



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**OPTIMIZACIÓN AERODINÁMICA DEL CARENADO DE UN VEHÍCULO TIPO
KART BASADA EN CFD, ORIENTADA A LA REDUCCIÓN DEL COEFICIENTE
DE ARRASTRE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Automotriz

AUTOR: DOLFER JOSHUE LAVAYEN TIGRERO
JORDAN ARIEL TORRES LOPEZ

TUTOR: ING. PAUL HERNAN TOTOY MONTERO

Guayaquil – Ecuador

2025

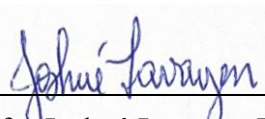
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Dolfer Joshué Lavayen Tigrero con documento de identificación N° 0958568735 y Jordan Ariel Torres López con documento de identificación N° 0850075599; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

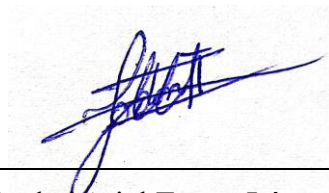
Guayaquil, 22 de agosto del año 2025

Atentamente,



Dolfer Joshué Lavayen Tigrero

0958568735



Jordan Ariel Torres López

0850075599

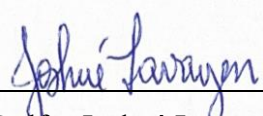
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Dolfer Joshué Lavayen Tigrero con documento de identificación No. 0958568735 y Jordan Ariel Torres López con documento de identificación No. 0850075599, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Optimización aerodinámica del carenado de un vehículo tipo kart basada en CFD, orientada a la reducción del coeficiente de arrastre”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

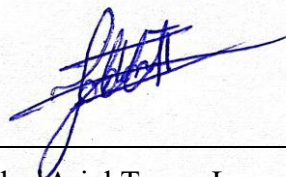
Guayaquil, 22 de agosto del año 2025

Atentamente,



Dolfer Joshué Lavayen

0958568735



Jordan Ariel Torres Lopez

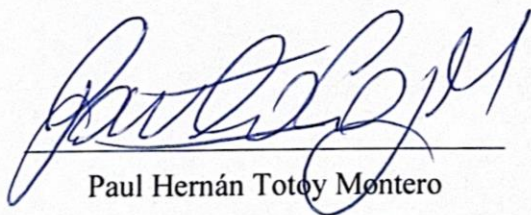
0850075599

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paul Hernán Totoy Montero con documento de identificación N° 1722909395, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN AERODINÁMICA DEL CARENADO DE UN VEHÍCULO TIPO KART BASADA EN CFD, ORIENTADA A LA REDUCCIÓN DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE, realizado por Dolfer Joshué Lavayen Tigrero con documento de identificación N° 0958568735 y por Jordan Ariel Torres López con documento de identificación N° 0850075599, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 22 de agosto del año 2025

Atentamente,



Paul Hernán Totoy Montero

1722909395

DEDICATORIA

Dedico este trabajo al señor todo poderoso Dios, quien me ha brindado la sabiduría y fortaleza para poder cumplir con mis ámbitos académicos, a mi abuelo el Ing. Augusto Tigrero González el cual es mi ejemplo a seguir por su gran esfuerzo y dedicación al aprendizaje, a mi madre la Lic. Maribel Tigrero la cual es mi pilar fundamental en mi crecimiento académico, por siempre guiarme al camino del bien y creer en mí.

Dolfer Joshue Lavayen Tigrero

Dedico este trabajo a quienes estuvieron a mi lado durante todo este proceso, incluso en los momentos en que me costó avanzar, a mi familia, por su comprensión, apoyo incondicional y por sostenerme cuando sentí que no podía más. Su amor y paciencia fueron fundamentales para llegar hasta aquí, a las personas que me alentaron a no abandonar, que creyeron en mí incluso cuando yo no estaba tan presente como debería, esta meta también es suya, este logro no es perfecto, pero es real. Y a pesar de las dificultades, representa un paso importante en mi camino personal y académico.

Jordan Ariel Torres Lopez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios porque sé que él es quien me da la fuerza para levantarme cada vez que siento que algo es imposible de lograr, a mi abuelo Ing. Augusto Tigreiro por siempre estar pendiente de mis estudios, agradezco enormemente a mi madre por su gran esfuerzo, sacrificio de poder brindarme los estudios y poder formalizarme en el ámbito profesional y por creer en mí en cada decisión que tomé, agradezco a mi tutor el Ing. Paul Totoy Montero por su inmensa paciencia en este proceso de titulación por brindarme sus conocimientos, agradezco a mis tías por brindarme palabras de aliento y consejos a seguir, agradezco a Madeleine quien me alentó a no rendirme cuando quería tirar la toalla, agradezco a mi amigo Joel por ser una gran persona dando palabras de aliento, y todas las personas que me dieron el apoyo necesario para motivarme a seguir en este camino.

Dolfer Joshue Lavayen Tigreiro

Agradezco a todas las personas que han sido parte de este proceso y han contribuido a que este proyecto sea posible, a mi tutor de tesis el Ing. Paul Totoy gracias por su guía, paciencia y valiosas observaciones que enriquecieron este trabajo desde el inicio. Su experiencia y disposición marcaron una diferencia fundamental en mi formación académica, a mis compañeros y amigos, por su compañía, apoyo emocional y por los momentos compartidos que hicieron más llevadero este camino y por supuesto, a mi familia, por su amor constante, su apoyo incondicional y por ser mi refugio en los días difíciles. Este logro también es suyo, gracias a todos los que, de una u otra forma, estuvieron presentes en este proceso.

Jordan Ariel Torres Lopez

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen:.....	1
1. Introducción	1
2. Materiales y Métodos	4
2.1. Digitalización de geometría.....	4
2.2. Configuración túnel de viento	5
2.3. Técnicas de mallado	5
2.4. Condiciones de frontera.....	6
2.5. Modelo matemático	7
2.6. Modificaciones y fundamentos.....	7
2.6.1. Metodología experimental de primera mejora aerodinámica	7
2.6.2. Metodología experimental de segunda mejora aerodinámica	7
2.6.3. Metodología experimental de tercera mejora aerodinámica.....	7
3. Resultados	8
3.1. Estudio convergencia de malla	8
3.2. Geometría del kart.	8
3.2. Análisis de coeficiente de arrastre.	8
3.3. Análisis de fuerza de arrastre.....	9
3.3. Análisis de mayores puntos de presión.....	10
3.4. Análisis de velocidad de aire.	11
4. Discusión.....	13
5. Conclusiones	14
Apéndice A. Gráficas de Análisis Aerodinámico de Carenado Original	15
Apéndice B. Graficas Carenado Primera Propuesta	16
Apéndice C. Graficas Carenado Segunda Propuesta	18
Apéndice D. Graficas Carenado Tercera Propuesta.....	19
Referencias.....	20

Artículo

Optimización aerodinámica del carenado de un vehículo tipo kart basada en CFD, orientada a la reducción del coeficiente de arrastre

Dolfer Lavayen¹, Jordan Torres² y Paul Totoy³

¹ Universidad Politécnica Salesiana; dlavayent@est.ups.edu.ec

² Universidad Politécnica Salesiana; jtorres13@est.ups.edu.ec

³ Universidad Politécnica Salesiana; ptotoy@ups.edu.ec

Resumen:

Este estudio tiene como objetivo optimizar el carenado de un vehículo tipo kart para mejorar su eficiencia aerodinámica y reducir el coeficiente de arrastre, parámetro clave que influye en el consumo energético y la estabilidad. La investigación parte de la identificación de deficiencias en diseños convencionales, caracterizados por alta resistencia al avance y bajo aprovechamiento de la carga aerodinámica. Para abordarlo, se aplicaron técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) combinadas con escaneo 3D, modelado CAD y mallas de alta resolución, permitiendo evaluar el flujo de aire y proponer mejoras sin fabricar prototipos físicos. Se desarrollaron tres configuraciones optimizadas orientadas a mejorar la canalización del flujo, reducir zonas de alta presión y principalmente reducir el coeficiente de arrastre. Los resultados mostraron que, mediante modificaciones justificadas de la geometría del carenado original, se reduce el coeficiente de arrastre, generando beneficios en rendimiento, eficiencia y seguridad. Se logró la reducción de coeficiente aerodinámico obteniendo valores de 0,27 como valor inicial respecto al modelo original y mejoras de 0,22, 0,24. El uso de herramientas CFD en etapas iniciales de diseño es una estrategia eficiente y de bajo costo para desarrollar vehículos competitivos. El trabajo sienta bases para futuras investigaciones, recomendando evaluar las mejoras en condiciones reales.

Palabras clave: aerodinámica; CFD; coeficiente de arrastre; optimización de carenado; simulación computacional.

This study focus on optimizing the body shield of a kart-type vehicle to improve its aerodynamic efficiency and reduce the drag coefficient, a key parameter influencing energy consumption and stability. The research is based on the identification of deficiencies in conventional designs, characterized by high drag and poor aerodynamic load utilization. To overcome these deficiencies, Computational Fluid Dynamics (CFD) techniques combined with 3D scanning, CAD modeling, and high-resolution meshes were applied, allowing airflow evaluation and improvements to be proposed without manufacturing physical prototypes. Three optimized configurations were developed to improve flow channeling, reduce high-pressure zones, and primarily reduce the drag coefficient. The results showed that justified modifications to the original fairing geometry reduced the drag coefficient, generating benefits in performance, efficiency, and safety. The reduction in the drag coefficient was achieved, obtaining values of 0.27 as an initial value compared to the original model, and improvements of 0.22 and 0.24. The use of CFD tools in early design stages is an efficient and low-cost strategy for developing competitive vehicles. The work lays the groundwork for future research, recommending that improvements be evaluated under real-life conditions.

Keywords: aerodynamics; CFD; drag coefficient; body shield optimization; computational simulation.

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2023 por los autores. Presentado para su posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de Creative Commons Attribution license.

1. Introducción

La aerodinámica desempeña un papel fundamental en el rendimiento tanto de vehículos de competición, como los go-karts. Donde la optimización del carenado y las formas de

la carrocería puede mejorar sustancialmente las prestaciones como una reducción del arrastre, reflejándose en mayores velocidades punta o aceleraciones más rápidas, al mismo tiempo que incrementa la estabilidad y seguridad en curvas [1]. En este sentido, un diseño enfocado en la reducción del coeficiente de arrastre permite atravesar el flujo de aire con menor resistencia, lo que se traduce en un desplazamiento más eficiente.

Actualmente, existe un reconocimiento creciente sobre las limitaciones aerodinámicas en el ámbito de la ingeniería automotriz, particularmente en los go-karts. Por ello, las investigaciones contemporáneas se orientan a incrementar la eficiencia aerodinámica con el objetivo de mejorar el rendimiento global del vehículo. Las principales deficiencias detectadas en este campo se relacionan con diseños de carenados poco optimizados, una elevada resistencia al avance y una baja generación de carga aerodinámica útil. Estos aspectos constituyen problemáticas clave que la presente investigación pretende abordar mediante propuestas de mejora aerodinámica [2].

El carenado es una cubierta externa que recubre parcial o totalmente la estructura de un vehículo. Su función principal es canalizar el flujo de aire de forma eficiente para reducir la resistencia aerodinámica, evitar la formación de zonas de turbulencia y, en algunos casos, generar carga aerodinámica negativa. El diseño del carenado debe considerar transiciones suaves, formas estilizadas y superficies continuas que minimicen las perturbaciones en el flujo de aire [3]. Además, la incorporación de carenados optimizados desde el punto de vista aerodinámico ofrece beneficios significativos. En términos de rendimiento, la disminución del coeficiente de arrastre y el aumento de la carga aerodinámica útil no solo incrementan la velocidad y estabilidad del vehículo, sino que también permiten un mejor aprovechamiento de la energía disponible [4].

Como resultado, esta optimización se traduce en una conducción más segura y predecible, con vueltas más consistentes en contextos de competición, así como en una mayor autonomía en aplicaciones recreativas y profesionales. Desde una perspectiva integral, los beneficios alcanzan a todos los actores implicados pilotos, ingenieros y fabricantes al reducirse los costos operativos, mejorar la experiencia de conducción y favorecer el cumplimiento de metas de sostenibilidad en el sector automotriz [5].

Se destaca que la presión aerodinámica influye de manera directa en el comportamiento dinámico de los go-karts, determinando factores como la resistencia al avance, la estabilidad y la adherencia en curvas. En términos generales, las zonas de alta presión, ubicadas principalmente en la parte frontal del vehículo, generan una fuerza opuesta al movimiento que incrementa el coeficiente de arrastre (C_d), lo que obliga al motor a emplear mayor potencia para mantener la velocidad deseada [6].

En consecuencia, las deficiencias aerodinámicas no solo afectan el rendimiento técnico, sino que también inciden directamente sobre los principales actores involucrados. En el caso de los pilotos, enfrentan vehículos con menor estabilidad y control, especialmente a altas velocidades, debido a la falta de carga aerodinámica negativa que compromete el agarre en curvas. Históricamente, el diseño estructural de los go-karts ha priorizado la simplicidad por encima de la aerodinámica, lo cual ha limitado su potencial dinámico. Como resultado, esta tendencia repercute directamente en la gestión energética del vehículo: si no se optimiza la aerodinámica, a velocidades de 100 km/h, el consumo energético puede incrementarse hasta en un 59 % en vehículos kart eléctricos, en comparación con un 13 % en aquellos con motor de combustión interna [7].

Por otra parte, es necesario comprender la relación existente entre velocidad y resistencia aerodinámica para dimensionar el problema con mayor precisión. Por ejemplo, a 100 km/h, la resistencia al avance puede representar aproximadamente el 60 % de las fuerzas totales que el vehículo debe superar para mantener su movimiento. Es importante destacar que esta resistencia crece de forma proporcional al cuadrado de la velocidad, mientras que la potencia necesaria para vencerla se incrementa con el cubo de esta. En este sentido, incluso ajustes mínimos en el diseño del carenado pueden generar mejoras sustanciales en la eficiencia energética y el desempeño global del kart [8].

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), por sus siglas en inglés es una herramienta de simulación digital que permite modelar y analizar el comportamiento del flujo de fluidos en contacto con superficies sólidas. En ingeniería automotriz, el CFD se utiliza para predecir patrones de flujo, distribución de presiones y zonas de turbulencia alrededor del vehículo. Esta técnica permite validar diseños aerodinámicos sin necesidad de fabricar prototipos físicos, reduciendo costos y tiempos de desarrollo [9].

Para optimizar estos aspectos, se recurre con frecuencia al uso de CFD, aplicada a modelos tridimensionales desarrollados en software CAD [10], esta técnica permite detectar áreas críticas donde se produce resistencia y separación del flujo de aire, lo que facilita la modificación del carenado con el fin de mejorar la eficiencia aerodinámica [6].

En el estudio realizado por [10] abordó el diseño aerodinámico de un monoplaza eléctrico de competición dentro del marco de la competencia Formula Student. La investigación incluyó tanto el modelado geométrico del vehículo como la simulación del flujo de aire mediante herramientas CFD. El diseño de la carrocería se creó tomando como inspiración formas biológicas eficientes, como las gotas de agua y los cuerpos de delfines, conocidas por su capacidad para reducir el coeficiente de arrastre. Se empleó el modelo de turbulencia SST $k-\omega$ en un entorno tridimensional para simular las condiciones del flujo alrededor del vehículo. El contorno de presión, velocidad y flujo de aire aerodinámico se observa en la figura 1 donde su valor inicial de resistencia aerodinámica fue de 43.5N logrando una reducción del 29.89% obteniendo 30.5N como valor final, en referencia a esta investigación se propone diseñar modificaciones aerodinámicas orientadas a la reducción del coeficiente aerodinámico [10].

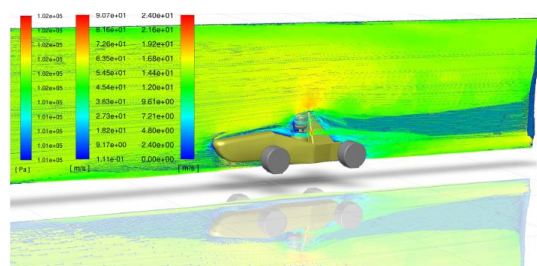


Figura 1: Presión, velocidad y flujo de aire aerodinámicos. [10]

El estudio de [11] realizó un análisis aerodinámico del coche de competición eléctrico del ISC Formula Student mediante simulaciones CFD utilizando el software Ansys Fluent. Se compararon dos modelos: el del año 2020 con el del 2021, evaluando variables como el arrastre, la sustentación y las distribuciones de presión y velocidad [11].

Las simulaciones permitieron identificar mejoras en el rendimiento aerodinámico del nuevo modelo, proponiendo ajustes en el diseño del carenado en la parte frontal, modificando la geometría delantera para optimizar la eficiencia y la estabilidad del vehículo [11].

En la figura 2 se observa una comparación entre monoplazas de distintos años tanto como monoplaza del año 2020 (a) que tiene una carrocería frontal cuadrada y el monoplaza 2021 (b) donde rediseñó la carrocería frontal en forma de cuerpo de delfín obteniendo valores de reducción de fuerza de sustentación de 7% del modelo 2021 con respecto al modelo 2020.

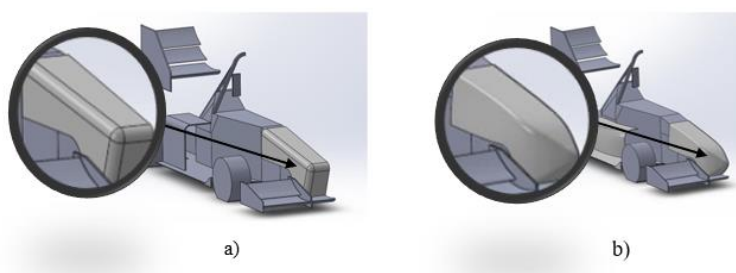


Figura 2: Modelos de los monoplazas simulados. (a) Modelo año 2020; (b) Modelo año 2021. [11]

La combinación de escaneo 3D y simulación CFD es una práctica común en la industria automotriz para optimizar el diseño de vehículos y mejorar su eficiencia aerodinámica buscando obtener modelos digitalizados de los originales, abordando la mayor cantidad de detalles posibles. [12]

Por lo mencionado, el presente trabajo busca contribuir al diseño de un carenado aerodinámicamente optimizado para un prototipo tipo kart, mediante el uso de herramientas (CFD). El problema que se aborda es la ausencia de soluciones técnicas que mejoren el coeficiente de arrastre en vehículos ligeros como los go-karts, los cuales históricamente han priorizado estructuras simples sin considerar criterios aerodinámicos. Esta omisión conlleva un aumento en la resistencia al avance, mayor consumo energético y pérdida de eficiencia dinámica. Se pretende demostrar que, a través de un diseño geométrico estratégico y la validación computacional del flujo, es posible reducir la resistencia aerodinámica contribuyendo así al desarrollo de vehículos más eficientes, y con mayor competitividad dentro del ámbito del automovilismo deportivo

Se establecen lineamientos de diseño que faciliten la reducción del coeficiente de arrastre, elemento crucial para optimizar la estabilidad y el desempeño del kart en condiciones reales, tanto en competición como en uso recreativo.

2. Materiales y Métodos

En esta sección se llevó a cabo un proceso integral que contempló la digitalización 3D del kart, la configuración del túnel de viento virtual, el mallado, la definición de condiciones de frontera y la aplicación de modelos matemáticos, etapas que permitieron posteriormente implementar modificaciones dirigidas a optimizar su desempeño aerodinámico.

2.1. Digitalización de geometría

El kart fue digitalizado utilizando un escáner 3D Einstar Shining 3D, el cual permitió capturar con alta precisión la geometría y las superficies del vehículo [13]. Durante el proceso, se efectuaron tomas desde diferentes ángulos para garantizar una cobertura completa, evitando zonas sin escanear. El software del equipo generó una nube de puntos representativa del modelo real, la cual fue depurada para eliminar elementos ajenos y corregir imperfecciones. A partir de esta nube de puntos, se obtuvo un archivo STL que reprodujo fielmente las superficies del carenado y componentes expuestos. Este modelo digital se utilizó como referencia para su reconstrucción en Autodesk Inventor, generando una geometría sólida apta para el mallado y el análisis aerodinámico posterior en ANSYS Fluent. En la figura 3 se muestra un archivo stl con una nube de puntos referente al Kart eléctrico escaneado (a), también se muestra un sólido del kart eléctrico realizado en programa autodesk inventor (b).

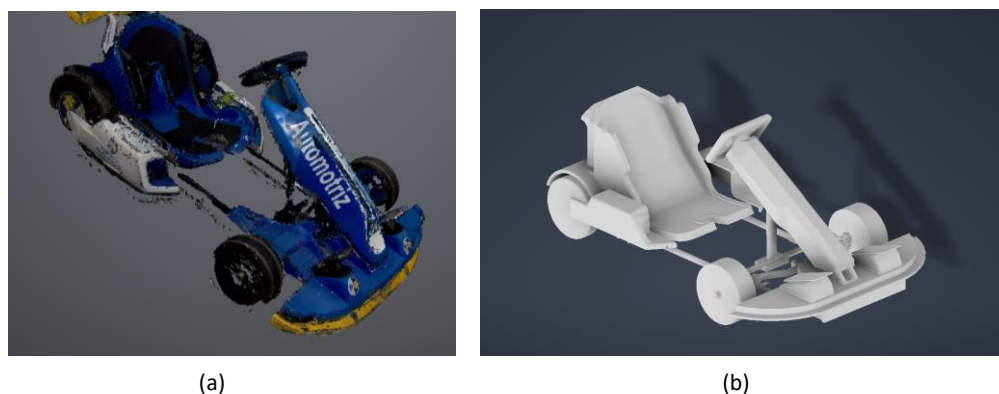


Figura 3: (a) Generación nube de puntos a partir de escaneo 3D; (b) Kart eléctrico realizado en programa Autodesk Inventor

Este estudio se enfoca en la optimización del carenado del kart eléctrico por lo cual el piloto es un factor secundario debido a su diversidad de geometría ya sea de 1,50 m 1,60m 1,70m el cual es un valor variable y no se obtiene un valor estable, varios autores

optan por modelar primero el vehículo “limpio” para cuantificar mejoras en carrocería o alerones [14].

2.2. Configuración túnel de viento

Para la creación del túnel de viento se tomó en cuenta el trabajo de [15] donde recomiendan crear un dominio rectangular generoso con medidas $3*L - 2.5*L$, donde L es la longitud característica del vehículo, la entrada del túnel se ubicó a unos $4*L$ de la nariz del vehículo y la salida $6L$ desde la parte posterior del kart, permitiendo el desarrollo del flujo y disipación del remolino de estela. Dado que el kart eléctrico a estudiar tiene una longitud de 1,35m se procedió hacer el cálculo para las correctas medidas del dominio donde se obtuvo las medidas descritas en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros túnel de viento [15]

Parámetro	Fórmula	Resultado	Descripción
Longitud total del dominio	-----	15 019	Longitud completa del túnel de viento
Ancho total del dominio	3×1350	4 050	Espacio lateral total
Altura total del dominio	2.5×1350	3 375	Altura libre del túnel
Desde entrada al kart	4×1350	5 400	Distancia desde la entrada hasta la nariz del kart
Desde el kart a la salida	6×1350	8 100	Distancia desde la parte trasera del kart hasta la salida

Para reducir recursos computacionales y tiempo de cálculo se optó por realizar el estudio con la mitad del kart, esto es posible debido a que el vehículo consta con una simetría en el plano vertical a lo largo de su eje longitudinal [16] así se indica la Figura 4.

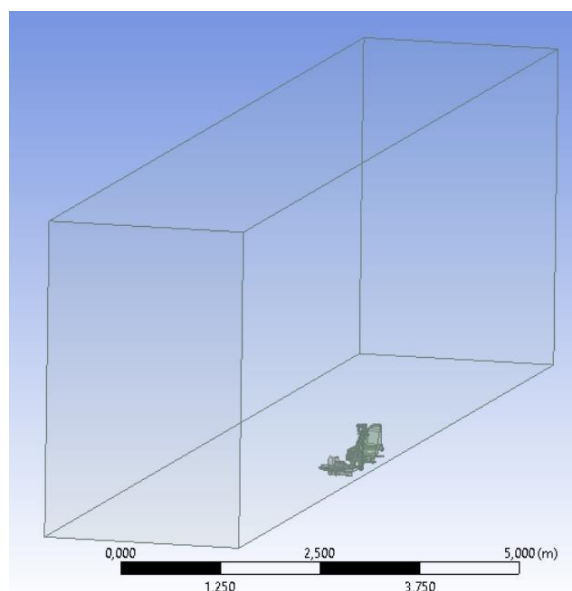


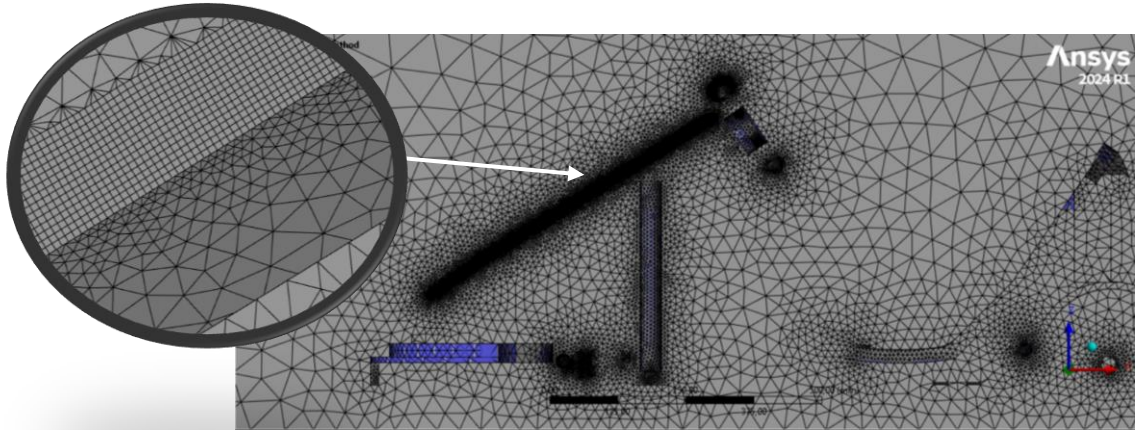
Figura 4: Dominio de simulación túnel de viento Kart eléctrico realizado en programa ANSYS

2.3. Técnicas de mallado

La malla utilizada en el presente estudio siguió la configuración mostrada en la Tabla 2, aplicando diferentes niveles de refinamiento en el dominio y en las zonas cercanas a la pared para capturar con mayor precisión los efectos asociados a la capa límite y la distribución del flujo alrededor del vehículo, garantizando así una adecuada resolución de las características aerodinámicas clave, como se aprecia en la figura 5.

Tabla 2. Técnicas de mallado

Refinamiento	General	Mayor precisión
kart	80 mm	20 mm
Perfil del kart	8 mm	0,5 mm
Método de mallado	Elementos tetraédricos	
Tasa de crecimiento (<i>Growth Rate</i>)	1,1	
Número de capas (<i>Layers</i>)	15	

**Figura 5:** Malla de volúmenes finitos de alta densidad método de lo tetraedros

Para el cálculo de la capa límite se empleó la fórmula clásica de Blasius descrita en la ecuación (1), la cual permite estimar el desarrollo del espesor de capa límite de un cuerpo sometido a un flujo uniforme. Donde se obtiene como resultado 0,0055m. La fórmula empleada está descrita por [17] a continuación:

$$\delta = \frac{5x}{\sqrt{Re}} \quad (1)$$

Donde:

δ : Corresponde al espesor de capa limite

x : Es la longitud de elemento a ser estudiado

Re : Corresponde al número de Reynolds

2.4. Condiciones de frontera

Los valores de condiciones de frontera empleados en los diferentes estudios aerodinámicos se mencionan en la Tabla 3 a continuación.

Tabla 3. Parámetros de estudio

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Velocidad de entrada del fluido (Inlet)	16,667	m/s	[18]
Viscosidad cinemática del aire	1.5×10^{-5}	m ² /s	[19]
Temperatura del entorno	299.15 (26)	K (°C)	[20]
Presión de salida	101100	Pa	[20]
Valor de densidad del aire	1.1777	kg/m ³	[20]

Además, se consideró el piso del túnel de viento como una pared fija, este simuló la calzada, mientras que las paredes laterales y superiores del túnel de viento tuvieron condiciones de deslizamiento libre, ya que el flujo externo lejos del vehículo no es relevante. Sobre la superficie del carenado se aplicó condiciones de No-Slip con el fin de capturar la capa límite aerodinámica.

2.5. Modelo matemático

Para el modelado de la turbulencia se seleccionó el esquema $k-\omega$ SST (Shear Stress Transport) dentro del módulo Viscous Model de ANSYS Fluent, debido a su capacidad para predecir con precisión fenómenos de separación de flujo bajo gradientes de presión adversos y su versatilidad para manejar tanto la región cercana a la pared como el flujo libre. El modelo SST combina las ventajas del $k-\omega$ en la zona próxima a la pared permitiendo un adecuado tratamiento de la capa límite sin necesidad de funciones de pared con las del $k-\epsilon$ en la región lejana, reduciendo así la dependencia de las condiciones de contorno [21].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla (\rho v) = 0 \quad (2)$$

Donde:

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$; Representa la derivada parcial de la densidad

$\nabla (\rho v)$; Corresponde a la divergencia del flujo de masa

0: Indica que no hay creación ni destrucción de masa dentro del volumen de control.

2.6. Modificaciones y fundamentos

En este apartado se explica la metodología utilizada para las modificaciones de geometría.

2.6.1. Metodología experimental de primera mejora aerodinámica

En la primera mejora aerodinámica se empleó un alerón delantero en referencia al trabajo de [22] donde llevó a cabo un estudio orientado a analizar el efecto de distintas modificaciones en el rendimiento aerodinámico de un monoplaza de tipo Fórmula SAE. Entre las soluciones evaluadas, la incorporación de un alerón delantero en uno de los modelos destacó como una de las más efectivas, ya que contribuyó tanto a mejorar la estabilidad del vehículo como a disminuir la fuerza de sustentación indeseada. Incluir un alerón delantero tiene el objetivo de generar fuerza descendente que incremente la adherencia del eje delantero al pavimento. El autor obtuvo una reducción del 17,85%, el cual logró alterar la dinámica del flujo en la zona inferior del vehículo, acelerando el paso del aire y produciendo una región de baja presión controlada que ejercía un empuje descendente sobre la estructura [22].

2.6.2. Metodología experimental de segunda mejora aerodinámica

En la segunda modificación aerodinámica se incorporó un alerón delantero con geometría curvada, inspirado en la propuesta de [23] para el diseño de un alerón de kart de competición mediante simulaciones CFD. Esta configuración busca optimizar la canalización del flujo hacia las zonas laterales y la parte inferior del vehículo, logrando una distribución de presiones más equilibrada en la sección frontal. La curvatura del perfil dirige parte del flujo hacia las ruedas delanteras y los costados del carenado, lo que reduce la concentración de alta presión en el morro y contribuye a disminuir el arrastre por presión. Esta propuesta se caracteriza por emplear siluetas con formas orgánicas sin transiciones agresivas en su geometría. Asimismo, esta disposición favorece la adherencia del flujo en la parte inferior del vehículo, mejorando la estabilidad y el balance aerodinámico durante la circulación a altas velocidades obteniendo como resultado la reducción del 10 % del coeficiente aerodinámico [23].

2.6.3. Metodología experimental de tercera mejora aerodinámica

En la tercera optimización del carenado se incluyó un recubrimiento frontal semicerrado donde se identificaron zonas de alta resistencia al avance demostrando que la modificación de la geometría del carenado tales como ensanchamiento del bumper delantero y la defensa de la columna de la dirección pueden mejorar el comportamiento aerodinámico del vehículo para esta modificación se tuvo constancia el trabajo de [6] quien empleó simulaciones (CFD) en ANSYS Fluent para evaluar y optimizar el comportamiento aerodinámico de un kart teniendo como resultados reducciones del coeficiente aerodinámico del 10.33% respecto a su valor inicial [6].

3. Resultados

Para garantizar la independencia de la solución respecto a la malla, se llevó a cabo pruebas de convergencia de malla, tomando como variable de control la fuerza de arrastre (F_d) el estudio de convergencia de malla se detalla en la Tabla 4.

3.1. Estudio convergencia de malla

Tabla 4. Estudio convergencia de malla

Malla (mm)	Nodos	Elementos	F_d (N)
250	1255590	3925459	22,765598
200	1280729	4059728	22,513512
150	1327129	4307152	22,472155
100	1418394	4796682	22,439787
50	1880368	7354329	22,120508

El estudio de convergencia de malla evidenció una disminución progresiva mínima de la fuerza de arrastre (F_d) conforme se incrementó la densidad de la malla. Al reducir el tamaño de celda de 250 mm a 50 mm, la F_d pasó de 22,7656 N a 22,1205 N, lo que refleja cambios no significativos. No obstante, este refinamiento implica un incremento considerable en el costo computacional, ya que el número de elementos aumentó de 3,9 millones en la malla más gruesa a 7,3 millones en la más fina. La diferencia entre las dos mallas más refinadas, de 100 mm y 50 mm, resultó efectiva ($F_d = 22,4398$ N y 22,1205 N, respectivamente). En consecuencia, la malla de 100 mm se adoptó como referencia para el análisis final se reconoció como una malla equilibrada.

3.2. Geometría del kart.

Como se puede apreciar en la Figura 6 la imagen (a) representa el carenado original del kart, en la imagen (b) se puede observar el kart con un alerón frontal y silueta con cambios no tan agresivos buscando asemejarse a figuras naturales, en la imagen (c) se incluyó un alerón frontal curvo y un recubrimiento del volante en forma de cuerpo de delfín, seguido de la imagen (d) que tiene incluido un recubrimiento frontal semicerrado.

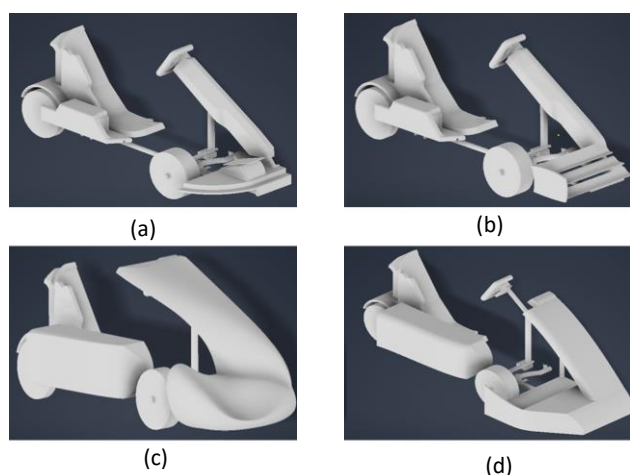
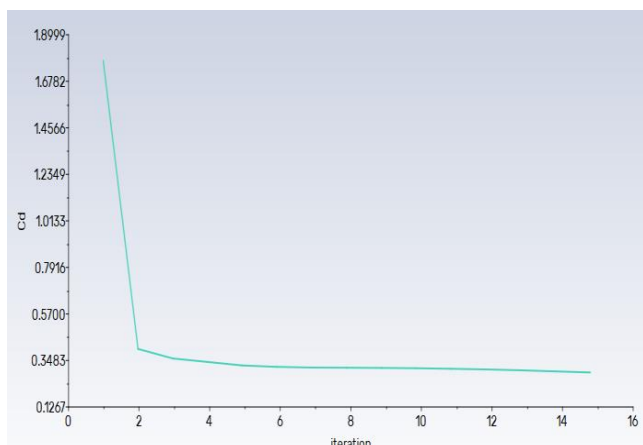


Figura 6: Carenado original (a), primera mejora (b), segunda mejora (c), tercera mejora aerodinámica (d).

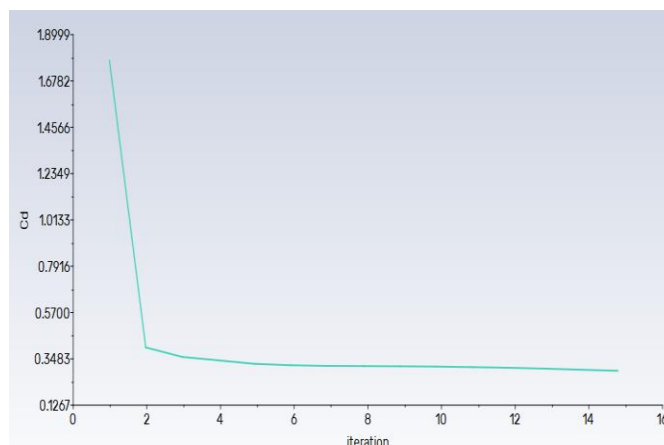
3.2. Análisis de coeficiente de arrastre.

De acuerdo con lo ilustrado en la Figura 7, partiendo del valor inicial del coeficiente de arrastre del carenado original ($C_d = 0,2743$) correspondiente a la gráfica (a), se efectuó una comparación con las tres propuestas de mejora aerodinámica, observándose en todos los casos una reducción del arrastre. La primera propuesta grafica (b) registró un $C_d = 0,24099$, lo que representa una disminución del 12,15 % respecto al modelo base; la

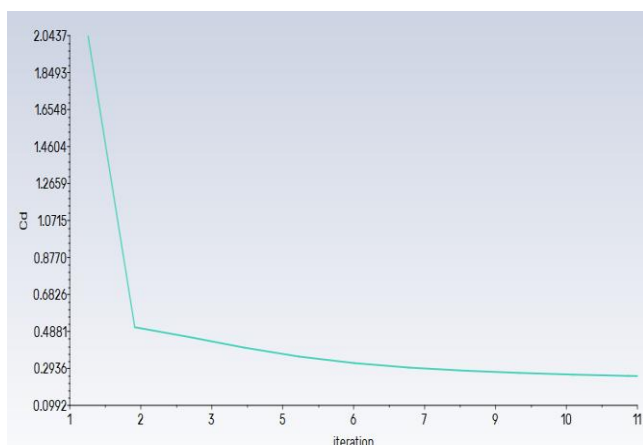
segunda propuesta grafica (c) alcanzó un $C_d = 0,2465$, correspondiente a una reducción del 10,15 %. Finalmente, la tercera configuración evidenció el mejor desempeño gráfica (d), con un $C_d = 0,2216$, equivalente a una disminución del 19,20 % en comparación con el diseño original, consolidándose como la alternativa más eficiente desde la perspectiva aerodinámica.



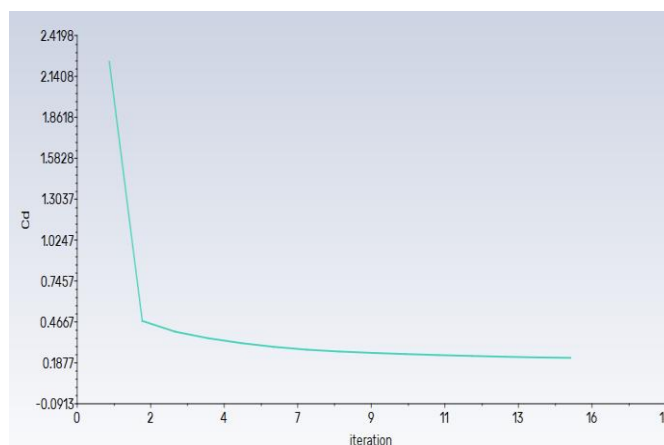
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7: (a) Gráfica de coeficiente de arrastre carenado original; (b) Gráfica de coeficiente de arrastre primera propuesta; (c) Gráfica de coeficiente de arrastre segunda propuesta; (d) Gráfica de coeficiente de arrastre tercera propuesta.

3.3. Análisis de fuerza de arrastre.

Según se muestra en la Figura 8 se considera como valor inicial la fuerza de arrastre del carenado original, que alcanzó un valor de 22,67 N gráfica (a), en la gráfica de la primera mejora aerodinámica (b) se observa que se redujo este parámetro a 19,91 N, lo que representa una disminución significativa frente al diseño base. En contraste, la segunda propuesta correspondiente a la gráfica (c) registró un incremento hasta 23,10 N, superando incluso el valor inicial y evidenciando un desempeño menos favorable esto debido a su cambio de área frontal. Por su parte, la tercera configuración correspondiente a la gráfica (d) alcanzó 20,82 N, lo que afirma también una reducción respecto al carenado original, aunque menos marcada que en la primera propuesta.

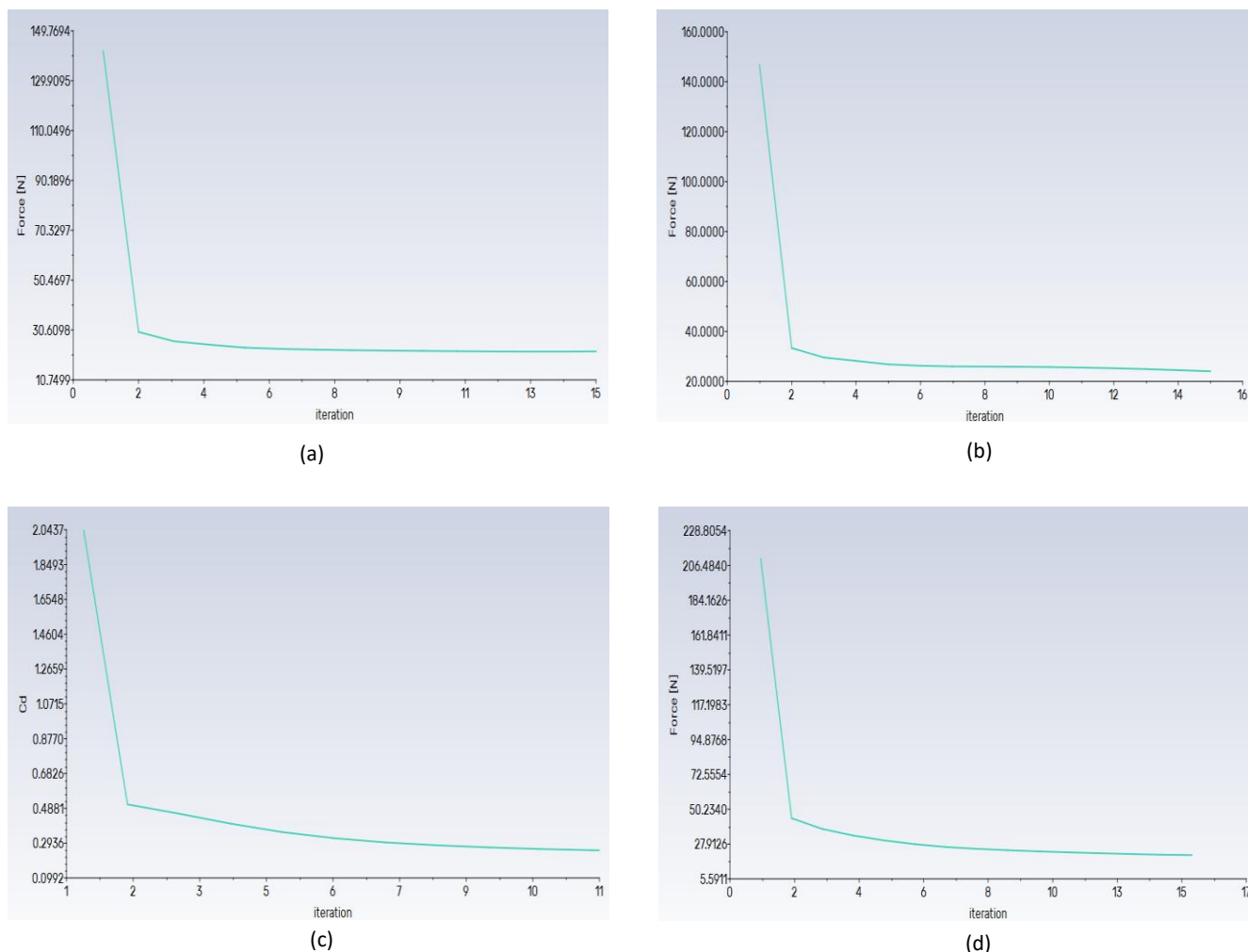


Figura 8: Gráfica de fuerza de arrastre carenado original (a), Gráfica de fuerza de arrastre primera mejora (b), Gráfica de fuerza de arrastre segunda mejora (c), Gráfica de fuerza de arrastre tercera mejora aerodinámica (d).

3.3. Análisis de mayores puntos de presión.

Según se observa en la Figura 9 las gráficas de mayor punto de presión del carenado original y de las diferentes propuestas de mejoras aerodinámicas, en la gráfica de puntos de mayor presión del carenado original (a) se visualiza un punto de mayor presión ubicado en la parte frontal del carenado seguido de un punto de presión en la parte inicial del recubrimiento frontal y también se visualiza un punto de mayor presión en el volante con valores de 101271 Pa y puntos de menor presión en una zona de gran tamaño ubicada en la parte posterior del asiento del kart con un valor de 10628 Pa, en la gráfica de la primera mejora aerodinámico (b) se observa un mayor punto de presión en el bastidor y parte del alerón frontal seguido de un punto de presión en el volante con un valor de 101272 Pa y puntos de menor presión en una zona pequeña detrás del asiento del kart con valores de 100233 Pa, para la gráfica de la segunda mejora aerodinámica (c) se observa un punto de mayor presión en el bumper curvo y parte del recubrimiento frontal este punto de mayor presión está distribuido de manera homogénea por todo el alerón con valor de 101264 Pa y por último se observa una gráfica de mayores puntos de presión correspondiente a la tercera mejora aerodinámica (d) donde su mayor punto de presión se ubica en parte del recubrimiento frontal del carenado del kart con un valor de 101264 Pa y su menor punto de presión se ubica por debajo del recubrimiento frontal con un valor de 100911Pa.

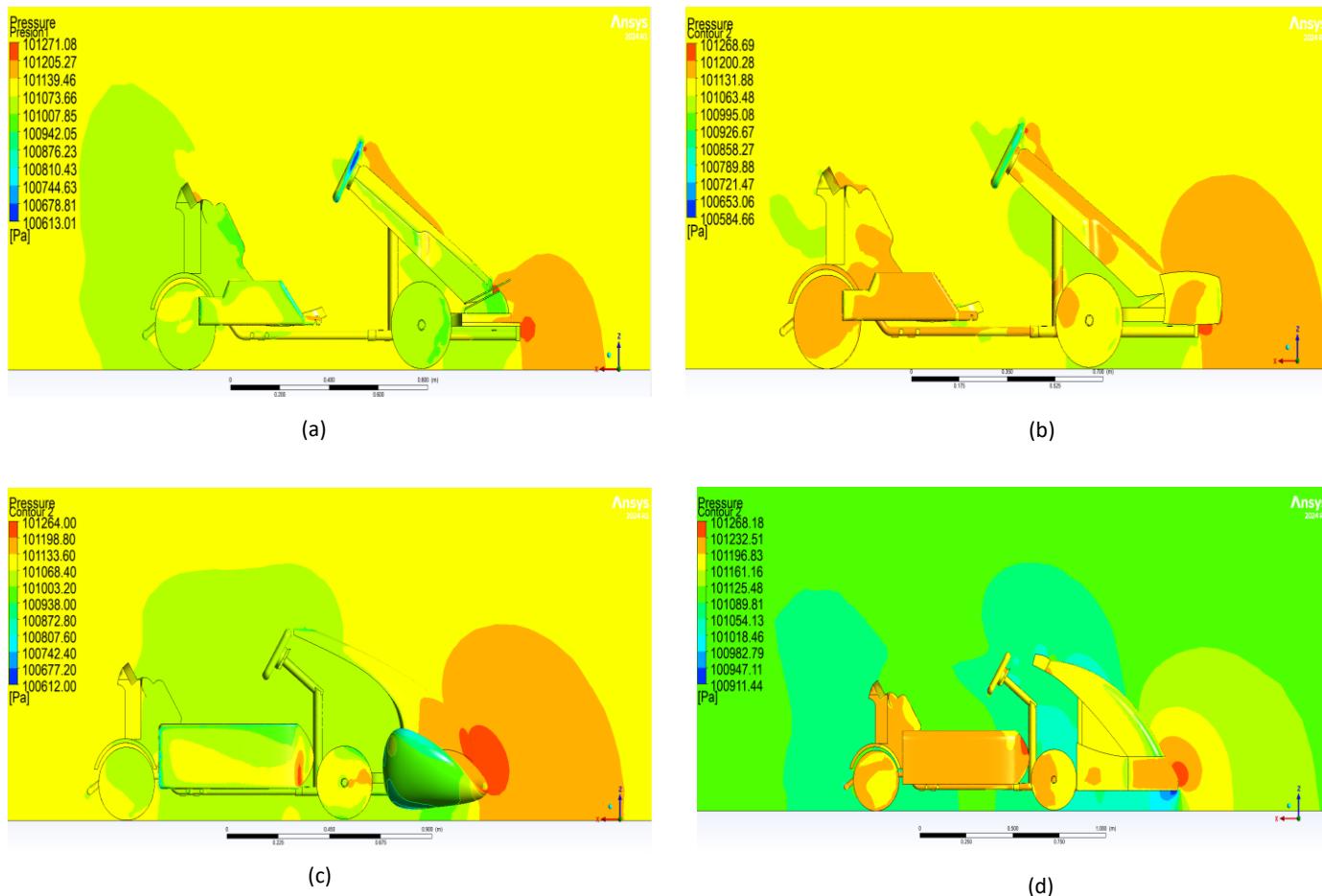


Figura 9: Gráfica puntos de mayor presión de carenado original (a), Gráfica puntos de mayor presión de primera mejora (b), Gráfica puntos de mayor presión de segunda mejora (c), Gráfica puntos de mayor presión de tercera mejora aerodinámica (d).

3.4. Análisis de velocidad de aire.

En la Figura 10 se aprecian líneas de corriente respecto a velocidades punta para el carenado original (a); para la primera mejora aerodinámica (b); para la segunda mejora aerodinámica (c); y para la tercera mejora aerodinámica (d).

Donde el análisis de velocidades del carenado original (a) se aprecia una velocidad media de 10 m/s del fluido, no se genera turbulencias al entrar en contacto el fluido con el carenado, pero si en la parte posterior del kart. Se observa que se generan mayores turbulencias en la parte posterior del asiento.

Para la primera mejora aerodinámica (b) tienen una velocidad media del fluido de 12 m/s esto es debido a que al momento de incluir el alerón el flujo del viento cambia, al comparar con el modelo original se puede apreciar que el fluido se acelera en la zona modificada, gráficamente se visualiza la generación de vórtices detrás del vehículo.

En la segunda mejora (c) se determina una velocidad media de 13 m/s un carenado con forma de delfín, gráficamente se observan grandes turbulencias una vez el fluido se desprende de la carrocería.

En la tercera mejora aerodinámica (d) se puede observar una velocidad media de fluido de 9 m/, el recubrimiento, aunque eficiente para cubrir ruedas y columna de dirección, tiende a bajar mucho su velocidad en la zona frontal. Es el modelo que menor cantidad de vórtices genera.

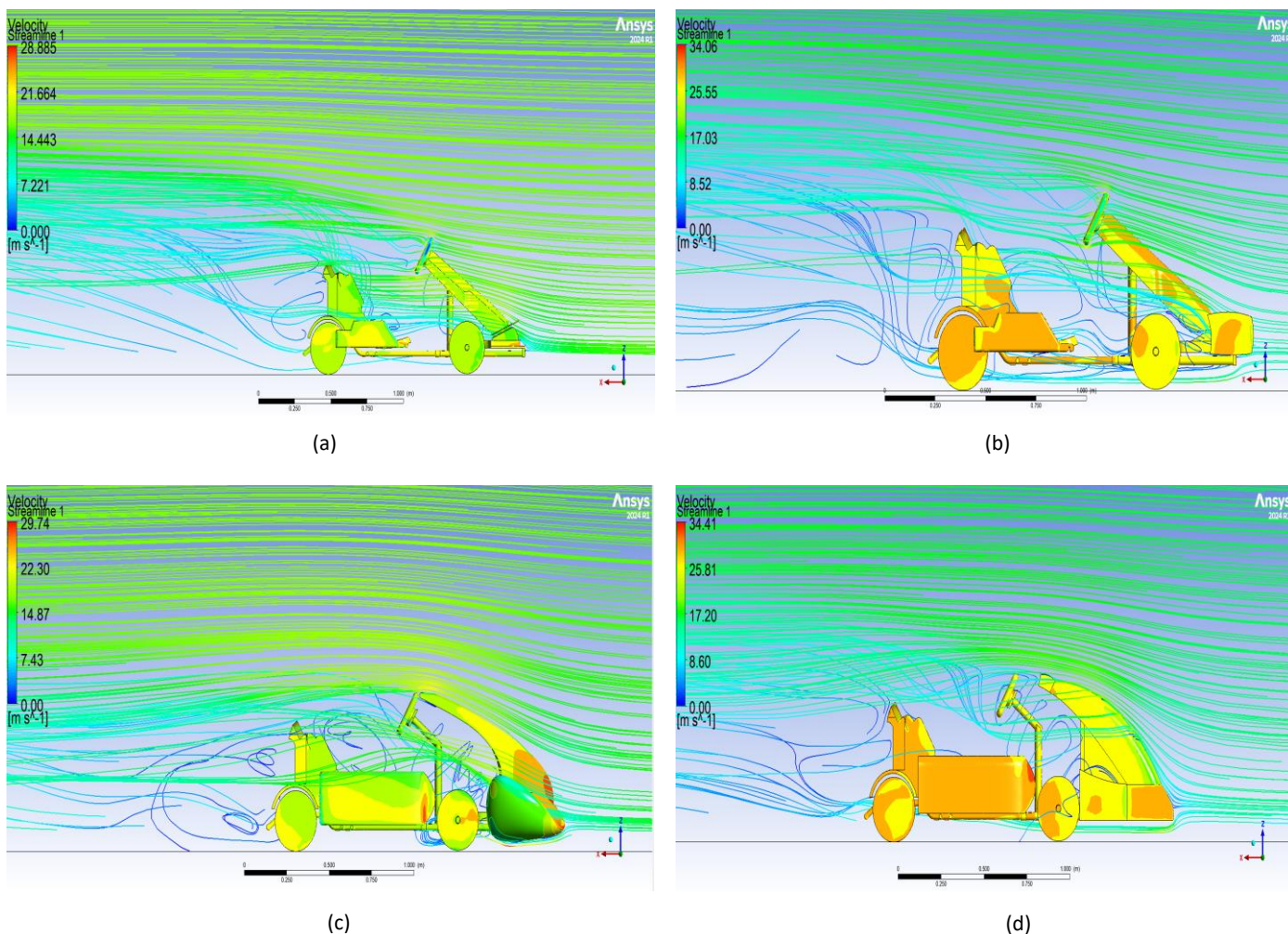


Figura 10: Gráfica StreamLine de carenado original (a), Gráfica StreamLine de primera mejora (b), Gráfica StreamLine presión de segunda mejora (c), Gráfica StreamLine presión de tercera mejora aerodinámica (d).

Con el fin de sintetizar de manera visual los parámetros más relevantes, se elaboró un gráfico estrella (Figura 11), que permite comparar de forma simultánea de los cuatro carenados evaluados.

Estudio Aerodinámico de Carenado

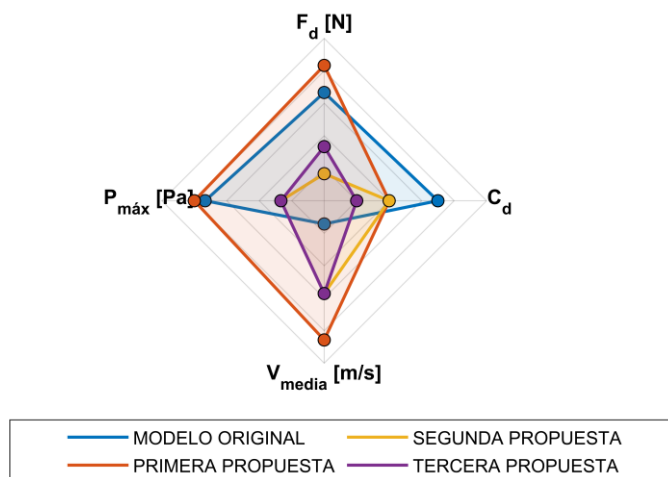


Figura 11: Gráfica estrella estudio aerodinámico carenado de Kart

El gráfico evidencia que la tercera propuesta presenta el equilibrio más favorable, al concentrar los valores más bajos de Cd y Fd sin comprometer la estabilidad del flujo. La primera propuesta muestra también una mejora notable respecto al diseño original, mientras que la segunda propuesta, aunque reduce el Cd, no logra disminuir de manera significativa la fuerza de arrastre.

4. Discusión

Se ratifica una correcta convergencia en la obtención de resultados, lo que evidencia la aplicación de un modelo matemático adecuado. Esto se debe a que la evaluación de los residuales en las simulaciones CFD, bajo el modelo de turbulencia SST k- ω , constituye la consistencia numérica de los cálculos en función del modelo seleccionado. En términos generales, los residuales presentan valores relativamente altos en las primeras iteraciones; no obstante, conforme avanza el proceso, estos tienden a disminuir progresivamente hasta estabilizarse, lo cual ratifica la confiabilidad del procedimiento de simulación.

La variable de continuidad se mantiene en valores cercanos a 0,01, pero con claras tendencias de estabilidad para cada uno de los casos estudiados, al ser un valor relativamente bajo, se puede indicar que no compromete la validez del estudio. El resto de los valores están por debajo de umbrales de 0,001 lo que afirma el correcto funcionamiento del modelo matemático escogido.

Finalmente, existe una ligera irregularidad en los residuales de ω de la primera propuesta de mejora, esto se debe a los diferentes cuerpos separados que se implementaron para el carenado (alerón delantero), sin embargo, al avanzar las iteraciones, estas fluctuaciones reducen drásticamente y están en un umbral de 0,001. El comportamiento se encuentra en la Figura 12.

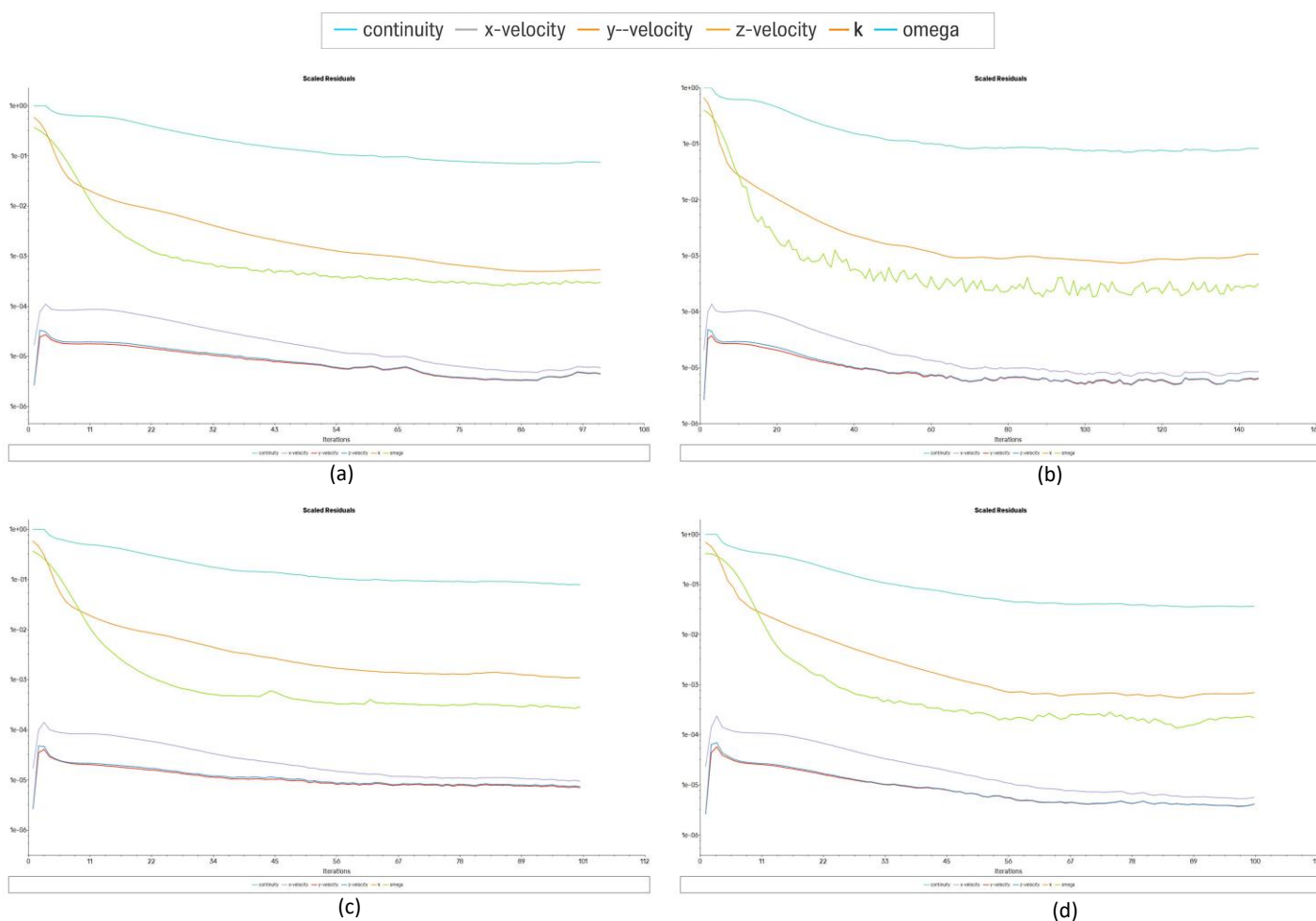


Figura 12: Grafica de residuales, (a) analizadas carenado original, (b) primera propuesta de mejora, (c) segunda propuesta, (d) tercera propuesta.

El trabajo de [22] donde incorporó un alerón en la parte delantera y obtuvo como resultado una reducción de C_d 17,85% pasando de 0.85 a 0.70, en la propuesta generada se incluye un alerón delantero para el Kart eléctrico dando como resultado una reducción del 12.15% pasando de 0.27 a 0.24, validando que la incorporación del alerón en la parte frontal es útil para la reducción del C_d .

Además, la segunda propuesta presentó un comportamiento particular. El C_d se redujo hasta 0,2465, es decir, un 10 % menos respecto al carenado original, pero la F_d aumentó a 23,11 N, superando incluso el valor inicial.

Esto se explica debido a que el C_d es un coeficiente adimensional que se calcula en función de la fuerza de arrastre dividida por la presión dinámica y el área de referencia. En este caso, aunque la geometría logró canalizar mejor el flujo y redujo el valor adimensional del C_d , el diseño también aumentó el área frontal efectiva expuesta al flujo. En consecuencia, el área de referencia mayor provocó que, aun con un C_d más bajo, el área es directamente proporcional a la fuerza de arrastre. Adicionalmente, las simulaciones mostraron zonas de turbulencia posteriores más intensas, lo que explica la formación de vórtices que incrementaron la resistencia.

El trabajo de [6] diseñó un recubrimiento del área frontal con un ángulo de la superficie ajustado para reducir el coeficiente de arrastre del kart obteniendo como resultado una reducción de 10.33% de su valor de C_d inicial, disminuyendo de 0,571 a 0,512, comparando con los resultados propuestos por [6], y manteniendo una metodología similar al momento de redefinir la geometría se obtuvo como resultado una reducción de 19.22% pasando de 0.274 a 0.221, lo que valida que el diseño de un recubrimiento frontal reduce positivamente el coeficiente de arrastre.

Con los datos analizados se confirma que los métodos aplicados resultan eficaces para lograr la reducción del coeficiente de arrastre.

5. Conclusiones

Se caracterizó el desempeño aerodinámico del carenado original mediante el uso de técnicas CFD, apoyadas en procesos de digitalización 3D y modelado CAD. La integración de estas metodologías permitió desarrollar un carenado optimizado para un vehículo tipo kart, con lo cual se obtuvieron reducciones tanto en el coeficiente de arrastre (C_d) como en la fuerza de arrastre (F_d) respecto al diseño inicial.

Se identificaron zonas críticas en el carenado original donde su mayor punto de presión se ubicó en la parte frontal del kart dándonos una presión de 101271 Pa y el coeficiente de arrastre obtenido fue de 0,2743, con una fuerza de arrastre de 22,67 N, a partir de estos valores de referencias, se implementaron tres metodologías experimentales de mejora aerodinámica en el carenado del kart.

En la primera mejora aerodinámica se incluyó un alerón delantero y suavizado de aristas en el kart donde se alcanzó un C_d de 0,2409 y una F_d de 19,91 N, lo que representa una reducción del 12 % en C_d y del 12 % en F_d respecto al modelo original, en la segunda mejora aerodinámica, se diseñó un alerón curvo y recubrimiento del volante en forma de cuerpo de delfín con esta modificación se obtuvo un C_d de 0,2465, equivalente a una disminución del 10 %, aunque la F_d aumentó a 23,11 N, lo que evidencia un balance desfavorable en términos de arrastre total este desbalance fue provocado por la variación del área frontal del diseño, en la tercera mejora aerodinámica se obtuvo por un diseño semi cerrado que recubra la parte frontal del kart, los resultados de esta modificación mostraron una reducción de C_d de 0,2216 y una F_d de 20,83 N, reflejando la mayor mejora global con una reducción del 19 % en C_d y del 8 % en F_d en comparación con el carenado original.

Se generaron tres propuestas que cumplen con el objetivo de reducir el coeficiente aerodinámico en base al valor inicial del carenado original, la tercera propuesta tuvo el valor de C_d más bajo lo que valida el cumplimiento correcto de su forma aerodinámica,

posicionando esta propuesta como la mas efectiva para modificaciones de geometría en carenados de kart.

Apéndice A. Gráficas de Análisis Aerodinámico de Carenado Original

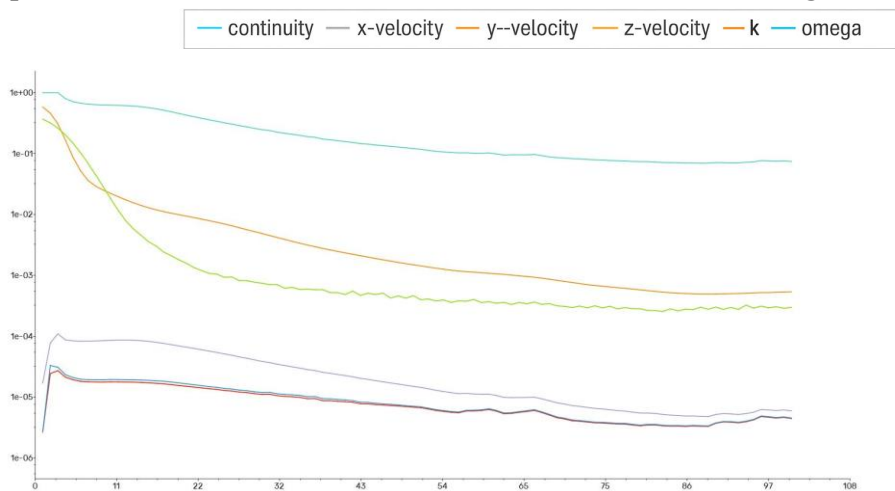


Figura A.1. Gráfica de residuales carenado original

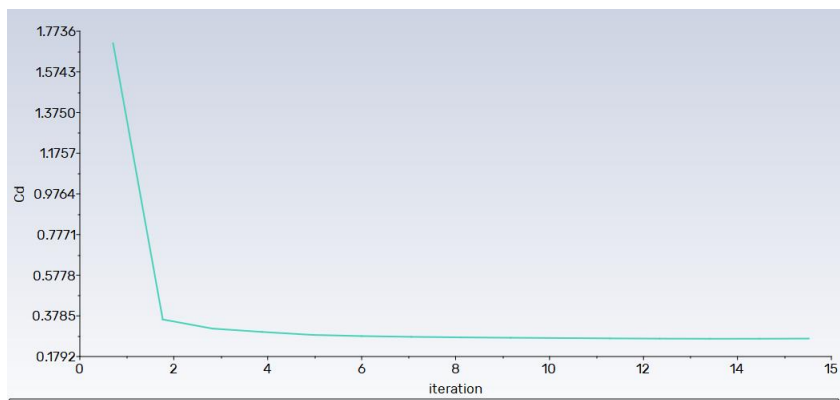


Figura A.2. Gráfica de Coeficiente de arrastre

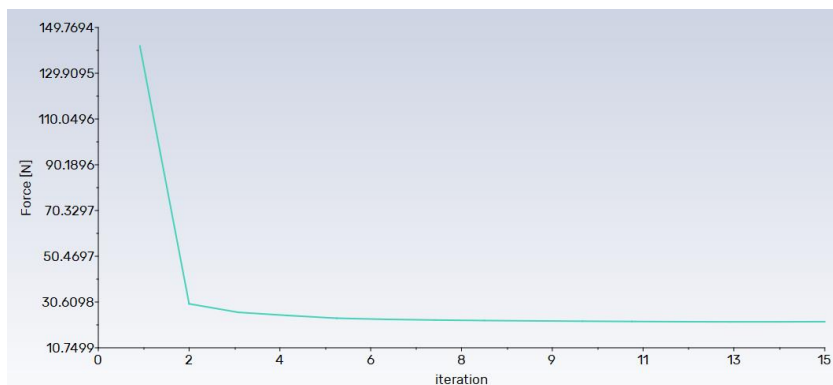


Figura A.3. Grafica de fuerza de arrastre

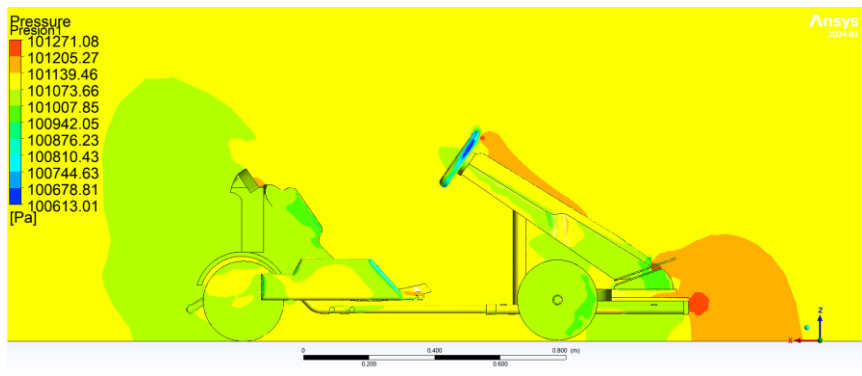


Figura A.4. Gráfica contorno puntos de mayor presión

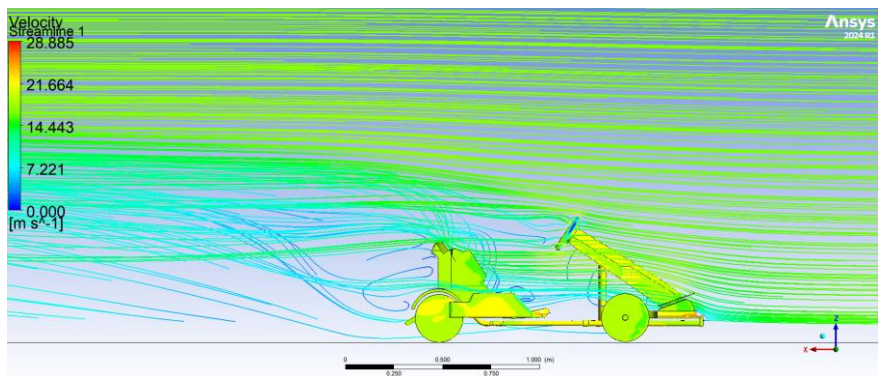


Figura A.5. Gráfica velocidad en U

Apéndice B. Graficas Carenado Primera Propuesta

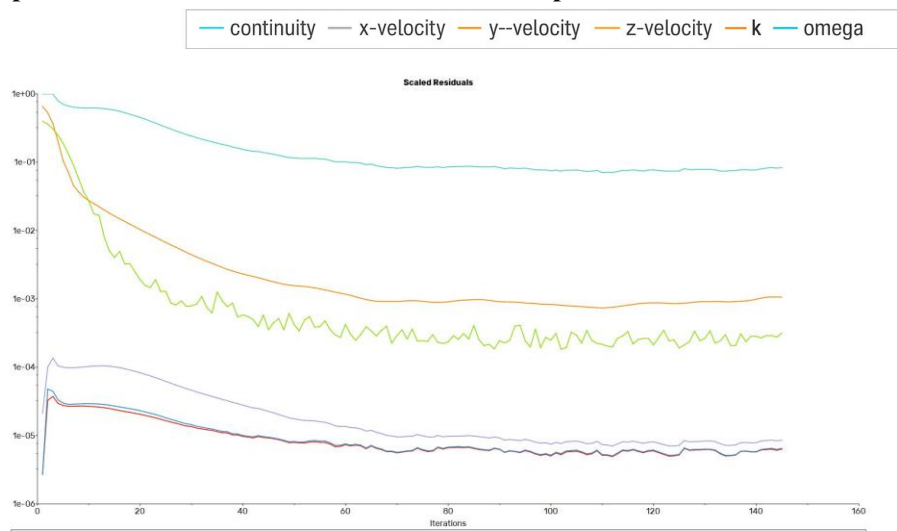


Figura B.1. Gráfica de residuales primera mejora aerodinámica

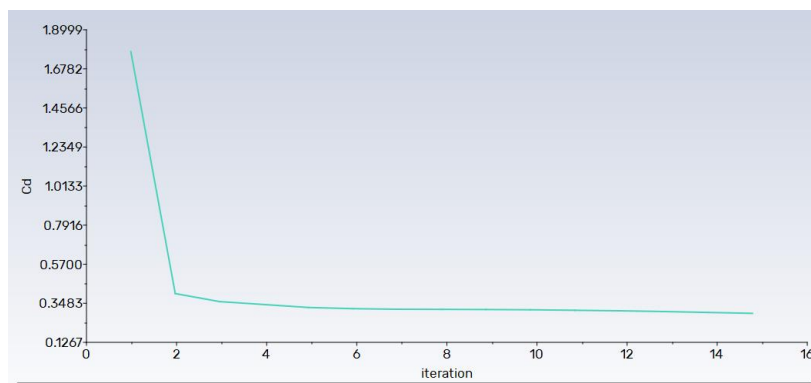


Figura B.2. Grafica de coeficiente de arrastre

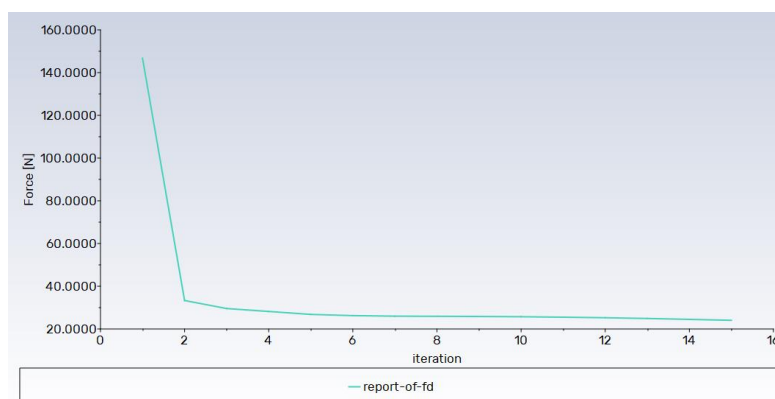


Figura B.3. Grafica de fuerza de arrastre

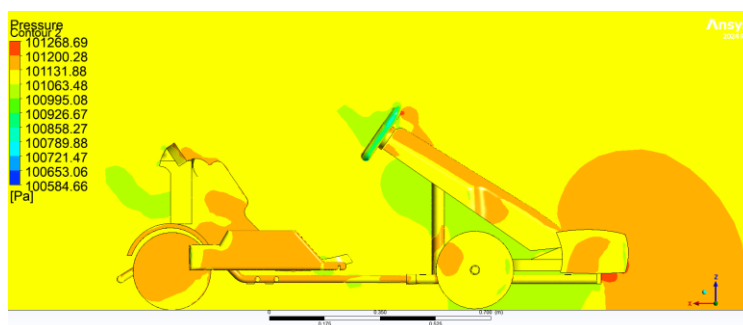


Figura B.4. Grafica contorno puntos de mayor presión

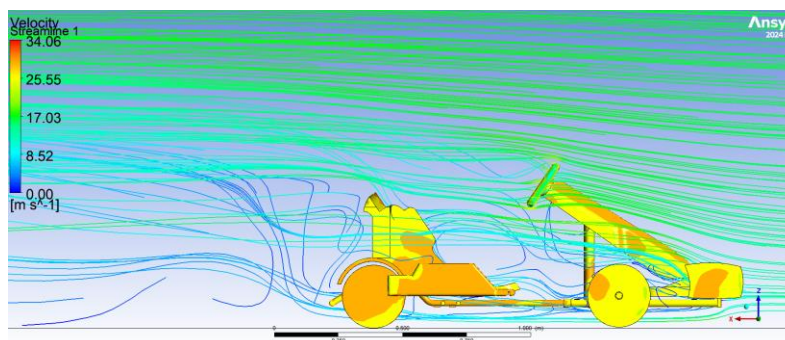


Figura B.5. Gráfica velocidad en U

Apéndice C. Graficas Carenado Segunda Propuesta

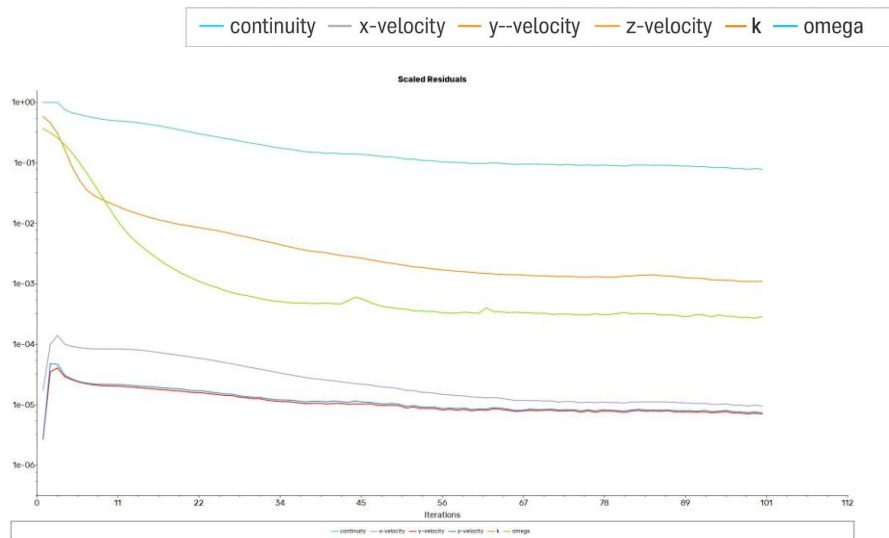


Figura C.1. Gráfica de residuales segunda mejora aerodinámica

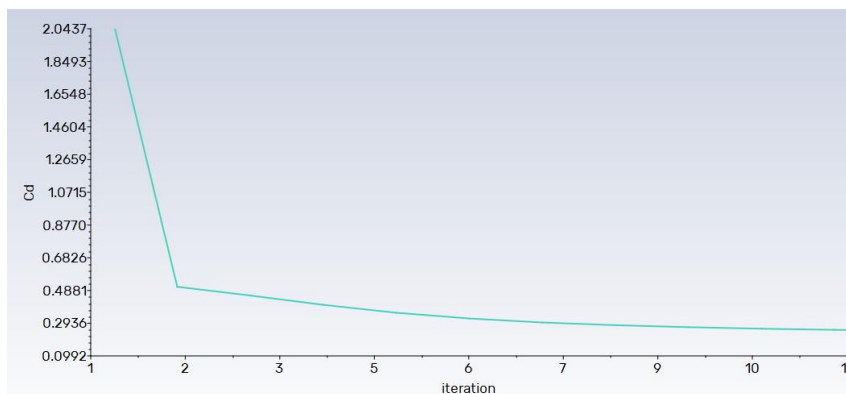


Figura C.2. Grafica de coeficiente de arrastre

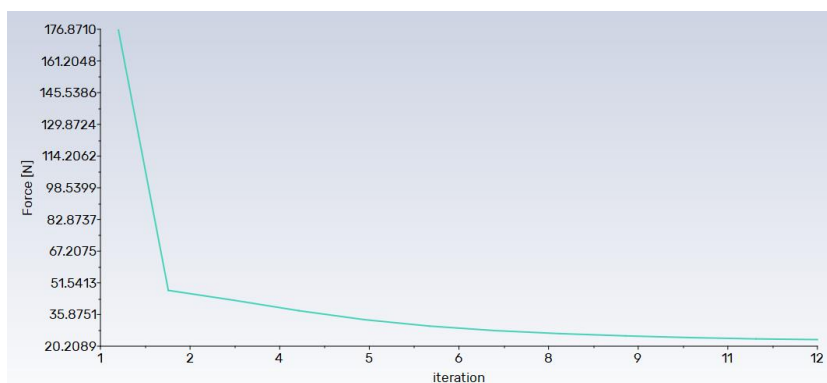


Figura C.3. Grafica de fuerza de arrastre

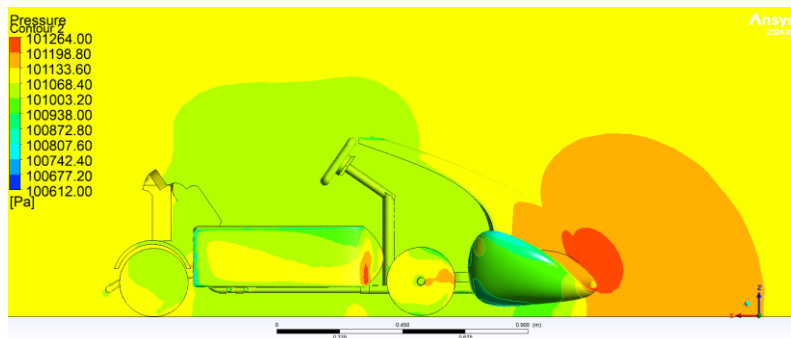


Figura C.4. Grafica contorno puntos de mayor presión

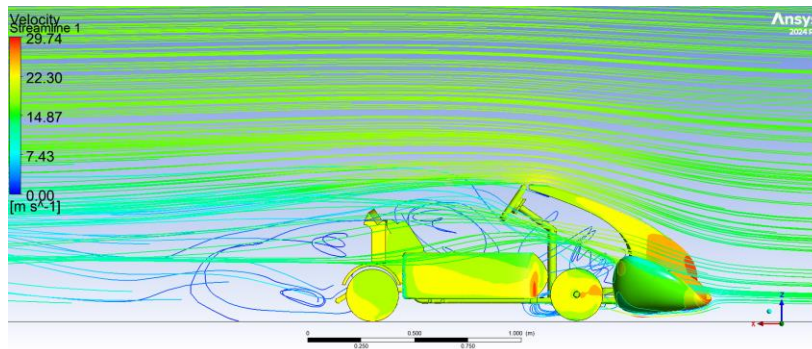


Figura C.5. Gráfica velocidad en U

Apéndice D. Graficas Carenado Tercera Propuesta

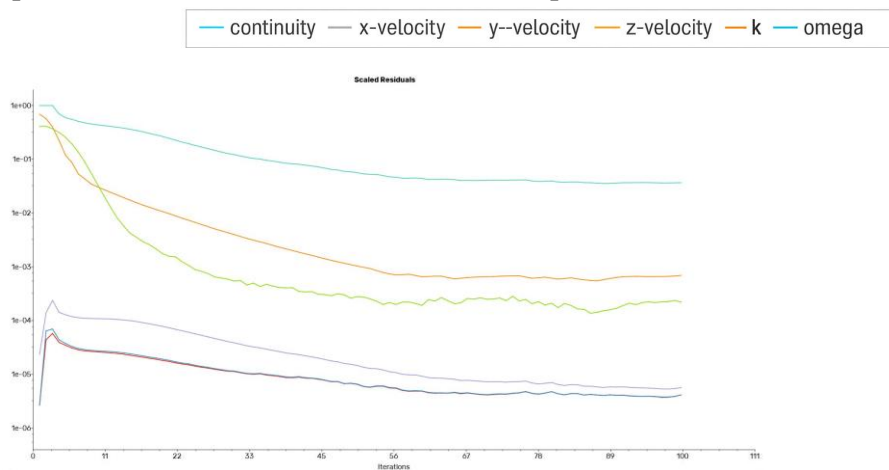


Figura D.1. Gráfica de residuales segunda mejora aerodinámica

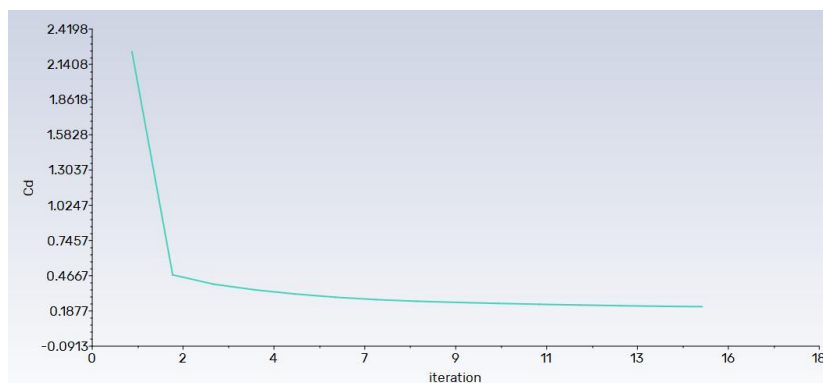


Figura D.2. Grafica de coeficiente de arrastre

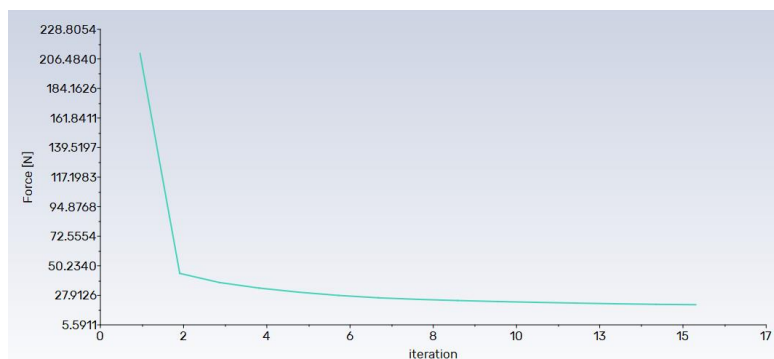


Figura D.3. Grafica de fuerza de arrastre

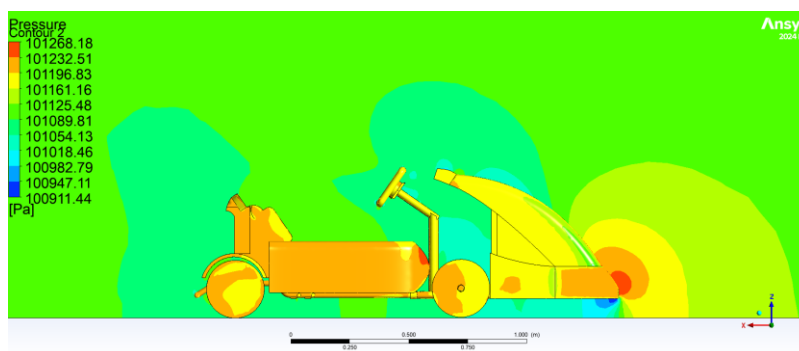


Figura D.4. Grafica contorno puntos de mayor presión

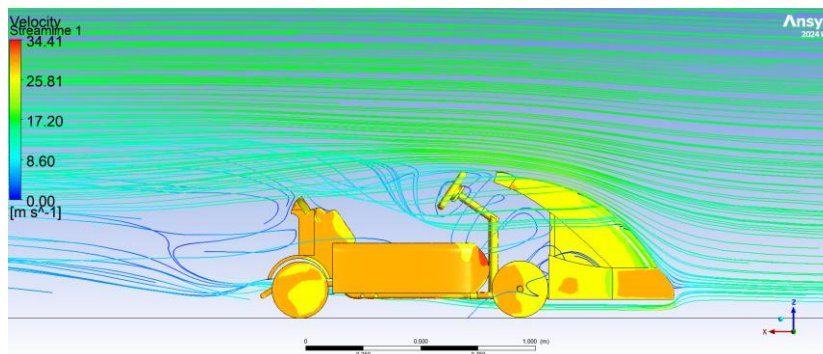


Figura D.5. Gráfica velocidad en U

Referencias

1. Madhu, S.; Murali, P.; Ramasai, R.; Vardhan, M.V.; Prakash, K.B. Computational Fluid Dynamics (CFD) Analysis of A Go-Kart. *International Journal of Research Publication and Reviews* 2024, 5, 3418–3424, doi:10.55248/gengpi.5.1124.3262.
2. AL-Rawi, M.; Oumssount, A. One-Way Fluid Structure Interaction of a Go-Kart Spoiler Using CFD Analysis. In *Proceedings of the The 13th Conference of the International Sports Engineering Association*; MDPI: Basel Switzerland, June 15 2020; p. 51.
3. Lee, Y.; Park, H. A Study on Aerodynamic and Structural Design of Fairing Using Glass Fabric Composite Structure. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023, 13, doi:10.3390/app13063765.
4. Murali, P.; Ramasai, R.; Vardha, M.V.; Prakash, K.B.; Venkaiah, P. Review On Body Panel For Electric Go-Karts. *International Journal of Research Publication and Reviews* 2025, 6, 8817–8820, doi:10.55248/gengpi.6.0425.1562.
5. Mihalić, T.; Hoster, J.; Tudić, V.; Kralj, T. Concept Design and Development of an Electric Go-Kart Chassis for Undergraduate Education in Vehicle Dynamics and Stress Applications. *Applied Sciences (Switzerland)* 2023, 13, doi:10.3390/app132011312.
6. Ruban, L. E.; Kennet Thomas, I.V.; Dicson, V. L.M.; B.S, D.; H.M, M. A Study on the Effect of Fairing Designs of Go Kart on Its Performance Using CFD Analysis. *International Research Journal on Advanced Science Hub* 2020, 2, 21–29, doi:10.47392/ir-jash.2020.142.
7. Iinuma, Y.; Taniguchi, K.; Oshima, M. Aerodynamics Development for a New EV Hatchback Considering Crosswind Sensitivity. In *Proceedings of the SAE Technical Papers*; SAE International, 2018; Vol. 2018-April.

8. Nyoni, E.; Chigumba, P. Aerodynamics and Its Role in Enhancing Fuel Efficiency in Automotive Engineering. ~ 32 ~ International Journal of Automobile Engineering 2024, 5.
9. Wang, L.; Hu, X.; Guo, P.; Wang, Z.; Wang, J.; Wang, Y.; Ma, Y.; Li, Y.; Zhao, J.; Yang, X.; et al. Analysis of the Influence of Different Turbulence Models on the Prediction of Vehicle Aerodynamic Performance. *Energies (Basel)* 2025, 18, doi:10.3390/en18112803.
10. Li, J.; Liu, F.; Wang, L. Design and Aerodynamic Characteristics Analysis of an Electric Racecar Body Based on CFD. *World Electric Vehicle Journal* 2024, 15, 192, doi:10.3390/wevj15050192.
11. Álvarez, D.; *Análisis Aerodinámico y Propuesta de Mejora Del Coche de Competición Eléctrico Del ISC*, Universidad Pontificia Comillas, 2022.
12. Dumas, L. CFD-Based Optimization for Automotive Aerodynamics. In *Optimization and Computational Fluid Dynamics*; Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg, 2024; pp. 191–215.
13. Shining 3D Einar Shining 3D: Escáner 3D Portátil Available online: https://www.3dmarket.mx/wp-content/uploads/2022/12/EIN-STAR-SHINING_compressed.pdf?srltid=AfmBOop_bmbiPJMEGh__Ij_zKkkdn1dYIw14oz5dT1f5u04DhJBnlqfn (accessed on 19 May 2025).
14. Groth, C.; Del Bene, C.; Larsson, T.; Biancolini, M.E. Evaluation of Go-Kart Aerodynamic Efficiency Using CFD, RBF Mesh Morphing and Lap Time Simulation. *International Journal of Aerodynamics* 2016, 5, 146, doi:10.1504/IJAD.2016.10004107.
15. Hoque, M.A.; Rahman, M.S.; Rimi, K.N.; Alif, A.R.; Haque, M.R. Enhancing Formula Student Car Performance: Nose Shape Optimization via Adjoint Method. *Results in Engineering* 2023, 20, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101636.
16. Hetawal, S.; Gophane, M.; Ajay, B.K.; Mukkamala, Y. Aerodynamic Study of Formula SAE Car. *Procedia Eng* 2014, 97, 1198–1207, doi:10.1016/j.proeng.2014.12.398.
17. Amoo, O.M.; Falana, A. Numerical Techniques for the Solution of the Laminar Boundary Layer Equations. In *Applications of Heat, Mass and Fluid Boundary Layers*; Elsevier, 2020; pp. 233–258 ISBN 9780128179499.
18. Adveo Kart Eléctrico AM3 Electric – Ficha Técnica Available online: <https://adveokartselectricos.es/am3-electric/> (accessed on 29 June 2025).
19. Dulhoste; Jean François *Compilado de Tablas de Mecánica de Los Fluidos*; Universidad Nacional de Cuyo, 2008; ISBN 0071593136.
20. Granda, J.; Instituto Nacional de Meteorología E Hidrología - INAMHI. 2019.
21. NASA Langley Research Center SST K-Omega Turbulence Model.
22. Hetawal, S.; Gophane, M.; Ajay, B.K.; Mukkamala, Y. Aerodynamic Study of Formula SAE Car. *Procedia Eng* 2014, 97, 1198–1207, doi:10.1016/j.proeng.2014.12.398.
23. Pacheco, K.; Rojas, O. *Diseño de Un Alerón Delantero Para Un Kart de Competencia Mediante CFD*; Bogotá, 2018;