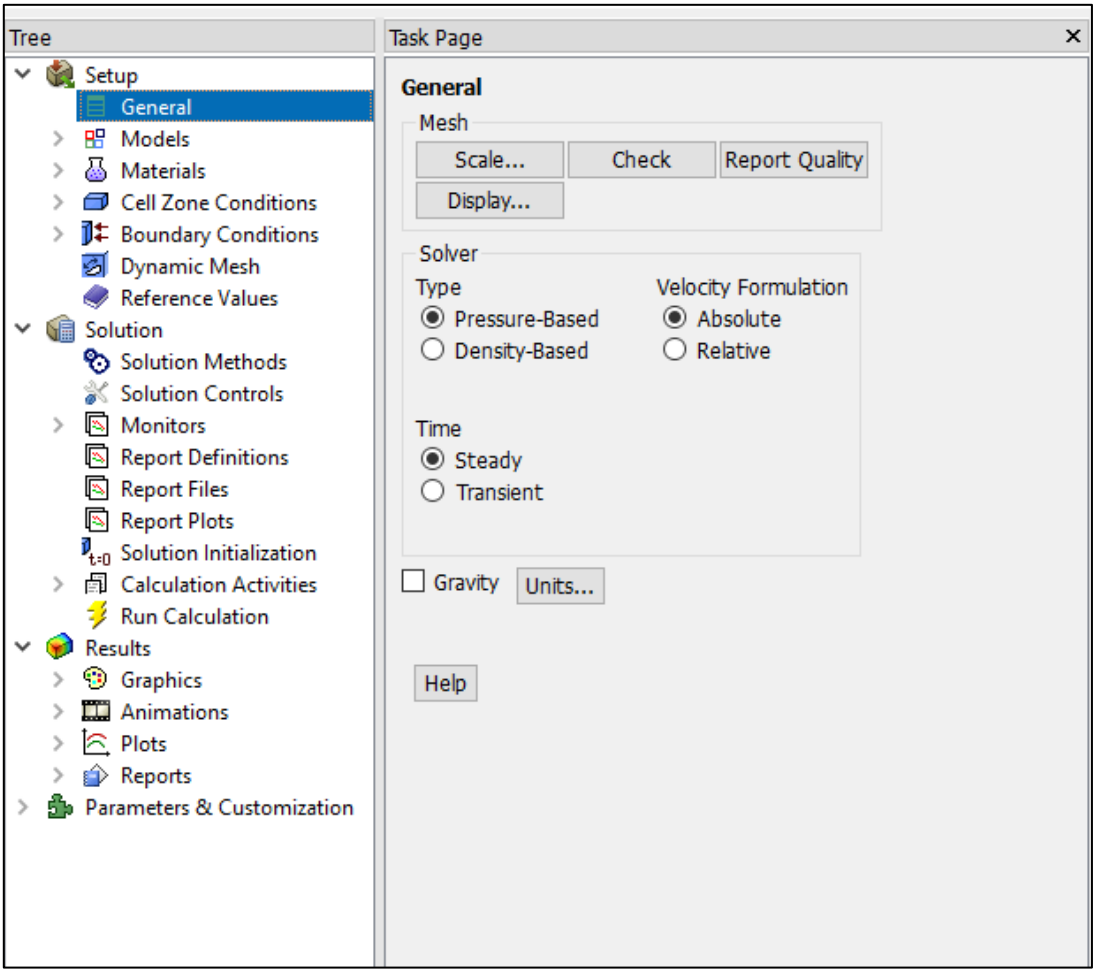


Figura 2.4: Detalle de la interfaz gráfica del software ANSYS Fluent.

2.1.3 ANSYS ICEM CFD

Una de las etapas más importantes y que mayor tiempo demandan en una simulación CFD corresponde al mallado. El software seleccionado para esta etapa corresponde a ANSYS ICEM CFD, que a diferencia del programa asignado por defecto ANSYS Meching, posee muchas más herramientas y tipos de malla, con la posibilidad de verificar la calidad de cada bloque o elemento y de trabajar de forma individual con cada uno de estos. Otra gran ventaja es la de crear mallas estructuradas, no estructuradas e híbridas. En mallas estructuradas los elementos que la componen

forman patrones definidos, mientras que en las mallas no estructuradas los patrones formados son de tipo irregulares.

Entre los formatos de malla que se pueden obtener se encuentran los siguientes:

- Multi-bloque estructurada
- No estructurada hexaédrica
- No estructurada tetraédrica
- Cartesiana con refinamiento de tipo “H-grid”
- Mallas híbridas con geométricas tetraédricas, hexaédricas, piramidales y/o prismáticas.
- Mallas con superficies cuadradas o triangulares.

Para comenzar a crear el dominio se pueden utilizar las herramientas integradas de dibujo o también importar archivos en formato CAD, lo que resulta de gran utilidad para complementar con el software Autodesk Inventor.

2.2. Normas de diseño para la carrera

Las reglas de la competencia establecen que el auto solar debe cumplir con los siguientes parámetros dimensionales:

- Longitud máxima: 5000 [mm]
- Anchura máxima: 2200 [mm]
- Altura máxima: 1600 [mm]

La altura se considera desde el contacto con suelo de los neumáticos hasta la altura máxima del auto. El modelo que se utilizará en este análisis se muestra en la Figura 2.5:

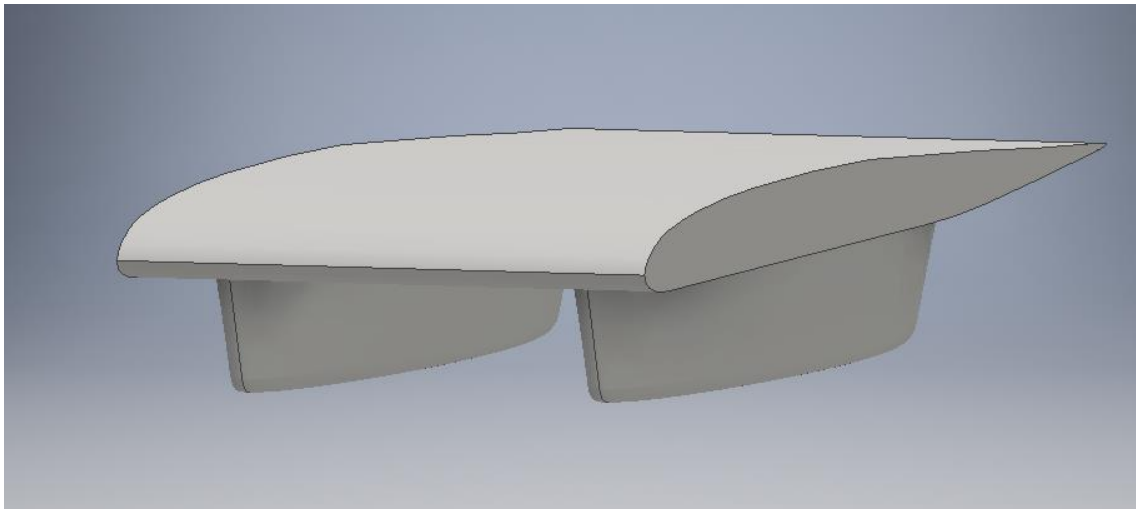


Figura 2.5: Modelo simplificado en 3 dimensiones del Auto Solar Ergón, realizado con el software Autodesk Inventor.

Cabe señalar que no será necesario utilizar la cúpula del piloto y las ruedas, ya que se intentará realizar cambios solo en el ala y los cubre ruedas. Con estas simplificaciones se logra reducir el tiempo de procesamiento y la obtención del mallado.

En la Figura 2.6 y la Figura 2.7 se muestran las dimensiones laterales del auto solar. La cuerda del perfil alar posee 4,5 [m] de longitud, observándose una leve diferencia en la figura debido a la inclinación del ángulo de ataque.

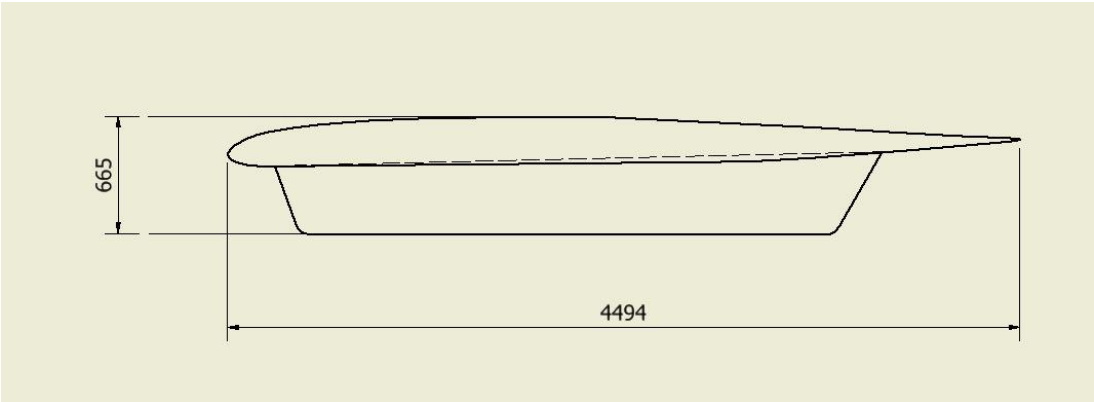


Figura 2.6: Esquema del *Auto Solar Ergón.*

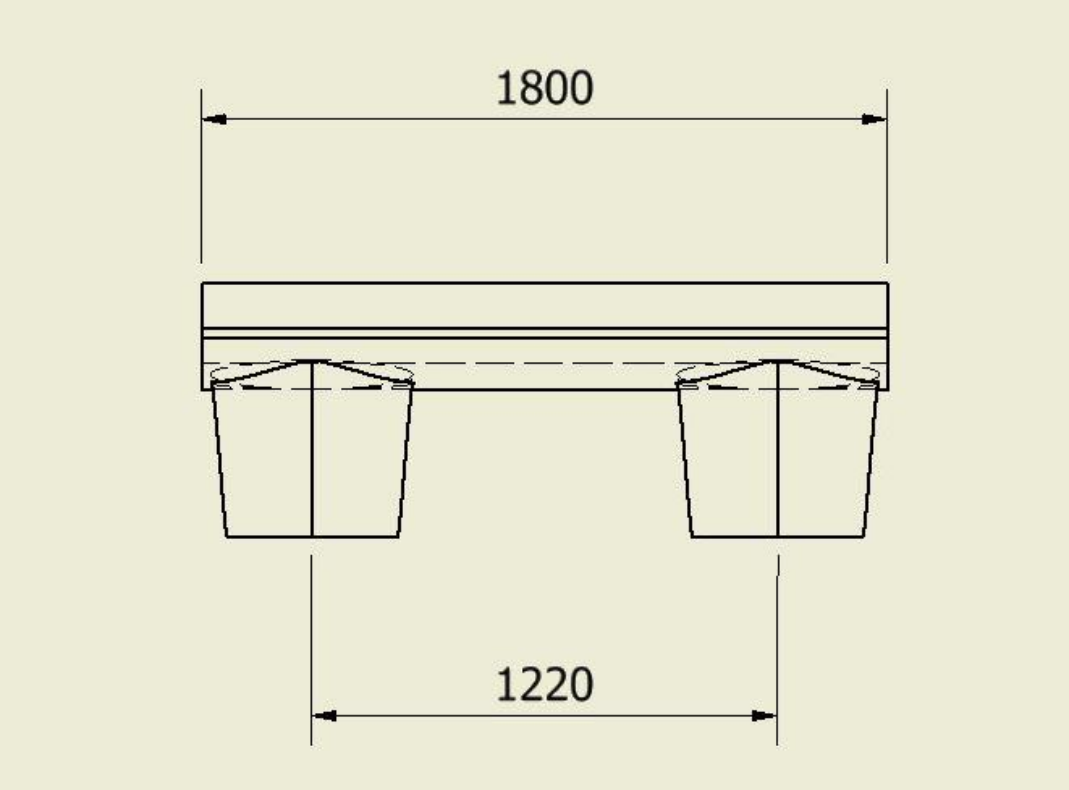


Figura 2.7: Esquema del *Auto Solar Ergón.*

2.3. Configuración del modelo

La configuración del modelo consta de una etapa previa para determinar los valores de entrada llamada simulación precursora y otra etapa que abarca varias simulaciones del objeto de estudio. Una simulación precursora se realiza de manera previa a la simulación principal, obteniendo el perfil de velocidad desarrollado junto con los parámetros de turbulencia en un dominio de mayor dimensión al utilizado en la simulación principal. Los parámetros de velocidad y turbulencia obtenidos en la simulación precursora son posteriormente utilizados como datos de entrada en la simulación principal. Esto permite reducir los tiempos de procesamiento al disminuir el tamaño del dominio.

2.3.1 Dominio de la simulación Precursora

En este caso se utilizará un dominio de largo 20L y altura 11D + H, donde L corresponde a la cuerda y D al espesor máximo del perfil alar y **H la altura desde el suelo hasta la superficie más baja del ala o perfil alar**, como se muestra en la Figura 2.8:

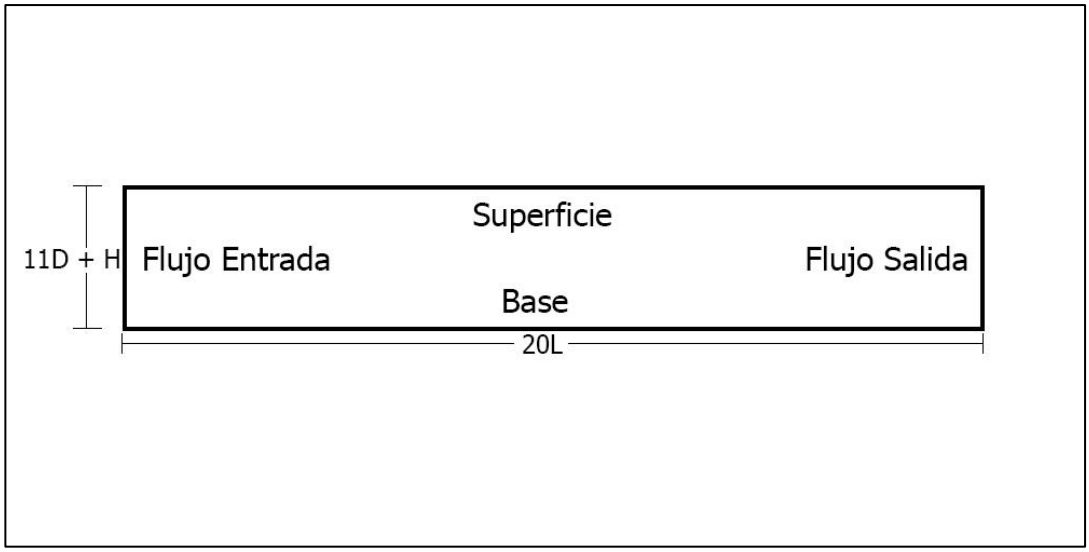


Figura 2.8: Dominio de la simulación precursora. (Figura no a escala real).

En la figura anterior se representan las dimensiones del dominio de la simulación precursora.

2.3.2 Dominio de las simulaciones en 3d

Para comenzar con el proceso de simulaciones, se realizan pruebas para verificar la factibilidad de realizar una malla en 3d. Las dimensiones del dominio se muestran en la Figura 2.9:

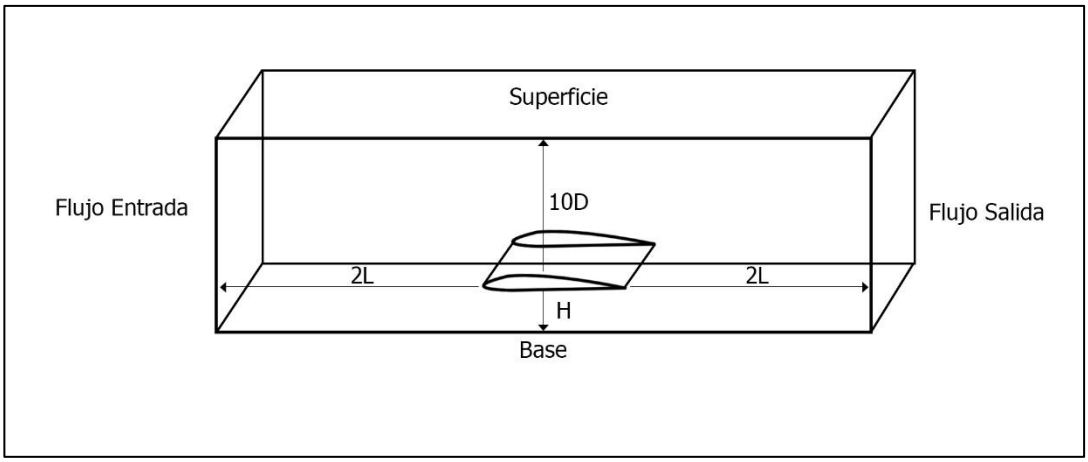


Figura 2.9: Dominio de la malla en 3d.

Para simplificar la geometría se trabajará sin los cubre ruedas y solo con el perfil alar. Es posible reducir el tamaño del dominio y por ende la cantidad de nodos de la malla, trabajando con la mitad del perfil alar cortándolo por su eje de simetría. Al observar el dominio en dirección del flujo de entrada, se tienen las dimensiones que se muestran en la Figura 2.10:

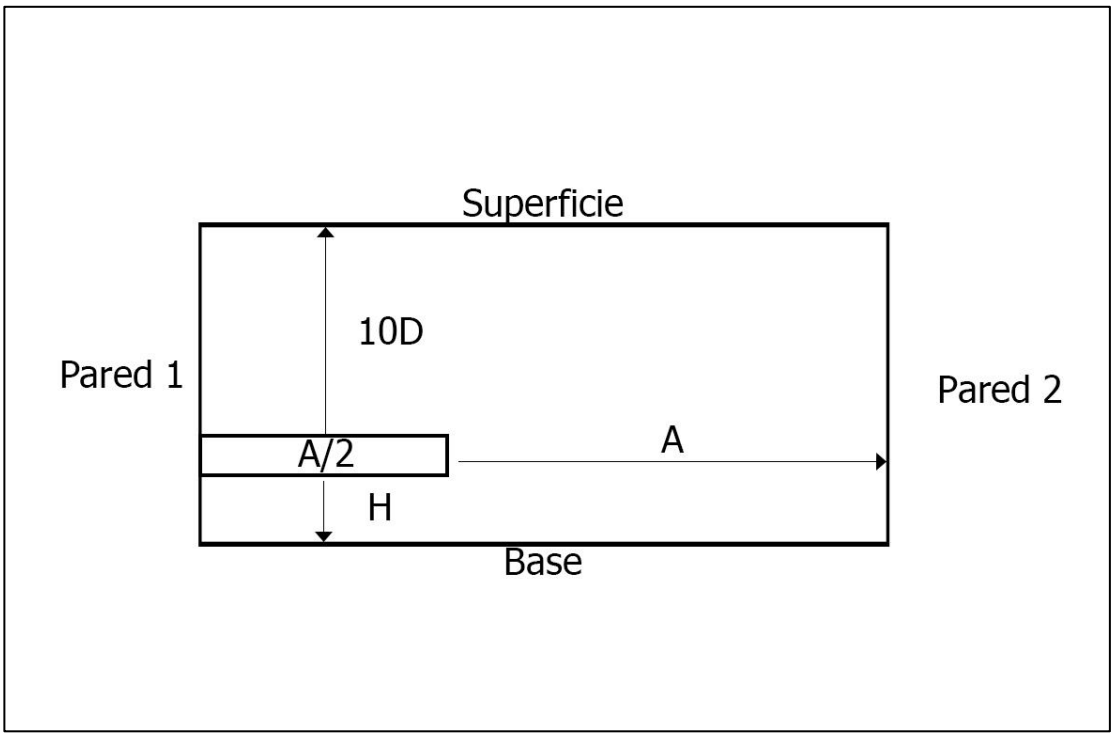


Figura 2.10: Dominio de la malla en 3d, vista en dirección del flujo.

Como referencia se tienen 2 paredes en el dominio que poseen diferentes condiciones según el tipo de flujo. La altura H corresponde a la distancia desde el suelo hasta la base del ala, considerando la distancia que hay al incluir las ruedas y los cubre ruedas. La distancia 10D corresponde a 10 veces el espesor máximo del perfil alar y la distancia A al ancho original del mismo.

2.3.3 Dominio de las simulaciones en 2d de las secciones longitudinales

En esta etapa se obtienen los perfiles de cortes longitudinales en el auto solar. En primer lugar, se debe seleccionar una mitad simétrica del modelo realizando un corte en el eje de simetría y posteriormente se obtienen 2 perfiles L1 y L2 realizando 2 cortes a la mitad obtenida del paso anterior a igual distancia cada uno. En la Figura 2.11 se presenta de forma detallada la ubicación de estos perfiles:

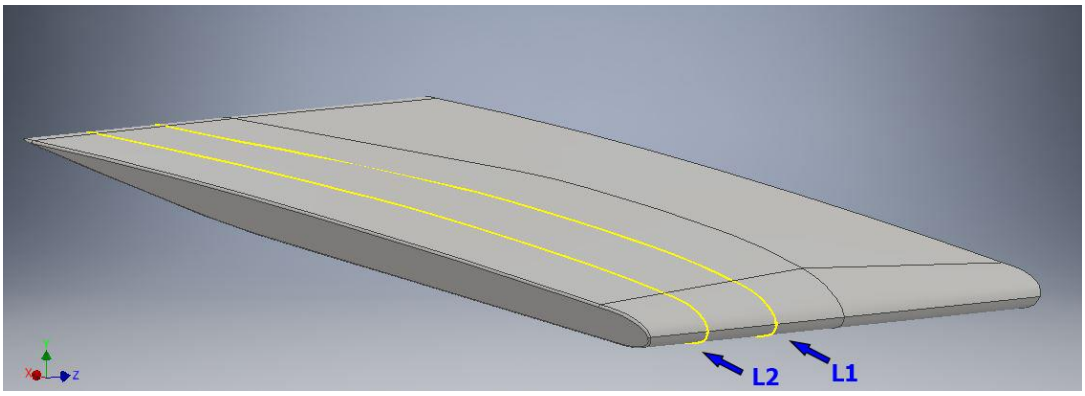


Figura 2.11: Perfiles longitudinales del auto solar.

Luego de realizar la simulación precursora es posible obtener un dominio más reducido para las simulaciones posteriores, manteniendo la misma altura. El primero de los dos grupos de simulaciones corresponde a los perfiles longitudinales, los cuales tienen el dominio que se muestra en la Figura 2.12:

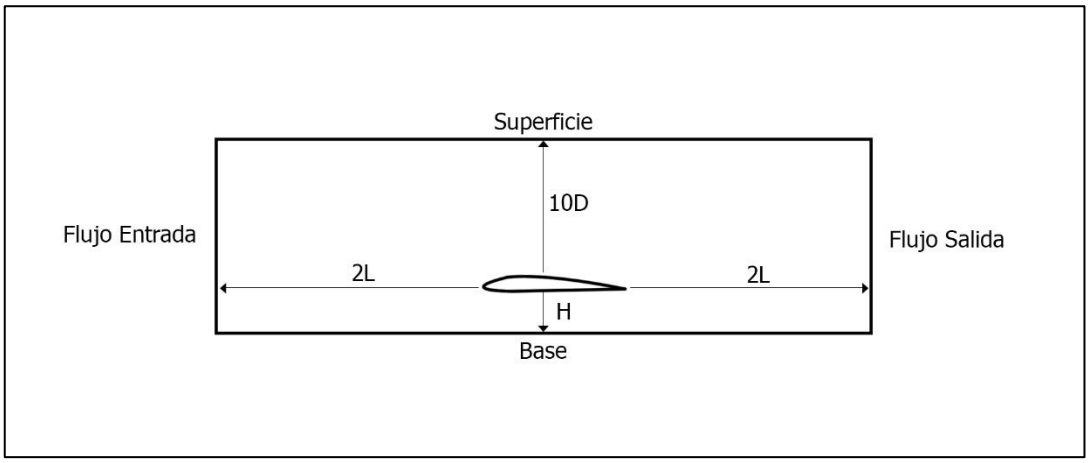


Figura 2.12: Dominio de los perfiles longitudinales.

Las dimensiones del dominio se mantienen para la altura, mientras que el ancho disminuye a 5L. En la figura anterior, la cuerda y el espesor del perfil alar se deben considerar al calcular las dimensiones.

2.3.4 Dominio de las simulaciones en 2d de las secciones transversales

El segundo grupo de simulaciones se realiza con los perfiles transversales del modelo, cortando la mitad simétrica en 3 partes a igual distancia y de forma transversal. Los perfiles T1, T2 y T3 se muestran en la Figura 2.13:

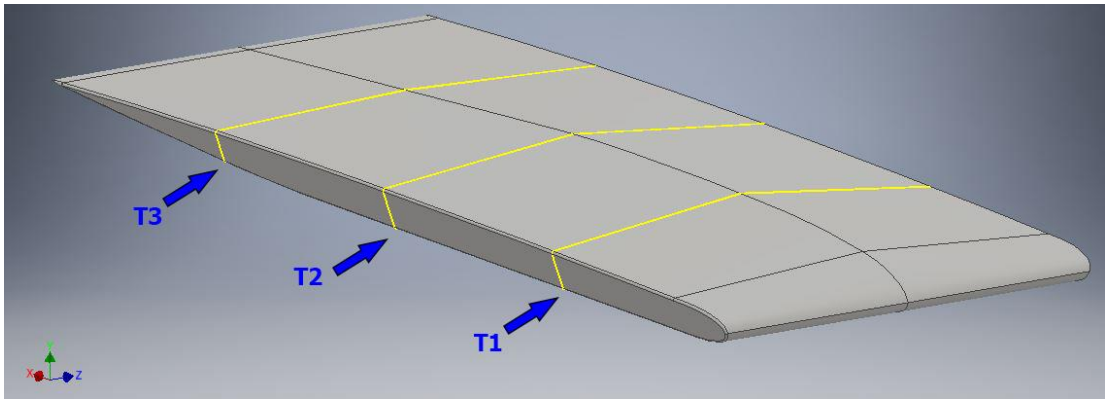


Figura 2.13: Perfiles transversales del auto solar.

El dominio se obtiene manteniendo la misma altura de las simulaciones del grupo anterior, pero variando el ancho. Las dimensiones del dominio se muestran en la Figura 2.14:

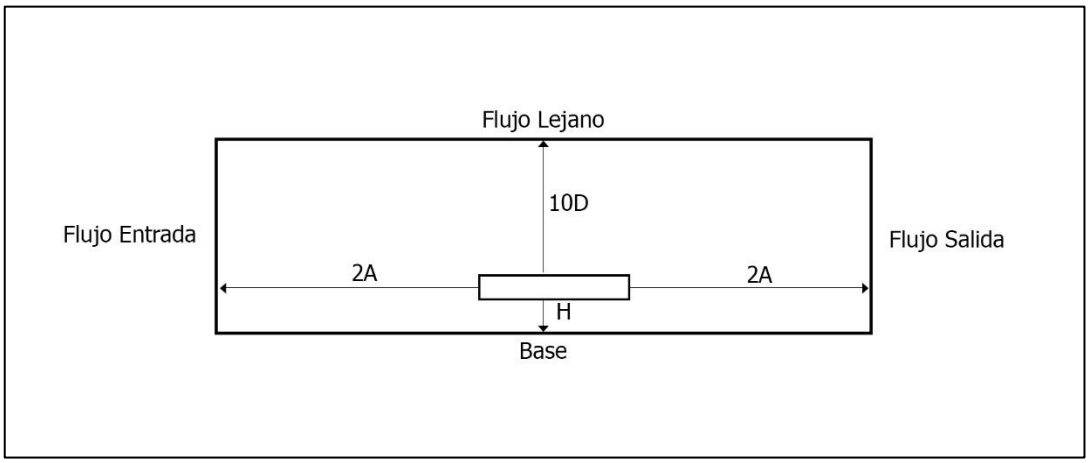


Figura 2.14: Dominio de los perfiles transversales.

2.4. Generación de la malla

ICEM CFD es un módulo de Ansys que se utiliza para la creación de mallas estructuradas, no estructuradas e híbridas con distintos tipos de geometría. A diferencia de la herramienta predeterminada que ofrece Ansys Fluent, ICEM CFD permite realizar cambios manuales en la malla y ajustar de forma flexible los parámetros de diseño, utilizando bloques de división y la herramienta OGrid que mejora los ángulos interiores en las esquinas de cada bloque. Posee herramientas para analizar la calidad de malla, utilizando una interfaz gráfica que ayuda a encontrar los sectores defectuosos de forma sencilla. Dadas las ventajas que posee ICEM CFD, se utilizara para trabajar el mallado.

2.4.1 Malla de la simulación Precursora

La malla consta de 14000 nodos, separados en bloques. En la parte inferior se realizó un refinamiento gradual para lograr obtener un valor de y^+ cercano a 1 de acuerdo al modelo de turbulencia utilizado, donde también se observaran los cambios en el perfil de velocidad provocados por la condición de no deslizamiento. En la Figura 2.15 se muestra el extremo izquierdo de la malla. Para efectos prácticos no se mostrará la malla completa, ya que su geometría no permite apreciar bien los detalles cerca de la pared.

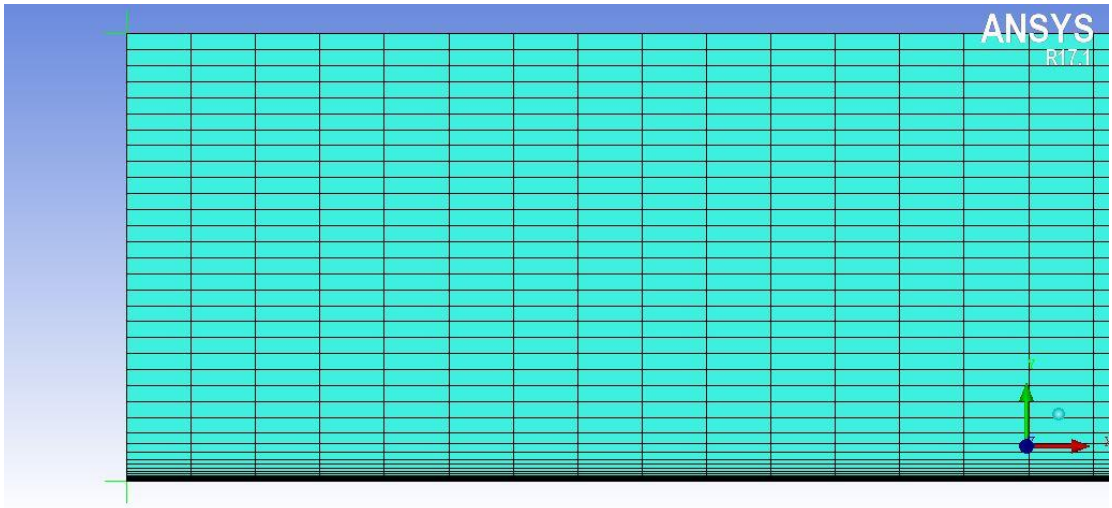


Figura 2.15: Detalle de la malla de la simulación precursora donde se aprecia el refinamiento cerca de la pared.

2.4.2 Malla de las Simulaciones en 3d

Se procede a crear la malla con el programa ICEM CFD separándola en varios bloques o secciones. Con la herramienta OGrid se facilita el trabajo al interior de cada bloque donde se encuentran las geométricas más complicadas, mejorando los ángulos internos para una mejor calidad final de la malla.

En la Figura 2.16 se presentan las proyecciones de la malla sobre las paredes del dominio y el modelo:

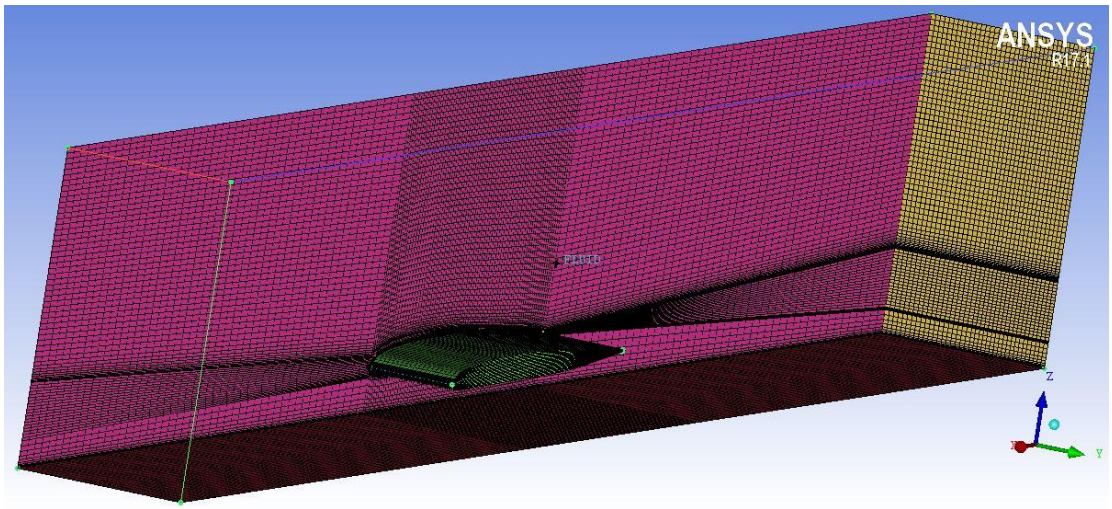


Figura 2.16: Malla en 3d proyectada sobre 3 paredes del dominio y el modelo.

La malla cercana a la pared del modelo y el suelo es refinada para cumplir con los valores de y^+ requeridos, como se muestra en la Figura 2.17:

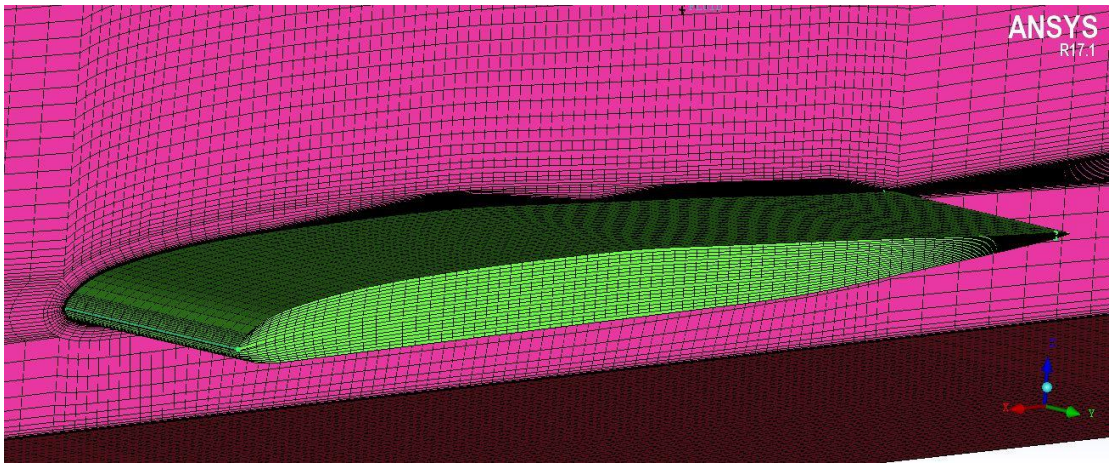


Figura 2.17: Detalle de la malla en 3d.

La malla consta de 950.000 nodos, cantidad elevada para realizar cálculos de procesamiento en un equipo de un solo procesador. Se realizó una primera simulación con esta malla para verificar si cumple con las características necesarias de refinamiento de los sectores críticos. Luego de una hora de cálculos en Fluent, el programa se detiene por problemas de convergencia de los valores residuales. Debido al excesivo tiempo necesario para mejorar la malla y obtener las soluciones, **se descarta la malla en 3d y se decide continuar el estudio aerodinámico de los perfiles en 2d.**

2.4.3 Malla de los perfiles 2d del modelo

Las simulaciones en 2d del modelo cuentan con 6 perfiles transversales y 4 perfiles longitudinales en total, considerando el modelo original y el modelo mejorado. Para cada uno de los perfiles se crea una malla diferente y con las especificaciones de cada dominio. Se debe cumplir la misma condición de la malla anterior, donde y^+ es cercano a 1 en el suelo y en el contorno del perfil alar. Es necesario revisar y corregir las curvaturas excesivas en la malla, ya que se pueden generar problemas de convergencia. La condición de no deslizamiento se aplica al suelo y al perfil alar.

En la sección D del anexo se pueden observar cada una de las mallas generadas y una vista en detalle del refinamiento en la pared de cada perfil, a modo de cumplir con el valor de y^+, junto con el comportamiento de la capa límite y sus subcapas.

2.5. Condiciones de borde

2.5.1 Condiciones de borde de la simulación precursora

Se debe tener cuidado al momento de elegir las condiciones de borde, ya que los datos obtenidos de ésta simulación serán utilizados como parámetros de entrada posteriormente. Las condiciones de borde para los casos donde el flujo es longitudinal se muestran en la Tabla 2.1:

Borde	Condición	Parámetros
Superior	Velocidad Entrada	$V_x = 28[m/s]$, I = 2%, $\frac{\mu_t}{\mu} = 2$
Inferior	Pared (No deslizamiento)	$\vec{V} = 0\ [m/s]$
Izquierdo	Velocidad Entrada	$V_x = 28[m/s]$, I = 2%, $\frac{\mu_t}{\mu} = 2$
Derecho	Presión Salida	Presión de referencia $P = 0\ [Pa]$

Tabla 2.1: Condiciones de borde de la simulación precursora para las simulaciones de los perfiles longitudinales.

La velocidad de los flujos longitudinales será de 28 [m/s] (100 [km/h]), velocidad superior a la máxima alcanzada el año 2014 de 75 [km/h].

En el caso de los flujos transversales, se asumirá un 60% de la velocidad utilizada en el caso de los flujos longitudinales, ya que la velocidad será mayor en la dirección de desplazamiento del auto solar. Las condiciones de borde quedarán como se muestra en la Tabla 2.2:

Borde	Condición	Parámetros
Superior	Velocidad Entrada	$V_x = 17[m/s]$, I = 2%, $\frac{\mu_t}{\mu} = 2$
Inferior	Pared (No deslizamiento)	$\vec{V} = 0\ [m/s]$
Izquierdo	Velocidad Entrada	$V_x = 17[m/s]$, I = 2%, $\frac{\mu_t}{\mu} = 2$
Derecho	Presión Salida	Presión de referencia $P = 0\ [Pa]$

Tabla 2.2: Condiciones de borde de la simulación precursora para las simulaciones de los perfiles transversales.

El valor de la intensidad turbulenta será I = 2%, valor aproximado como se especifica en el libro "Computer-Aided Control Systems Design" [18], donde el valor para flujos sobre automóviles y aviones es de aproximadamente 1%. Al considerar el efecto del suelo sobre el flujo, se incrementará este valor al 2%.

2.5.2 Condiciones de borde de las simulaciones en 2d

En el caso de las simulaciones de los perfiles en 2d, es necesario obtener como datos de entrada la velocidad, la energía cinética turbulenta y la tasa de disipación especifica. Estos datos de entrada se obtienen de las dos simulaciones precursoras y varían dependiendo si los datos son utilizados para las simulaciones de los perfiles transversales o longitudinales. Las condiciones de no deslizamiento en el perfil y en el suelo se mantienen para ambos casos.

Las condiciones de borde para las simulaciones transversales y longitudinales, se resumen en la Tabla 2.3:

Borde	Condición	Parámetros
Superior	Velocidad Entrada	Datos simulación precursora
Inferior	Pared (No deslizamiento)	$\vec{V} = 0\ [m/s]$
Izquierdo	Velocidad Entrada	Datos simulación precursora
Derecho	Presión Salida	Presión de referencia $P = 0\ [Pa]$
Perfil Alar	Pared (No deslizamiento)	$\vec{V} = 0\ [m/s]$

Tabla 2.3: Condiciones de borde de las simulaciones en 2d del auto solar.

2.6. Configuración de ANSYS Fluent

En ANSYS Fluent hay dos opciones de métodos numéricos disponibles, el método basado en densidad y el método basado en presión. El primer método fue diseñado para ser utilizado en flujos de alta velocidad compresibles, mientras que el segundo método se aplica a flujos de baja velocidad incompresibles. En este trabajo se utilizara el método basado en presión, ya que se asume que los flujos simulados son de tipo incompresible. Este método utiliza un algoritmo de solución que resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes de forma secuencial llamado algoritmo segregado (ver anexo B).

Para resolver las ecuaciones se utilizara un método de acoplamiento de presión velocidad a modo de obtener una condición adicional para la presión y reformular la ecuación de continuidad. ANSYS Fluent entrega cinco opciones de algoritmos para tratar el acoplamiento de presión velocidad: SIMPLE, SIMPLEC, PISO, coupled y FSM. Todos los algoritmos a excepción de “coupled” se basan el método predictor-corrector [14]. Para obtener soluciones más precisas se utilizará el algoritmo PISO, ya que entrega mejores resultados en mallas con exceso de curvatura.

Es posible obtener estabilidad de la convergencia al utilizar los factores de baja relajación o URF por sus siglas en inglés. Cada ecuación lleva asociado factores de baja relajación para controlar el cálculo de las variables en cada iteración. El manual de ANSYS Fluent recomienda utilizar los valores URF por defecto. Si los valores residuales continúan incrementándose después de 4 o 5 iteraciones, se debe reducir el valor de los factores.

En este trabajo se utilizarán esquemas de primer orden en las variables con dificultad para alcanzar la convergencia, mientras que para las demás variables se utilizarán esquemas de segundo orden, logrando un resultado más preciso.

En la Tabla 2.4 se resumen los parámetros de configuración utilizados en ANSYS Fluent:

Parámetro	Tipo
Discretización de presión	2do orden
Discretización de momentum	2do orden
Discretización de k	1er orden
Discretización de ω	1er orden
Acoplamiento de presión-velocidad	PISO
URF presión	0,3
URF momentum	0,7
URF k	0,8
URF ω	0,8

Tabla 2.4: Resumen de la configuración de ANSYS Fluent.

Los valores residuales son utilizados para medir el desequilibrio en cada ecuación de un volumen de control y son importantes para definir la convergencia de una variable, asegurando que las soluciones se calculen de forma correcta. El manual de ANSYS Fluent recomienda valores residuales mínimos del orden de 10^{-3} para obtener resultados aceptables. Luego se utilizan valores residuales de 10^{-4} para las variables

de velocidad y turbulencia, mientras que para la conservación de masa se utiliza un valor de 10^{-3}, ya que es más difícil obtener valores inferiores.

Capítulo 3

Análisis y resultados

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones comenzando con el modelo original, analizando el comportamiento del flujo y determinando las zonas más críticas en términos del arrastre. En base al análisis del modelo original se proponen dos mejoras aerodinámicas y se realizan simulaciones para comparar los resultados y establecer si se logra la reducción del arrastre.

3.1. Validación de las funciones de pared

El correcto uso de los modelos de turbulencia viene dado por los valores de y^+. Según lo comentado en la sección 4.12, el modelo $k - \omega\ SST$ requiere un valor de y^+ cercano a 1 en las zonas donde se requiere el estudio de la capa límite. Las condiciones de borde utilizadas en las simulaciones de los perfiles transversales y longitudinales se resumen en la Tabla 2.3. Utilizando la ecuación (1.13), la velocidad promedio del flujo y el largo característico correspondiente al ancho en el caso de los perfiles transversales y a la cuerda en los perfiles longitudinales, se obtiene un valor del número de Reynolds de $3{,}3 \cdot 10^6$ y de $5{,}4 \cdot 10^6$ respectivamente.

En las simulaciones realizadas, las capas límite se desarrollan en las paredes del modelo y en el suelo. En la sección C del anexo, se observa el comportamiento de y^+ en los distintos perfiles simulados en conjunto con los valores en la base del dominio (suelo). Se debe notar que en el eje *x* se tiene la posición respecto al centro de la malla, recorriéndola en la misma orientación del eje. En la Tabla 3.1 y Tabla 3.2 se resumen los valores máximos obtenidos de y^+ del modelo original y del modelo mejorado:

Valor máximo Y+ modelo original		
Simulación	Y+ Perfil	Y+ Suelo
T1	0,06	0,15
T2	0,05	0,26
T3	0,06	0,16
L1	0,25	0,3
L1 invertido	0,40	0,30

Tabla 3.1: Valores de Y+ en la simulación del modelo original.

Valor máximo Y+ modelo mejorado		
Simulación	Y+ Perfil	Y+ Suelo
T1	0,07	0,16
T2	0,09	0,18
T3	0,09	0,19
L1	0,15	0,33
L2	0,07	0,27

Tabla 3.2: Valores de Y+ en la simulación del modelo mejorado.

Los valores obtenidos de Y+ son inferiores a uno, es decir, el tamaño de la malla en las zonas cercanas a la pared es adecuado y es posible representar correctamente las leyes de pared.

3.2. Simulación del modelo original

Como se comprobó en el capítulo anterior, no fue posible desarrollar la simulación del modelo en 3d debido a que la malla requería de mucho tiempo para ser mejorada y posteriormente muchos recursos de procesamiento para obtener las soluciones. El presente trabajo se realizara con simulaciones en 2d.

En las simulaciones de los perfiles transversales se obtienen predominancias del arrastre debido a las fuerzas de presión, determinando el flujo en los perfiles se

comportara igual que en un cuerpo de tipo “bluff body”. En la Figura 3.1 se muestra la distribución de la fuerza de arrastre en los perfiles transversales siendo un 99,5% correspondiente a fuerzas de presión y un 0,5% a fuerzas de viscosidad.

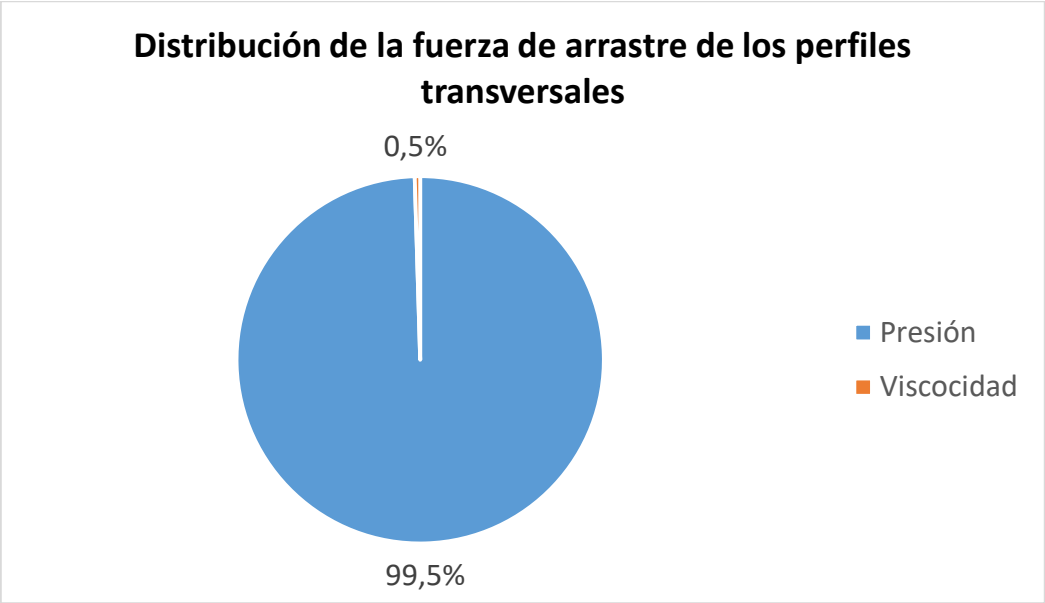


Figura 3.1: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles transversales del modelo original.

En los perfiles longitudinales se tiene un comportamiento diferente y característico de los cuerpos de tipo “streamlined” predominando las fuerzas de arrastre por viscosidad. La fuerza de arrastre debido a la presión representa el 32,6% del total y la fuerza de arrastre por viscosidad un 67,4 % como se muestra en la Figura 3.2:

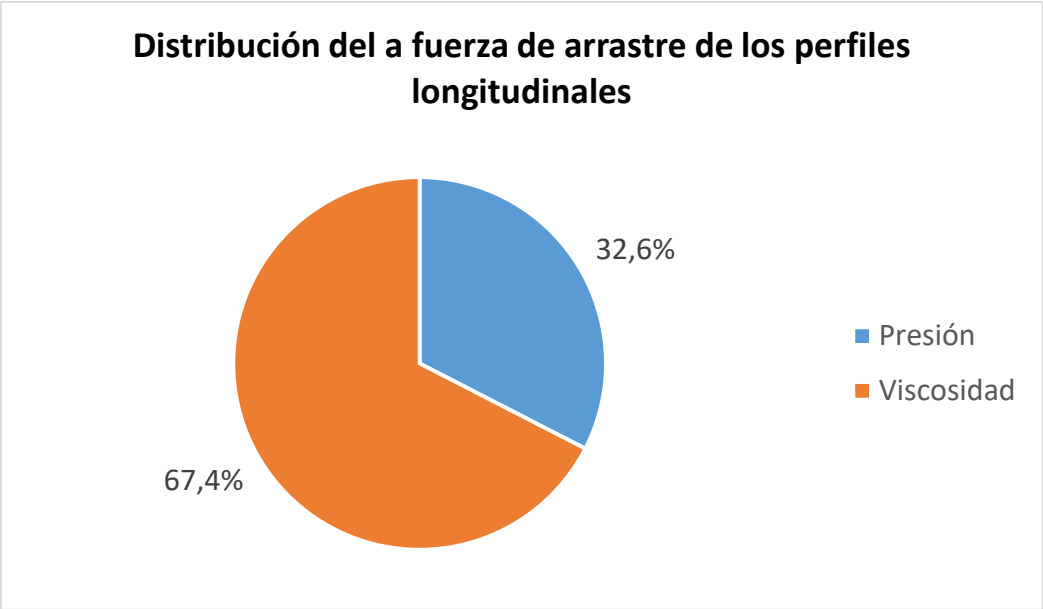


Figura 3.2: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles longitudinales del modelo original.

3.2.1 Simulación de los perfiles transversales del modelo original

En las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 se representa la magnitud del vector velocidad. Se observan zonas con una notable disminución de la velocidad en el costado derecho de cada perfil, cercanos al extremo de salida del flujo en el dominio. También existen zonas de baja velocidad en la parte superior e inferior del perfil, que comienzan en el extremo izquierdo debido a la separación de la capa límite. La mayor zona de baja velocidad y separación del flujo se encuentra en el costado derecho del perfil T1, ya que es el perfil con mayor espesor.

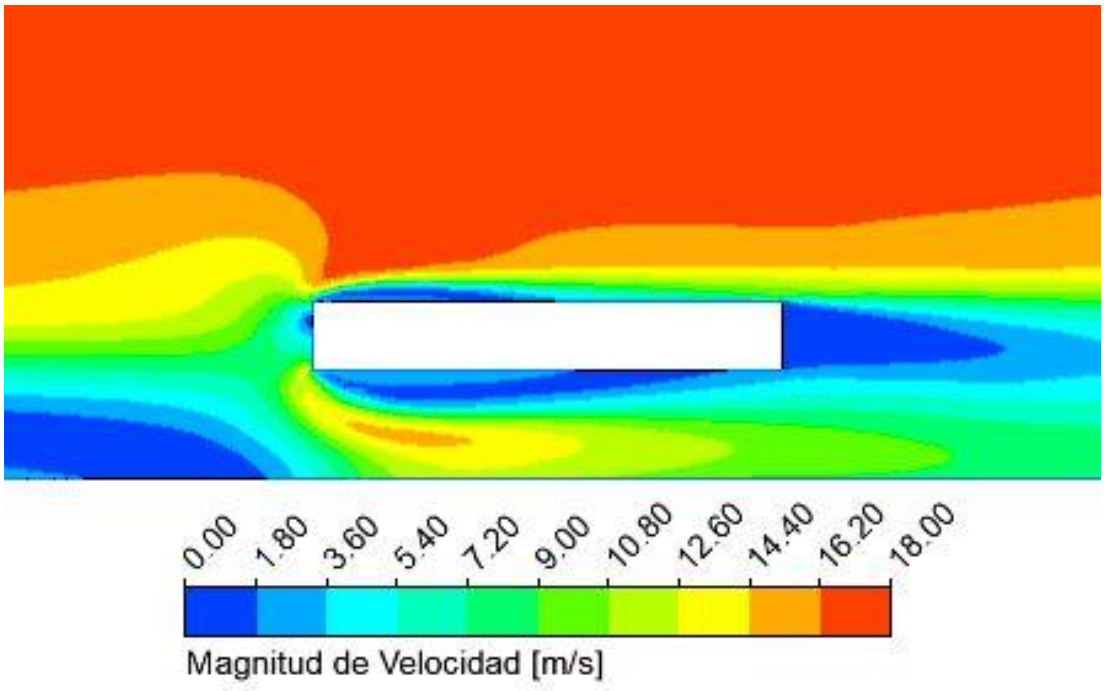


Figura 3.3: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original.

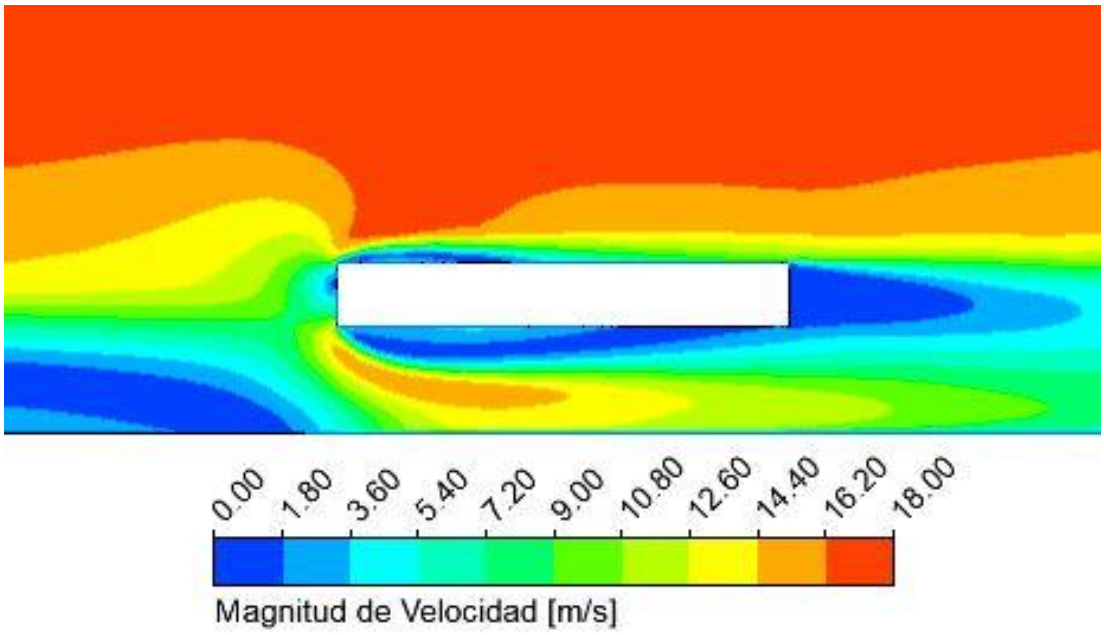


Figura 3.4: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original.

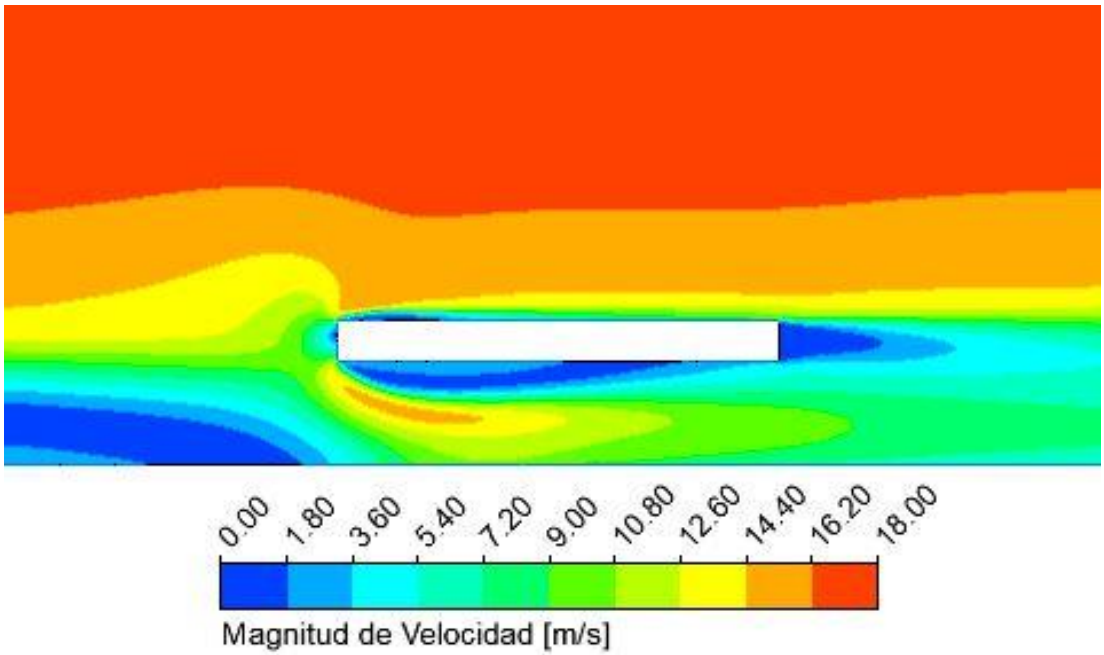


Figura 3.5: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original.

Las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 muestran la distribución del coeficiente de presión con un patrón común en los 3 perfiles. En el costado izquierdo, cercano al flujo de entrada en el dominio, existe un aumento de la presión debido a los puntos de estancamiento de la zona, mientras que en el costado derecho la presión es cualitativamente menor. Se genera una diferencia de presión entre el lado derecho e izquierdo de cada perfil que provoca un aumento en el arrastre.

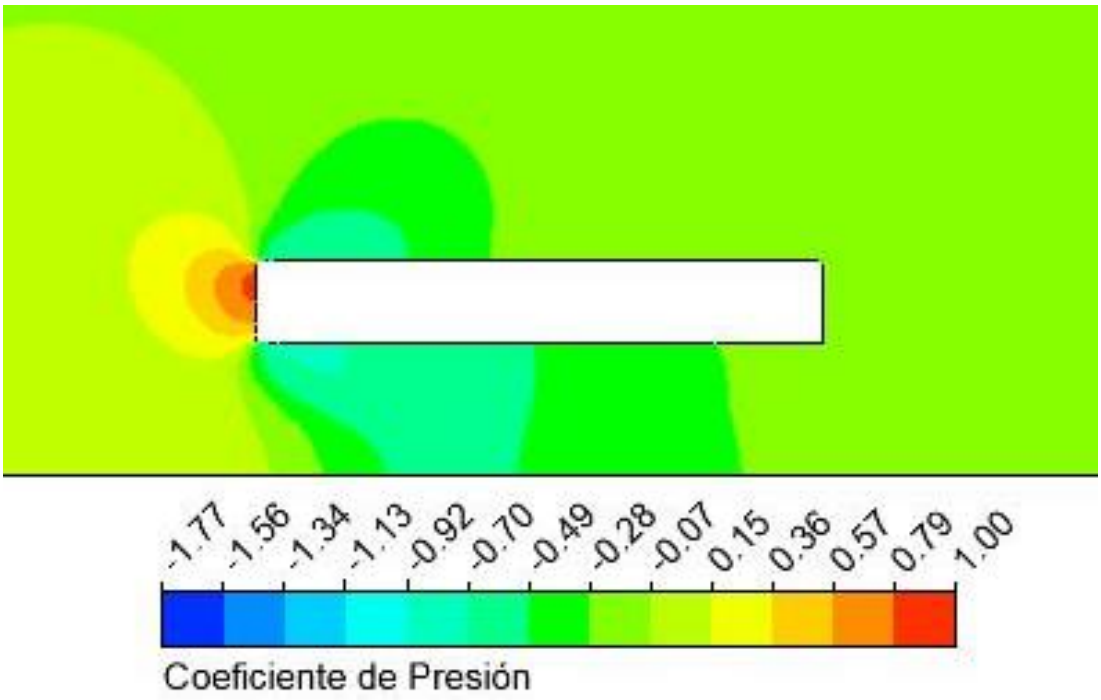


Figura 3.6: Coeficiente de presión alrededor del perfil T1 del modelo original.

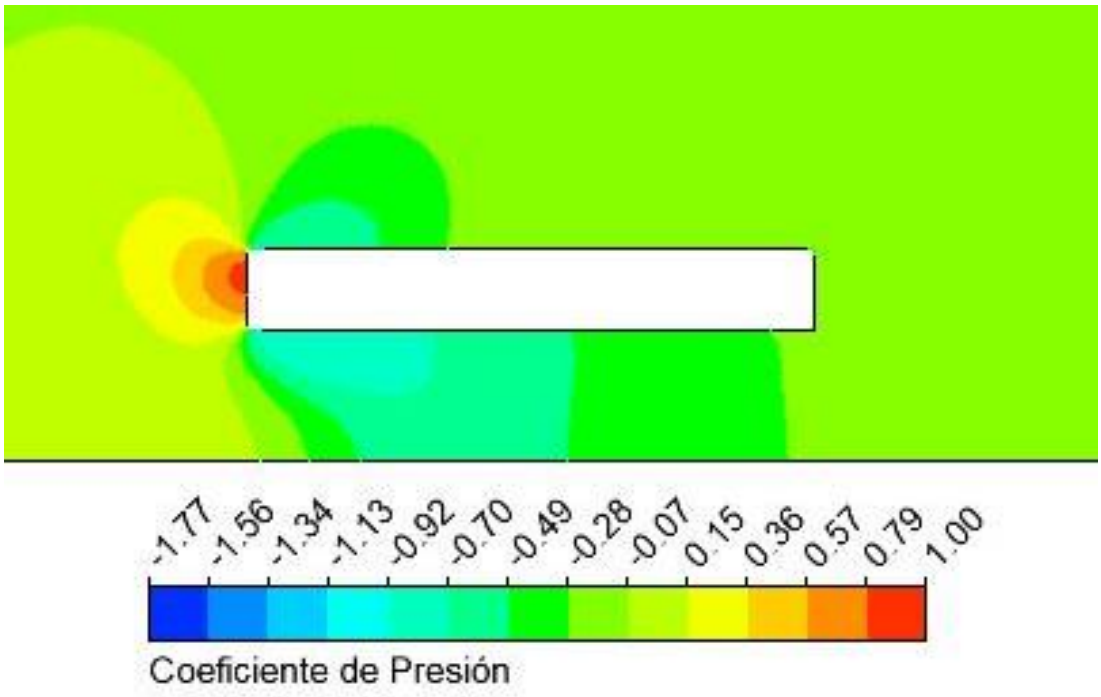


Figura 3.7: Coeficiente de presión alrededor del perfil T2 del modelo original.

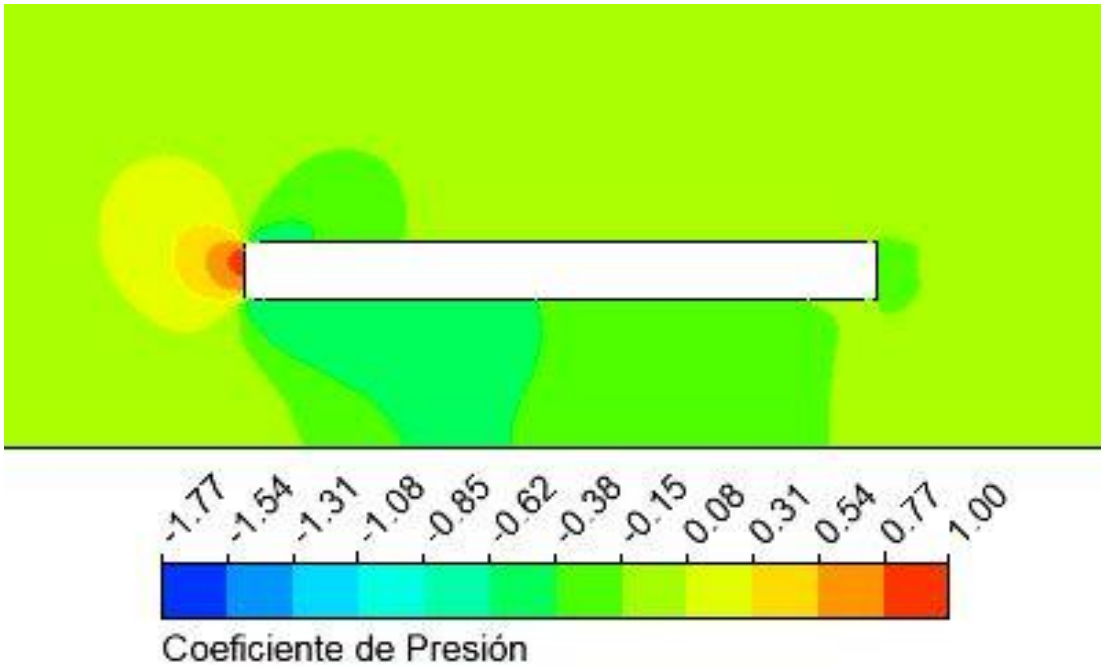


Figura 3.8: Coeficiente de presión alrededor del perfil T3 del modelo original.

Los vectores de velocidad de las figuras 3.9, 3.10 y 3.11 muestran la recirculación del flujo en el lado derecho, superior e inferior de cada perfil, con flujos de baja velocidad y presión, como se determinó anteriormente.

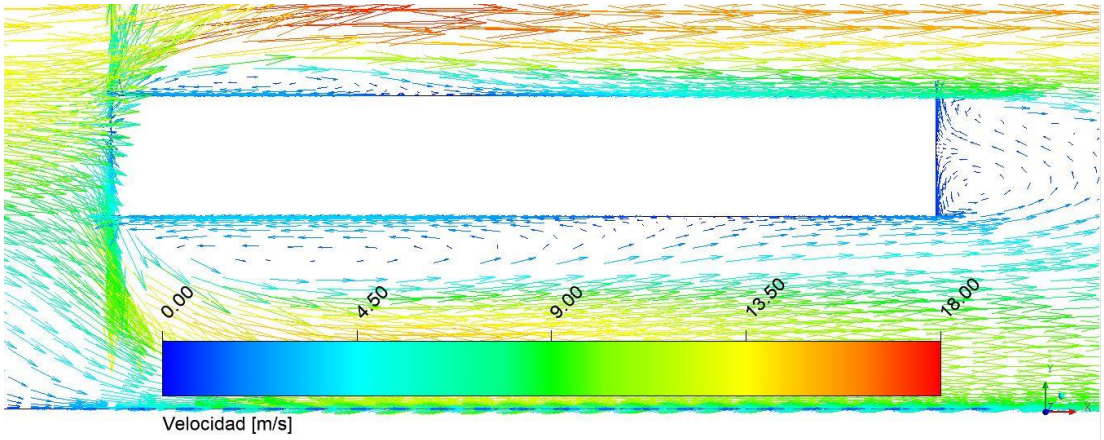


Figura 3.9: Vectores de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original.

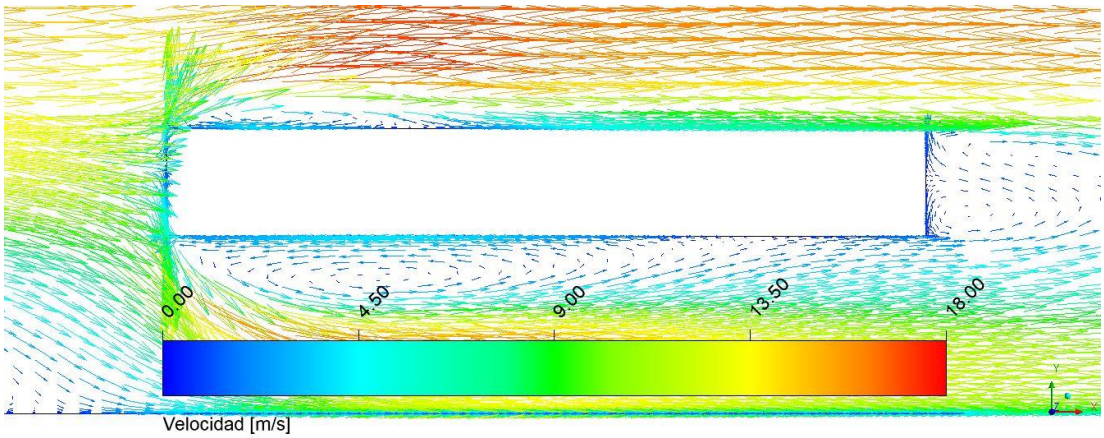


Figura 3.10: Vectores de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original.

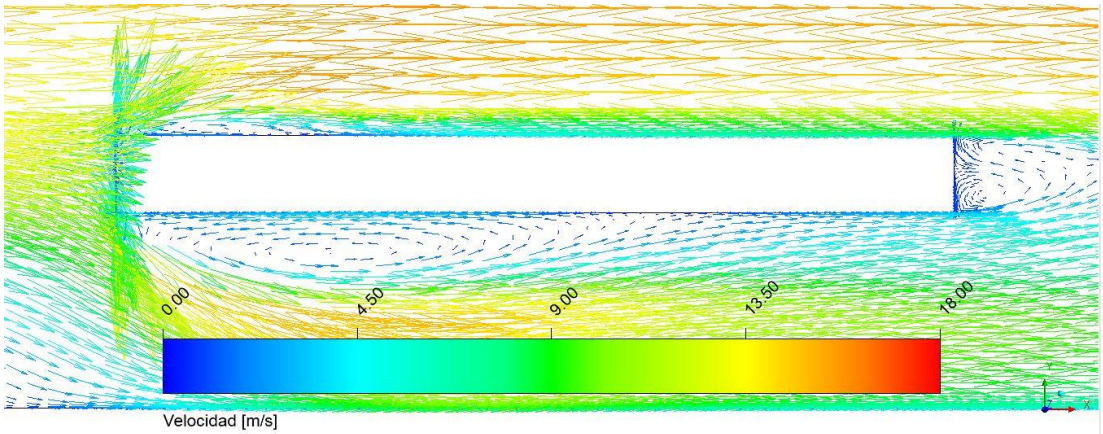


Figura 3.11: Vectores de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original.

Se observa que en la parte superior del perfil, la zona de recirculación es menor que en el lado derecho e inferior. Este fenómeno se debe a que la velocidad del flujo de aire es mayor a la altura del borde superior del perfil que a la altura del borde inferior, por la condición de adherencia del suelo.

Los valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión son presentados en la Tabla 3.3. Estos valores serán comparados posteriormente con la propuesta de mejora aerodinámica en la sección 3.4.3.

Perfiles	Fuerza de arrastre [N]	Cd presión
T1	31,12	0,94
T2	31,85	1,00
T3	18,87	0,92

Tabla 3.3: Valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión de los perfiles transversales del modelo original.

Para reducir el arrastre se modificará el espesor del perfil desde el centro hacia los extremos laterales y estos últimos tendrán un ángulo de inclinación para reducir los puntos de estancamiento y evitar la recirculación del flujo como se logra en los cuerpos de tipo “streamlined”.

3.2.2 Simulación del perfil longitudinal del modelo original

Los resultados del perfil longitudinal muestran que el flujo posee un comportamiento uniforme, con un pequeño punto de estancamiento en el borde de ataque. En la Figura 3.12 no se observan posibles recirculaciones del flujo alrededor del perfil. En la zona del intradós, cercana al borde de ataque, la velocidad se incrementa debido a la inclinación del perfil alar, generando una sustentación negativa o “downforce”.

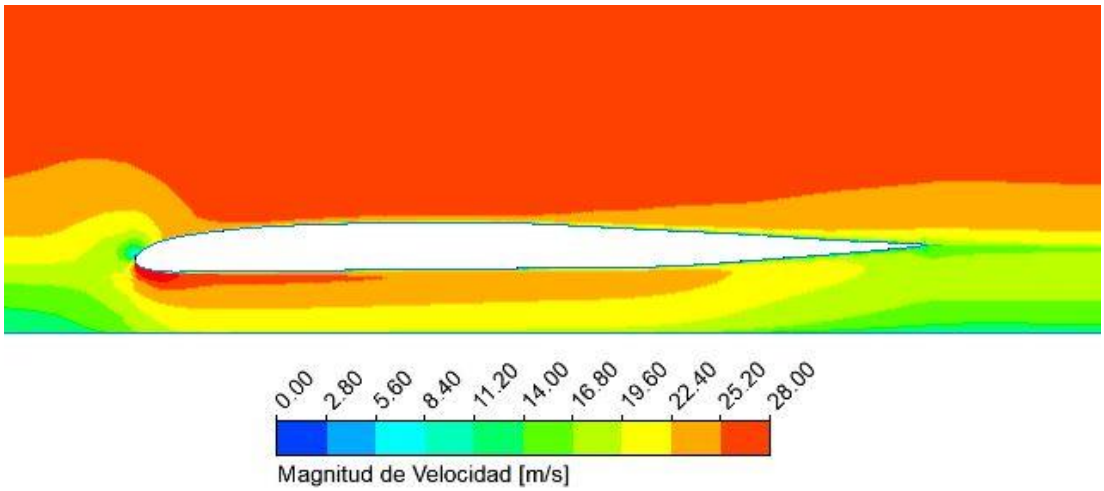


Figura 3.12: Magnitud de velocidad alrededor del perfil L1 del modelo original.

En la Figura 3.13 se muestra el coeficiente de presión, registrando un incremento en borde de ataque, donde anteriormente se observó un punto de estancamiento. También existe una zona de baja presión en el intradós debido al aumento de la velocidad local.

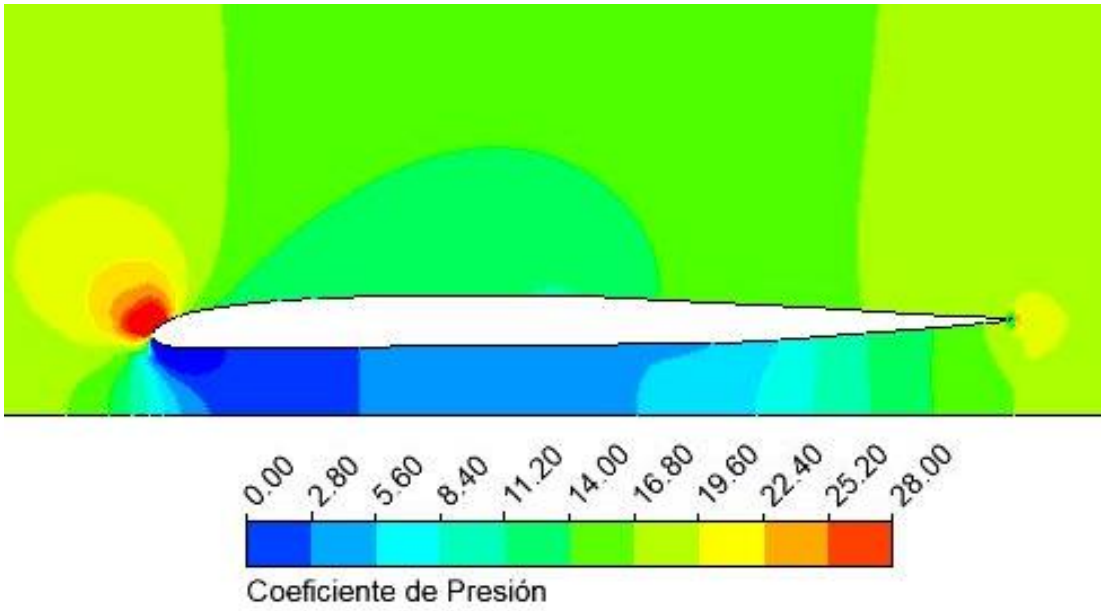


Figura 3.13: Coeficiente de presión alrededor del perfil L1 del modelo original.

Los valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión se presentan en la Tabla 3.4, mientras que los valores de fuerza de sustentación y coeficiente de sustentación se registran en la Tabla 3.5. Junto con los valores obtenidos en la simulación de los perfiles longitudinales, se adjuntan valores de referencia del coeficiente de arrastre y coeficiente de sustentación del perfil NACA $65_3 - 018$ con ángulo de ataque a -2° [19] y del coeficiente de arrastre de una esfera [5], obtenidos con un número de Reynolds de $6 \cdot 10^6$ y $1 \cdot 10^6$ respectivamente, cercanos al valor obtenido en la simulación del perfil longitudinal del modelo original de $5{,}4 \cdot 10^6$. El valor del coeficiente de arrastre del perfil L1 (E. Bambino 7) es superior al del perfil NACA $65_3 - 018$, pero se debe tener en cuenta la forma de obtener este valor, ya que el área y la fuerza de arrastre que se consideran para realizar los cálculos puede variar dependiendo del autor, mientras que al comparar este valor con el coeficiente de arrastre de la esfera se observa una clara diferencia a favor del perfil L1 del modelo original, con un valor inferior que muestra un buen comportamiento aerodinámico en términos del arrastre. El coeficiente de sustentación es levemente mayor en el perfil L1 del modelo original (en valor absoluto) que en el perfil NACA $65_3 - 018$.

Los valores del perfil L1 de estas tablas serán comparados posteriormente con la propuesta de mejora aerodinámica en la sección 3.3 y 3.4.3.

	Modelo original (E. Bambino 7)		NACA 653-018	Esfera
Perfil	Fuerza de arrastre [N]	Cd presión	Cd	Cd
L1	16,37	0,05	0,01	0,1

Tabla 3.4: Valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión del perfil longitudinal del modelo original y valores de referencia del coeficiente de arrastre del perfil NACA $65_3 - 018$ y de una esfera.

	Modelo original (E. Bambino 7)		NACA 653-018
Perfil	Fuerza de sustentación [N]	Cl	Cl
L1	-543,27	-0,332	-0,200

Tabla 3.5: Valores de fuerza de sustentación y coeficiente de sustentación del perfil longitudinal del modelo original y del valor de referencia del coeficiente de sustentación del perfil NACA $65_3 - 018$.

En este caso, a diferencia de los perfiles transversales, la reducción del arrastre se realizará mediante la modificación del ángulo de ataque. Esta modificación se verá con más detalle en la sección 3.3.

3.3. Primera propuesta de mejora del modelo

La primera propuesta de mejora del modelo se basa en mejorar la relación existente entre el ángulo de ataque y el coeficiente de arrastre. La posición actual del ala con un ángulo de ataque aproximado de -1°, genera una sustentación negativa o "downforce", pero también genera un aumento en la fuerza de arrastre. La variación del ángulo de ataque implica también una variación en el área frontal o proyectada. A mayor ángulo de ataque, mayor área frontal y mayor diferencia de presión entre el intradós y el extradós, generando un aumento del arrastre. En la Figura 3.14 se muestra la relación entre el ángulo de ataque y el coeficiente de arrastre en un perfil NACA 23015 para un valor del número de Reynolds de $9 \cdot 10^6$, distinto al obtenido en las simulaciones realizadas en este trabajo (Número de Reynolds de $3{,}3 \cdot 10^6$ en los perfiles transversales y $5{,}4 \cdot 10^6$ en los perfiles longitudinales):

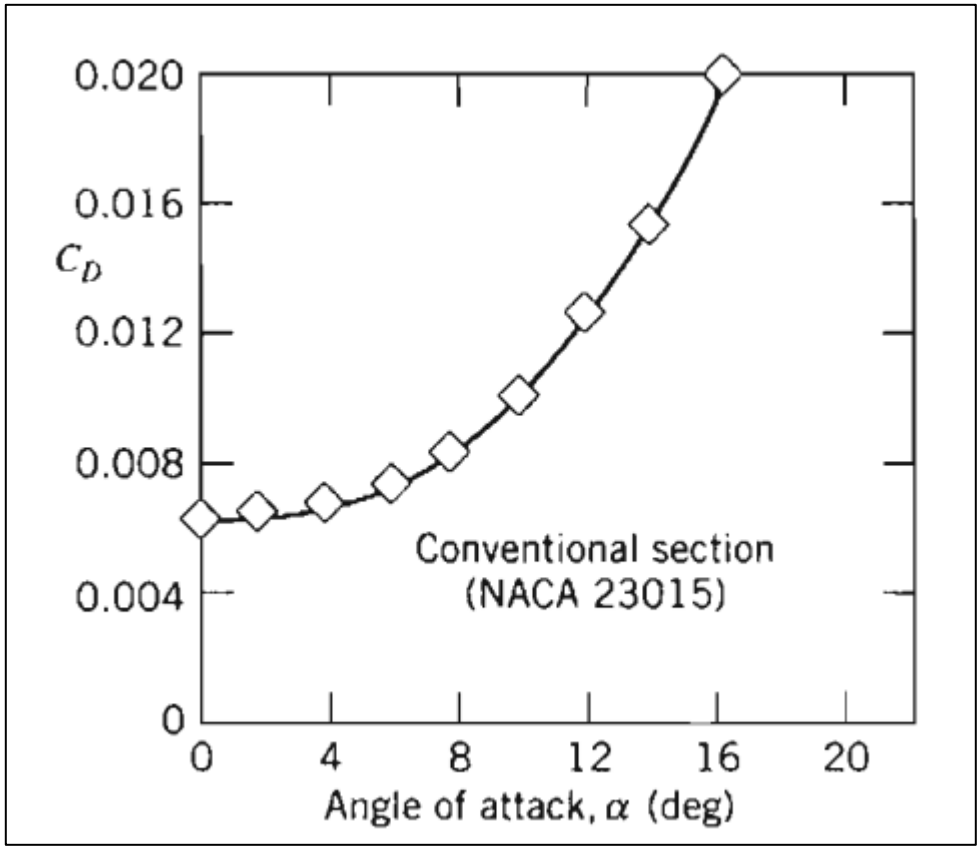


Figura 3.14: Coeficiente de arrastre Cd versus ángulo de ataque (alfa) para un perfil NACA 23015 [5].

Se observa que a mayor ángulo de ataque, mayor valor del coeficiente de arrastre. El valor mínimo se obtiene cuando el ángulo de ataque es cercano a cero.

Para valores negativos del ángulo de ataque se espera un comportamiento similar, lo que se comprobará con la presente propuesta de mejora del modelo.

La propuesta de mejora busca reducir el coeficiente de arrastre al llevar el ángulo de ataque a los cero grados e invertir el perfil para aprovechar la sustentación negativa o "downforce" que se genera por la geometría del perfil. La Figura 3.15 muestra las configuraciones del caso actual y de la mejora propuesta:

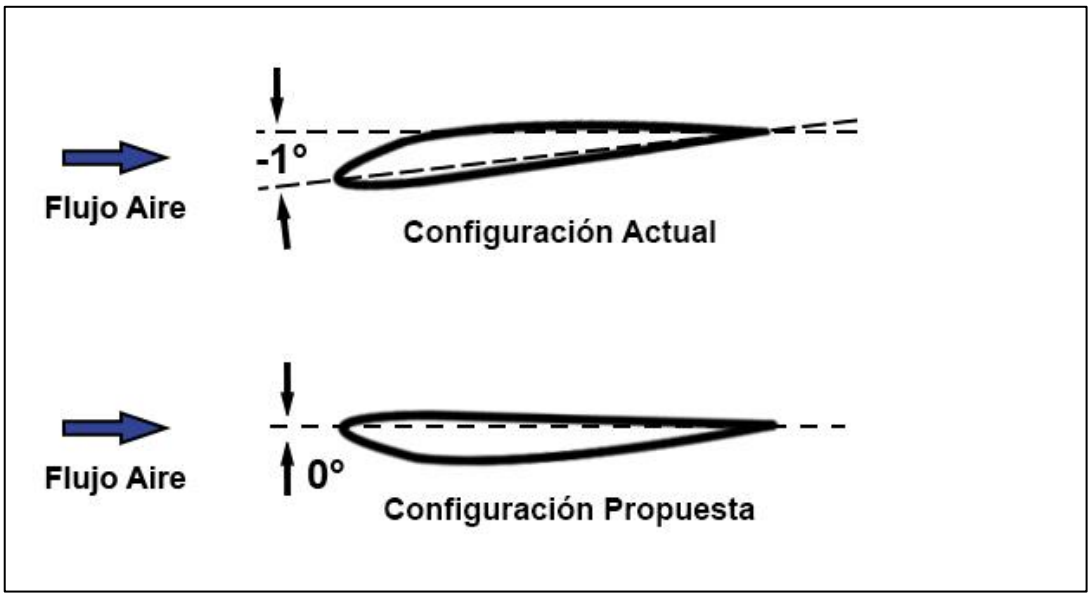
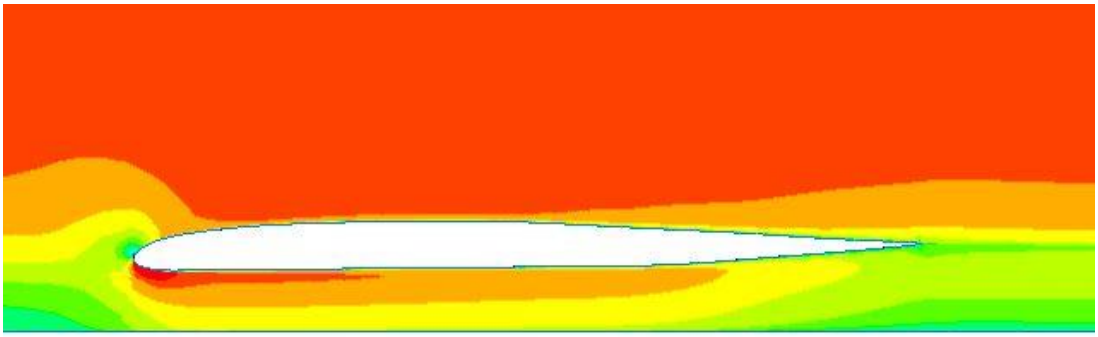
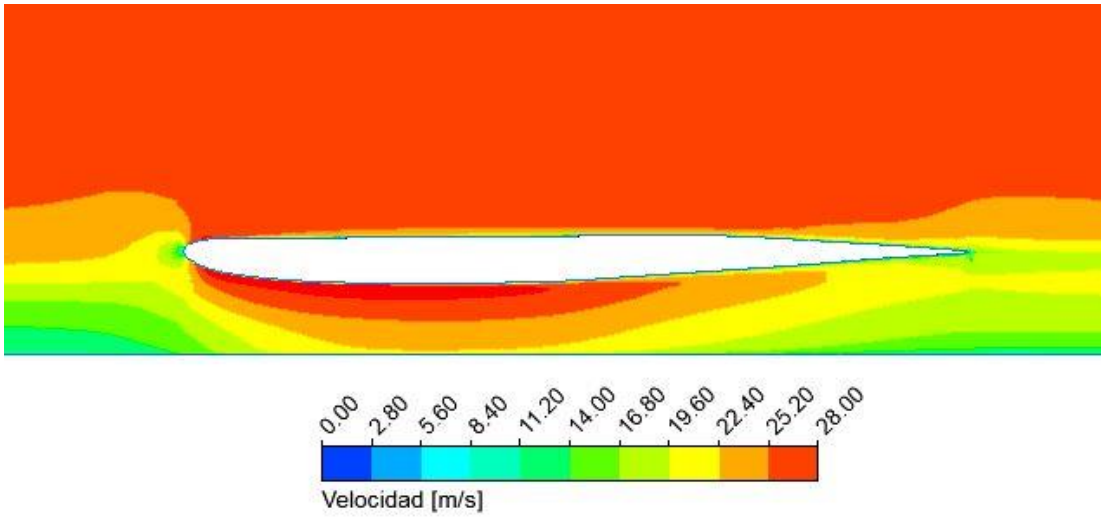


Figura 3.15: Configuración actual del perfil alar con un ángulo de ataque de -1° y configuración propuesta con perfil alar invertido y ángulo de ataque de 0°.

En las figuras 3.16 y 3.17 se muestra la comparativa de la magnitud de velocidad y distribución del coeficiente de presión, obtenidos de la simulación del perfil original como referencia y el perfil invertido, con ángulo de ataque de 0°. La nueva configuración del perfil posee un punto de estancamiento con una menor área en el borde de ataque y un aumento de la velocidad local en la zona del extradós de distribución más extendida.



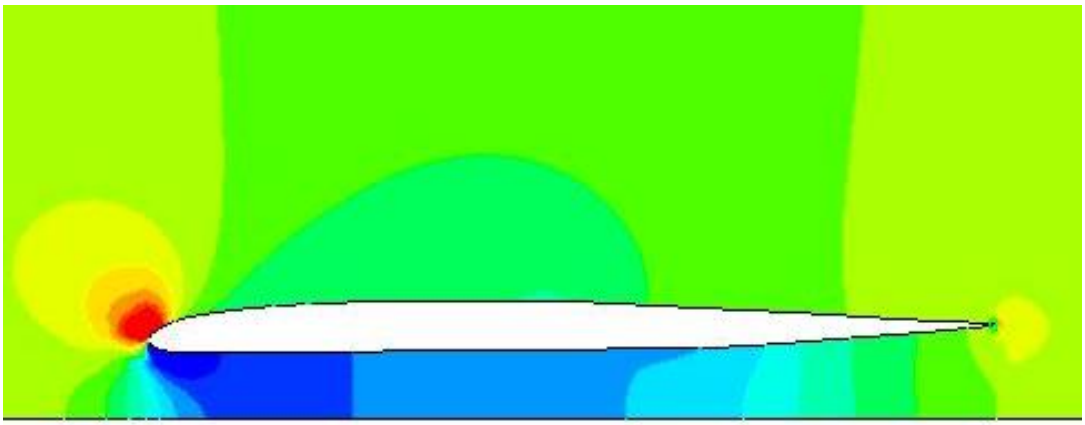
(A)



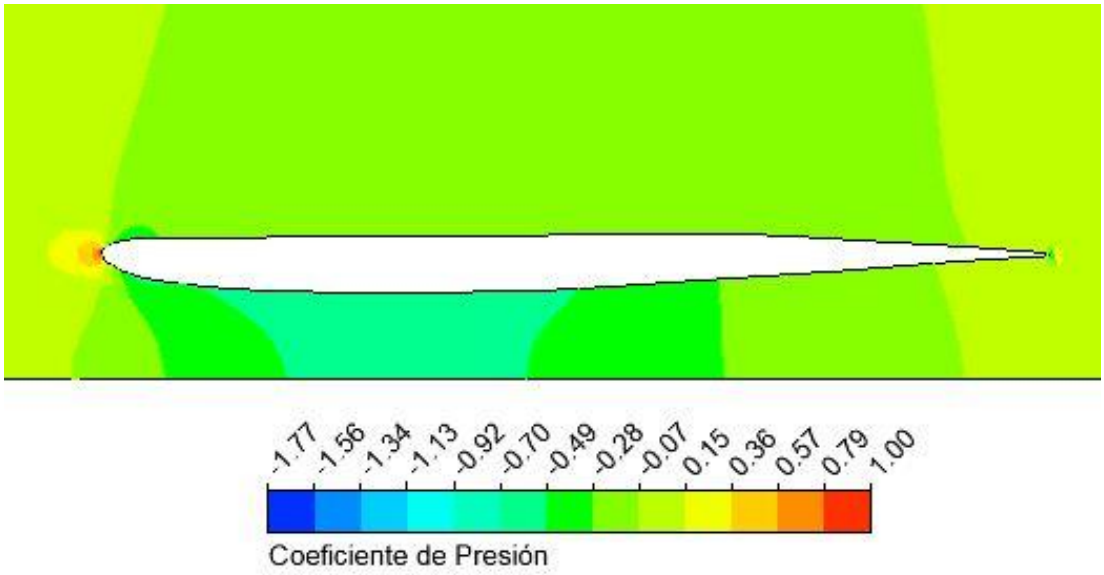
(B)

Figura 3.16: Magnitud de velocidad alrededor del perfil L1 del modelo original (A) y del perfil L1 invertido, con ángulo de ataque de 0° (B).

La diferencia de presiones entre el intradós y extradós genera una fuerza de sustentación negativa que se desplaza hacia el centro del perfil a diferencia de la configuración inicial, donde la fuerza se localiza cerca del borde de ataque. Este fenómeno se representa en la Figura 3.17, donde las bajas presiones en el perfil del modelo original (A) se concentran en intradós cercano al borde de ataque, mientras que en el perfil invertido (B) las bajas presiones se distribuyen de manera más uniforme hacia el centro del extradós.



(A)



(B)

Figura 3.17: Coeficiente de presión alrededor del perfil L1 del modelo original (A) y del perfil L1 invertido, con ángulo de ataque de 0° (B).

Las figuras 3.18 y 3.19 comparan el valor obtenido del coeficiente de arrastre por presión y fuerza de arrastre total en el perfil L1 del modelo original y el perfil L1 invertido a 0° respectivamente.

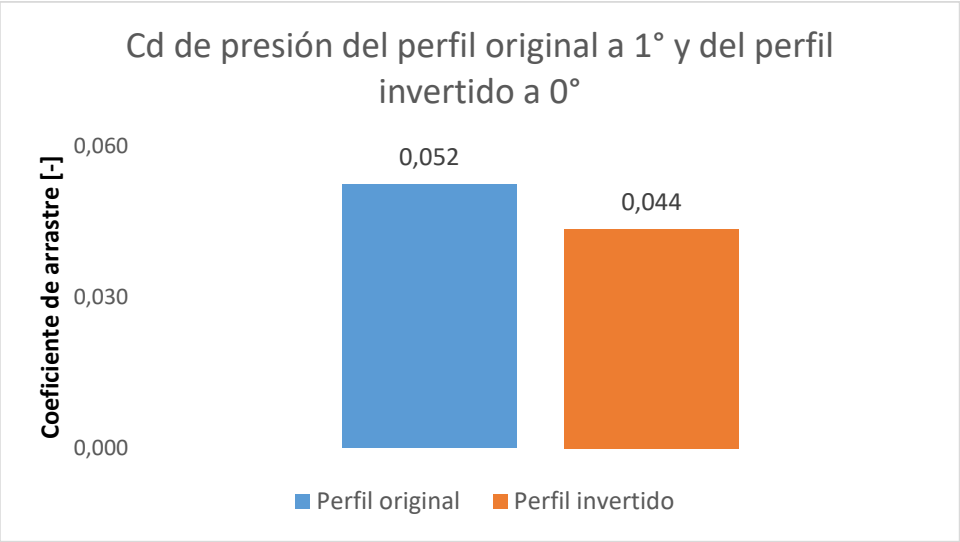


Figura 3.18: Comparativa del coeficiente de arrastre de las fuerzas de presión de la configuración actual y de la configuración propuesta.

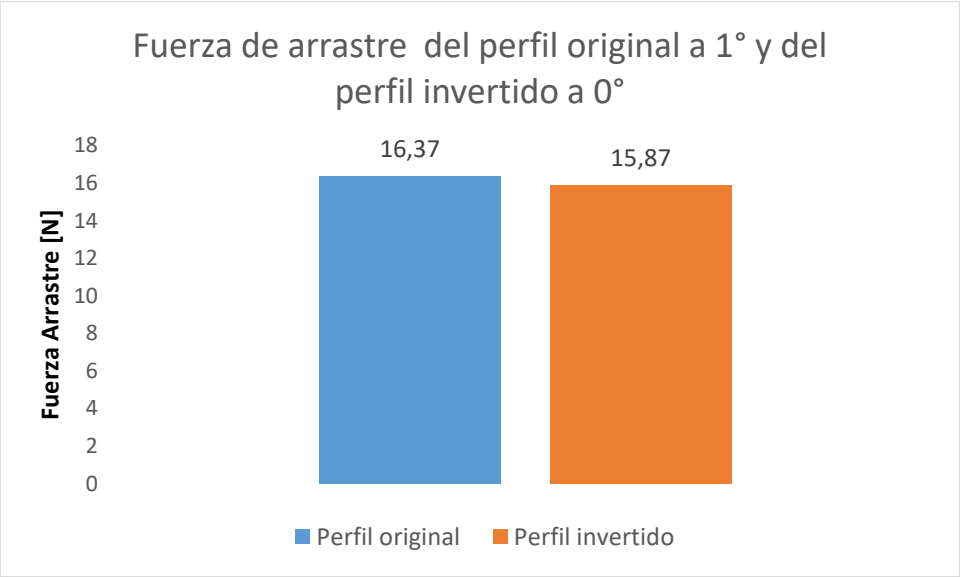


Figura 3.19: Comparativa de la fuerza de arrastre total de la configuración actual y de la configuración propuesta.

Con la mejora propuesta se logra reducir el coeficiente de arrastre por presión en un 15% y la fuerza de arrastre total en un 3%. Este último valor no representa una

reducción significativa, ya que la fuerza de arrastre por viscosidad permanece constante y es la componente con mayor predominancia.

Las figuras 3.20 y 3.21 comparan el coeficiente de sustentación y la fuerza de sustentación en el perfil L1 del modelo original y el perfil L1 invertido a 0° respectivamente.

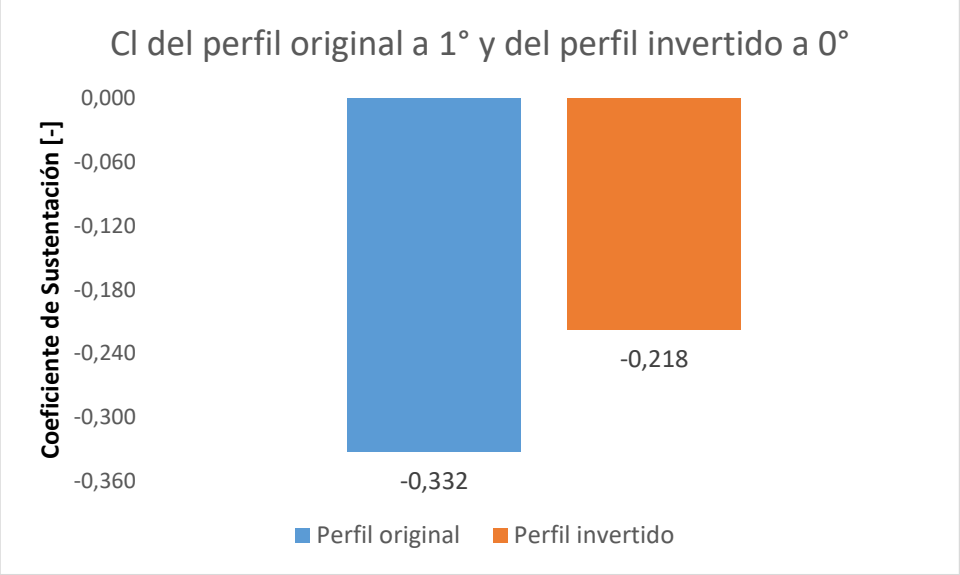


Figura 3.20: Comparativa del coeficiente de sustentación de la configuración actual y de la configuración propuesta.

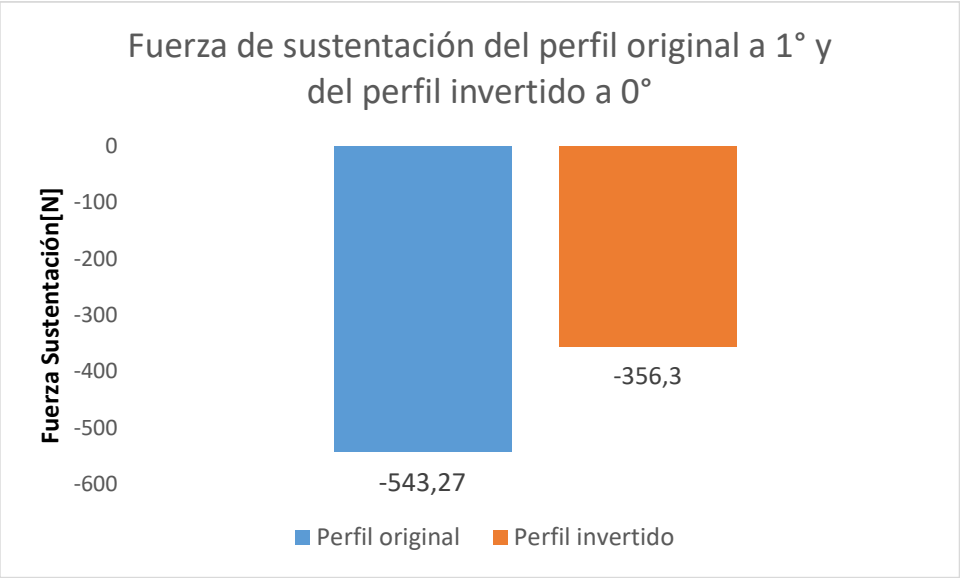


Figura 3.21: Comparativa de la fuerza de sustentación de la configuración actual y de la configuración propuesta.

Al cambiar el ángulo de ataque también cambia la sustentación negativa. La modificación realizada provoca una disminución de un 34% del coeficiente de sustentación y un 34 % de la fuerza de sustentación negativa. El porcentaje de pérdida de sustentación negativa es mayor al porcentaje de reducción de la fuerza de arrastre y la propuesta de mejora no resulta del todo favorable.

Para los autos de competición es importante mantener el agarre de los neumáticos en las curvas. En el caso del auto solar Ergon, el viento cruzado puede provocar un desplazamiento lateral no deseado y la disminución de la fuerza de sustentación no sería conveniente.

3.4. Segunda propuesta de mejora del modelo

La propuesta de mejora del modelo consta de una serie de modificaciones a las secciones laterales y del espesor alar del modelo original, evitando los puntos de estancamiento en las secciones donde el flujo es normal a la pared. En la Figura 3.22 se observa el modelo propuesto:

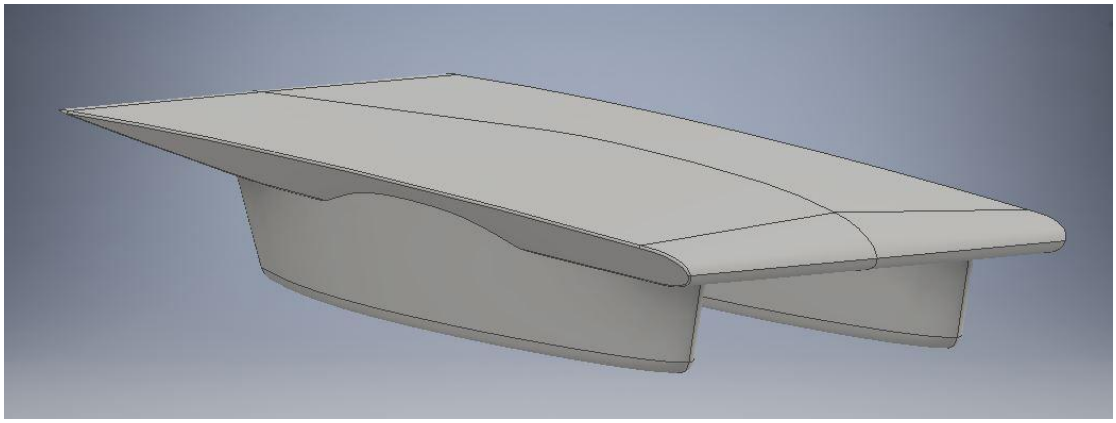
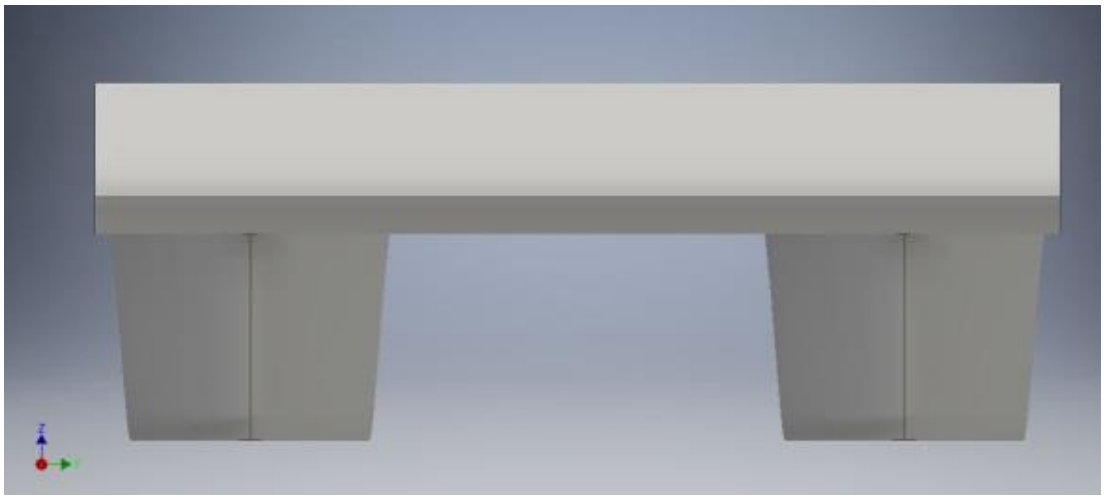
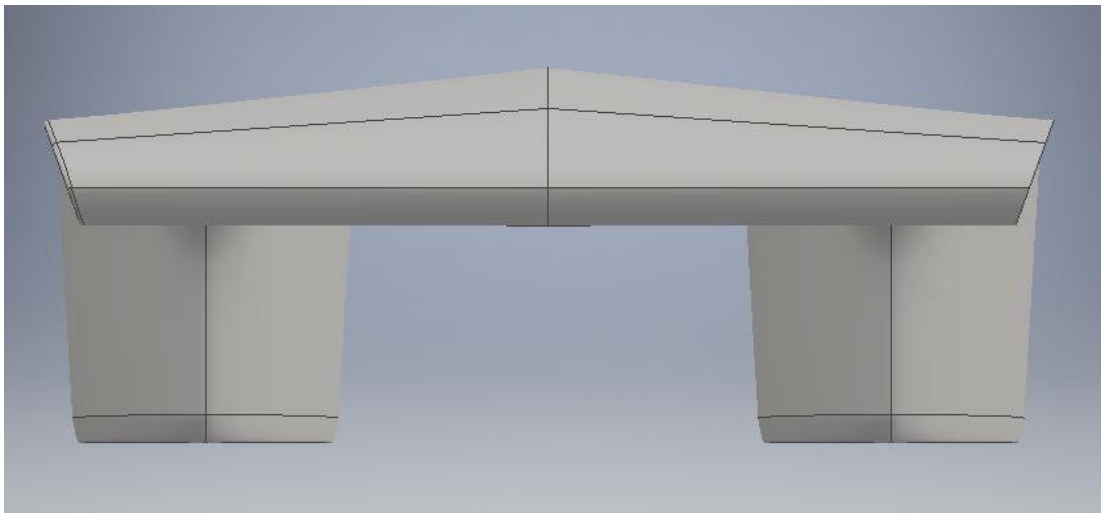


Figura 3.22: Modelo mejorado del Auto Solar Ergón.

En las figuras 3.23, 3.24 y 3.25 se muestra una comparativa entre el modelo original y el modelo mejorado en distintas vistas:



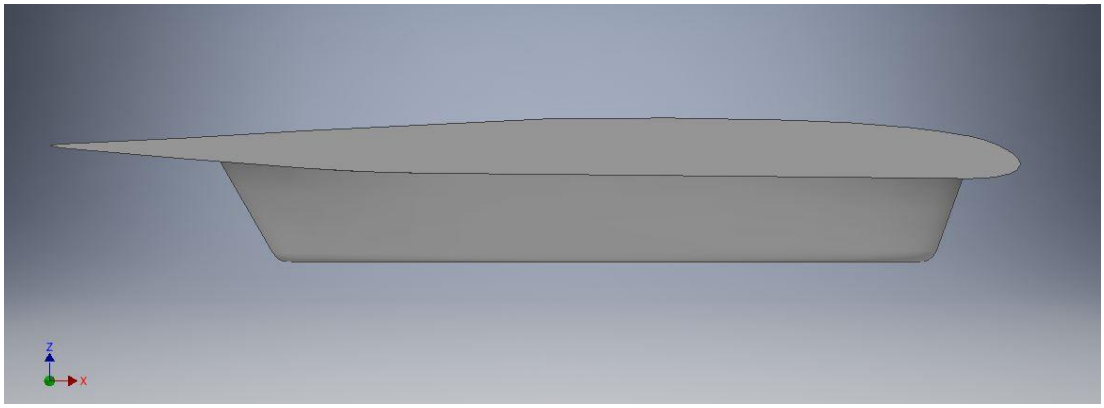
(A)



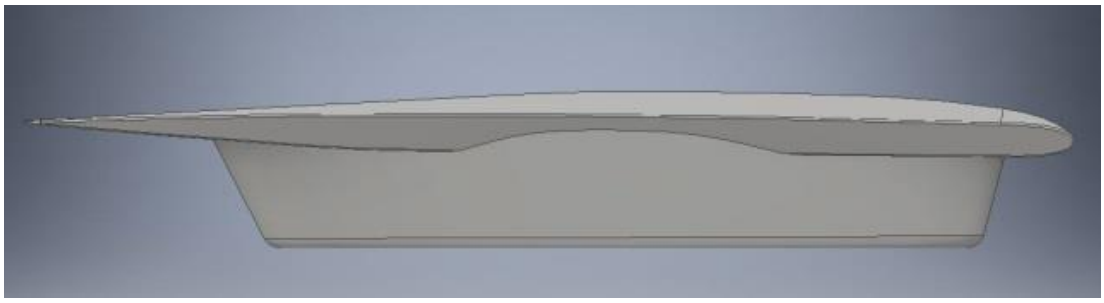
(B)

Figura 3.23: Vista frontal del modelo original (A) y el modelo mejorado (B).

Se puede observar la disminución del espesor del perfil alar desde el centro hasta las secciones laterales y la inclinación de estas últimas.

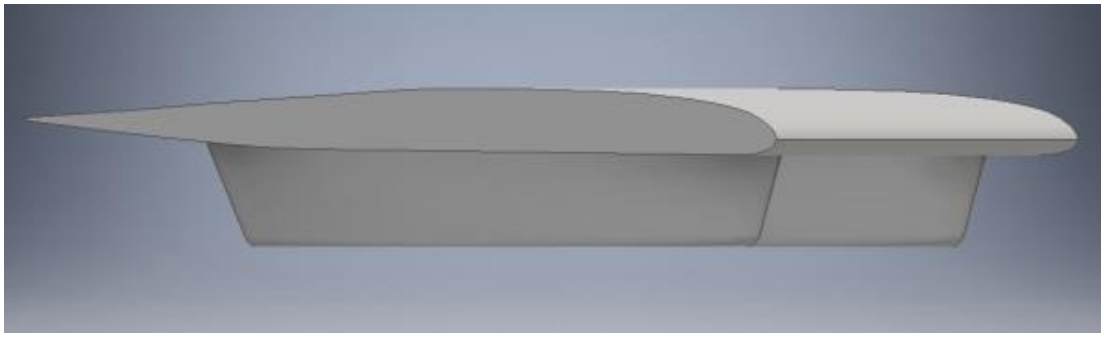


(A)

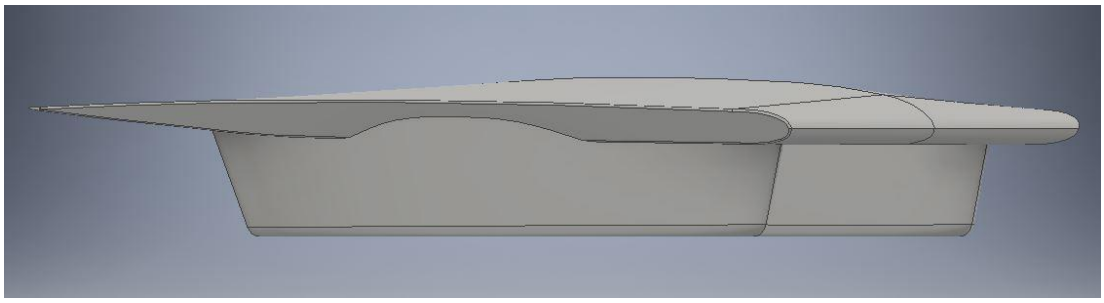


(B)

Figura 3.24: Vista lateral del modelo original (A) y el modelo mejorado (B).



(A)



(B)

Figura 3.25: Vista isométrica del modelo original (A) y el modelo mejorado (B).

En la Figura 3.26 se muestra la distribución de la fuerza de arrastre de los perfiles transversales del modelo mejorado. A diferencia de la distribución observada en la Figura 3.1 del modelo original, las fuerzas de arrastre por viscosidad aumentan en

porcentaje y las fuerzas de arrastre por presión disminuyen. Esto se debe a que la modificación del perfil disminuye el área de la sección transversal en los extremos y logra reducir el arrastre por presión.

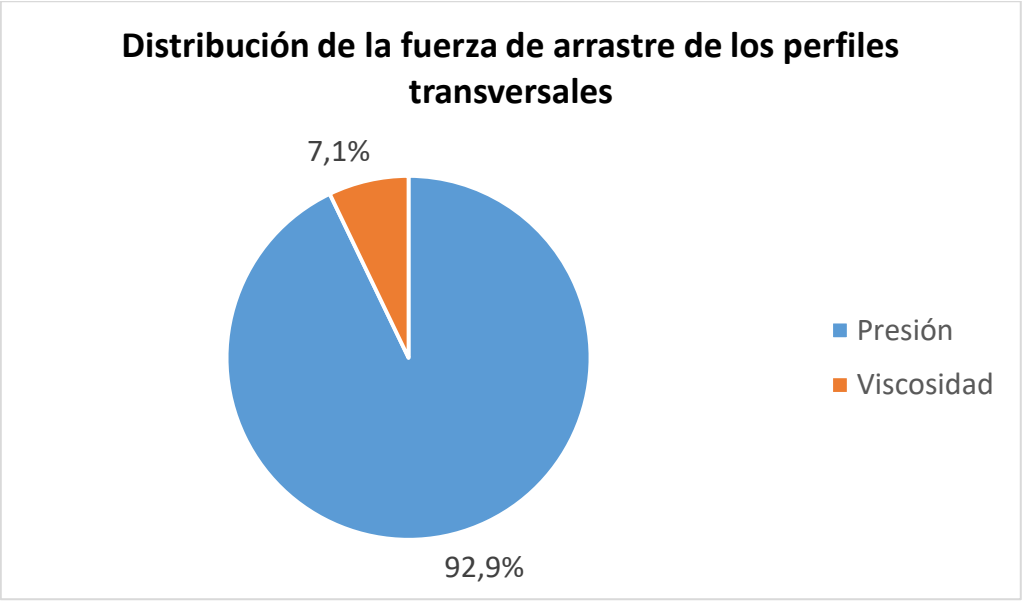


Figura 3.26: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles transversales del modelo mejorado.

En la Figura 3.27 se muestra la distribución de la fuerza de arrastre de los perfiles longitudinales del modelo mejorado. En este caso, se observan resultados similares en la distribución de las fuerzas con los valores obtenidos en la Figura 3.2 del modelo original. Se registra un leve aumento del porcentaje de distribución en el arrastre por fuerzas de viscosidad y una baja reducción de los arrastres por presión. De igual forma que en los perfiles transversales, la disminución del área transversal hacia los extremos laterales del ala crea perfiles alares con menor espesor y se reducen los arrastres por presión.

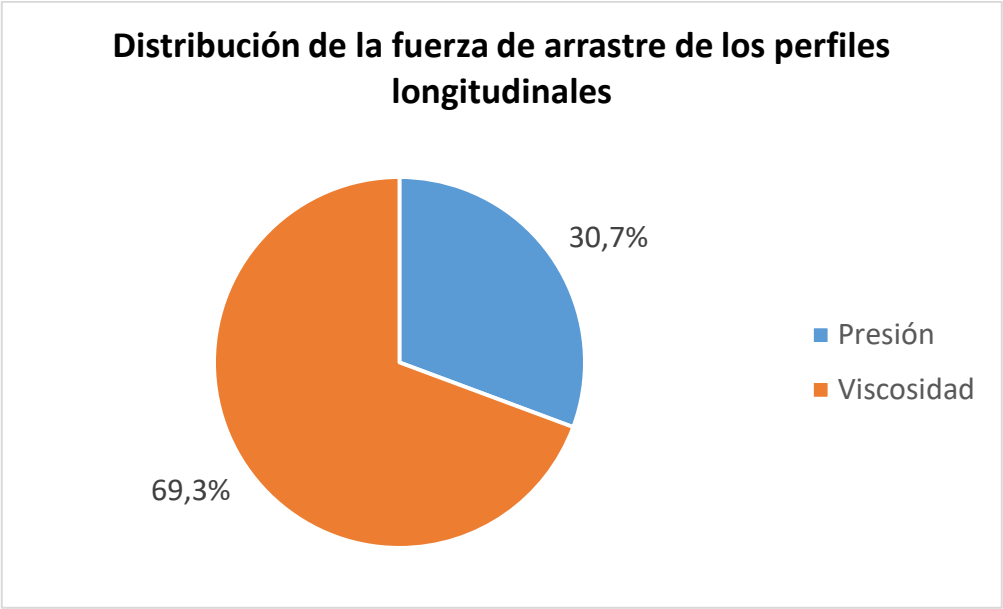
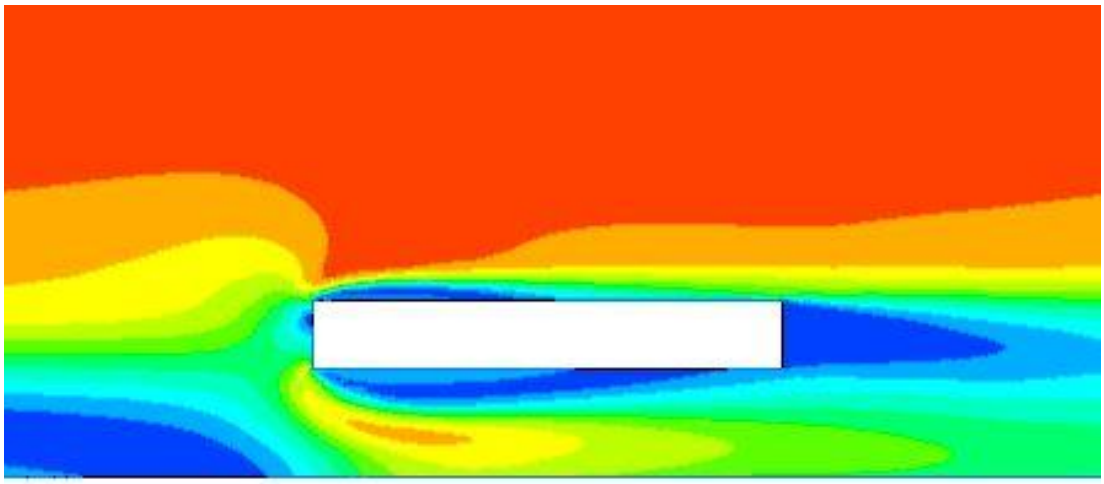


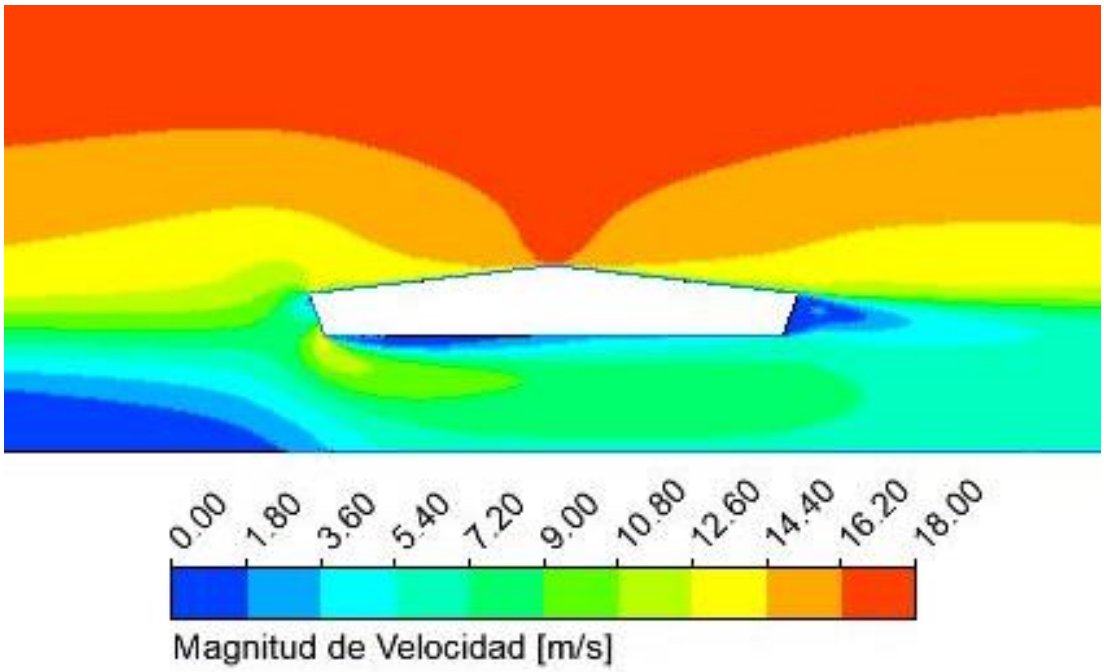
Figura 3.27: Distribución de las fuerzas de arrastre de los perfiles longitudinales del modelo mejorado.

3.4.1 Simulación de los perfiles transversales del modelo mejorado

Los resultados de la simulación de los perfiles transversales en el modelo mejorado muestran un flujo con zonas de despegamiento menores al modelo original. En las figuras 3.28, 3.29 y 3.30 se comparan los resultados de la magnitud de velocidad de los perfiles transversales del modelo original y el modelo mejorado. En el lado derecho de los perfiles se observa una reducción de la separación de la capa límite. En la parte superior cercana al lado izquierdo del perfil se logra obtener un flujo sin despegamiento, mientras que en la parte inferior el flujo se comporta de manera similar al original, sin cambios importantes.

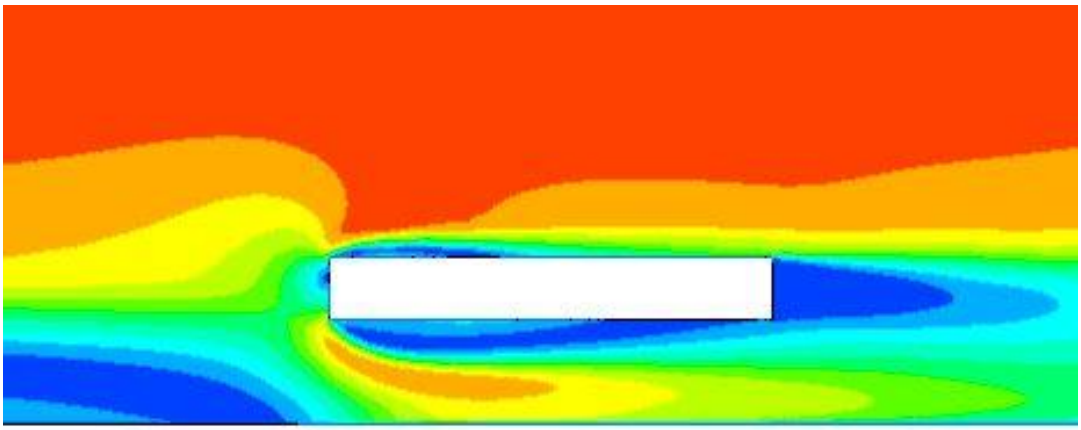


(A)

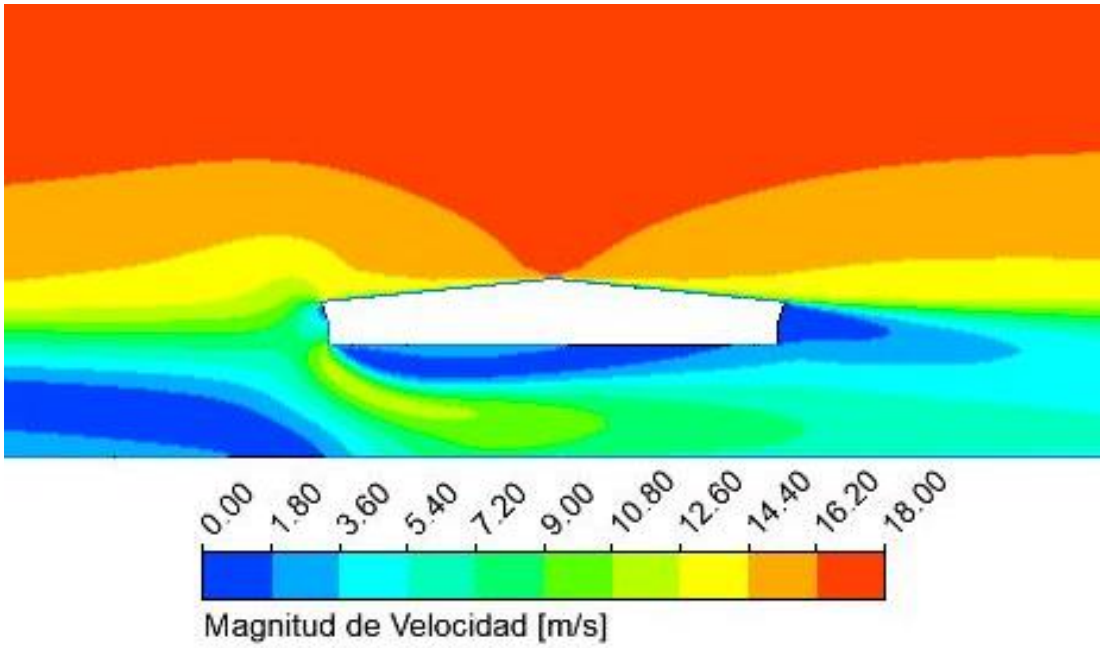


(B)

Figura 3.28: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original (A) y del perfil T1 del modelo mejorado (B).

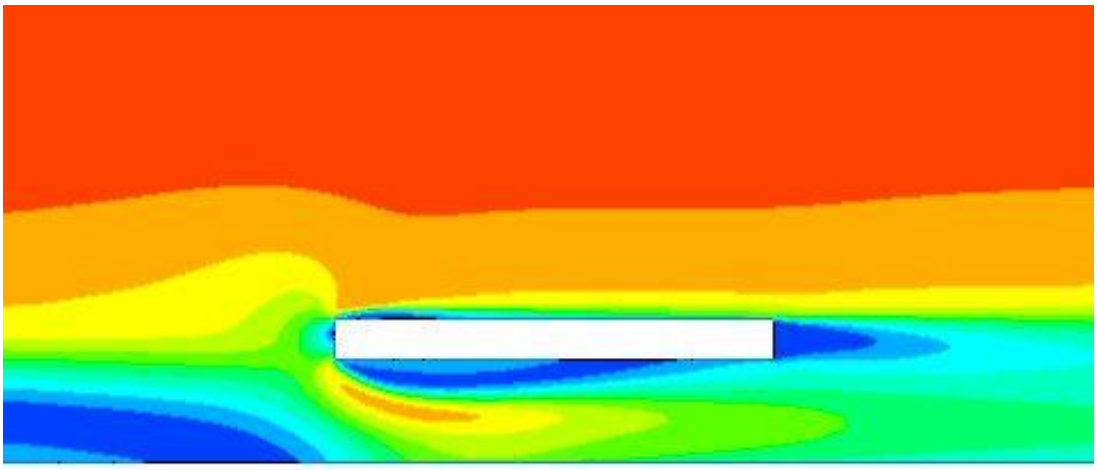


(A)

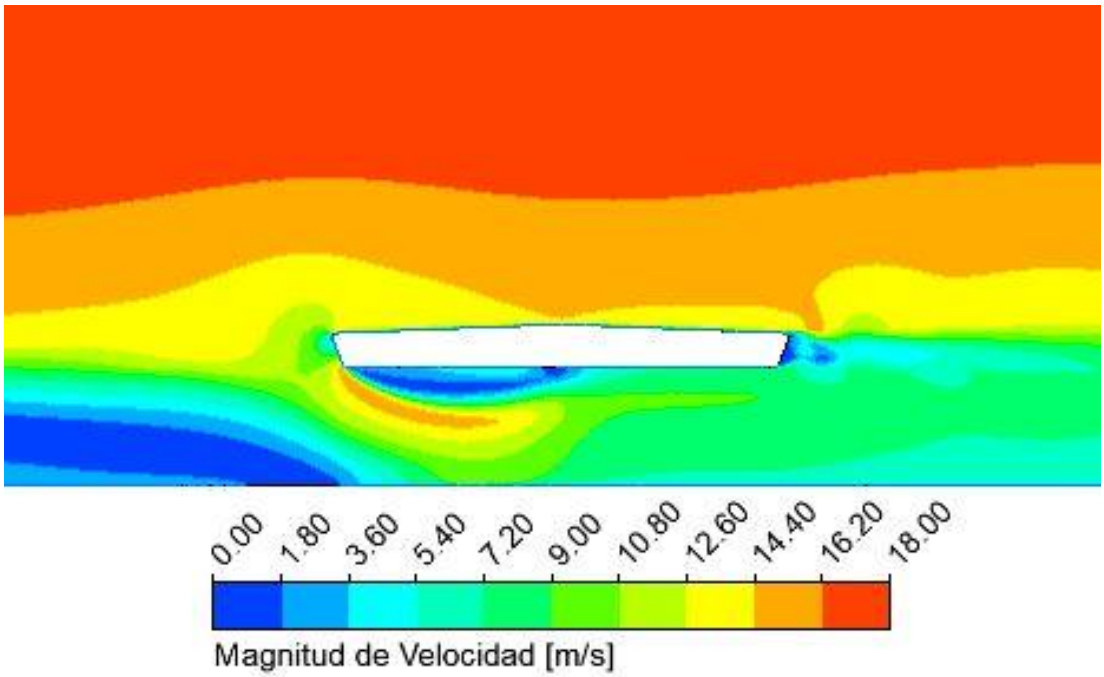


(B)

Figura 3.29: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original (A) y del perfil T2 del modelo mejorado (B).



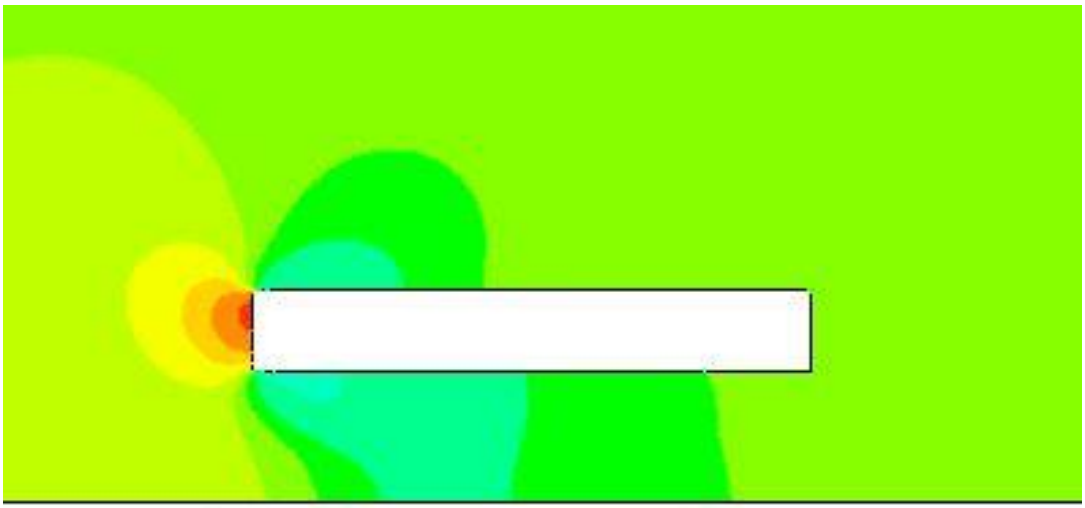
(A)



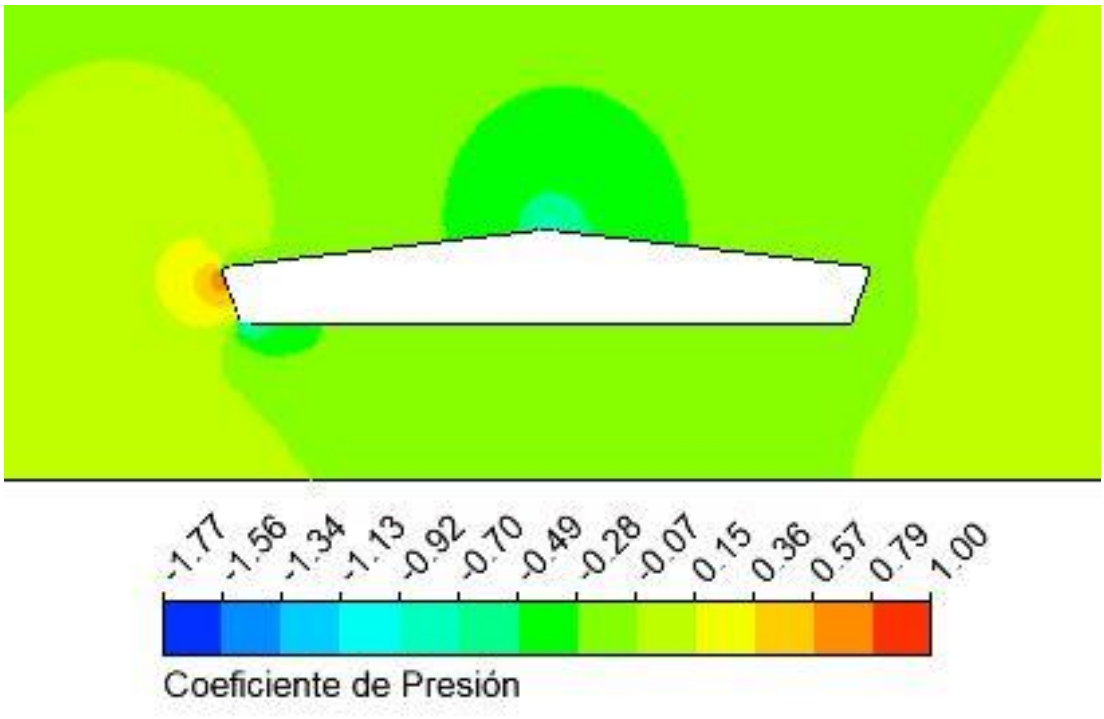
(B)

Figura 3.30: Magnitud de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original (A) y del perfil T3 del modelo mejorado (B).

En las figuras 3.31, 3.32 y 3.33 se comparan los resultados del coeficiente de presión de los perfiles transversales del modelo original y el modelo mejorado. En el borde izquierdo de los perfiles mejorados la presión disminuye, ya que el área transversal de cada perfil es menor al original y posee un ángulo de inclinación que disminuye los puntos de estancamiento. Al medio de la parte superior de los nuevos perfiles la presión disminuye, provocando una fuerza de sustentación positiva. Este fenómeno solo ocurre en los perfiles T1 y T2 que poseen una mayor diferencia del área transversal entre los extremos y el centro, a diferencia del perfil T3.

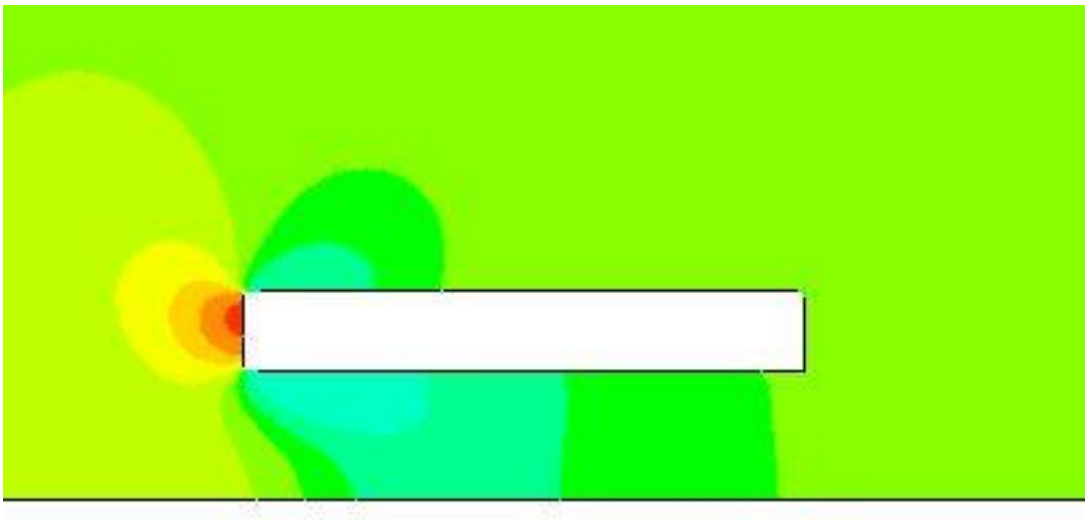


(A)

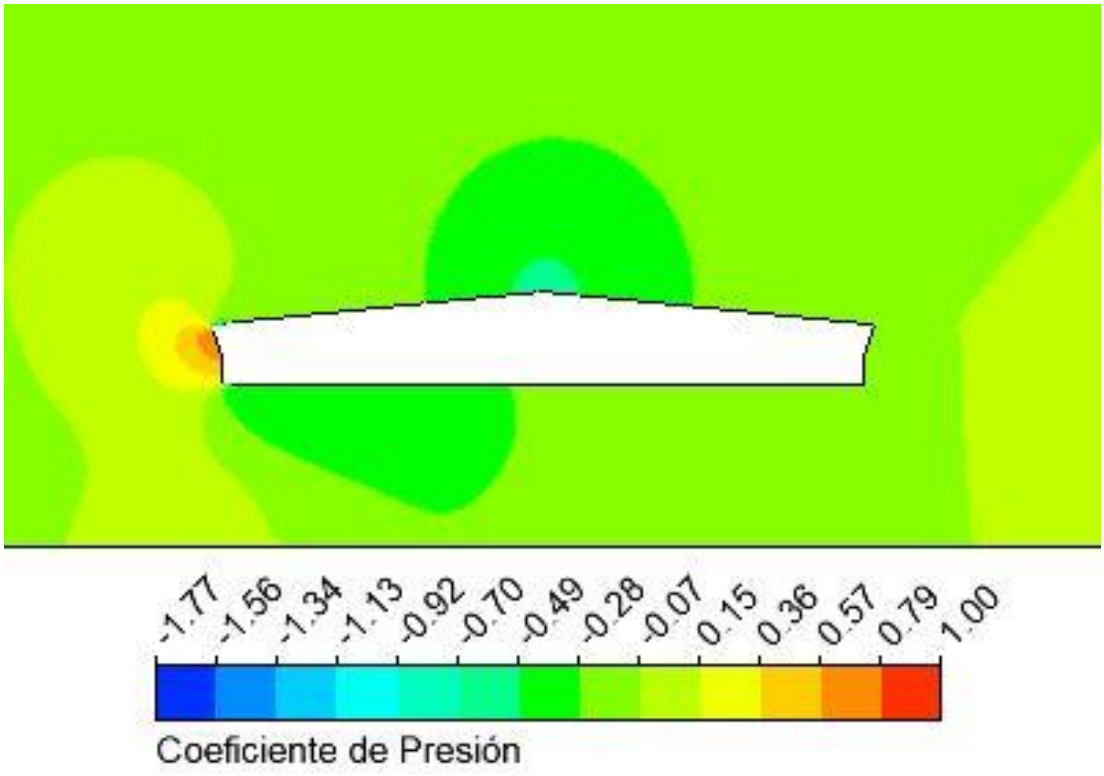


(B)

Figura 3.31: Coeficiente de presión alrededor del perfil T1 del modelo original (A) y del perfil T1 del modelo mejorado (B).

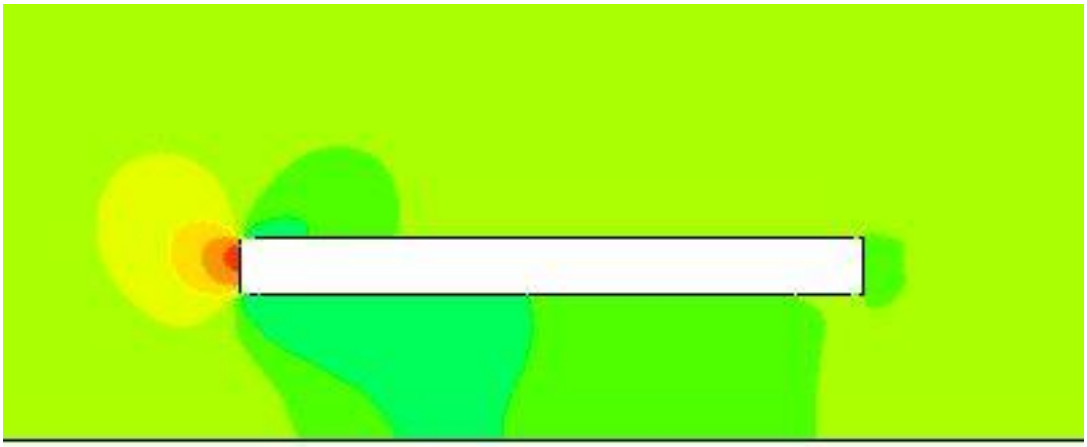


(A)

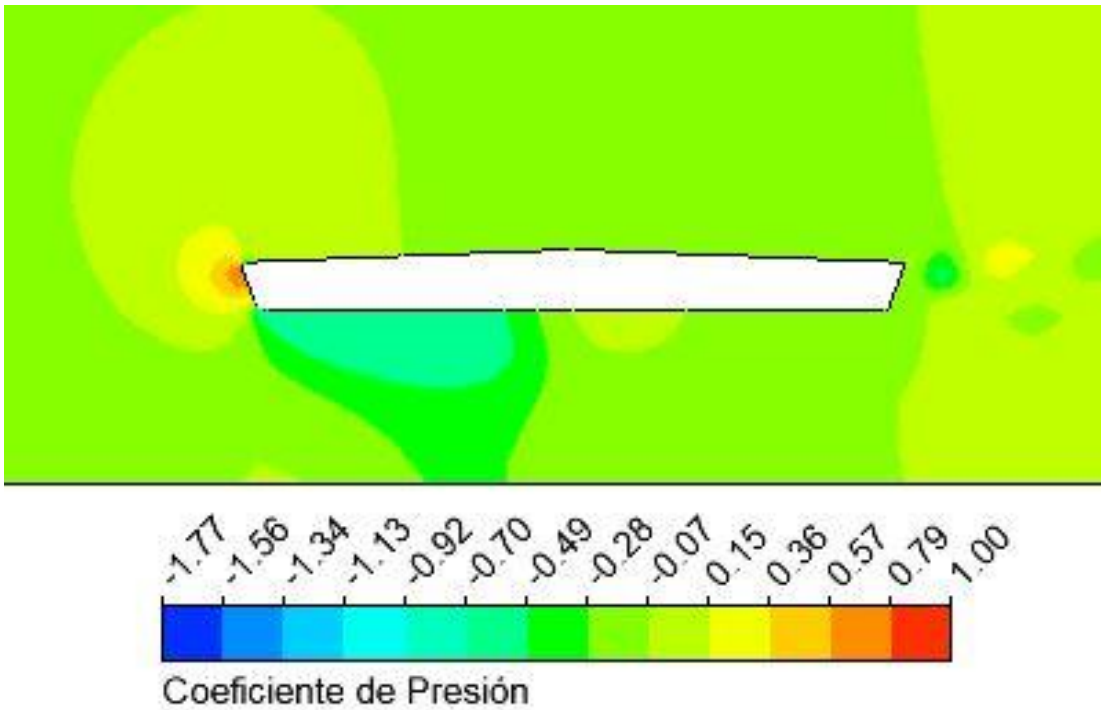


(B)

Figura 3.32: Coeficiente de presión alrededor del perfil T2 del modelo original (A) y del perfil T2 del modelo mejorado (B).



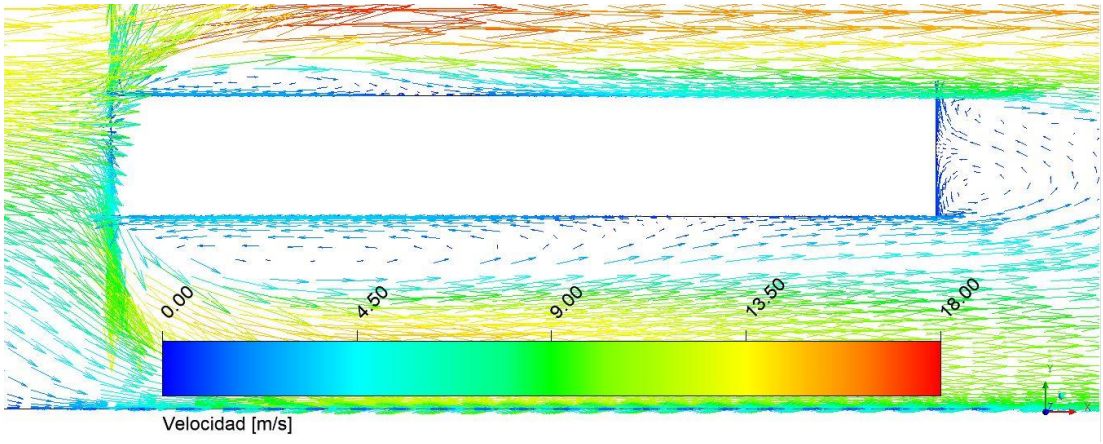
(A)



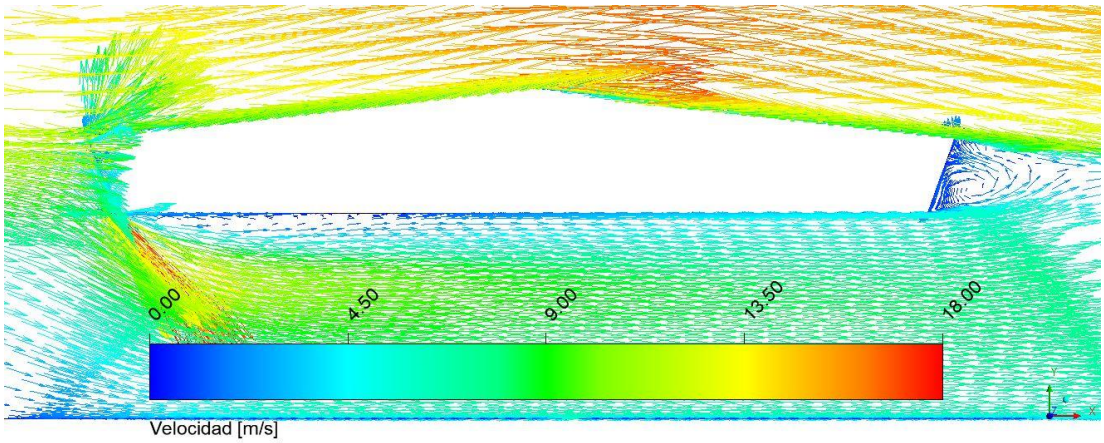
(B)

Figura 3.33: Coeficiente de presión alrededor del perfil T3 del modelo original (A) y del perfil T3 del modelo mejorado (B).

La mejora de las zonas de despegamiento de la capa límite y de recirculación se observan con mayor detalle en las figuras 3.34, 3.35 y 3.36 donde se representan los vectores de velocidad. La recirculación de la zona inferior y el lado derecho persiste en la mejora, pero se logra disminuir el tamaño en este último sector. En la parte superior no se observa recirculación a diferencia del modelo original, ya que la disminución del espesor del perfil y la inclinación del extremo lateral permiten que los puntos de estancamiento disminuyan. Es común ver en un cuerpo de tipo “bluff body”, zonas de separación y recirculación producto de las superficies que son perpendiculares al flujo y que preceden zonas de alta presión debido a los puntos de estancamiento. Logrando un comportamiento uniforme del flujo de aire aguas arriba, sin cambios abruptos en la trayectoria de las líneas de corriente, es posible disminuir las zonas de alta presión.

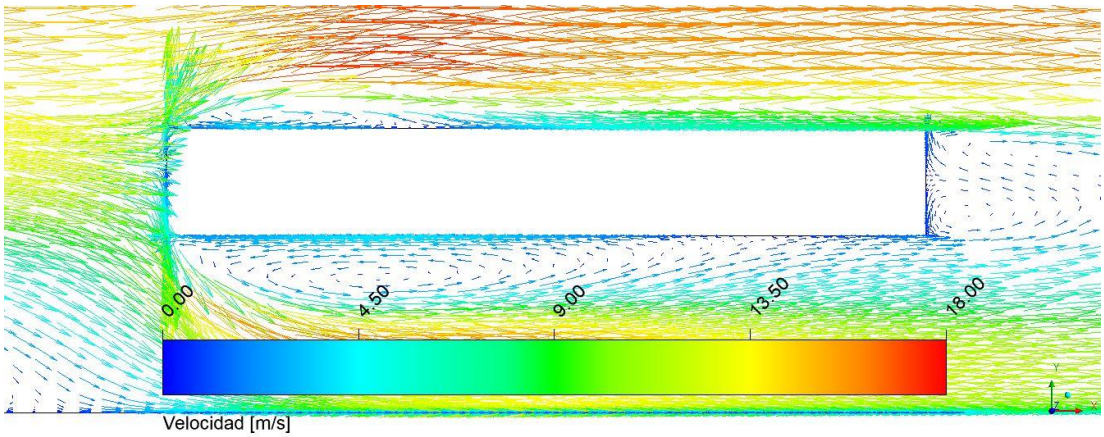


(A)

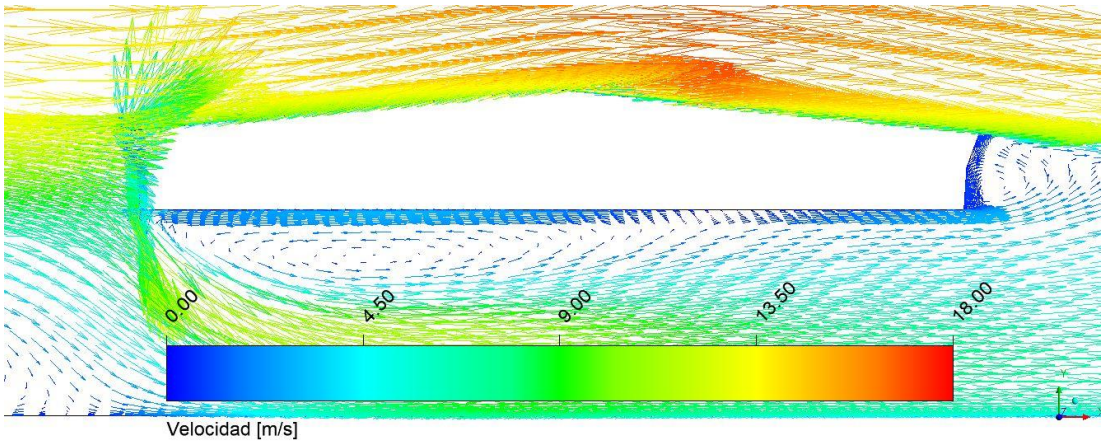


(B)

Figura 3.34: Vectores de velocidad alrededor del perfil T1 del modelo original (A) y del perfil T1 del modelo mejorado (B).

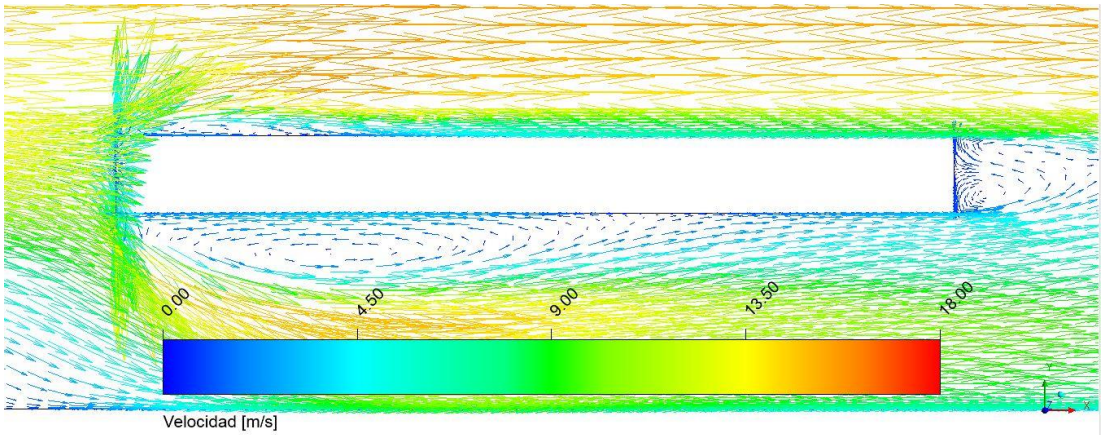


(A)

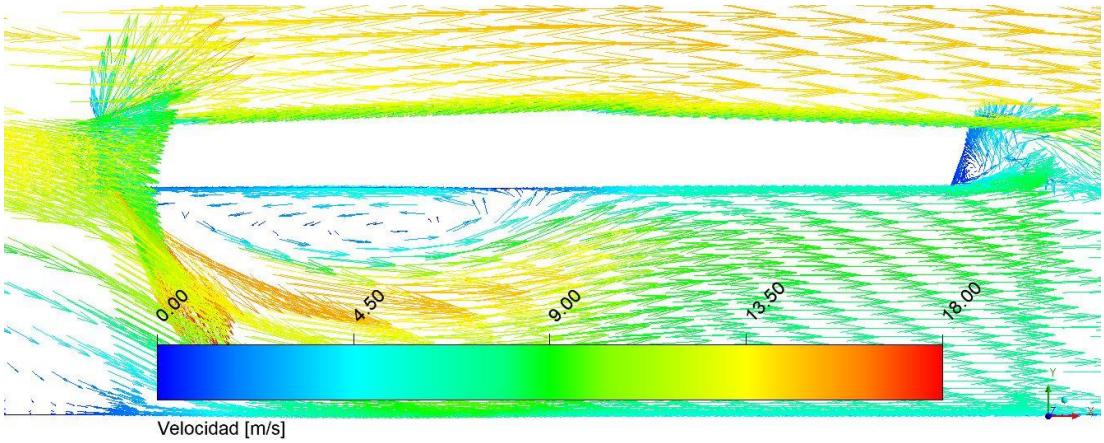


(B)

Figura 3.35: Vectores de velocidad alrededor del perfil T2 del modelo original (A) y del perfil T2 del modelo mejorado (B).



(A)



(B)

Figura 3.36: Vectores de velocidad alrededor del perfil T3 del modelo original (A) y del perfil T3 del modelo mejorado (B).

En la Tabla 3.6 se muestran los valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión, obtenidos en la simulación de los perfiles transversales del modelo mejorado y los valores de referencia obtenidos en la simulación del modelo original. Los resultados indican que se logró disminuir la fuerza de arrastre en todos los perfiles junto con el coeficiente de arrastre por presión, especialmente en el perfil T1. Estos valores serán analizados con más detalle en el análisis cuantitativo (ver sección 3.4.3).

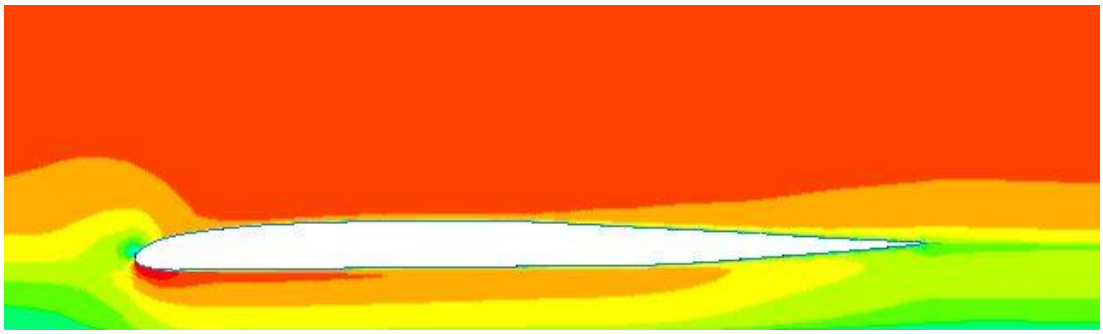
	Modelo mejorado		Modelo original	
Perfiles	Fuerza de arrastre [N]	Cd presión	Fuerza de arrastre [N]	Cd presión
T1	11,41	0,318	31,120	0,943
T2	14	0,420	31,850	1,003
T3	10,34	0,465	18,870	0,919

Tabla 3.6: Valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión de los perfiles transversales de la segunda propuesta de mejora y del modelo original.

3.4.2 Simulación de los perfiles longitudinales del modelo mejorado

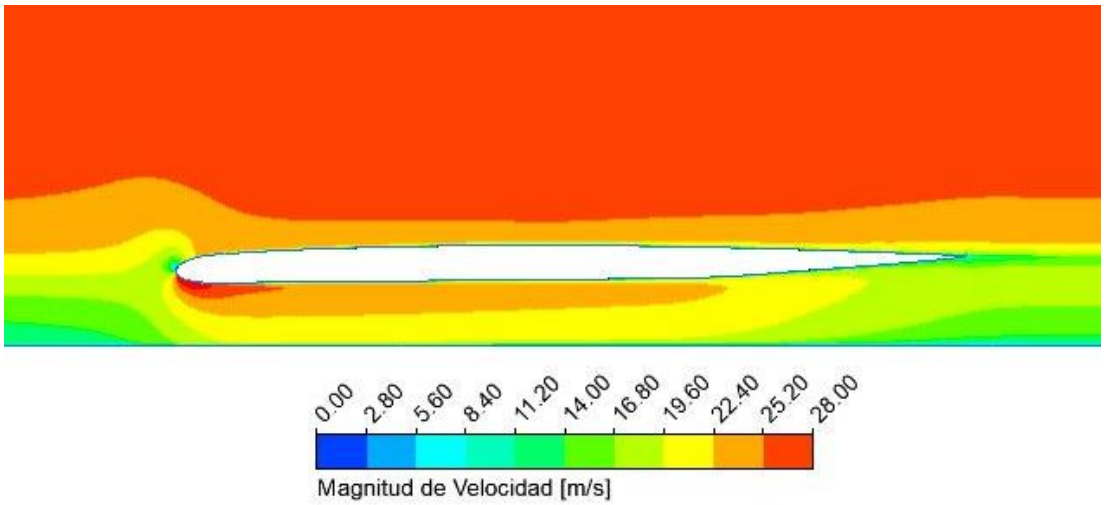
En los resultados obtenidos de las simulaciones de los perfiles longitudinales del modelo mejorado, se observa un flujo sin zonas de separación de la capa límite. En la Figura 3.37 se compara la magnitud de velocidad del perfil L1 del modelo original, con los perfiles L1 y L2 del modelo mejorado. En el caso del modelo original no existe un perfil L2, ya que todos los perfiles longitudinales son iguales.

Los flujos observados en los perfiles L1 y L2 del modelo mejorado son similares al obtenido en el perfil L1 del modelo original. Al ser geometrías de tipo “streamlined”, los cambios en el espesor o área frontal no influyen de forma significativa en el arrastre total.



(A)

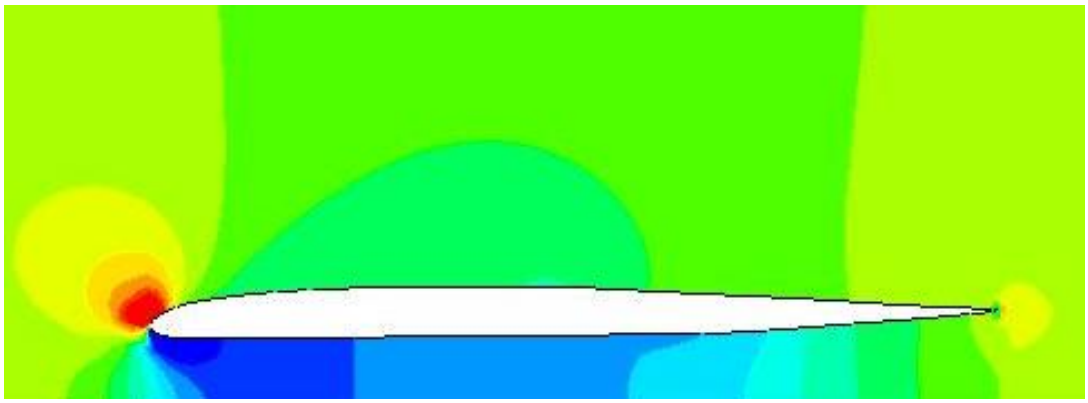
(B)



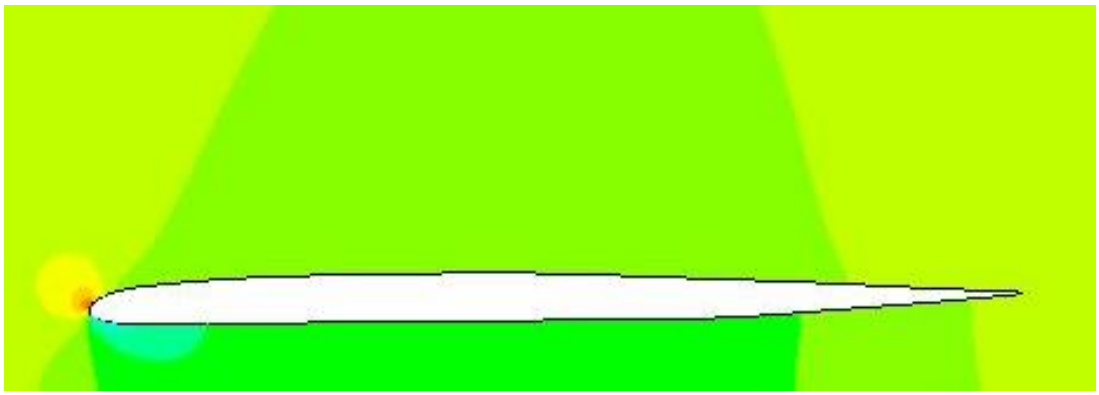
(C)

Figura 3.37: Magnitud de velocidad alrededor de los perfiles L1 del modelo original (A), L1 del modelo mejorado (B) y L2 del modelo mejorado (C).

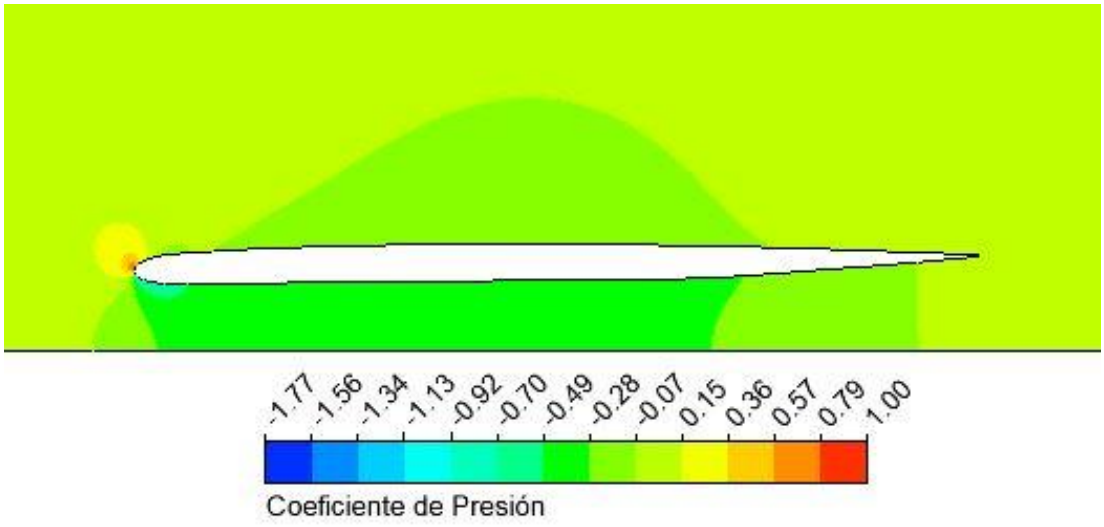
En la Figura 3.38 se muestra una comparativa del coeficiente de presión del perfil L1 del modelo original (A), el perfil L1 del modelo mejorado (B) y el perfil L2 del modelo mejorado (C). Se observa una reducción de la presión del punto de estancamiento ubicado en el borde de ataque de los nuevos perfiles y un leve aumento de la misma en la zona del intradós.



(A)



(B)



(C)

Figura 3.38: Coeficiente de presión alrededor de los perfiles L1 del modelo original (A), L1 del modelo mejorado (B) y L2 del modelo mejorado (C).

En la Tabla 3.6 se muestran los valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión, obtenidos en la simulación de los perfiles longitudinales del modelo mejorado y los valores de referencia obtenidos en la simulación del modelo original. A diferencia de los perfiles transversales, la disminución de la fuerza de arrastre total y del coeficiente de arrastre por presión no fue significativa, ya que en estos perfiles predominan las fuerzas de arrastre por viscosidad. Estos valores serán analizados con mayor detalle en el análisis cuantitativo (ver sección 3.4.3).

	Modelo mejorado		Modelo original	
Perfiles	Fuerza de arrastre [N]	Cd presión	Fuerza de arrastre [N]	Cd presión
L1	16,38	0,059	16,370	0,052
L2	14,4	0,053	16,370	0,052

Tabla 3.7: Valores de fuerza de arrastre total y coeficiente de arrastre por fuerzas de presión de los perfiles longitudinales de la segunda propuesta de mejora y del modelo original.

3.4.3 Análisis Cuantitativo de la segunda propuesta de mejora

En la sección 3.4.1 se logró determinar de forma cualitativa que el flujo de aire en los perfiles transversales del modelo mejorado reducía el arrastre por fuerzas de presión, mejorando las zonas donde existía separación de la capa límite y disminuyendo los puntos de estancamiento. En esta sección se comparan los resultados de los valores de arrastre en el modelo original y el modelo mejorado para determinar el real beneficio obtenido, utilizando las tablas 3.6 y 3.7. Se debe recordar que en el caso de los perfiles longitudinales, el perfil L2 del modelo original no existe y los perfiles L1 y L2 del modelo mejorado serán comparados con el perfil L1 del modelo original.

En la Figura 3.39 se comparan los valores de coeficiente de arrastre por fuerzas de presión de los perfiles transversales y longitudinales del modelo original y el modelo mejorado. La mayor reducción del coeficiente de arrastre se logró en los perfiles transversales T1, T2 y T3 con un 66%, 58% y 49% menos de este valor, mientras que en los perfiles longitudinales L1 y L2 el comportamiento fue el opuesto con un aumento del 13% y 1% respectivamente.

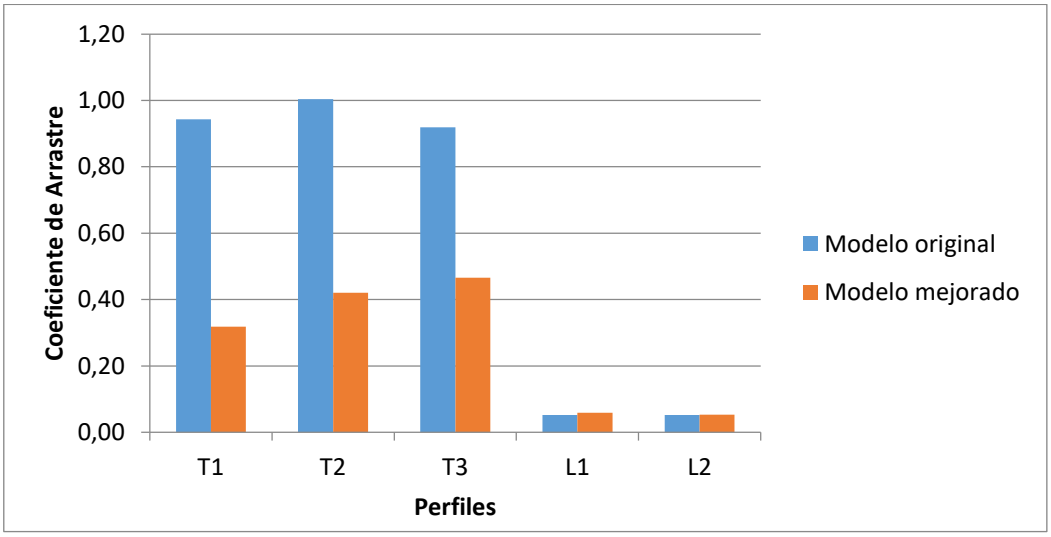


Figura 3.39: Comparativa de los coeficientes de arrastre por presión de los perfiles longitudinales y transversales del modelo original y del modelo mejorado.

El incremento del coeficiente de arrastre en los perfiles longitudinales se debe a que la disminución de la fuerza de arrastre no fue proporcional a la disminución del área frontal de los perfiles. Al observar la ecuación (1.8) en el marco teórico es posible determinar que la fuerza de arrastre debe disminuir en mayor proporción que el área frontal para reducir el valor del coeficiente de arrastre por fuerzas de presión.

Considerando la componente de arrastre por viscosidad, se compara la fuerza de arrastre total del modelo original con el modelo mejorado como se muestra en la Figura 3.40. En este caso, tanto en los perfiles transversales como en los longitudinales se logra disminuir el arrastre en distintas cantidades. En los perfiles transversales T1, T2 y T3 se redujo un 63%, 56% y 45%, mientras que en los perfiles longitudinales L1 y L2 la reducción fue menor o nula con un 0% y un 12% respectivamente.

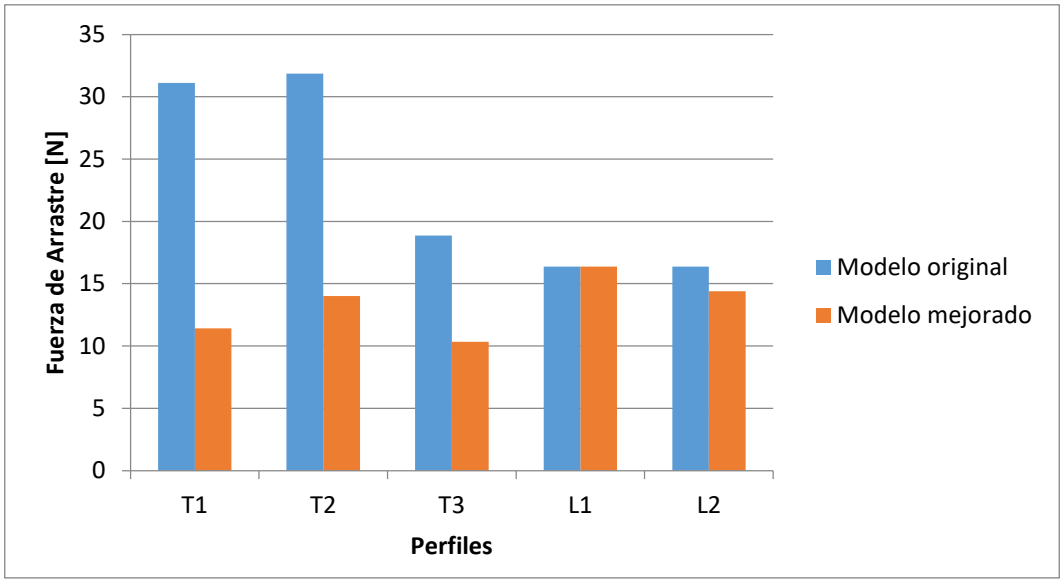


Figura 3.40: Comparativa de la fuerza de arrastre de los perfiles longitudinales y transversales del modelo original y del modelo mejorado.

Los resultados permiten establecer que la segunda propuesta de mejora disminuye considerablemente el arrastre total, sin realizar grandes cambios en la geometría.

Una importante observación a destacar es el comportamiento del flujo de aire en la parte inferior de los perfiles transversales que no cambió de forma significativa, lo que sugiere que de haber considerado los cubre ruedas, los resultados hubieran sido similares.

Capítulo 4

Conclusiones

El presente trabajo de título verifica la posibilidad de mejorar el desempeño aerodinámico del auto solar Ergon reduciendo las fuerzas de arrastre. Con los resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Dependiendo de la dirección del flujo de aire sobre el auto, las componentes de la fuerza de arrastre van a tener cierto tipo de predominancia. Con viento en contra el arrastre predominante es debido a fuerzas de viscosidad, mientras que con vientos laterales el arrastre se debe en su mayoría a fuerzas de presión. Este resultado es útil para idear una propuesta de mejora y obtener la mayor reducción del arrastre posible.

- En la primera propuesta de mejora, la fuerza de arrastre total disminuyó un 3%, pero también lo hizo la sustentación negativa con una reducción de 34% respecto de la configuración inicial. Los resultados obtenidos no son del todo favorables, ya que se cumple el objetivo de reducir el arrastre pero también se reduce considerablemente la sustentación negativa.

- En la segunda propuesta de mejora, la fuerza de arrastre total de los perfiles transversales T1, T2 y T3 disminuyó un 63%, 56% y 45% respectivamente, mientras que en los perfiles longitudinales L1 y L2 la disminución fue de un 0% y 12% respectivamente. A diferencia de la primera propuesta, no se requieren grandes modificaciones estructurales para realizar la mejora y se obtiene una gran reducción de la fuerza de arrastre total sin perder fuerza de sustentación negativa, ya que el ángulo de ataque permanece constante. Esta propuesta es una buena alternativa para mejorar el desempeño aerodinámico.

- El estudio realizado entrega una base para analizar el modelo de forma más detallada, utilizando una malla en 3d y los elementos que en un comienzo fueron retirados (cubre ruedas).

Como recomendación para trabajos posteriores más detallados, se sugiere utilizar una malla en 3d de tipo no estructurada, ya que el tiempo necesario para crearla es inferior al de una malla estructurada. Una simulación que utilice este tipo de malla, debe ser calculada con un buen procesador, ya que el tiempo empleado será mayor.

Bibliografía

[1] Valentina Jiménez. (2014, enero) Ingenium. [Online]. http://ingenium.usm.cl/noticias/ergon/

[2] La Ruta Solar. (2018, Septiembre) Carrera Solar Atacama. [Online]. http://www.carrerasolar.com

[3] Rhona. (2018, Septiembre) Rhona. [Online]. https://www.rhona.pe/articulo/corporativo/1/12/rhona-renueva-apoyo-al-auto-solar-ergon.html

[4] Despegamos. (2018, Septiembre) Despegamos. [Online]. http://www.despegamos.es/2014/12/23/perfiles-naca/

[5] Robert Fox, Alan McDonald, and Philip Pritchard, *Introduction to Fluid Mechanics*. Massachusetts, United States of America: John Wiley and sons, 2004.

[6] Dick K. P. Yue, Marine Hydrodynamics, 2005.

[7] Pilotfriend. (2018, Septiembre) Pilotfriend. [Online]. http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/aero/aero_res.htm

[8] Racecar engineering. (2018, Septiembre) Racecar engineering. [Online]. http://www.racecar-engineering.com/technology-explained/diffusers-engineering-basics-aerodynamics/

[9] Franz Durst, *Fluid Mechanics, An Introduction to the Theory of Fluid Flows*. Erlangen, Alemania: Springer, 2008.

[10] Oleg Zikanov, *Essential Computational Fluid Dynamics*. New Jersey, United States of America: John Wiley & Sons, 2010.

[11] R. Shankar Subramanian. (2015, Agosto) Department of Chemical and Biomolecular Engineering Web site. [Online]. http://web2.clarkson.edu/projects/subramanian/ch330/notes/Reynolds%20Number.pdf

[12] Fenando Villalpando, Marcelo Reggio, and Adrian Ilinca, *Assessment of Turbulence Models for Flow Simulation around a Wind Turbine Airfoil*, Guan Yeoh, Ed. Montreal, Canada, 2011.

[13] Fernando Villalpando, Marcelo Reggio, and Adrian Ilinca, Assessment of Turbulence Models for Flow Simulation around a Wind Turbine Airfoil, febrero 15, 2011.

[14] SAS IP, Ansys Fluent Theory Guide, Noviembre 2013.

[15] Christopher Earls Brennen, An Internet Book on Fluid Dynamics, 2006.

[16] Ansys Inc., Ansys Fluent user's guide, Abril 2009.

[17] SAS IP, *ANSYS Fluent User's guide*, 13th ed. Pensilvania, United Sates of America, 2010.

[18] Cheng Siong Chin, Computer-Aided Control Systems Design: Practical Applications Using MATLAB, 2013.

[19] Ira H. Abbott and Albert E. Von Doenhoff, *Theory of Wing Sections, including a summary of airfoil data*. New York, United States of America: McGraw-Hill, 1959.

[20] David Pnuelli and Chaim Gutfinger, *Fluid Mechanics*. Cambridge: The Press Syndicate of the University of Cambridge, 1997.

[21] Jesús Sánchez Vázquez. Simulacion numérica directa en paralelo de las ecuaciónes de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida.

[22] Dominique Thévenin and Gábor Janiga, *Optimization and Computational Fluid Dynamics*. Magdeburg, Germany: Springer, 2008.

Anexo A

Marco Teórico

A.1 Operadores matemáticos

El operador nabla $\boldsymbol{\nabla}$ en coordenadas cartesianas se escribe de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{\nabla} = \hat{x}\frac{\partial}{\partial x} + \hat{y}\frac{\partial}{\partial y} + \hat{z}\frac{\partial}{\partial z}$$

Donde $\hat{x}, \hat{y}\ y\ \hat{z}$ corresponden a los vectores unitarios en dirección de los ejes cartesianos.

El operador laplaciano $\boldsymbol{\nabla}^2$ en las ecuaciones de Navier-Stokes se utiliza de forma vectorial. Tomando el campo de velocidad $\boldsymbol{V} = (V_x, V_y, V_z)$ en coordenadas cartesianas, la expresión $\boldsymbol{\nabla}^2\boldsymbol{V}$ se representa como se muestra a continuación:

$$\boldsymbol{\nabla}^2\boldsymbol{V} = (\boldsymbol{\nabla}^2 V_x, \boldsymbol{\nabla}^2 V_y, \boldsymbol{\nabla}^2 V_z)$$

Luego se desarrolla el operador laplaciano para cada componente del campo de velocidad:

$$\boldsymbol{\nabla}^2 V_x = \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}\right)$$

$$\boldsymbol{\nabla}^2 V_y = \left(\frac{\partial^2 V_y}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 V_y}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 V_y}{\partial z^2}\right)$$

$$\boldsymbol{\nabla}^2 V_z = \left(\frac{\partial^2 V_z}{\partial x^2}, \frac{\partial^2 V_z}{\partial y^2}, \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2}\right)$$

Anexo B

ANSYS Fluent

B.1 Algoritmo segregado

El algoritmo segregado es utilizado en la simulación basada en presión donde las ecuaciones de Navier-Stokes son resueltas de forma secuencial como se explica a continuación:

1- Se actualizan las propiedades del fluido incluyendo la viscosidad turbulenta.

2- Las ecuaciones de conservación de momentum se resuelven con los valores actualizados de presión y flujos másicos.

3- Se resuelve la ecuación de corrección de presión con los valores del campo de velocidad y de flujo másico actualizados.

4- Se corrigen los valores de flujo másico, presión y campo de velocidad utilizando la corrección de presión del paso 3.

5- Las ecuaciones adicionales para escalares, valores de turbulencia, energía e intensidad de radiación son resueltas con los valores de las soluciones obtenidas.

6- Se verifica la convergencia de las ecuaciones.

En la Figura 4.1 se resume el ciclo del algoritmo segregado:

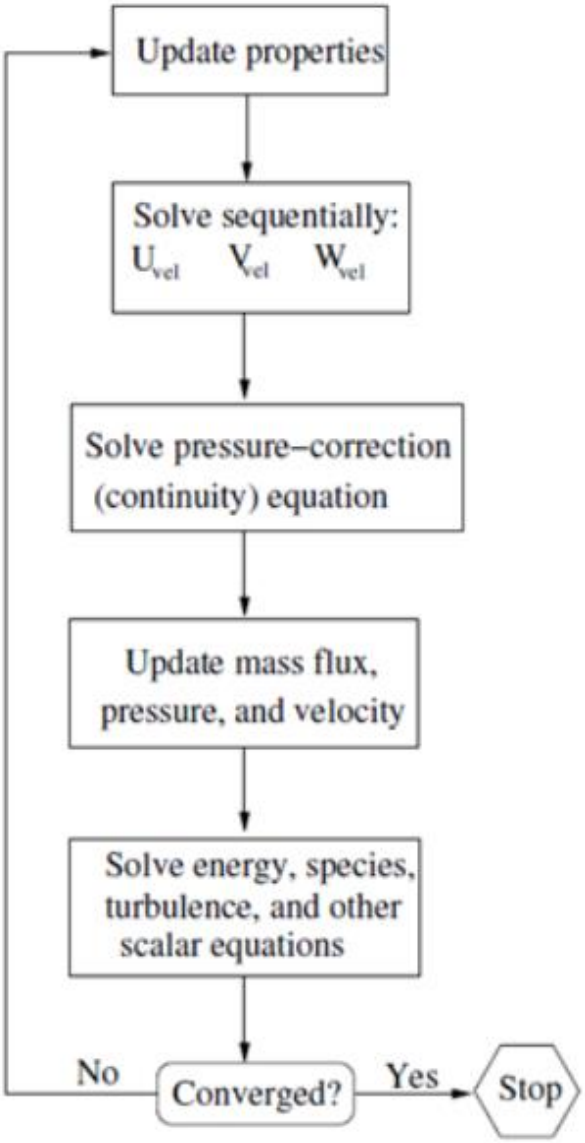


Figura 4.1: Esquema del ciclo del algoritmo segregado [16].

Anexo C

Valores de Y+

C.1 Valores de Y+ de los perfiles transversales del modelo original.

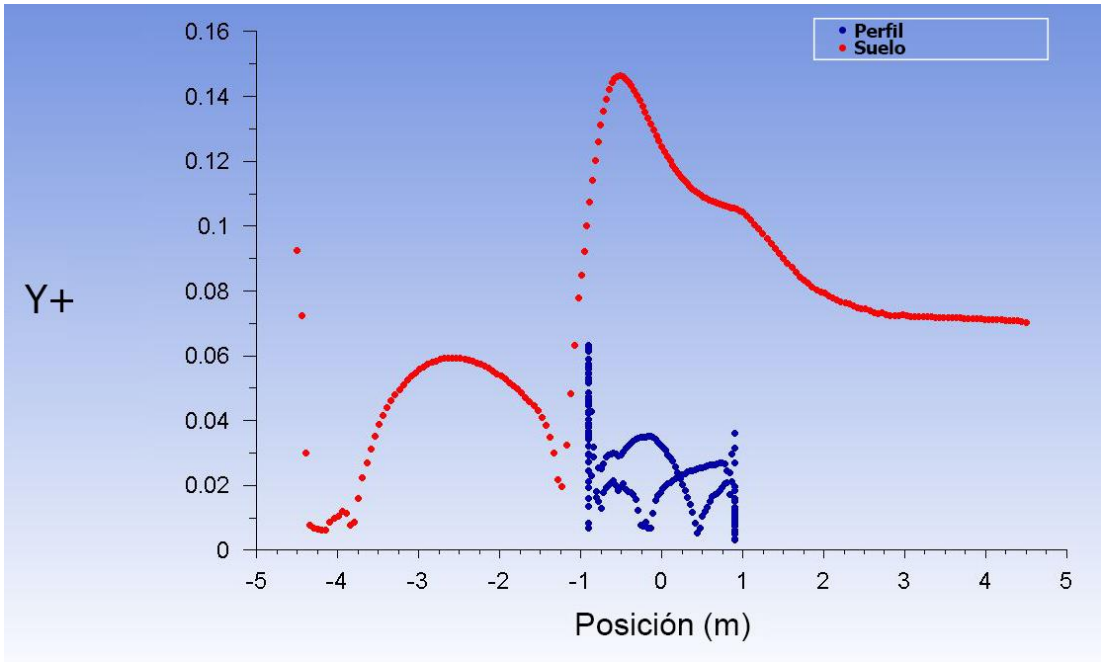


Figura 4.2: Valores de Y+ alrededor del perfil T1 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X.

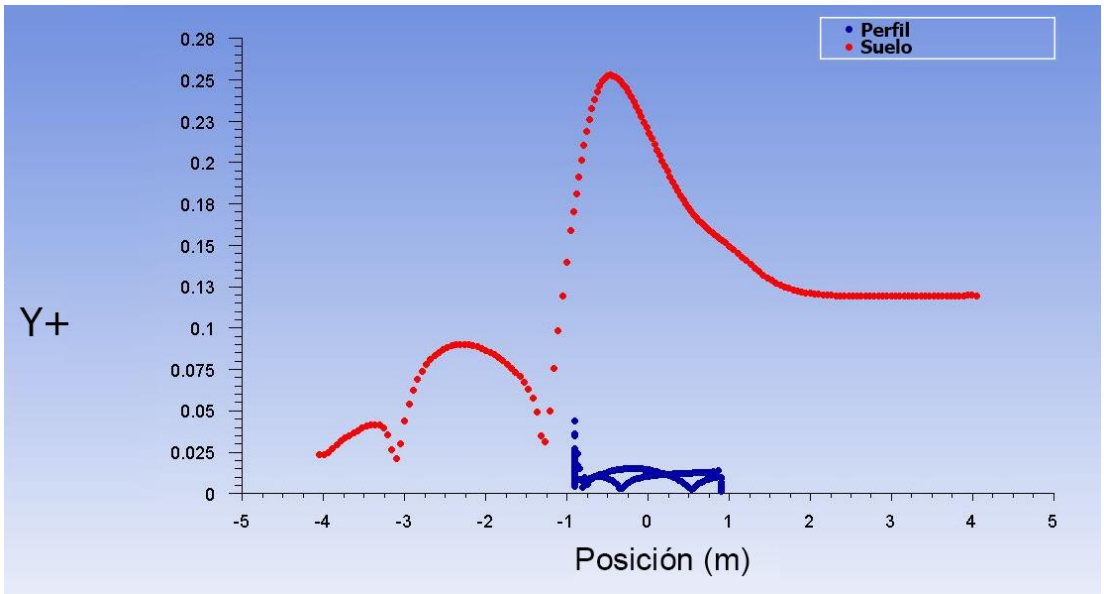


Figura 4.3: Valores de Y+ alrededor del perfil T2 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X.

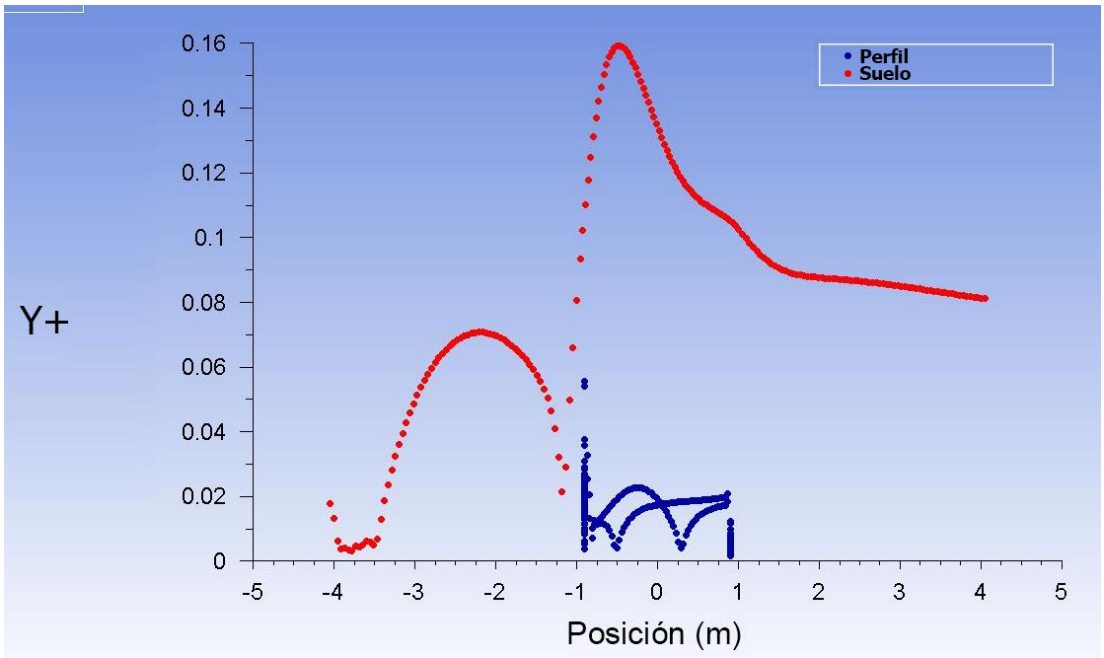


Figura 4.4: Valores de Y+ alrededor del perfil T3 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X.

C.2 Valores de Y+ del perfil longitudinal del modelo original.

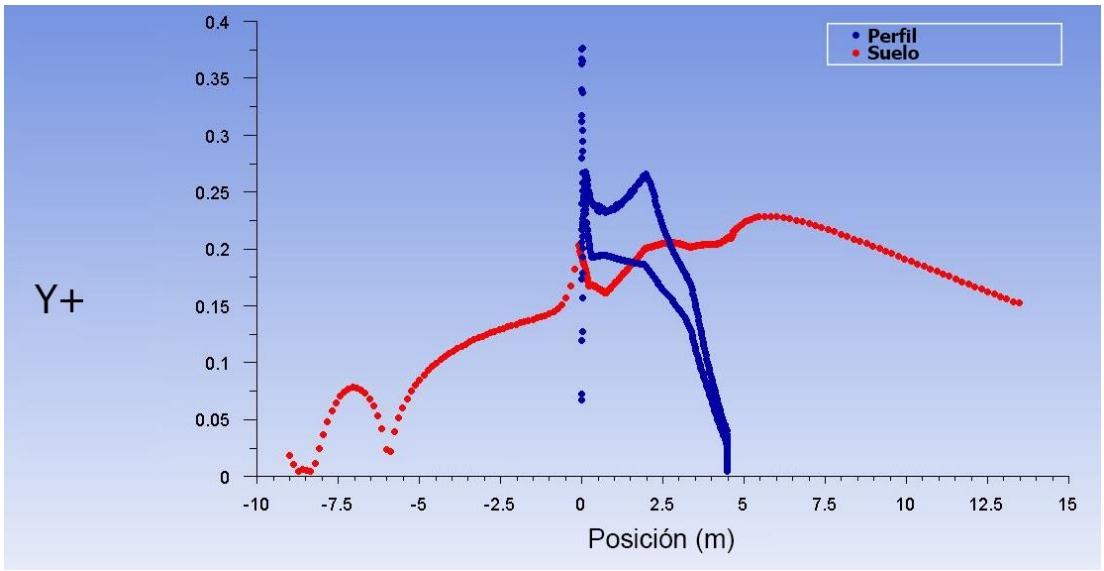


Figura 4.5: Valores de Y+ alrededor del perfil L1 del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X.

C.3 Valores de Y+ de los perfiles transversales del modelo mejorado.

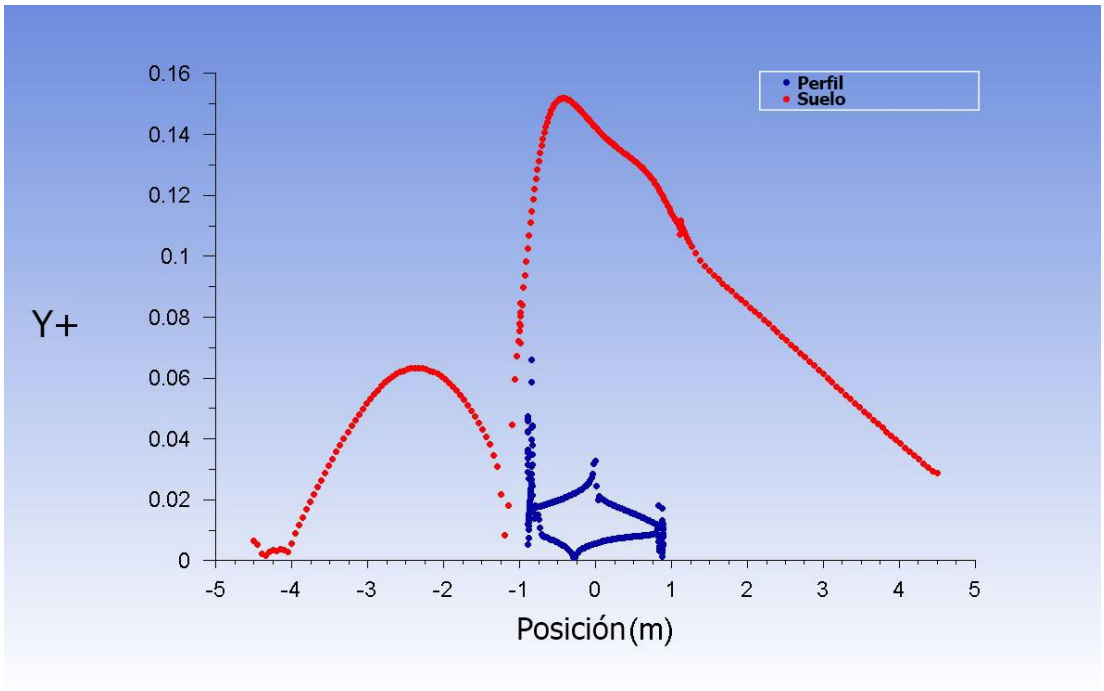


Figura 4.6: Valores de Y+ alrededor del perfil T1 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X.

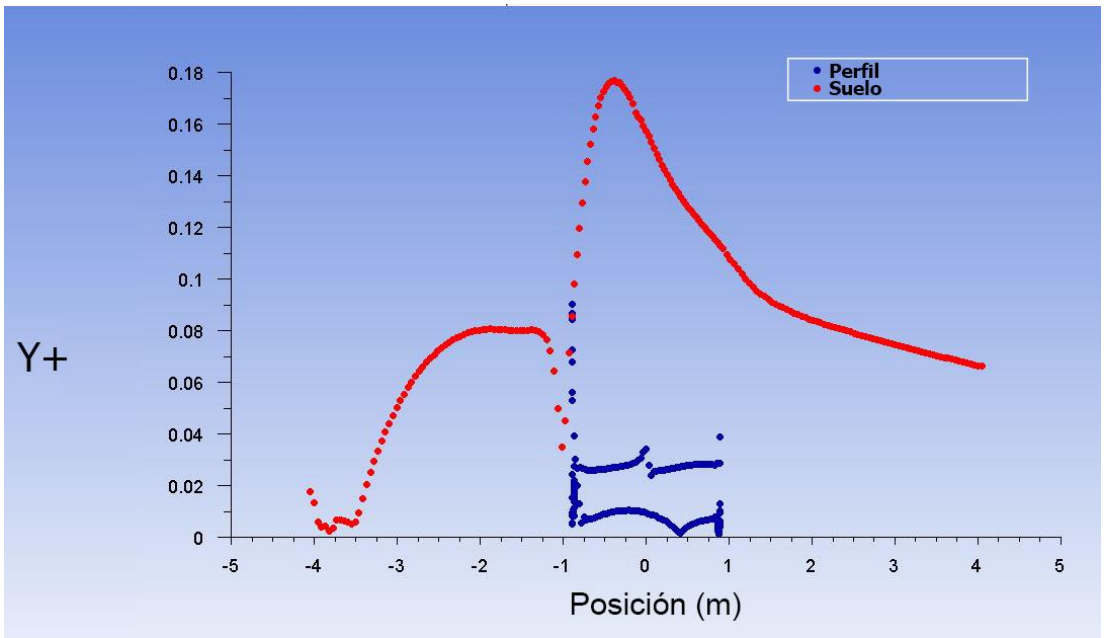


Figura 4.7: Valores de Y+ alrededor del perfil T2 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X.

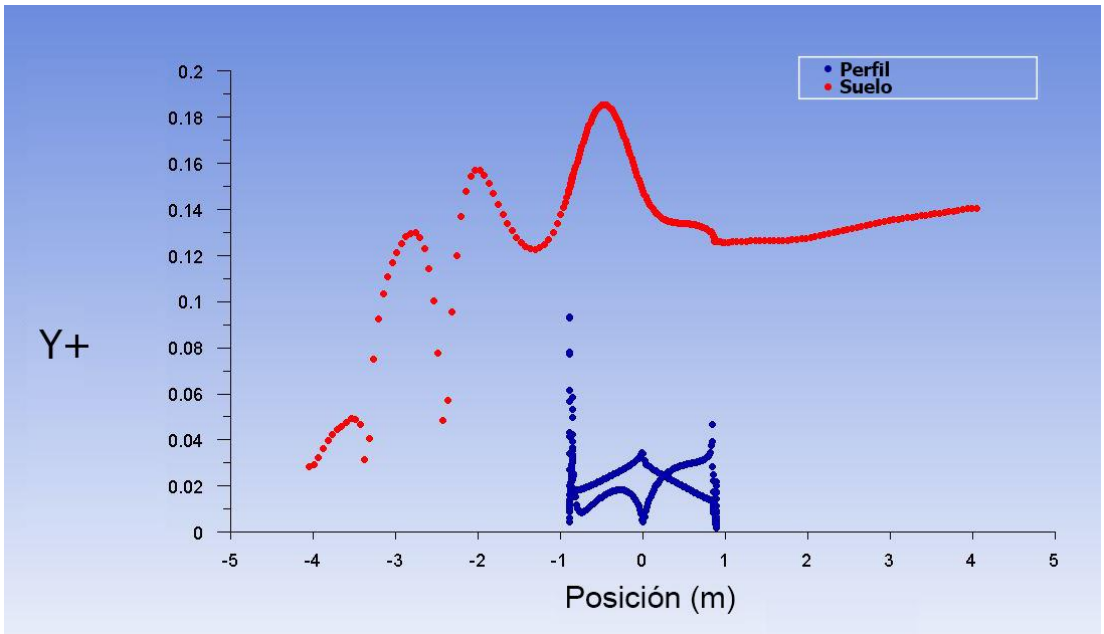


Figura 4.8: Valores de Y+ alrededor del perfil T3 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X.

C.4 Valores de Y+ de los perfiles longitudinales del modelo mejorado.

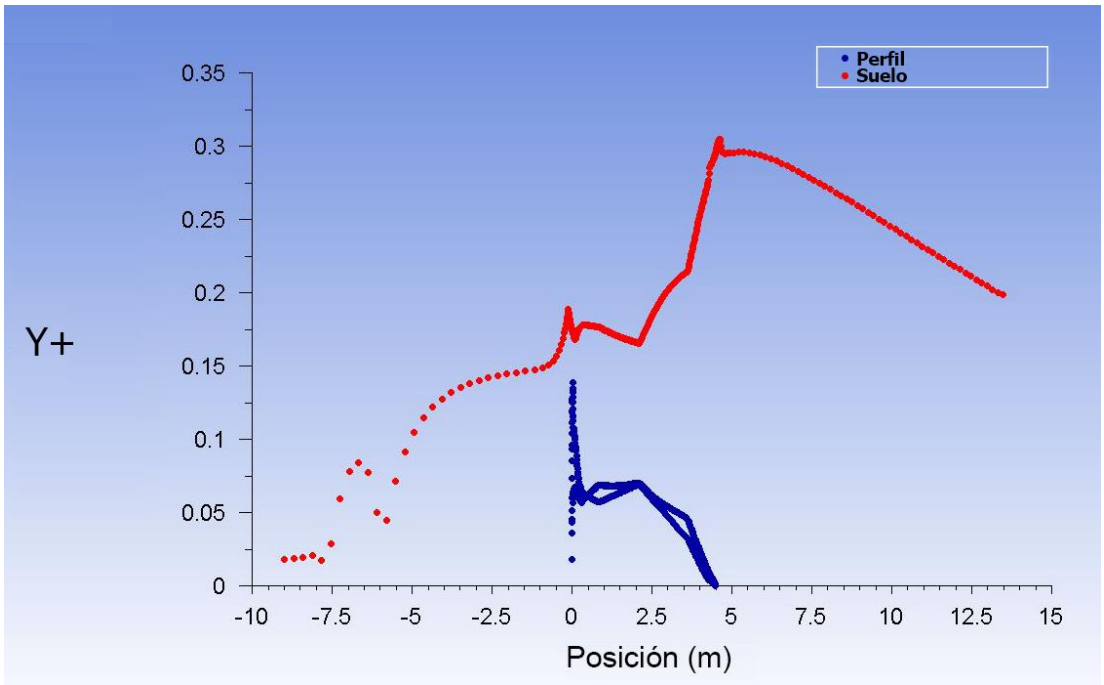


Figura 4.9: Valores de Y+ alrededor del perfil L1 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X.

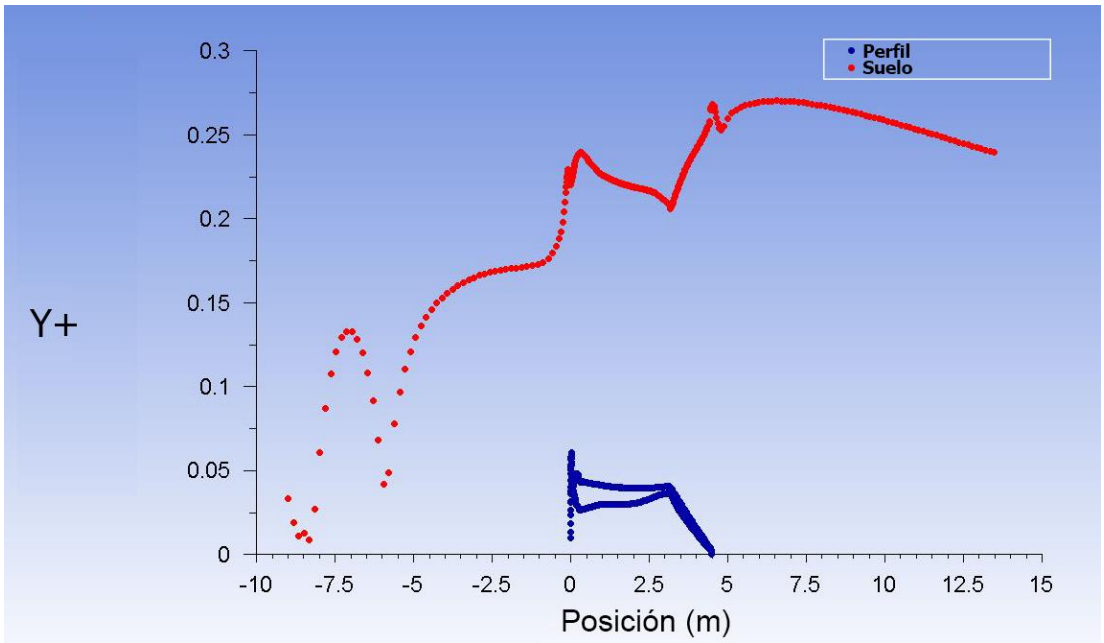


Figura 4.10: Valores de Y+ alrededor del perfil L2 del modelo mejorado y del suelo, en función de la posición en el eje X.

C.5 Valor de Y+ del perfil longitudinal invertido del modelo original.

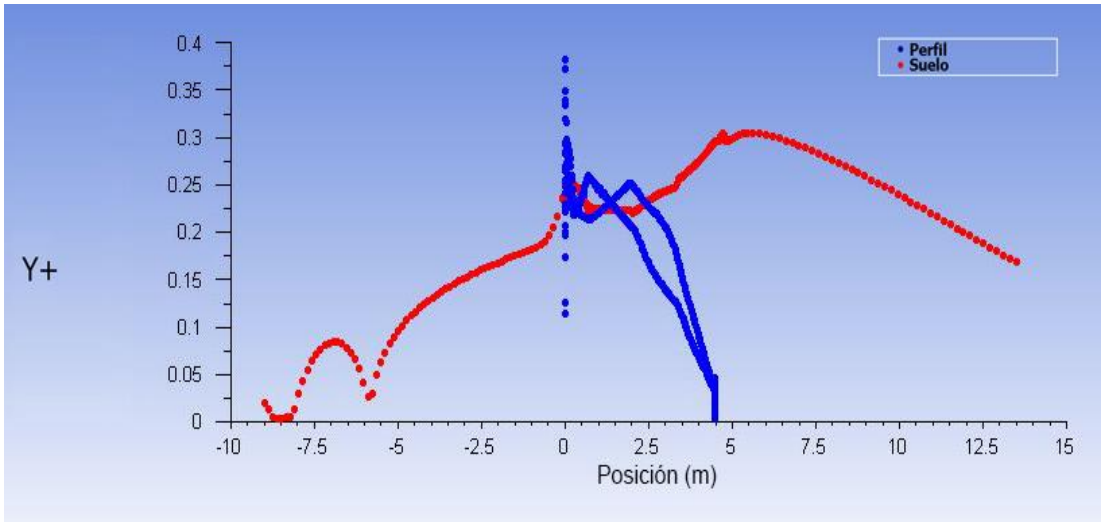


Figura 4.11: Valores de Y+ alrededor del perfil L1 invertido del modelo original y del suelo, en función de la posición en el eje X.

Anexo D

Mallas

D.1 Mallas de los perfiles transversales del modelo original

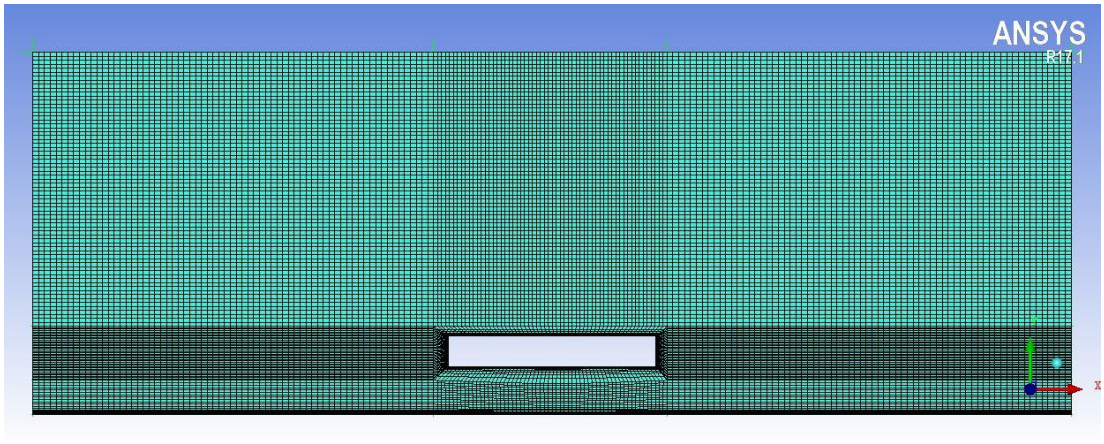


Figura 4.12: Malla del perfil T1 del modelo original.

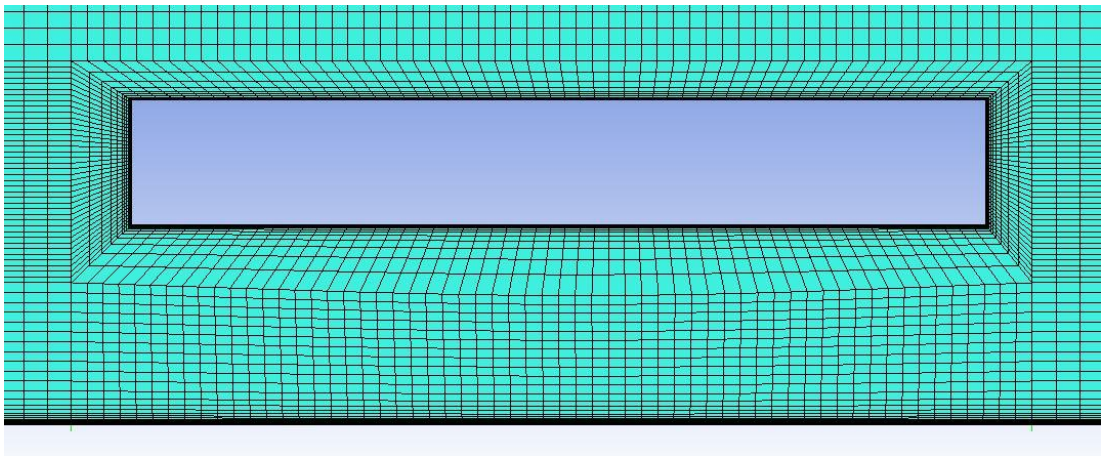


Figura 4.13: Detalle de la malla del perfil T1 del modelo original.

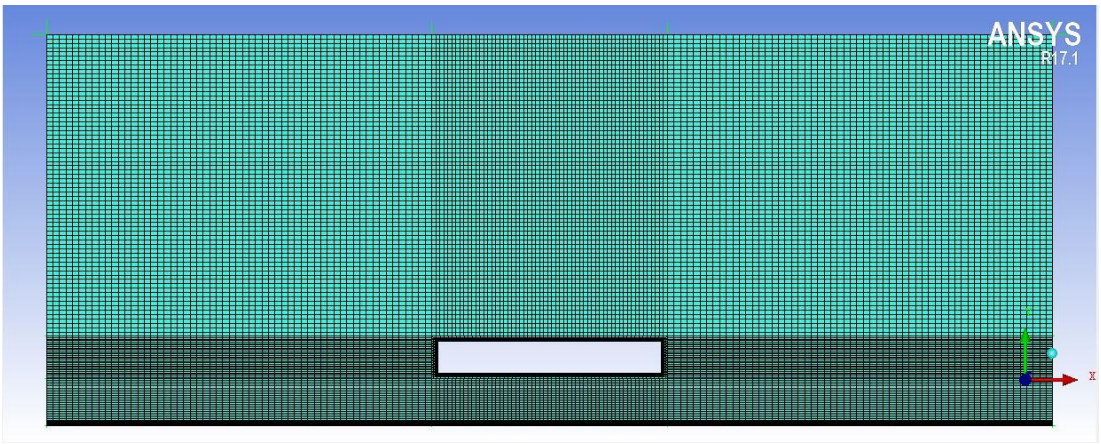


Figura 4.14: Malla del perfil T2 del modelo original.

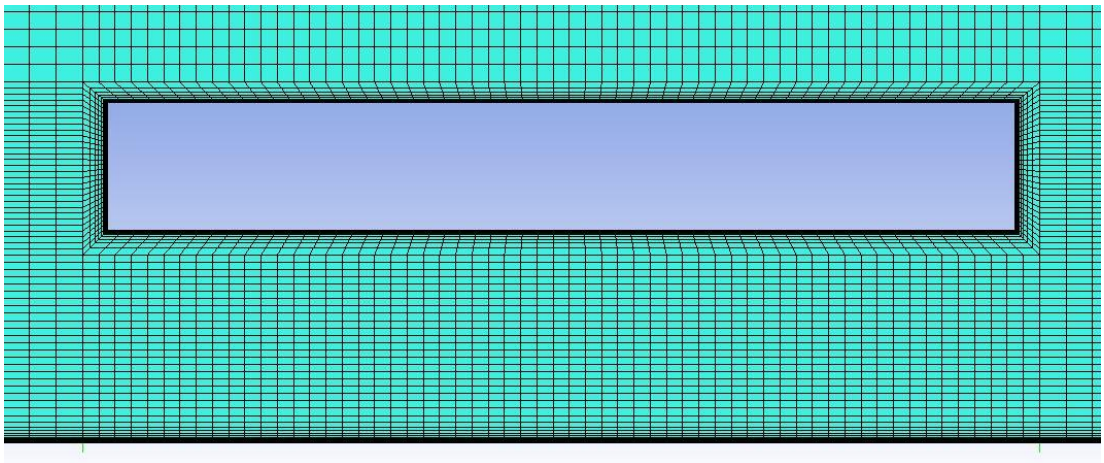


Figura 4.15: Detalle de la malla del perfil T2 del modelo original.

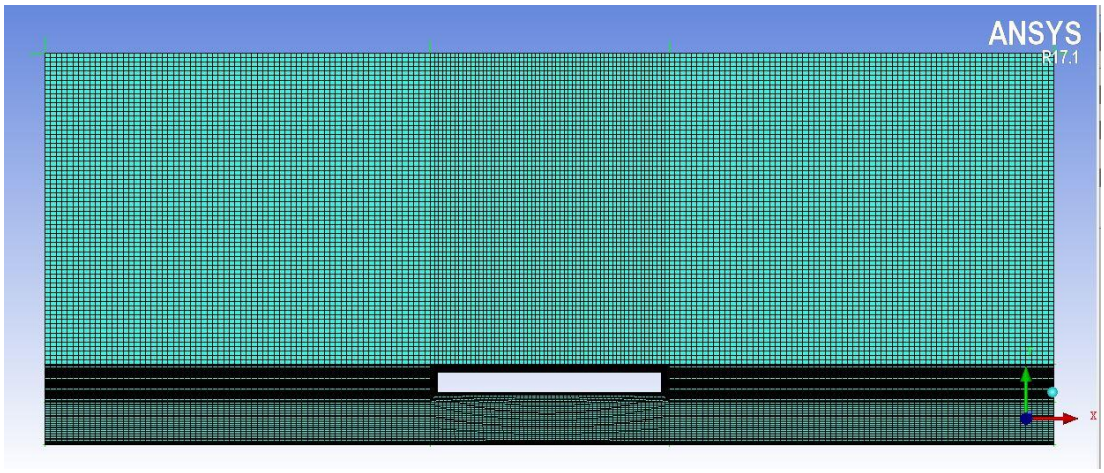


Figura 4.16: Malla del perfil T3 del modelo original.

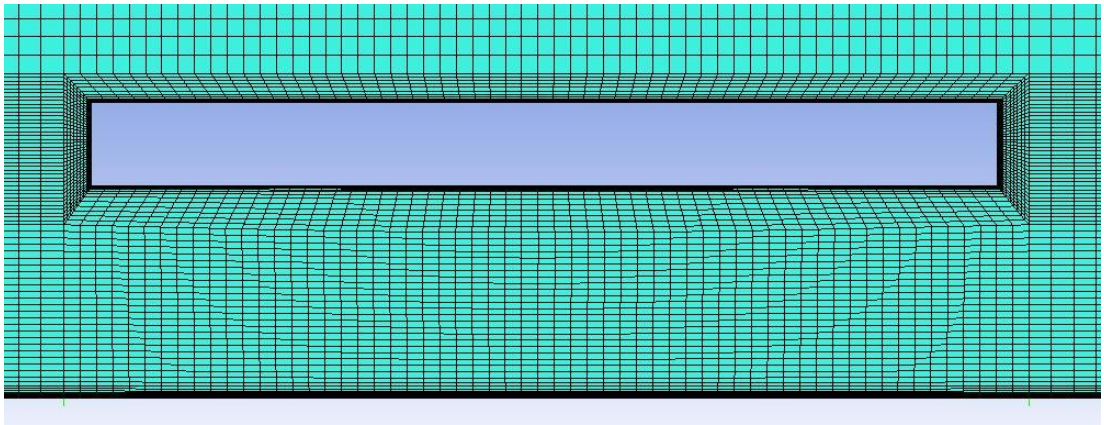


Figura 4.17: Detalle de la malla del perfil T3 del modelo original.

D.2 Mallas de los perfiles longitudinales del modelo original

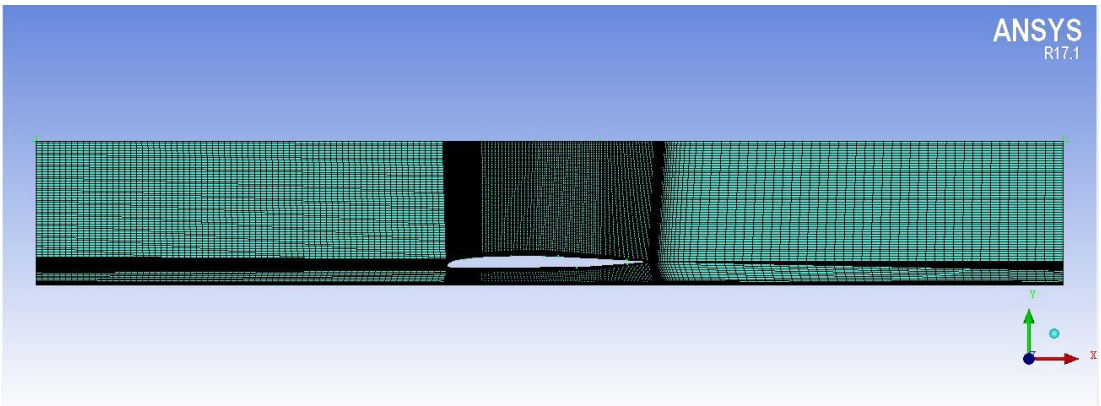


Figura 4.18: Malla de los perfiles L1 y L2 del modelo original.

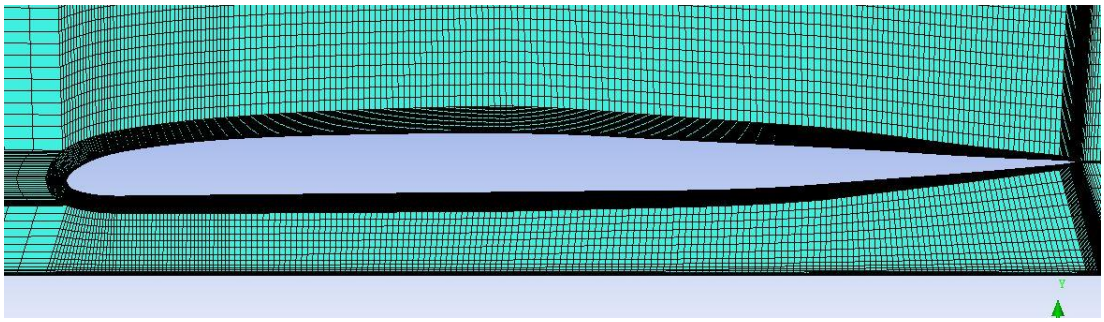


Figura 4.19: Detalle de la malla de los perfiles L1 y L2 del modelo original.

D.3 Mallas de los perfiles transversales del modelo mejorado

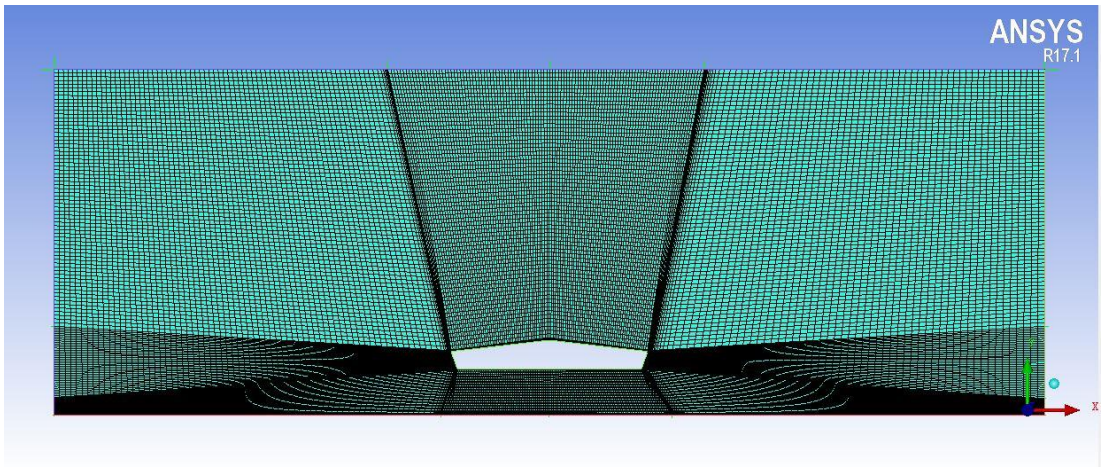


Figura 4.20: Malla del perfil T1 del modelo mejorado.

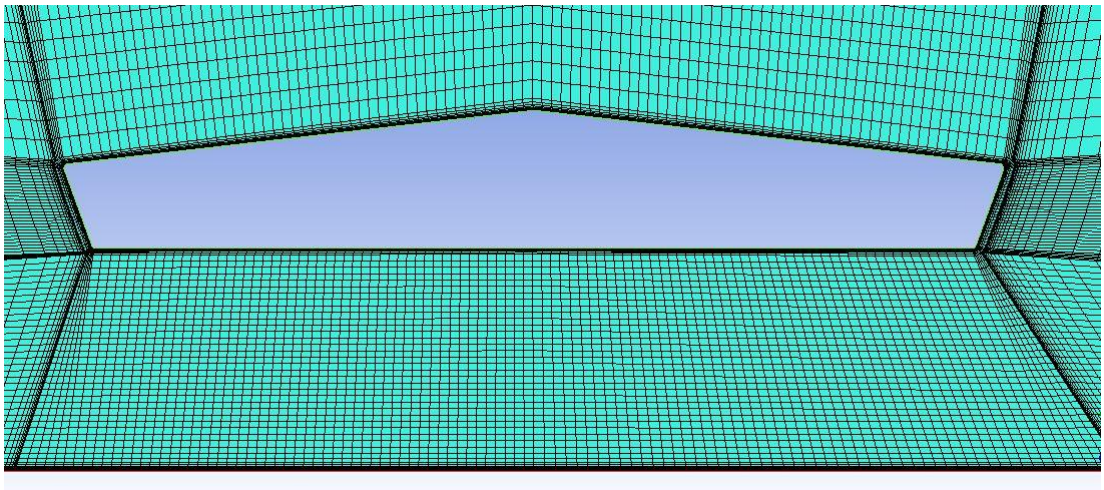


Figura 4.21: Detalle de la malla del perfil T1 del modelo mejorado.

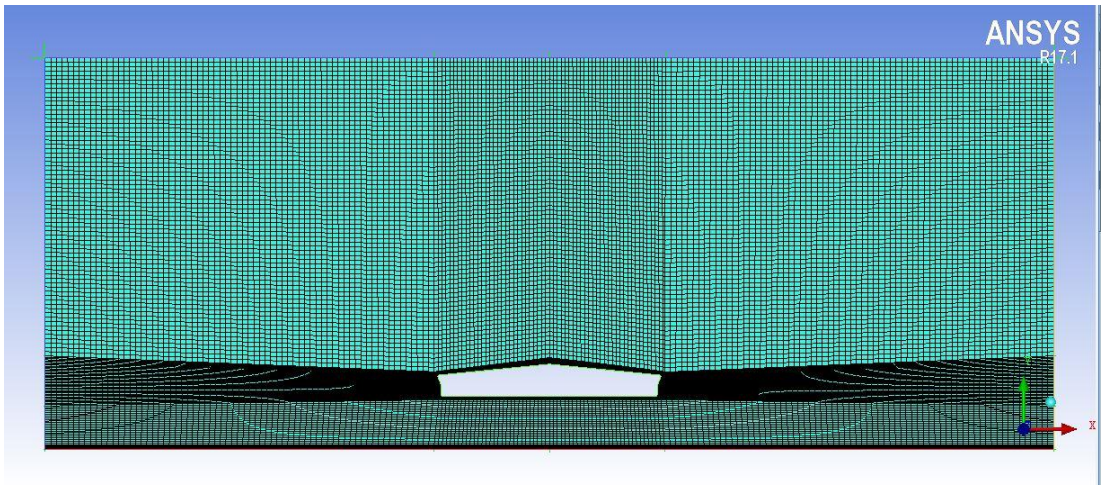


Figura 4.22: Malla del perfil T2 del modelo mejorado.

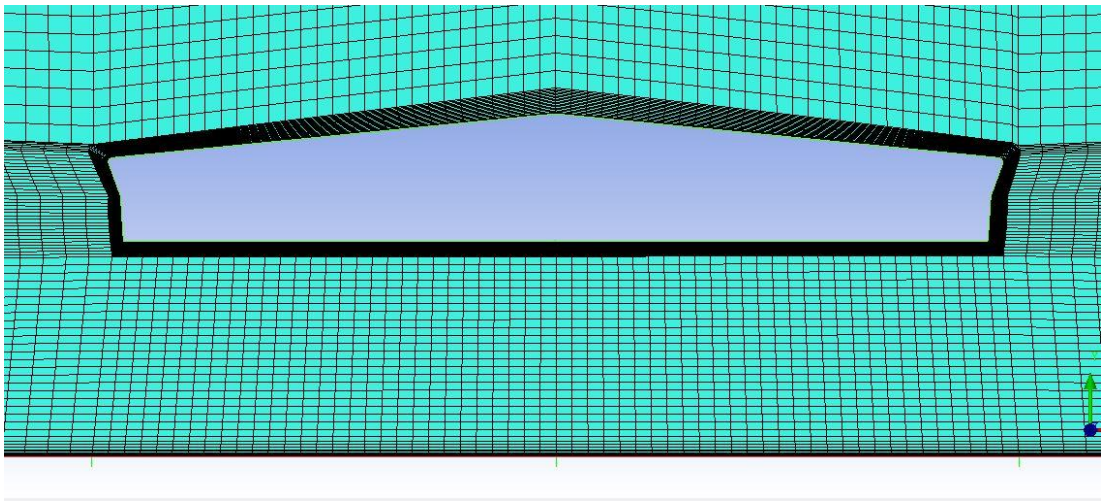


Figura 4.23: Detalle de la malla del perfil T2 del modelo mejorado.

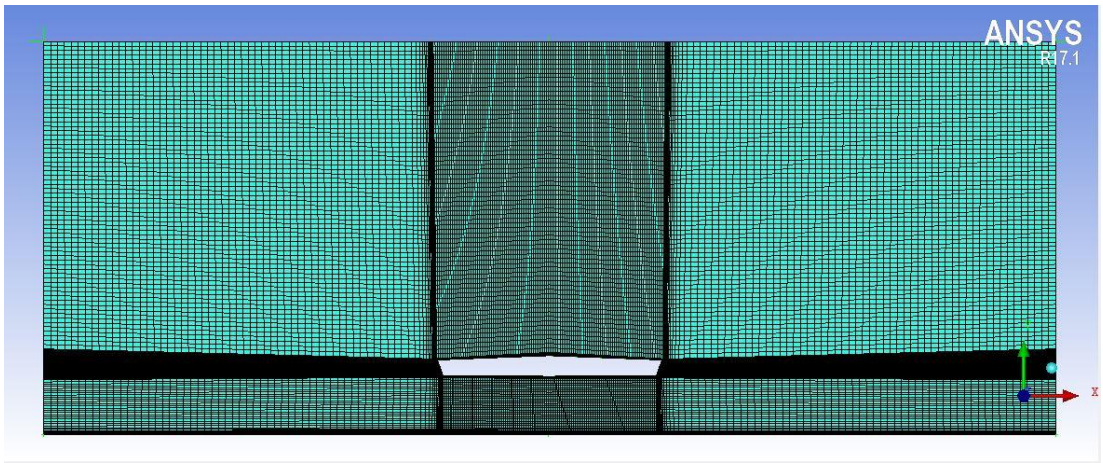


Figura 4.24: Malla del perfil T3 del modelo mejorado.

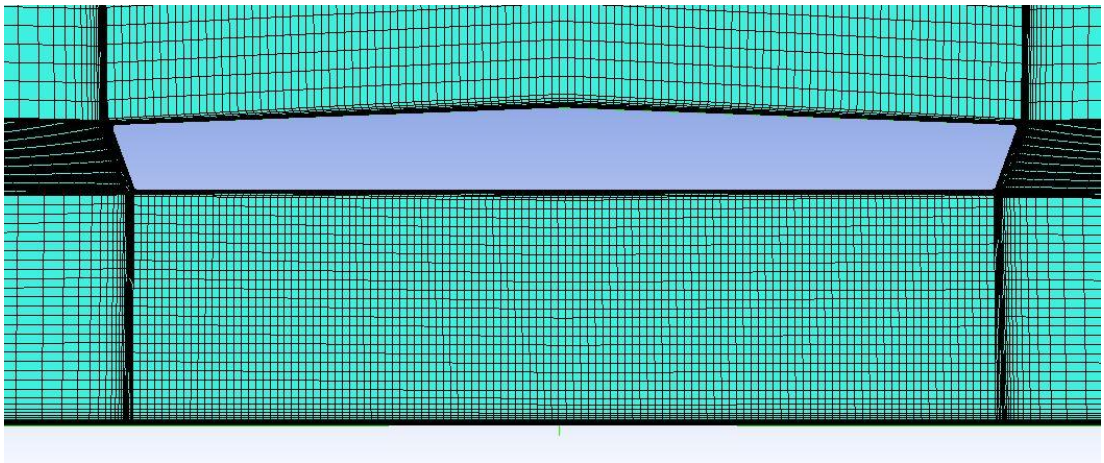


Figura 4.25: Detalle de la malla del perfil T3 del modelo mejorado.

D.4 Mallas de los perfiles longitudinales del modelo mejorado

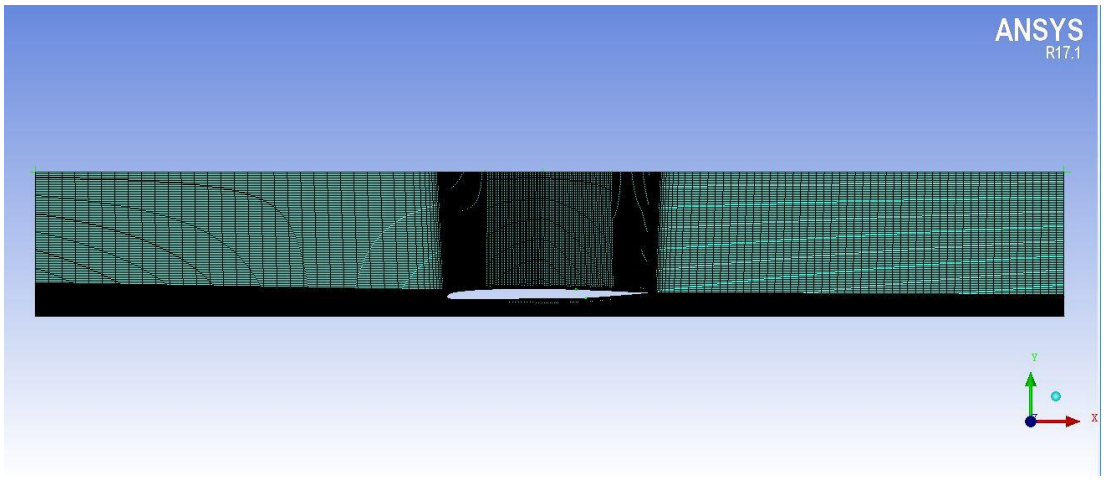


Figura 4.26: Malla del perfil L1 del modelo mejorado.

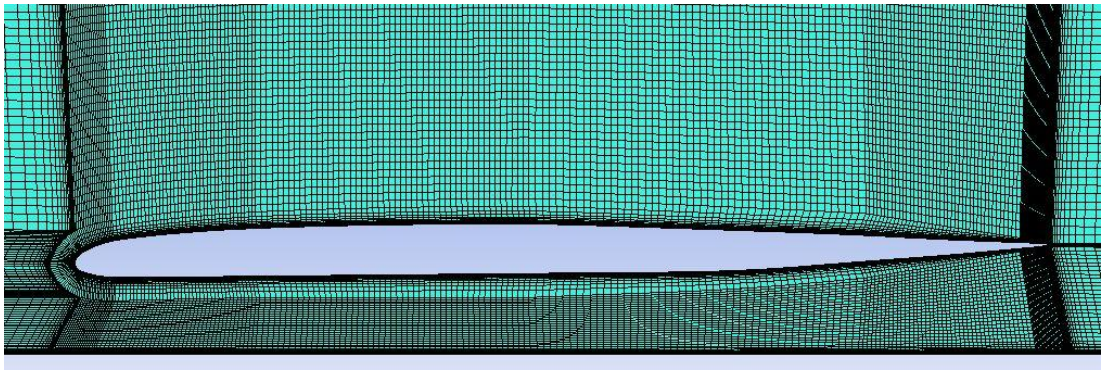


Figura 4.27: Detalle de la malla del perfil L1 del modelo mejorado.

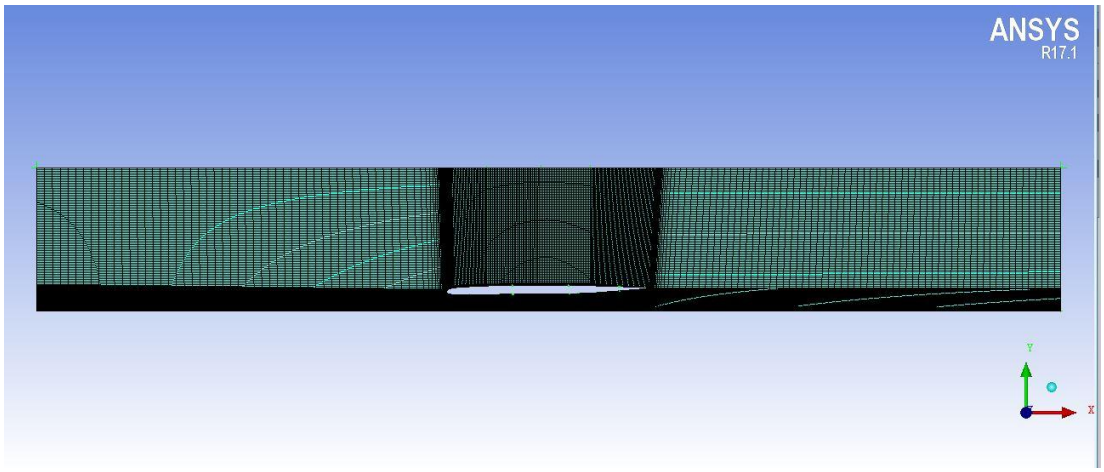


Figura 4.28: Malla del perfil L2 del modelo mejorado.

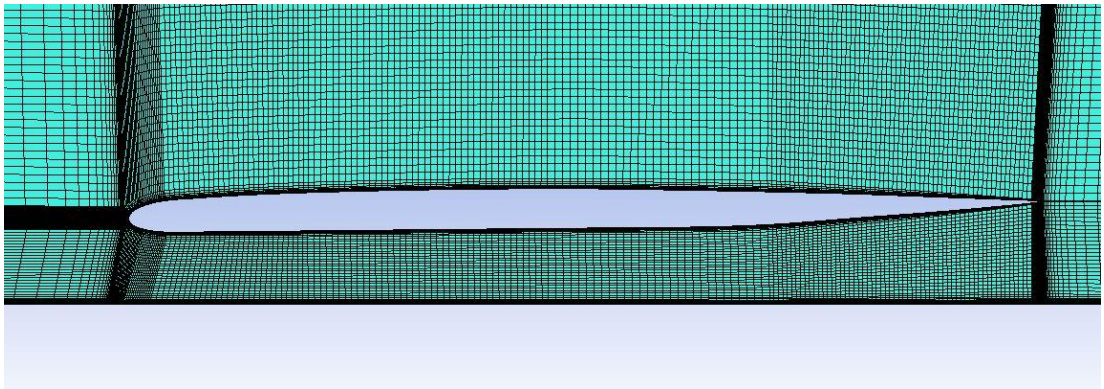


Figura 4.29: Detalle de la malla del perfil L2 del modelo mejorado.

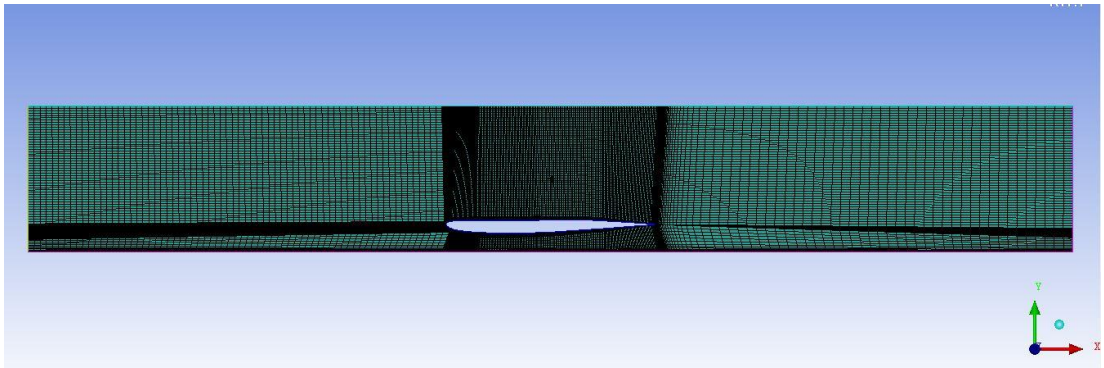


Figura 4.30: Malla del perfil invertido L1 del modelo original.

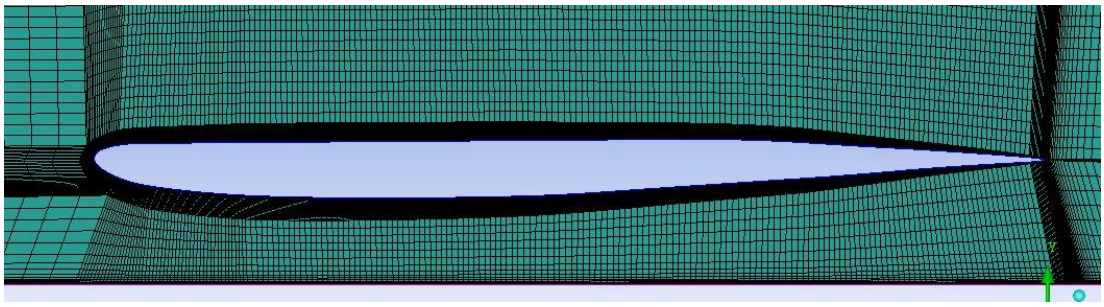


Figura 4.31: Detalle de la malla del perfil invertido L1 del modelo original.