

**DISEÑO DE UN ALERON DELANTERO PARA UN KART DE COMPETENCIA
MEDIANTE CFD**

KAREN GISELL PACHECO MARTÍNEZ
OSCAR DANIEL ROJAS SARMIENTO

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA
BOGOTÁ D.C.
2018

**DISEÑO DE UN ALERON DELANTERO PARA UN KART DE COMPETENCIA
MEDIANTE CFD**

KAREN GISELL PACHECO MARTÍNEZ
OSCAR DANIEL ROJAS SARMIENTO

Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Aeronáutico

Tutor:
Ing. John Jairo Vaca Ríos

FUNDACIÓN UNIVERSITARIA LOS LIBERTADORES
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA AERONÁUTICA BOGOTÁ D.C.
2018

Nota de Aceptación:

Firma del Presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá D.C., junio de 2018

DEDICATORIA

A Dios, por ser el motor de mi vida y acompañarme en cada paso de esta misma; su amor y bendiciones han sido el soporte de cada una de mis luchas y éxitos.

A mis papás Ramiro José Pacheco González y María Isabel Martínez, quienes desde siempre me han brindado de amor y ejemplo y por haber luchado desde siempre por la realización de mis sueños.

A mis hermanas y sobrinos, por guiarme e inspirarme cada día, por hacer de mí una mejor mujer y persona.

A mi familia y amigos, por brindarme apoyo y aliento cada vez que lo he necesitado.

KAREN GISELL PACHECO MARTÍNEZ

DEDICATORIA

Quiero agradecer en primera instancia a Dios, por permitirme llegar a ésta instancia, por darme toda la sabiduría y capacidad de lograr las metas que me he propuesto hasta el día de hoy. Así mismo, por darme la vida y la salud para poder afrontar cada uno de los retos que ésta carrera planteó para mí.

Además, quiero agradecer a los dos pilares de mi vida, mis padres, quienes con inmenso sacrificio me apoyaron en cada proyecto y cada reto durante estos cinco años, quiero agradecerles por su ayuda, sus palabras, su entusiasmo que me motivó día a día, por formarme y así convertirme en la persona que soy ahora. Sin ellos no habría logrado todo lo que he podido, desde mi infancia hasta el final de mi carrera.

No menos importante es el agradecimiento a todos y cada uno de mis compañeros y amigos con quienes compartí muchas experiencias, personas con las que pude disfrutar ésta maravillosa época de universidad, gracias a ellos porque con cada pregunta que me hacían yo lograba aprender más.

Finalmente, quiero agradecer de manera inmensa a mi compañera de trabajo, quien prácticamente desde el inicio de ésta aventura estuvo cada día apoyándome en todo, en mi vida profesional y personal, gracias por las palabras, la ayuda y sobretodo la capacidad de levantarme. Sin ella, realizar éste trabajo habría sido más complicado.

OSCAR DANIEL ROJAS SARMIENTO

AGRADECIMIENTOS

Los autores del trabajo queremos agradecer al Ing. John Jairo Vaca Ríos, quien ha sido nuestro guía a lo largo de este proceso, nos ha alentado, enseñado, apoyado y ha creído en nuestras habilidades y conocimientos desde un principio. Gracias por cada día enseñarnos algo nuevo con la mejor disposición e interés.

De igual manera queremos agradecer al Ing. Jaime Enrique Orduy Rodríguez y al Ing. Philippe Alain White quienes como amigos y profesores nos han brindado sus conocimientos y experiencias de manera enriquecedora para poder realizar este trabajo de la manera más completa posible.

A la federación colombiana de karts y a la compañía Birel Art Colombia, por brindarnos toda la información y el apoyo necesario para la realización de este proyecto.

Finalmente, agradecemos a nuestros profesores, amigos y compañeros quienes en este tiempo nos han brindado su apoyo y comprensión nos han alentado durante el tiempo de realización de este proyecto.

CONTENIDO

RESUMEN.....	21
PALABRAS CLAVE.....	21
ABSTRACT.....	22
KEYWORDS.....	22
1. INTRODUCCIÓN.....	23
1.1. Descripción y planteamiento del problema.....	23
1.2. Objetivos.....	24
1.3. Tipo de investigación.....	24
2. AERODINÁMICA DE UN KART.....	25
2.1. Antecedentes.....	25
2.2. Aerodinámica.....	27
2.2.1. Coeficiente de fricción.....	27
2.2.2. Carga aerodinámica.....	27
2.2.3. Sustentación.....	27
2.2.4. Coeficiente de sustentación.....	28
2.2.5. Arrastre aerodinámico.....	28
2.2.6. Coeficiente de arrastre.....	28
2.2.7. Eficiencia aerodinámica.....	29
2.2.8. Coeficiente de presión.....	29
2.2.9. Momento.....	30
2.2.10. Coeficiente de momento.....	30
2.2.11. Curva polar.....	31

2.2.12.	Ecuación de Bernoulli	31
2.2.13.	Número de Reynolds	32
2.2.14.	Condición de no deslizamiento	32
2.2.15.	Capa Límite.....	33
2.3.	Dinámica de fluidos computacional.....	34
2.3.1.	Definición.....	34
2.3.2.	Aplicaciones.....	34
2.3.3.	Elementos.....	34
2.3.3.1.	Pre-procesador.....	35
2.3.3.2.	Solucionador.....	35
2.3.3.3.	Post-procesador.....	35
2.4.	Aspectos básicos de la discretización.....	35
2.5.	Turbulencia y su modelación.....	36
2.5.1.	Calculo flujo turbulento.....	37
2.5.2.	Modelos de flujo turbulento.....	37
2.6.	Condiciones de frontera.....	37
2.7.	Consideraciones legales.....	38
2.7.1.	Según el reglamento CIK-FIA (Comisión Internacional de <i>Karting</i> de la Federación Internacional de Automovilismo).....	38
2.7.1.1.	Seguridad.....	38
2.7.1.2.	Chasis.....	38
2.7.1.3.	Diseños de paragolpes.....	38
2.7.1.4.	Especificaciones para el parachoques delantero.....	38
2.7.1.5.	Peso.....	39
2.7.2.	Según el reglamento FCK (Federación Colombiana de <i>Karts</i> – Reglamento Deportivo Nacional 2015).....	39

2.7.2.1.	Materiales.....	39
2.7.2.2.	Consideraciones en el diseño del parachoques delantero.....	39
3.	ELECCIÓN DE PERFIL AERODINÁMICO.....	40
4.	GEOMETRÍA DEL VEHÍCULO.....	45
4.1.	Diseño y modelamiento.....	45
4.1.1.	Modelamiento piezas del kart.....	46
4.1.2.	Modelamiento alerón delantero.....	48
4.1.3.	Ensamble de los modelos CAD.....	50
4.2.	Dominio computacional.....	51
4.2.1.	Método De Sustracción Booleana.....	54
5.	MALLA COMPUTACIONAL, MODELO MATEMÁTICO Y CONVERGENCIA NUMÉRICA.....	56
5.1.	Refinamiento Del Mallado.....	56
5.2.	Ecuaciones fundamentales.....	60
5.2.1.	Ecuación de continuidad.....	61
5.2.2.	Ecuación de momentum.....	61
5.3.	Definición de las fronteras.....	62
5.4.	Definición de las condiciones de frontera.....	63
5.4.1.	Aspectos generales	63
5.4.2.	Condiciones de frontera.....	64
5.4.3.	Valores de referencia.....	65
5.4.4.	Métodos de solución.....	65
5.4.5.	Monitores.....	68
5.4.6.	Inicialización de la simulación.....	68
5.4.7.	Ejecución del cálculo.....	69

5.5. Análisis de convergencia numérica.....	69
5.6. Evaluación de la calidad de la malla.....	73
6. SIMULACIÓN FINAL.....	77
6.1. Definición de las condiciones de frontera.....	77
6.1.1. Aspectos generales.....	77
6.1.2. Condiciones de frontera.....	81
6.1.3. Métodos de solución.....	81
6.1.4. Ejecución del cálculo.....	82
7. RESULTADOS, ANALISIS Y VALIDACIÓN.....	83
7.1. Contornos de presión.....	83
7.2. Contornos de velocidad.....	86
7.3. Comparativa líneas de flujo sobre el kart convencional y modificado.....	91
7.4. Comparativa entre valores de presión y velocidad para el kart convencional y modificado.....	96
7.5. Comparación y validación de resultados.....	103
8. CONCLUSIONES.....	107
9. RECOMENDACIONES.....	109
10. BIBLIOGRAFÍA.....	110
11. ANEXOS.....	113

LISTAS DE TABLAS

Tabla 1. Condiciones de la simulación en XFLR-5.....	41
Tabla 2. Parámetros aerodinámicos perfil FX63-137.....	42
Tabla 3. Parámetros aerodinámicos perfil S4180.....	42
Tabla 4. Parámetros aerodinámicos perfil S4320.....	43
Tabla 5. Parámetros aerodinámicos perfil SPICA.....	43
Tabla 6. Parámetros aerodinámicos perfil E423.....	43
Tabla 7. Dimensiones del kart con alerón tradicional.....	52
Tabla 8. Dimensiones del kart con alerón modificado.....	52
Tabla 9. Dimensiones exactas del volumen principal para el kart con alerón tradicional	53
Tabla 10. Dimensiones del kart con alerón modificado.....	53
Tabla 11. Dimensiones exactas del volumen principal para el kart con alerón tradicional.....	54
Tabla 12. Parámetros físicos para calcular la distancia óptima en ambos kart.....	58
Tabla 13. Control de mallas para el kart con alerón tradicional.....	60
Tabla 14. Control de mallas para el kart con alerón modificado.....	60
Tabla 15. Aspectos generales para la convergencia numérica.....	64
Tabla 16. Coordenadas de las líneas de análisis sobre plano de simetría.....	98
Tabla 17. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para medio kart con alerón convencional y modificado.....	103
Tabla 18. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para kart completo con alerón convencional.....	103

Tabla 19. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para kart completo con alerón modificado.....	104
Tabla 20. Diferencia porcentual entre valores de eficiencia, arrastre y carga aerodinámica para kart con alerón convencional y alerón modificado.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Zona de flujo válidas para la ecuación de Bernoulli.....	32
Figura 2. Capa laminar y turbulenta en un perfil.....	33
Figura 3. Perfil PT40 considerado por poseer un intradós plano.....	40
Figura 4. Perfil E423 considerado por tener su línea de curvatura media próxima al extradós.....	41
Figura 5. Parámetros aerodinámicos del perfil E423.....	44
Figura 6. Kart Birel-Art.....	46
Figura 7. Chasis modelado del kart.....	46
Figura 8. Alerón tradicional del kart.....	47
Figura 9. Protector delantero del kart.....	47
Figura 10. Silla del kart.....	47
Figura 11. Timón del kart.....	48
Figura 12. Esquema preliminar del perfil usado para el alerón modificado.....	49
Figura 13. Alerón modificado para el kart Birel ART.....	49
Figura 14. Alerón modificado con endplates ajustados.....	50
Figura 15. Modelo CAD ensamblado del kart con alerón tradicional.....	51
Figura 16. Modelo CAD ensamblado del kart con alerón modificado.....	51
Figura 17. Modelado del volumen principal para el kart con alerón tradicional.....	53
Figura 18. Modelado del volumen principal para el kart con alerón modificado.....	54

Figura 19. Sustracción booleana para el kart con alerón tradicional.....	55
Figura 20. Sustracción booleana para el kart con alerón modificado.....	55
Figura 21. Ejemplo de mallado en kart con alerón tradicional.....	56
Figura 22. Detalle del Inflation alrededor del kart.....	57
Figura 23. Detalle del cálculo de la distancia a la pared de la primera capa de Inflation para el kart con alerón tradicional.....	59
Figura 24. Detalle del cálculo de la distancia a la pared de la primera capa de Inflation para el kart con alerón modificado.....	59
Figura 25. Fronteras enunciadas para el dominio computacional.....	63
Figura 26. Tabla de valores de referencia para el análisis de los karts.....	66
Figura 27. Métodos de solución para estudios de flujo externo.....	67
Figura 28. Reporte del coeficiente de arrastre para kart convencional.....	70
Figura 29. Empleo del CFD – Post para determinar velocidad de flujo.....	70
Figura 30. Escala de calidad para Skewness y Ortogonal Quality.....	73
Figura 31. Skewness para Kart con alerón convencional.....	74
Figura 32. Ortogonal Quality para Kart con alerón convencional.....	74
Figura 33. Skewness para Kart con alerón modificado.....	75
Figura 34. Ortogonal Quality para Kart con alerón convencional.....	75
Figura 35. Contorno de presión sobre kart con alerón convencional.....	83
Figura 36. Contorno de presión sobre kart con alerón convencional sobre plano de simetría.....	84

Figura 37. Contorno de presión sobre kart con alerón modificado sobre plano de simetría.....	85
Figura 38. Contorno de presión en kart con alerón modificado en los neumáticos.....	85
Figura 39. Contorno de velocidad sobre kart con alerón convencional en plano de simetría.....	86
Figura 40. Contorno de velocidad sobre kart con alerón convencional en los neumáticos.....	87
Figura 41. Contorno de velocidad sobre kart con alerón modificado en plano de simetría.....	88
Figura 42. Contorno de velocidad sobre kart con alerón modificado en plano de simetría con mayor detalle.....	89
Figura 43. Contorno de velocidad sobre kart con alerón modificado en los neumáticos en mayor detalle.....	89
Figura 44. Streamlines sobre kart con alerón convencional en plano de simetría.....	91
Figura 45. Streamlines sobre kart con alerón modificado en plano de simetría.....	92
Figura 46. Streamlines sobre kart con alerón modificado en plano de simetría, vista de perspectiva.....	93
Figura 47. Streamlines sobre kart con alerón convencional, vista inferior del volumen de control.....	94
Figura 48. Streamlines sobre kart con alerón modificado, vista inferior del volumen de control.....	94
Figura 49. Streamlines sobre kart con alerón convencional, vista frontal del volumen de control.....	95
Figura 50. Streamlines sobre kart con alerón modificado, vista frontal del volumen de control.....	95
Figura 51. Líneas de análisis para extracción de datos.....	97

Figura 52. Gráfica de presión sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón convencional.....	98
Figura 53. Gráfica de presión sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón modificado.....	99
Figura 54. Gráfica de velocidad de flujo sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón convencional.....	101
Figura 55. Gráfica de velocidad de flujo sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón modificado.....	102

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfica 1. Independencia de malla según la velocidad de flujo para el kart con alerón tradicional.....	71
Gráfica 2. Independencia de malla según el coeficiente de arrastre para el kart con alerón tradicional.....	71
Gráfica 3. Independencia de malla según la velocidad de flujo para el kart con alerón modificado.....	72
Gráfica 4. Independencia de malla según el coeficiente de arrastre para el kart con alerón modificado.....	72

LISTA DE ANEXOS

Conversión de la velocidad.....	113
Calculo de Reynolds a 75 km/h para kart con alerón tradicional.....	113
Cálculo de Reynolds a 75 km/h para kart con alerón modificado.....	114
Calculo de número Mach.....	114
Cálculo eficiencia aerodinámica del Kart con alerón tradicional.....	114
Cálculo eficiencia aerodinámica del Kart con alerón modificado.....	114
Posición del asiento Kart Birel – Art.....	115
Dimensiones del Kart Birel – Art	116
Vista superior del alerón tradicional del kart Birel Art	117
Vista frontal del alerón tradicional del kart Birel – Art.....	117
Vista lateral del alerón tradicional del kart Birel – Art.....	118

NOMENCLATURA

C_f = Coeficiente de fricción

ρ = Densidad

V_∞ = Velocidad Local

F = Fuerza de carga aerodinámica

μ' = Coeficiente de rozamiento

N = Fuerza normal

C_L = Coeficiente de sustentación

A = Área alar del plano

F_L = Fuerza de sustentación

F_D = Fuerza de arrastre

C_D = Coeficiente de arrastre

f = Eficiencia aerodinámica

P_∞ = Presión total

P = Presión estática

C_p = Coeficiente de presión

M = Momento de cabeceo

Re = Número de Reynolds

l = Longitud del kart

ϑ = Velocidad de Operación

μ = Viscosidad Dinámica

M = Número Mach

V_s = Velocidad del Sonido

R = Constante Universal del Aire

T= Temperatura

γ= Relación de calores específicos

RESUMEN

El presente trabajo muestra el proceso de análisis, rediseño y validación aerodinámica de un kart de competencia mediante la dinámica de fluidos computacional para poder evaluar el rendimiento de este mismo antes y después de la modificación realizada a su diseño original y así mejorar su rendimiento en competencia. Tomando como base la teoría de la dinámica de fluidos y orientando esta misma hacia a uno de sus usos más comunes, como lo es el estudio de flujo externo sobre un vehículo; se realizó un modelamiento mediante el software Solid Edge e Inventor del kart en su diseño tradicional y otro incorporando un alerón realizado a partir de un perfil aerodinámico escogido por su eficiencia mediante el software XFLR-5. Posteriormente, mediante el uso del software AnsysWorkbench19 se realizó el diseño de un dominio computacional, teniendo en cuenta distintas configuraciones de mallado, condiciones de frontera y métodos de solución; Posteriormente, se obtuvieron una serie de resultados para cada kart modelado y así, mediante análisis, se pudo generar una conclusión final teniendo en cuenta la perspectiva de diferentes artículos académicos con temas afín.

Adicionalmente, se proporcionan recomendaciones y sugerencias necesarias para realizar futuras investigaciones y proyectos cuyo tema esté relacionado con la dinámica de fluidos computacional aplicada a vehículos terrestres.

PALABRAS CLAVE

- AERODINÁMICA
- DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL
- KART DE COMPETENCIA
- RENDIMIENTO
- FLUJO EXTERNO
- ALERÓN MODIFICADO

ABSTRACT

The following document shows the analysis, redesign and aerodynamic validation processes of a competition kart through the Computational Fluid Dynamic with the purpose of evaluating its performance before and after of the realized modification to its original design and thus improve its performance during a competition. Based on the CFD theory and orienting this same to one of its most common uses, like is the external flow study around a car; modeling of the kart was carried out using the Solid Edge software and Inventor software, one of these modeling was using the common design and the other was using an incorporated aileron, this aileron was made through an aerodynamic airfoil chosen for its efficiency using the XFLR-5 software. Later, through the Ansys Workbench 19 software the computational domain was designed, taking into account different meshing settings, boundary conditions and solution methods; then, a series of results were obtained for each kart modeling and then, through analysis, a final conclusion could be established taking into account the perspective of different academic articles with related topics.

Also, recommendations and necessary suggestions are provided to carry out future research and projects related with the CFD applications in terrestrial cars.

KEYWORDS

- AERODYNAMIC
- COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)
- COMPETITION KART
- PERFORMANCE
- EXTERNAL FLOW
- MODIFIED AILERON

1. INTRODUCCIÓN

En el presente documento, se muestra el procedimiento, resultados y análisis de una simulación computacional del fluido externo que rodea un kart de competencia en operación, con la finalidad de poder determinar el coeficiente de arrastre de dicho vehículo antes y después de una modificación aerodinámica y así mismo la eficiencia de este; validando los resultados obtenidos con artículos científicos de estudios similares; adicionalmente generar conocimiento acerca de la implementación de la aerodinámica como base de la optimización del desempeño de un vehículo terrestre, contribuir con información necesaria para posibles estudios futuros acerca de la implementación de superficies aerodinámicas como el alerón delantero.

1.1. Descripción y planteamiento del problema

La aerodinámica basa gran parte de su estudio en la reducción del arrastre generado por la presencia de un objeto en un flujo de aire, sin embargo, esta rama de la mecánica de fluidos también tiene un factor determinante en aspectos como el rendimiento, la seguridad, estabilidad y confort referente a los vehículos terrestres. Por ello, los ingenieros aeronáuticos trabajan constantemente para que el flujo de aire que se desliza a lo largo del vehículo sea aprovechado al máximo. En la actualidad del automovilismo se encuentran competencias como la Fórmula 1, el *Karting*, *Rally Dakar*, *Nascar*, entre otros ¹ cuyos niveles de competitividad han incrementado en gran parte por la influencia de la aerodinámica en los vehículos de estas mismas, sin embargo, en el mundo del *karting* la ausencia de estudios aerodinámicos han rezagado el avance de este modelo competitivo en cuanto a eficiencia y rendimiento se refiere; se presentan inconvenientes como el flujo de aire desorganizado y la inestabilidad, este último, es un fenómeno que genera discrepancias en las fuerzas que se crean alrededor del monoplaza, haciéndolo impredecible y complejo de maniobrar, produciendo un desequilibrio aerodinámico y fallos en la suspensión, resultando así en un problema de tracción donde se pueden perder segundos de carrera y agarre de las ruedas a la pista, siendo esto un problema de inestabilidad que afecta directamente el desempeño de un monoplaza². Teniendo en cuenta el problema planteado previamente, este

¹ Tipos de carreras. {en línea}. {16 febrero de 2013}. {27 marzo de 2017}. Disponible en: <http://www.mecanicaymotores.com/tipos-de-carreras.html>

² TORRES, SANTI. "Hamilton: "El kart estaba dañado, era muy inestable"". En línea}. {15 marzo de 2017}. Disponible en: <http://soymotor.com/noticias/hamilton-el-kart-estaba-danado-era-muyinestable-919691>

trabajo se centra en responder ¿Es posible diseñar una superficie aerodinámica (alerón) capaz de reducir el problema de la inestabilidad, mejorar el comportamiento del flujo de aire y así aumentar la eficiencia aerodinámica del mismo?

1.2. Objetivos

Para dar respuesta a dicha pregunta se planteó el siguiente objetivo general:

- Diseñar un alerón delantero para reducir la inestabilidad de un kart de competencia usando herramientas computacionales.

Para dar cumplimiento a este objetivo, se plantearon las siguientes tareas mediante los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar el perfil aerodinámico que mejores características de desempeño presente basado en un estudio de sus variables aerodinámicas.
- Realizar una simulación computacional con el alerón seleccionado basado en los resultados obtenidos por el estudio aerodinámico inicial.
- Evaluar los resultados obtenidos durante la simulación realizada para determinar si hubo una reducción de la inestabilidad e incremento de la eficiencia aerodinámica.

1.3. Tipo de investigación

Realizando una investigación de tipo analítica experimental, dado que intenta analizar diferentes resultados basados en la experimentación para lograr un resultado linealizado con el objetivo principal, por lo que se plantea una metodología experimental que permita realizar una serie de prácticas matemáticas y computacionales para resolver el problema de investigación definido; a través de la manipulación de las variables aerodinámicas y de la experimentación simulada que permitan determinar las condiciones y características más apropiadas para dar solución a la temática tratada a lo largo de esta investigación.³

³ Grajales, Tevni. Tipos de investigación. {en línea}. {27 marzo de 2000}. {27 marzo 2017}. Disponible en: <http://tgrajales.net/investipos.pdf>

2. AERODINAMICA DE UN KART

2.1. Antecedentes

El primer hecho conocido de la aplicación de la aerodinámica en un automóvil de carreras fue la implementación de un alerón en un Porsche Spyder en el año 1956 por el ingeniero suizo Michael May, éste, se encontraba ubicado en la parte superior de la cabina del piloto con una libertad de movimiento de -3° y $+17^\circ$, sin embargo, por normatividad de la época, los comisarios de Nürburgring y Monza no permitieron su uso, por lo que nunca llegó a competir.

Durante la década de los años 60, los ingenieros concentraron sus esfuerzos en reducir la resistencia al avance que se generaba sobre el cuerpo minimizando el área frontal de contacto con el aire; los resultados obtenidos permitieron llegar a un nuevo diseño de carrocería, ésta se encontraba más cerca del suelo y su forma era lo más alargada posible. Este avance permitió mejorar la velocidad máxima en rectas, estableciendo mejoras en el rendimiento ocasionadas por la suspensión y los neumáticos del auto.

En 1966, Jim Hall, un ingeniero y piloto, realizó una significativa mejora en las prestaciones de los *karts* de competición. Siendo el pionero en correr en un auto con alerones y recordando que los planos de una aeronave mantienen el peso mediante una fuerza de sustentación positiva, pensó en diseñar alerones invertidos con el objetivo de crear una fuerza que empujará al auto contra el suelo. Esta idea fue rápidamente adoptada en el *kart* Chaparral 2E que fue diseñado por Jim Hall en Bridgehampton, Nueva York, e introducido en la Fórmula 1 con alerones de aluminio simples, en años posteriores fue prohibido por fallos estructurales, sin embargo, tiempo después la CSI (Commission Sport International) los aceptaría con ciertas restricciones enfocadas al montaje y su movilidad.

A finales de la década de los setenta el ingeniero Peter Wright en compañía de Colin

Chapman introdujo la idea de “efecto suelo” en un modelo Lotus 78 de la Fórmula 1. La idea resultaba en un complemento a la idea de Sir Michael Campbell, quien escribió una patente donde describía cómo un alerón simétrico generaba un apoyo aerodinámico cerca del suelo mediante una fuerza de succión bajo la carrocería. Jim Hall tomó esta idea y la plasmó en el modelo Chaparral 2J en 1970, mediante la implementación de grandes turbinas empujadas por motores auxiliares, creando fuerzas de succión con ayuda de “faldones” para la formación de bajas presiones en las zonas inferiores del vehículo.

Por reglamentación, los apoyos aerodinámicos no podían ser móviles, por ello, Peter Wright y Colin Chapman optaron por buscar la manera de que el diseño de la misma carrocería produjera la succión debajo del *kart*.

Producto de ello, los *karts* empezaron a tener una forma de ala invertida capaz de generar bajas presiones en áreas muy grandes, similar a un tubo Venturi, que desencadenó en altas velocidades en las curvas de las pistas y reducidas distancias de frenado. Los *karts* se empezaron a llamar “*karts* ala” y fueron más eficientes y elegantes que el anterior Lotus 78, como el Lotus 79 que permitió dominar ese año el campeonato del mundo de Fórmula 1 a manos de Mario Andretti. Rápidamente, Lotus fue superado por Williams Grand Prix Engineering con el monoplaza FW07, además de nacer el clásico Ralt RT2/3/4 que tuvo éxito en la Fórmula 2, 3 y en la Toyota Atlantic.

En la década de los 80, la “era turbo” era ya una realidad, durante esta época diseñaron y fabricaron motores más potentes y eficientes. Los diseñadores también empezaron a tener en cuenta que el estudio de la salida del aire era fundamental para lograr un mayor rendimiento; esta idea desencadenó en el nacimiento de los difusores, convirtiéndose en un apoyo aerodinámico fundamental.

Tras las muertes de Roland Ratzenberger y Ayrton Senna en Imola 1994, la FIA, máximo ente rector de los deportes de motor, realizó cambios en la normativa con el fin de reducir el apoyo aerodinámico de manera drástica. La norma limitaba el espacio mínimo entre la gran parte del fondo del *kart* y el suelo, produciendo una reducción de apoyo hasta valores de un 40% y mejorando la sensibilidad a los cambios de altura entre suelo y monoplaza haciéndolos más seguros.

Durante la época descrita, muchas competiciones han sido creadas o han desaparecido, otras han sufrido cambios o se han adaptado a la innovación, pero cabe destacar que, en todas ellas, la influencia aerodinámica ha sido crucial para mejorar las prestaciones de los *karts* de carreras. No sólo la aerodinámica contribuye al mejor rendimiento del *kart*, también hay que destacar los neumáticos que realizan el contacto *kart*.suelo y limitan el agarre del mismo.

La FIA, en 1996, realizó un estudio del comportamiento de la aerodinámica de los autos cuando se encuentran pegados para permitir una mayor probabilidad de adelantamiento. Los estudios indicaron que si se reducía la carga aerodinámica el efecto sobre el *kart* trasero eran aún más negativo.

En 1998, La FIA introdujo, en el mundial de la Fórmula 1 los neumáticos con dibujo, con el objetivo de reducir el contacto entre el suelo y la rueda y con ello la velocidad de paso por una curva, provocando un aumento en las distancias de frenado.

Además, los *karts* se hicieron 20 centímetros más estrechos reduciendo así el área de planta encargada de generar carga aerodinámica.⁴

2.2. Aerodinámica

La aerodinámica es una rama que constituye una parte de la mecánica de fluidos. La misma, se encarga del estudio de las fuerzas que aparecen sobre cuerpos sólidos cuando existe un movimiento relativo entre estos y el fluido que los rodea, siendo este un gas (aire). El estudio aerodinámico del vehículo constituye una fase muy importante del proyecto para la fabricación del mismo. La variación de las cargas y la disminución de la resistencia al avance son factores determinantes al momento de diseñar un auto. Por ello, la disminución de la resistencia al avance es el primer objetivo que afrontaron los constructores de automóviles, el cual se relaciona de manera directa con la velocidad y la potencia generada por el motor.⁵

2.2.1. Coeficiente de fricción

Se define como el cociente entre los esfuerzos tangenciales por unidad de superficie y la presión dinámica del fluido. Matemáticamente se expresa como:

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}$$

Ecuación 1

2.2.2. Carga aerodinámica

La carga aerodinámica es la fuerza encargada de mantener al *kart* fijo sobre el suelo cuando el flujo de aire lo recorre. Ésta, es debida al rozamiento y al agarre sobre el suelo. Matemáticamente la carga aerodinámica se expresa como:

$$N = (m * g) + F_z$$

Ecuación 2

2.2.3. Sustentación

Es la fuerza normal resultante respecto a la dirección del flujo que tiende a mover al objeto en dirección normal al flujo, representa la suma de las componentes de

⁴ A. Borja, "ESTUDIO MECÁNICO Y AERODINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL ALERÓN TRASERO DE UN AUTOMÓVIL Depto. Ingeniería Mecánica. Carlos III De Madrid Univ., Madrid, España. 2015.

⁵ D.S. Morocho "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN AERODINÁMICA TUNING PARA FALDONES, ALERONES Y ESTRIBOS DE UN VEHÍCULO CHEVROLET ESTEEM 2002" Depto. Ingeniería Automotriz. Escuela politécnica del Ejército. Latacunga,

presión y fuerzas de corte.⁶Matemáticamente se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$F_L = C_L \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A$$

Ecuación 3

2.2.4. Coeficiente de sustentación

El coeficiente de sustentación depende directamente del ángulo de ataque del perfil aerodinámico respecto de la dirección del viento relativo; su fórmula matemática se puede obtener del despeje de la ecuación de la fuerza de sustentación, de esta manera:

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A}$$

Ecuación 4

2.2.5. Arrastre aerodinámico

Se llama resistencia aerodinámica o Drag al componente de la fuerza que sufre un cuerpo cuando se mueve a través del aire en dirección de la velocidad relativa del fluido entre este y el cuerpo. Se expresa como:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A$$

Ecuación 5

2.2.6. Coeficiente de arrastre

El coeficiente de arrastre representa la efectividad de la forma en que un cuerpo atraviesa el aire⁷. Este, es un factor de vital importancia en el diseño de un vehículo, además, está determinado por los diferentes ángulos que presenta un perfil aerodinámico. Matemáticamente se define como:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2 A}$$

Ecuación 6

⁶ Y. A. Cengel & J. M. Cimbala. *MECÁNICA DE FLUIDOS FUNDAMENTOS Y APLICACIONES*. Primera edición. México. McGraw-Hill. 2006. pp. 564.

⁷ A. Borja, "ESTUDIO MECÁNICO Y AERODINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL ALERÓN TRASERO DE UN AUTOMÓVIL Depto. Ingeniería Mecánica. Carlos III De Madrid Univ., Madrid, España. 2015.

Este parámetro como ya se mencionó es de vital importancia, debido a que es un factor influyente en la velocidad del vehículo, un mayor desempeño aerodinámico repercute en mayor incidencia en el medio. El coeficiente de arrastre está influido entre otros factores por:

- La velocidad del flujo, cuando más rápido se circula, mayor arrastre se genera.
- La limpieza superficial, se produce una pérdida de capa laminar y uniformidad del flujo, por lo que la resistencia al avance se ve favorecida.
- El peso del vehículo.
- Desigualdad de balance en el vehículo.

Por ende, el aumento en la velocidad o el ángulo de ataque del objeto se logra aumentar el coeficiente de arrastre.

2.2.7. Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica representa la relación entre la fuerza de sustentación y la fuerza de arrastre, su principal objetivo es maximizar el coeficiente de sustentación y a su vez, reducir el coeficiente de arrastre.⁸ Se define como:

$$f = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D} \quad \text{Ecuación 7}$$

2.2.8. Coeficiente de presión

De acuerdo con la ecuación de Bernoulli, cuando se incrementa la velocidad la presión dinámica aumenta, en tanto la estática disminuye, por este motivo, sobre la parte superior de un perfil aerodinámico (extradós) la presión estática decrece, en condiciones normales, esta presión es mayor sobre el intradós (parte inferior del perfil) que sobre el extradós.⁹ Matemáticamente, se puede determinar la distribución de presión mediante una ecuación llamada “coeficiente de presión”, se expresa como:

$$C_P = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2} \quad \text{Ecuación 8}$$

⁸ A. Borja, “ESTUDIO MECÁNICO Y AERODINÁMICO DEL COMPORTAMIENTO DEL ALERÓN TRASERO DE UN AUTOMÓVIL” Depto. Ingeniería Mecánica. Carlos III De Madrid Univ., Madrid, España. 2015. 20-23p

⁹ G.H. Scarpin. “AERODINÁMICA DE PERFILES, CAPÍTULO II”. Córdoba. 2002. pp. 3

La distribución de la presión sobre un elemento aerodinámico varía según el ángulo de ataque y la simetría del mismo.

2.2.9. Momento

La distribución de presión sobre el perfil aerodinámico genera una fuerza perpendicular hacia arriba, sobre el extradós y una en dirección opuesta sobre el intradós, de esta manera, se generan los momentos aerodinámicos, o también llamados “momentos de cabeceo”.

Para un perfil simétrico, con un ángulo de ataque cero, se produce una distribución de presión uniforme tanto en intradós como en extradós, por lo que las fuerzas resultantes son las mismas, pero en dirección contraria, teniendo en cuenta esto y que la aplicación de dichas fuerzas es en el mismo punto no se producirá sustentación ni momento de cabeceo.

Para el perfil simétrico, con ángulo de ataque diferente de cero, se produce una distribución de presión diferente sobre el intradós y extradós, siendo mayor la fuerza resultante en la parte superior del perfil que en la parte inferior se generará sustentación, sin embargo, al aplicarse sobre el mismo punto no se producirá momento de cabeceo.

En un perfil asimétrico la línea de curvatura media ya no coincide con la cuerda del perfil, la fuerza sobre el extradós será mayor que sobre el intradós y no estarán aplicadas sobre el mismo punto, dos fuerzas de diferente magnitud y en sentido opuesto, además de generar una fuerza resultante en dirección de la mayor, producirá un momento de cabeceo.

2.2.10. Coeficiente de momento

El coeficiente de momento representa la relación entre el momento de cabeceo generado por el perfil (tomado al 25% de la cuerda media aerodinámica) y la presión dinámica¹⁰, matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S l}$$

Ecuación 9

¹⁰ G.H. Scarpin. “AERODINÁMICA DE PERFILES, CAPÍTULO II”. Córdoba. 2002. pp. 14-15 ¹¹P. Daniel. Sustentación y resistencia aerodinámica. [en línea]. Disponible en: <http://pdctdrlasallebonanova.blogspot.com.co/p/aerodinamica-ii.html>

2.2.11. Curva polar

La gráfica polar de un perfil aerodinámico representa la variación del coeficiente de sustentación en función del coeficiente de arrastre. Es de vital importancia dicha curva, dado que indica el margen de sustentación entre el cual la resistencia se mantiene entre límites adecuados.

La tangente del ángulo formado por una línea radial trazada a la curva desde el origen de las coordenadas representa la relación entre el coeficiente de sustentación y arrastre del perfil, se representa como:

$$\frac{C_L}{C_D} = \frac{F_L}{F_D} \quad \text{Ecuación 10}$$

Dicha relación es de vital importancia en el diseño de un elemento aerodinámico ya que establece el mayor coeficiente de sustentación cuando se tiene el menor coeficiente de arrastre.¹¹

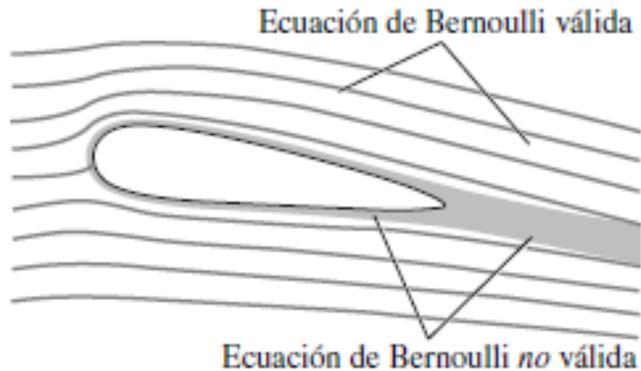
2.2.12. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli representa una relación entre la velocidad, la presión y la elevación producida por el contacto entre un fluido y un objeto, ésta, es válida en regiones donde el flujo es estacionario e incompresible.

La aproximación de la ecuación de Bernoulli tiene algunas limitaciones en su aplicación, se deben tener en cuenta que los efectos viscosos de un fluido son despreciablemente pequeños en comparación con los efectos de inercia, gravitacionales y de presión. Todos los fluidos son viscosos, por ende, esta aproximación no puede ser válida para todo un campo de flujo, en otras palabras, no se puede aplicar la ecuación de Bernoulli en todas partes de un flujo, sin importar que tan pequeña sea la viscosidad de un fluido. Sin embargo, resulta que la aproximación es apreciable en algunas zonas del flujo, éstas, se consideran como regiones no viscosas, dado que representan lugares donde las fuerzas viscosas o de fricción netas son despreciablemente pequeñas en comparación con las fuerzas anteriormente mencionadas que actúan sobre cada partícula del fluido en cuestión.¹¹

¹¹ Cengel, Yunus & Cimabala, John. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. México: McGraw-Hill, 2006. p. 185.

Figura 1. Zonas de Flujo válidas para la ecuación de Bernoulli.



Fuente: Cengel, Yunus & Cimabala, John. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones

2.2.13. Número de Reynolds

El número de Reynolds es un cociente que relaciona los esfuerzos inerciales con los esfuerzos viscosos ejercidos sobre un cuerpo y es utilizado para comparar datos a diferentes velocidades de flujo. En el flujo laminar, el número de Reynolds es pequeño debido a viscosidad alta y velocidades bajas, mientras en un flujo turbulento, es mayor a velocidades altas y viscosidad baja.¹²

2.2.14. Condición de no deslizamiento

Un fluido es aquella sustancia que fluye por un recipiente y adopta la forma del mismo, deformándose continuamente mientras sufre un esfuerzo tangencial.

Una de sus propiedades es la viscosidad, ésta, determina la resistencia que tiene un fluido a ser deformado de manera continua a través del tiempo mediante la aplicación de una fuerza tangencial. Toda partícula de un fluido que se encuentra en contacto con un objeto sólido presenta siempre la velocidad del sólido, no existe deslizamiento entre fluidos y objetos que se encuentran en contacto. Esta propiedad se conoce como “condición de no deslizamiento”.

Las partículas de fluido (aire) que envuelven el alerón de un kart cuando se encuentra en movimiento se ven sometidas a la condición de no deslizamiento provocando que la velocidad relativa entre el vehículo y las partículas de aire en contacto sea cero. De la misma manera, las partículas de fluido en contacto con

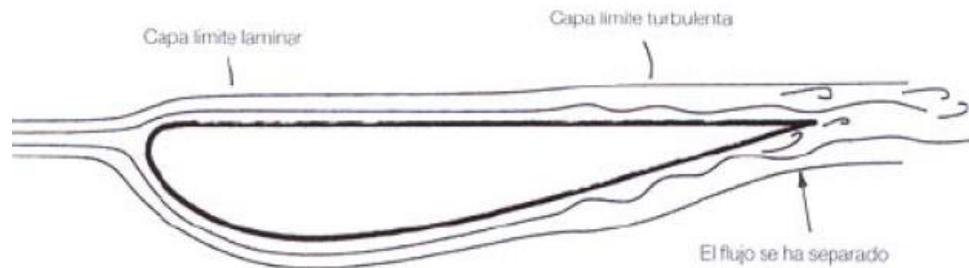
¹² Cengel, Yunus & Cimabala, John. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. México: McGraw-Hill, 2006. p. 564.

las anteriores experimentan una alteración no teniendo la misma velocidad que tendría esta misma partícula si estuviera a una distancia infinita, de la misma manera sucede con las partículas en contacto con estas. Dicha zona donde el fluido se ve alterado por la condición de no deslizamiento con un sólido se conoce como capa límite, la cual se compone por el fluido en contacto con el sólido hasta que alcanza un 99% de la velocidad que debería experimentar si estuviera lo suficientemente alejada del sólido.¹³

2.2.15. Capa límite

La capa límite es la zona de un fluido que debido a su movimiento es perturbado por la presencia de un sólido en contacto. El gradiente de velocidad es cero en la zona de superficie hasta llegar al flujo principal en el borde exterior, representando el 99% de la velocidad del aire sin perturbaciones.¹⁴

Figura 2. Capa laminar y turbulenta en un perfil



Fuente: Cengel, Yunus & Cimabala, John. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones

La capa límite se puede clasificar en dos tipos: Capa laminar y capa turbulenta, el flujo presenta un comportamiento laminar y turbulento respectivamente.

- Flujo laminar: Representa aquel flujo que se caracteriza por líneas suaves de corriente y un movimiento intensamente ordenado.

¹³ Camuñez, Rubén. Elementos y dispositivos en la Fórmula 1: Parte central del vehículo. España: Escuela técnica superior, 2014. p.16.

¹⁴ Borja, A., Estudio Mecánico Y Aerodinámico Del Comportamiento Del Alerón Trasero De Un Automóvil. España: Carlos III De Madrid Univ., Madrid, 2015. P. 23.

- Flujo turbulento: Representa aquel flujo que se caracteriza por líneas de corriente intensamente desordenadas, además de fluctuaciones de la velocidad.¹⁵

2.3. Dinámica de fluidos computacional

2.3.1. Definición

La dinámica de fluidos computacional, es un conjunto de metodologías que permiten analizar fenómenos relacionados con el flujo de un fluido mediante el uso de computadores; para ello, las ecuaciones fundamentales son expresadas de manera diferencial o integral, para luego ser traducidas de manera algebraica y así obtener un resultado numérico.¹⁶

2.3.2. Aplicaciones

Debido a la gran cantidad de análisis que se pueden realizar con CFD, no es extraño que sea una herramienta que se emplee para la investigación o el diseño; la lista de sus usos se extiende de la siguiente manera:

- Aerodinámica de aviones y vehículos.
- hidrodinámica de barcos
- Central eléctrica: combustión en motores de combustión interna y turbinas de gas.
- Ingeniería eléctrica y electrónica: enfriamiento de equipos, incluidos los microcircuitos.
- Ingeniería de procesos químicos: mezclas y separación, moldeo de polímeros.
- Entorno externo e interno de los edificios: carga de viento y calefacción o ventilación.
- Ingeniería ambiental: distribución de contaminantes.
- Hidrología y oceanografía: flujos en ríos, estuarios y océanos.
- Meteorología: predicción del clima.
- Ingeniería biomédica: flujo de sangre a través de las arterias y venas.¹⁷

2.3.3. Elementos

Los códigos CFD están estructurados de acuerdo a los algoritmos numéricos que requieran el problema con el que se trabaja. De manera general, estos códigos

¹⁵ Cengel, Yunus & Cimabala, John. Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones. México: McGraw-Hill, 2006. p. 342.

¹⁶ ANDERSON, John. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995. p.3.

¹⁷ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2ª Edición. Harlow: Pearson, 2007. p.1.

tienen 3 elementos principales: un pre-procesador, un solucionador y un pos procesador.

2.3.3.1. Pre-procesador

En el pre procesamiento, un programa CFD da entrada a un problema de flujo, en esta etapa; se deben realizar diferentes tareas, tales como: definir la geometría de la región de interés, generar la malla de dicha región, seleccionar los fenómenos físicos que van a modelarse, definir las propiedades del fluido y especificar las condiciones de frontera.

La solución de un problema en CFD se da en los nodos dentro de cada una de las celdas que componen la malla, por tanto, la precisión del resultado depende de la cantidad de celdas que se empleen; sin embargo, otro factor a tener en cuenta es el costo computacional, ya que entre mayor cantidad de nodos hayan, mayor será el costo. La mayor parte del tiempo de un proyecto con uso de CFD está relacionado con la definición de la geometría y la generación de la malla.

2.3.3.2. Solucionador

Algunos de los métodos numéricos empleados para dar solución a las ecuaciones fundamentales son: diferencias finitas, elementos finitos y métodos espectrales. De manera general el algoritmo numérico tiene los siguientes pasos:

- Conversión de las ecuaciones en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Solución de las ecuaciones algebraicas mediante un método iterativo.

2.3.3.3. Post-procesador

El post-proceso cuenta con una amplia gama de herramientas para poder observar los datos obtenidos a lo largo de la simulación; como lo es la animación para la visualización de resultados y la posible exportación de estas para su futura manipulación.¹⁸

2.4. Aspectos básicos de la discretización

La palabra “discretización” no cuenta en realidad con un significado específico, aunque esta, se pueda entender como “juntar” o “agrupar” un conjunto de elementos que no se encuentren conectados; en un ámbito como el de la dinámica de fluidos computacional, la palabra discretizar hace referencia al proceso mediante el cual una expresión matemática se aproxima a diferentes expresiones

¹⁸ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2º Edición. Harlow: Pearson, 2007. P.2-4.

análogas que prescriben los valores a un número finito de puntos o volúmenes en el dominio; es decir, es la aproximación en valores finitos que se realiza a una expresión matemática.

Para dar solución a un problema que inicialmente se encontraba expresado como una función matemática, se emplean soluciones analíticas de ecuaciones diferenciales parciales (E.D.P.) las cuales cambian las variables independientes de manera continua dentro del dominio; sin embargo las E.D.P. solo dan soluciones en puntos discretos dentro del dominio, dichos puntos surgen al crear una malla computacional.

Para casos sencillos, el espaciamiento entre puntos es igual, de esta manera, la programación de la solución es mucho más sencilla; para casos realizados en CFD, los cálculos computacionales se desarrollan en un espacio en el que el espaciamiento que hay entre puntos de la malla es el mismo; aun así, se cuenta con mallas denominadas “no estructuradas” en las que dicha propiedad es diferente, ya que la distancia entre puntos no es la misma y por lo general es una superficie muy irregular.

Si se tiene un campo de flujo que es gobernado por las ecuaciones de Navier-Stokes o de Euler, una solución analítica de dichas ecuaciones permitiría conocer expresiones cerradas acerca de diferentes propiedades en cualquiera de los puntos del dominio. Si las derivadas parciales en las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del fluido son reemplazados por coeficientes algebraicos donde son expresados en términos de otras variables, las E.D.P. habrán sido discretizadas mediante un método denominado diferencias finitas.¹⁹

2.5. Turbulencia y su modelación

En la dinámica de fluidos es posible encontrar gran cantidad de fluidos con diversos comportamientos; los más comunes de estos son flujos laminares o turbulentos (según corresponda un respectivo número de Reynolds). El factor más importante que difiere de un modelo a otro es la velocidad de operación, para bajas velocidades es posible que el flujo sea en su mayoría laminar; mientras que a grandes velocidades el flujo sea turbulento; este último se caracteriza por ser un flujo desordenado y que de manera general termina generando vórtices; este tipo

¹⁹ ANDERSON, John. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995. p.17.

de flujo es el más complejo por el cambio de velocidad y otras propiedades en diferentes direcciones.²⁰

2.5.1. Calculo flujo turbulento

Debido a que en algunas aplicaciones es necesario evitar la presencia de turbulencias (caracterizada por la presencia de remolinos) o incluso promover la presencia de estas; es de gran importancia desarrollar los métodos numéricos necesarios para poder calcular la presencia y los efectos de dichas turbulencias; los métodos más conocidos son: Modelos de Turbulencia Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES) y Direct Numerical Simulation (DNS).²¹

2.5.2. Modelos de flujo turbulento

Gran parte de los proyectos no requieren resolver en detalle las fluctuaciones de las turbulencias que dicho problema presenta; por lo cual, cuando se emplea CFD, es posible hacer aproximaciones tomando en cuenta propiedades promedio, por ejemplo; velocidades medias, presiones medias, etc. Por lo que los cálculos de flujos turbulentos se pueden realizar mediante las ecuaciones promediadas de Navier-Stokes

Sin embargo, el promedio del tiempo en las ecuaciones descarta detalles importantes de las fluctuaciones de los fluidos; por lo que para poder calcular flujos turbulentos con las ecuaciones Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) se requiere desarrollar modelos de turbulencia para poder predecir tensiones; al emplearse en CFD se requieren que dichos modelos sean precisos, simples y económicos de ejecutar. Los modelos RANS difieren entre estos mismos por el número de ecuaciones que se requieren para obtener las soluciones. Dichos modelos son: Mixing Length Model, Spalart Allmaras Model, $k-\epsilon$ Model, $k-\omega$ Model, Algebraic Stress Model (ASM) y Reynolds Stress Model (RSM).²²

2.6. Condiciones de frontera

La solución de un problema CFD requiere de la definición de unas condiciones de operación y condiciones de frontera, las cuales dependen de la geometría y de la complejidad de cada problema; estas condiciones deben acercarse lo más posible

²⁰ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2^o Edición. Harlow: Pearson, 2007. P.40-42.

²¹ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2^o Edición. Harlow: Pearson, 2007. P.65-66.

²² VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2^o Edición. Harlow: Pearson, 2007. P.66-67.

a las del problema real, ya que de esto dependerá la veracidad de los resultados y su posible aplicación. Las dos formas más comunes de configurar una condición de frontera son: i) prescribir el valor de la variable y ii) asignar el gradiente de la variable²³.

2.7. Consideraciones legales

2.7.1. Según el reglamento CIK-FIA (Comisión Internacional de *Karting* de la Federación Internacional de Automovilismo) de la competencia de *karting* mundial, la selección de partes para el diseño del *kart* debe cumplir con dicha normativa; entre los puntos tratados; se han tenido en cuenta:

2.7.1.1. Seguridad: los *karts* sólo están autorizados a correr si se encuentran en un estado de conformidad con la reglamentación de la CIK/FIA que velen por la seguridad del piloto.

2.7.1.2. Chasis: Todas las piezas principales del chasis deben estar fijadas sólidamente unas contra las otras. La utilización de titanio está prohibida.

2.7.1.3. Diseños de paragolpes: protección delantera y trasera; paragolpes delanteros y traseros ambos construidos en acero magnético cuya altura máxima debe ser 20 cm del suelo.

2.7.1.4. Especificaciones para el parachoques delantero:

- El parachoques delantero debe consistir de por lo menos 2 elementos de acero.
- Un acero la barra superior con un diámetro mínimo de 16 mm y un acero la barra más baja con un diámetro mínimo de 20 mm, ambas barras conectadas a la vez (estos 2 elementos deben ser independientes de la conexión de los pedales)
- Debe conectarse al chasis por 4 puntos, adicionalmente deben soldarse las conexiones de la barra superior y la barra más baja al marco del chasis.
- Proyección delantera: 350 mm (mínimo)
- Ancho de la barra más baja: recta y 300 mm (mínimo, respecto al eje longitudinal del *kart*)
- La conexión de la barra más baja debe ser paralela (en ambos planos horizontales y verticales) al eje del chasis y permite ajustarse (sistema de conexión al marco-chasis) de 50 mm de los parachoques; ellos deben estar 450 mm aparte y deben central el eje longitudinal del *kart* respecto a una altura de 90 +/- 20 mm del suelo.
- El ancho de la barra superior: recta y 400 mm (mínimo respecto al eje longitudinal del *kart*)
- La altura de la barra superior 200 mm y 250 mm mínimo y máximo del suelo respectivamente.

²³ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2^o Edición. Harlow: Pearson, 2007. p.196.

- Las conexiones de la barra superior deben estar 550 mm aparte y centrado respecto al eje longitudinal del *kart*.

2.7.1.5. Peso: Para las competencias de *Karting* el peso es un factor muy importante, ya que este permite que el rendimiento sea mejor tanto en desgaste de neumáticos, consumo de combustible y sin lugar a duda influye también la su velocidad, por esta razón en las competencias se busca lograr el menor peso posible.²⁴

2.7.2. Según el reglamento FCK (Federación Colombiana de *Karts* – Reglamento Deportivo Nacional 2015) algunas consideraciones que le atañen al diseño de un *Kart* para carrera son:

2.7.2.1. Materiales: No metálicos, fibra de carbono, Kevlar y fibra de vidrio están prohibidos, en todas las categorías; si se utiliza plástico, no debe ser posible la fragmentación.

2.7.2.2. Consideraciones en el diseño del parachoques delantero:

- En ningún momento debe estar situado por encima del plano que pasa por la parte alta de las ruedas delanteras.
- No debe tener aristas vivas.
- Tiene que tener un ancho mínimo de 1.000 mm y como máximo el ancho exterior del tren delantero.
- La distancia máxima entre las ruedas delanteras y la parte trasera del carenado: 150 mm.
- Voladizo delantero: 650 mm.
- El carenado debe tener en su cara delantera una superficie vertical de 80 mm de altura como mínimo y de 300 mm de longitud como mínimo situado inmediatamente por encima de la distancia al suelo.
- No debe poder acumular agua, arena, o cualquier otra sustancia.²⁵

²⁴ E. Santín, D. Toro, "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN KART SEGÚN LAS NORMAS CIK/FIA", M.S. thesis, Depto. AUTOMOTRIZ. Eng. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, ECUADOR, 2013.

²⁵ FEDERACIÓN COLOMBIANA DE KARTS, "REGLAMENTO DEPORTIVO NACIONAL", Colombia, 2017. {En línea} [Disponible en] <http://fedekart.net/pdf/enero2015/RDN%202015%20.pdf>

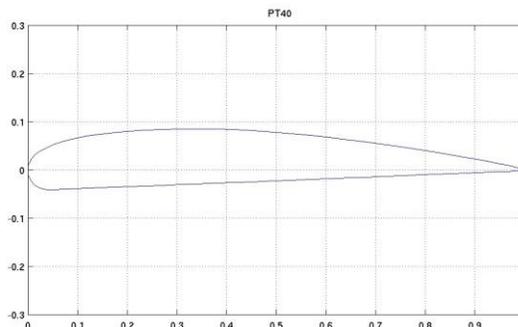
3. ELECCIÓN DE PERFIL AERODINÁMICO

Debido a que el proyecto se enfoca en el diseño del alerón delantero del kart, la elección del perfil aerodinámico para este es de gran importancia; por ello, se realizaron filtros de los perfiles encontrados en la página UIUC Airfoil Coordinates Database, posterior a esto, se empleó el software XFLR5 para poder analizar aspectos aerodinámicos de los perfiles seleccionados a diferentes ángulos de ataque y números Reynolds y así poder elegir el que se cree mejor desempeño tendría.

De la página UIUC Airfoil Coordinates Database se seleccionaron los perfiles que se emplean cuando se manejan bajos números de Reynolds dado que la velocidad de operación para este proyecto era de 20.83 m/s; entre estos, se encuentran un total aproximado de 184 perfiles, de los cuales se preseleccionaron 18 para un filtrado posterior de 10; estos filtros se realizaron a partir de las características de los perfiles, considerando el acople que tendría el alerón con el protector superior del kart en cuestión. Por una parte, 5 de los perfiles se eligieron considerando una forma simétrica debido a que esta forma a un grado de inclinación considerable podría emplearse como una extensión del protector delantero; mientras que los otros 5 perfiles se eligieron de manera que su línea de curvatura media se encontrará más cerca del extradós que el intradós con el objetivo de suavizar el flujo de aire que se direcciona del alerón al kart, estos últimos 10 perfiles que se analizaron posteriormente mediante el software XFLR5 fueron:

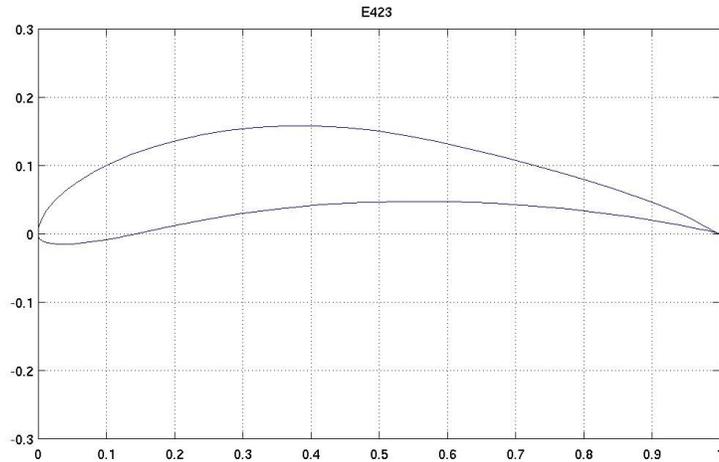
FX63-137	A-18
S4180	E-174
S4320	E423
SPICA	PT-40
WB-135/35	E42

Figura 3. Perfil PT40 considerado por poseer un intradós plano.



Fuente: UIUC Airfoil Coordinates Database

Figura 4. Perfil E423 considerado por tener su línea de curvatura media próxima al extradós



Fuente: UIUC Airfoil Coordinates Database

Los parámetros empleados durante la simulación realizada en el software XFLR-5 tales como la densidad y viscosidad dinámica del aire se tomaron considerando la altitud de Bogotá respecto del nivel medio del mar, la longitud del perfil se considera teniendo en cuenta las reglamentaciones del karting, las medidas establecidas para un parachoques en un kart de categoría junior, finalmente, la velocidad del aire se consideró dentro del rango mostrado debido a que entre estas, se encuentran las velocidades de operación típicas de un kart en competencia; dichos valores se consignan en la siguiente tabla.

Tabla 1. Condiciones de la simulación en XFLR-5

Parámetro	Magnitud
Velocidad del aire	75 - 100 (km/h)
Densidad	0,943409 (kg/m ³)
Viscosidad dinámica	0,000017054 (kg/m*s)
Longitud del perfil	13 (cm)

Fuente: Autores

Cada uno de los perfiles se simuló con dichas condiciones a diferentes ángulos de ataque; para cada perfil se tuvieron en cuenta diversos parámetros aerodinámicos tales como el coeficiente de sustentación, arrastre y la eficiencia; los perfiles con los mejores resultados, es decir, que presentaban un alto valor de eficiencia y coeficiente de sustentación en relación al coeficiente de arrastre cuando el perfil está en un alto grado de inclinación respecto al viento relativo, se muestran en las siguientes tablas.

Tabla 2. Parámetros aerodinámicos perfil FX63-137

Perfil	Ángulo de ataque	Cl	Cd	L/D
FX63-137	10°	1,708	0,029	58,613
	11°	1,69	0,038	44,586
	12°	1,675	0,049	33,931
	13°	1,695	0,059	28,756
	14°	1,736	0,067	25,883
	15°	1,781	0,075	23,638
	16°	1,823	0,084	21,622

Fuente: Autores

Tabla 3. Parámetros aerodinámicos perfil S4180

Perfil	Ángulo de ataque	Cl	Cd	L/D
S4180	10°	1,43	0,025	56,208
	11°	1,463	0,031	47,656
	13°	1,531	0,044	34,875
	14°	1,514	0,053	29,592
	15°	1,572	0,064	24,64
	16°	1,534	0,084	18,968

Fuente: Autores

Tabla 4. Parámetros aerodinámicos perfil S4320

Perfil	Ángulo de ataque	Cl	Cd	L/D
S4320	10°	1,433	0,026	55,49
	11°	1,465	0,03	48,528
	12°	1,477	0,036	40,877
	13°	1,481	0,045	32,975
	14°	1,434	0,062	23,009
	15°	1,39	0,083	16,795
	16°	1,375	0,102	13,326

Fuente: Autores

Tabla 5. Parámetros aerodinámicos perfil SPICA

Perfil	Ángulo de ataque	Cl	Cd	L/D
SPICA	10°	1,412	0,023	60,657
	11°	1,46	0,026	56,242
	12°	1,468	0,029	50,237
	13°	1,469	0,035	42,318
	14°	1,458	0,043	33,668
	15°	1,408	0,059	23,934
	16°	1,326	0,082	16,152

Fuente: Autores

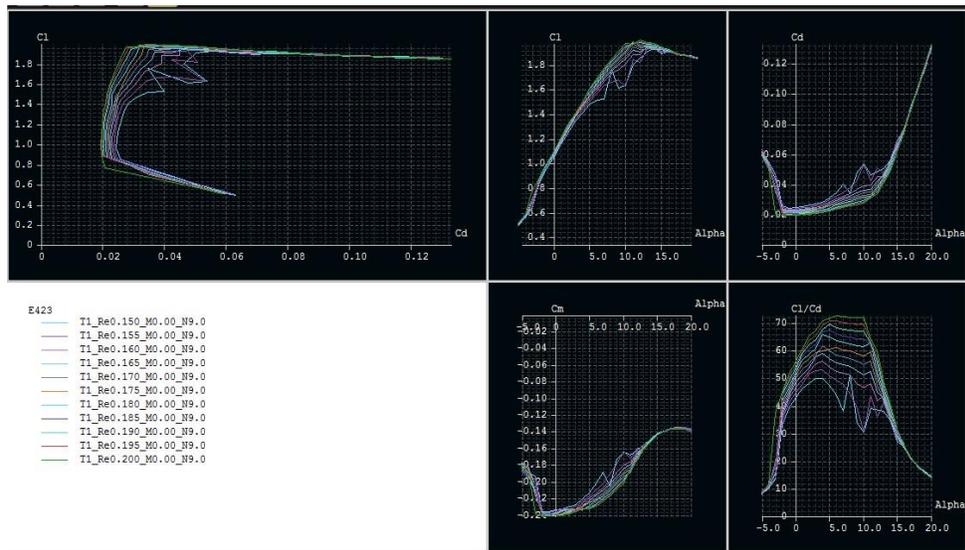
Tabla 6. Parámetros aerodinámicos perfil E423

Perfil	Ángulo de ataque	Cl	Cd	L/D
E423	10°	1,628	0,054	30,285
	11°	1,798	0,046	38,85
	13°	1,909	0,05	38,047
	14°	1,929	0,056	34,542
	15°	1,888	0,069	27,277
	16°	1,91	0,077	24,953
	17°	1,628	0,054	30,285

Fuente: Autores

En las siguientes imágenes se evidencian los resultados obtenidos para el análisis del perfil Eppler E423.

Figura 5. Parámetros aerodinámicos del perfil E423.



Fuente: Autores

En la imagen anterior se puede ver un resumen de las gráficas del comportamiento del perfil a diferentes ángulos de ataque y Reynolds; entre estas se encuentran la gráfica de Coeficiente de Sustentación vs. Ángulo de ataque; Coeficiente de Drag vs. Ángulo de ataque; Coeficiente de Momento vs. Ángulo de ataque y finalmente la Eficiencia vs. Ángulo de ataque.

El objetivo del proyecto se centró en el aumento de carga aerodinámica para hacer al kart mucho más estable en competencia, sobretodo en ocasiones de giro, evitando que deba frenar más de lo necesario para seguir la trazada y perder segundos; por esto, al considerar los resultados obtenidos en las tablas mostradas anteriormente, el perfil con mayor coeficiente de sustentación y mejor relación L/D, es decir, eficiencia aerodinámica para un ángulo de 14 grados fue el Eppler 423, de ahí, que fuera seleccionado para el posterior modelado e implementación en el kart. Se consideró el ángulo de 14 grados para el perfil dado que era el ángulo de inclinación que mejor se ajustaba para lograr que la transición entre el borde de salida del perfil y el protector delantero fuera lo más fina posible, logrando así una mayor uniformidad del flujo de aire al atravesar dicha sección del kart.

4. GEOMETRÍA DEL VEHÍCULO

Partiendo de los planos facilitados por la compañía Birel ART, se procede a realizar el diseño del kart en el software Solid Edge, manteniendo las medidas pero simplificando la geometría de las partes que componen este; para la elaboración del alerón se empleó el software INVENTOR, diseño que luego se adjuntó al kart; de manera que se finalizan los dos karts, uno de estos siguiendo el diseño original y el otro con la modificación en el alerón delantero. Una vez se tienen los diseños de los karts, se elabora un volumen de control que contenga los respectivos diseños y cuyas dimensiones sean apropiadas para poder observar el comportamiento del fluido

4.1. *Diseño y modelamiento*

El modelamiento del vehículo se realizó a partir de la documentación facilitada por la compañía Birel-Art, sin embargo su estructura general se simplificó empleando figuras y geometrías de mayor espesor; el suelo del kart, por ejemplo, que es hecho en tubos se reemplazó por un placa plana; algunas de las partes no se incluyeron en el modelamiento, como es el caso del motor, las tijeras de los frenos y demás; adicionalmente, algunos detalles no se tuvieron en cuenta, por lo que partes como las ruedas, el timón y el alerón delantero son mucho más sencillos que en el kart; todo esto con la idea de que el proceso de enmallado sea menos complejo y por tanto el consumo computacional no se incremente al evitar incluir partes que puedan ser demasiado pequeñas o complejas.

Posterior a este diseño, se realizó el modelamiento del segundo kart en donde se mantenía la geometría anterior, excepto por el alerón delantero; el cual se desarrolló a partir del perfil aerodinámico seleccionado previamente (como se muestra en el punto anterior); para la incorporación de esta nueva pieza, se tuvieron en cuenta las dimensiones del kart fabricado por la empresa Birel-Art; esto con el fin de que el nuevo diseño se encuentre dentro de la normatividad colombiana para el karting de competencia y de que el piloto no encuentre gran diferencia en su puesto entre el kart tradicional y el que tiene un nuevo alerón.

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Figura 6. Kart Birel-Art

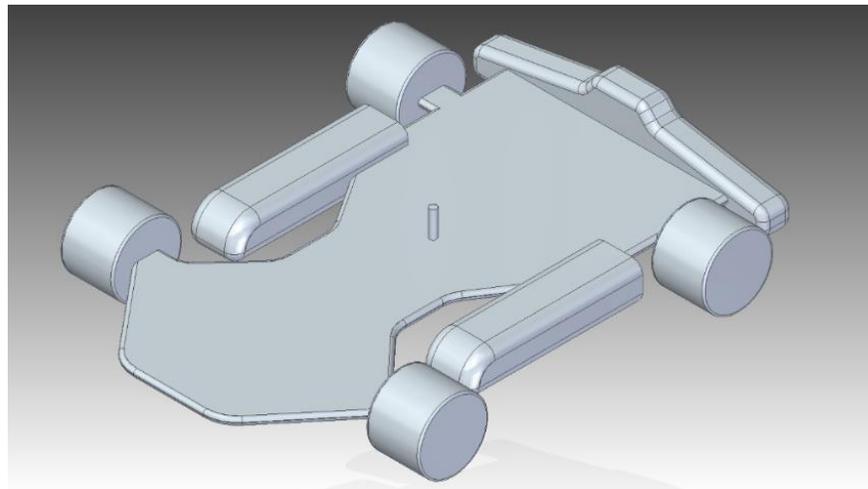


Fuente: Autores

4.1.1. Modelamiento piezas del kart

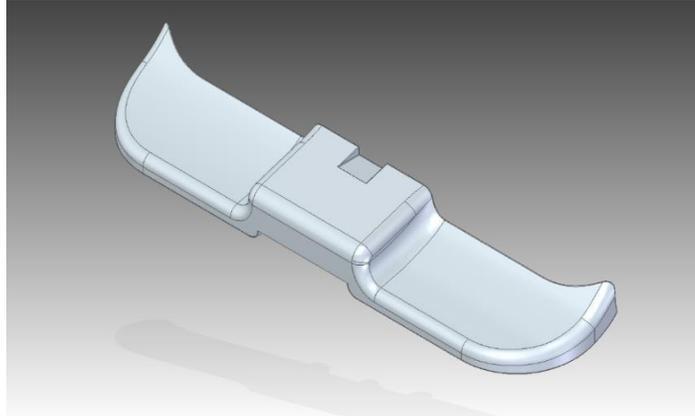
Cada uno de los elementos se diseñaron y modelaron en Solid Edge, licencia académica de Fundación Universitaria Los Libertadores, estos se desarrollaron partiendo de las medidas suministradas por la documentación del kart Birel-Art.

Figura 7. Chasis modelado del kart.



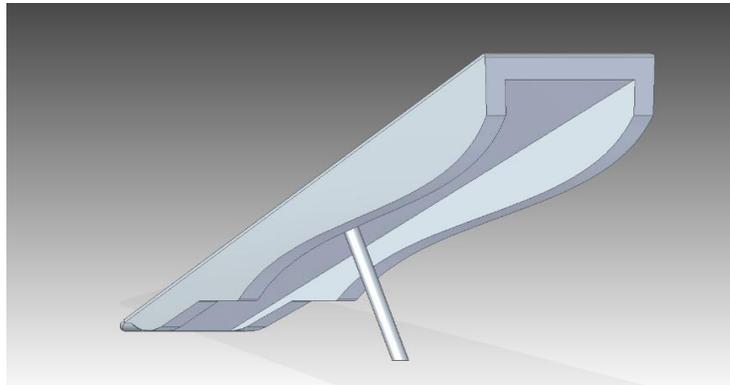
Fuente: Autores

Figura 8. Alerón tradicional del kart.



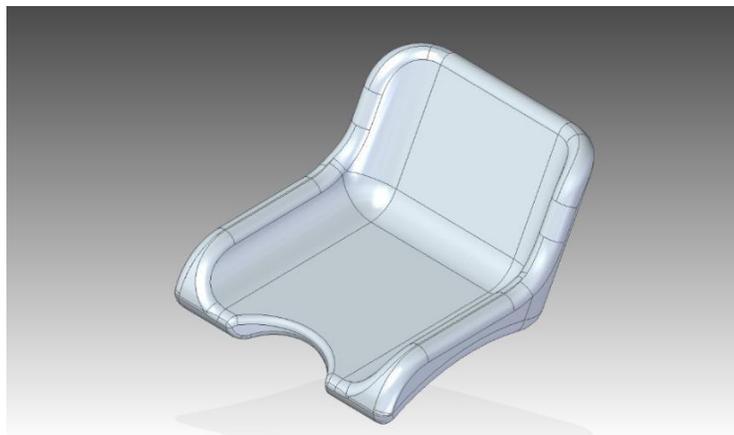
Fuente: Autores

Figura 9. Protector delantero del kart.



Fuente: Autores

Figura 10. Silla del kart.



Fuente: Autores

Figura 11. Timón del kart.



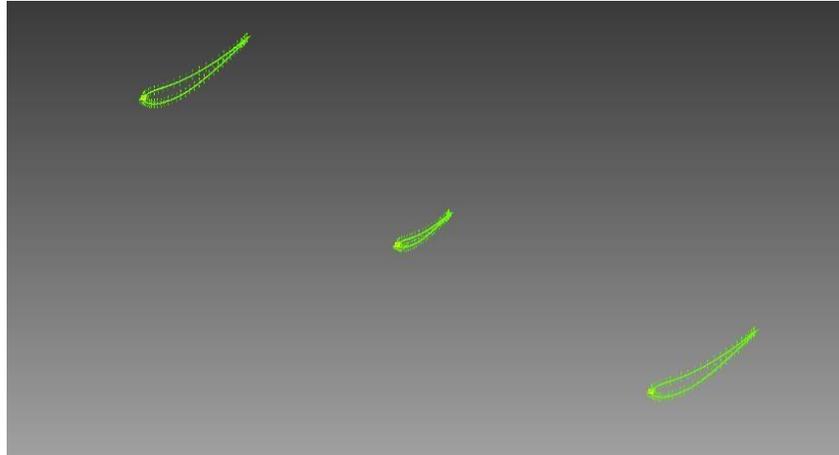
Fuente: Autores

4.1.2. Modelamiento alerón delantero

A diferencia de las demás piezas elaboradas, el diseño del alerón delantero a partir del perfil aerodinámico se realizó en el software Inventor simplemente por facilidad de trabajo y modelado; adicionalmente, para obtener el mayor rendimiento del alerón se diseñó para que al ensamblarlo en el kart se lograra un ángulo de ataque entre la dirección del viento y la cuerda del perfil de 14° , este ángulo genera el mayor coeficiente de sustentación; dichos datos se obtuvieron en la fase de selección del perfil aerodinámico mostrada en el capítulo 5. Como último aspecto, se introdujeron endplates con el objetivo de reducir el arrastre generado por la diferencia de presiones para lograr mayor eficiencia de flujo y uniformidad.

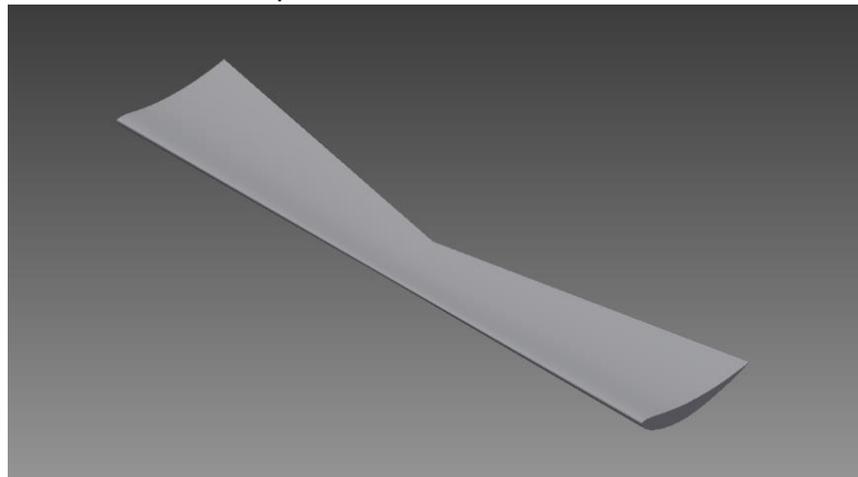
INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Figura 12. Esquema preliminar del perfil usado para el alerón modificado.



Fuente: Autores

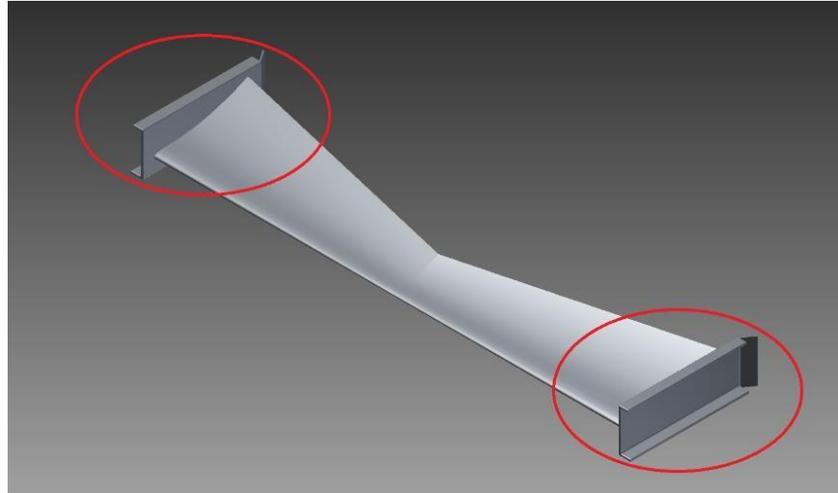
Figura 13. Alerón modificado para el kart Birel ART.



Fuente: Autores

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Figura 14. Alerón modificado con endplates ajustados.



Fuente: Autores

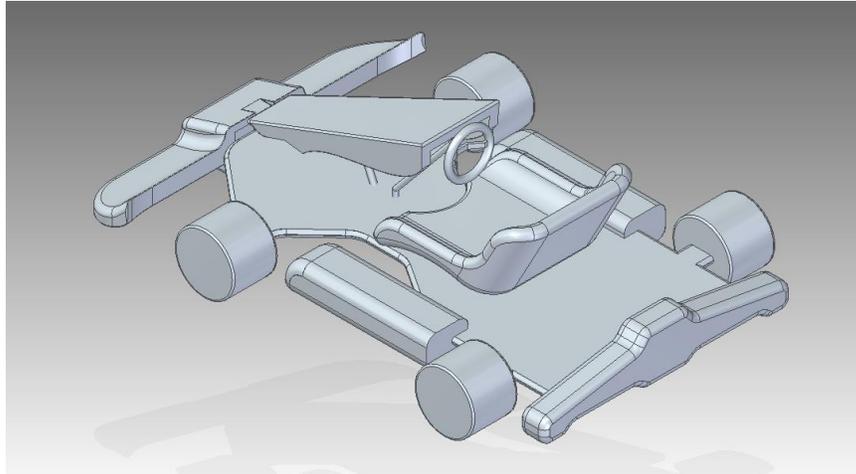
Nota: Los elementos destacados por las elipses rojas son los endplates ajustados al alerón para el kart.

4.1.3. Ensamble de los modelos CAD

Una vez se tuvieron todas las piezas, se prosiguió a realizar los ensambles de cada uno de los karts; empleando el software Solid Edge ST10, licencia académica personal, para así obtener el modelo CAD del kart de la compañía Birel-Art y el del kart con el nuevo alerón; como se puede apreciar en la figura 13 y 14 respectivamente.

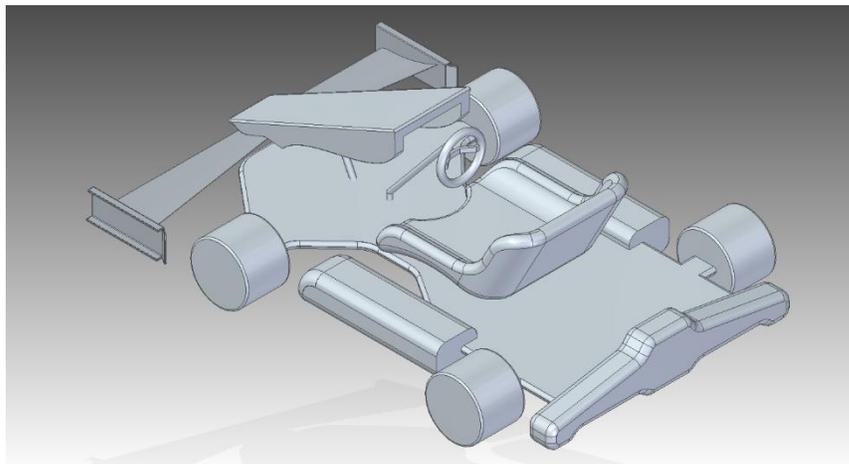
INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Figura 15. Modelo CAD ensamblado del kart con alerón tradicional.



Fuente: Autores

Figura 16. Modelo CAD ensamblado del kart con alerón modificado.



Fuente: Autores

4.2. Dominio computacional

El volumen de control principal fue diseñado y modelado en Solid Edge ST10 licencia académica personal. Para lograr las medidas exactas de dicho volumen se requirieron las dimensiones de largo, ancho y alto del kart. Dichas medidas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 7. Dimensiones del kart con alerón tradicional.

Concepto	Medida [mm]
Alto	430
Ancho	1015
Largo	1530.14

Fuente: Autores

Con dichas medidas y teniendo en cuenta la tesis de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014”²⁶ donde consideran el artículo de Castro *et al*²³ en su investigación titulada “*COMPUTATIONAL PREDICTION OF A VEHICLE AERODYNAMICS USING DETACHED EDDY SIMULATION*” se determinaron las dimensiones del volumen principal para posteriormente generarlo mediante el software Solid Edge, hay que destacar que este volumen se introdujo para la mitad del kart debido a la simetría que este presenta y así lograr un ahorro considerable del gasto computacional. Los parámetros de dimensionamiento basados en las referencias previamente mostradas se evidencian en la tabla como sigue:

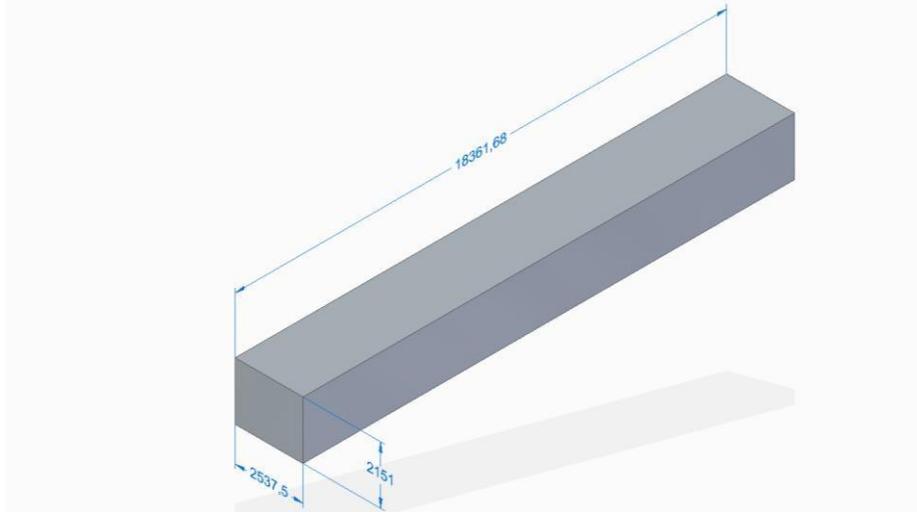
Tabla 8. Dimensiones del kart con alerón modificado.

Concepto	Parámetro de dimensión
Flujo incidente	4x Largo del kart
Flujo saliente	7x Largo del kart
Ancho del volumen principal	2.5x Ancho del kart
Alto del volumen principal	5x Alto del kart

Fuente: Referencia 25 - 26

²⁶ G.A. Florez, R. Guzmán. “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014”. Depto. Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores. p. 126. ²³ CASTRO *et al*. Computational Prediction of a Vehicle Aerodynamics using Detached Eddy Simulation. En: SAE Int. J. Passeng. Cars-Mech. Vol.; 6. No 1 (2013); p. 414-423.

Figura 17. Modelado del volumen principal para el kart con alerón tradicional.



Fuente: Autores

Tabla 9. Dimensiones exactas del volumen principal para el kart con alerón tradicional.

Concepto	Medida [mm]
Flujo incidente	6120.56
Flujo saliente	10710.98
Ancho V.C	2537.5
Alto V.C	2151

Fuente: Autores

Así mismo, se realizó el mismo proceso para el volumen principal del kart con alerón modificado, dado que se vio necesario realizar pequeñas modificaciones en los dimensionamientos del mismo para obtener una geometría que se pudiera trabajar en AnsysWorkbench19. Las dimensiones del kart se presentan en la tabla como sigue:

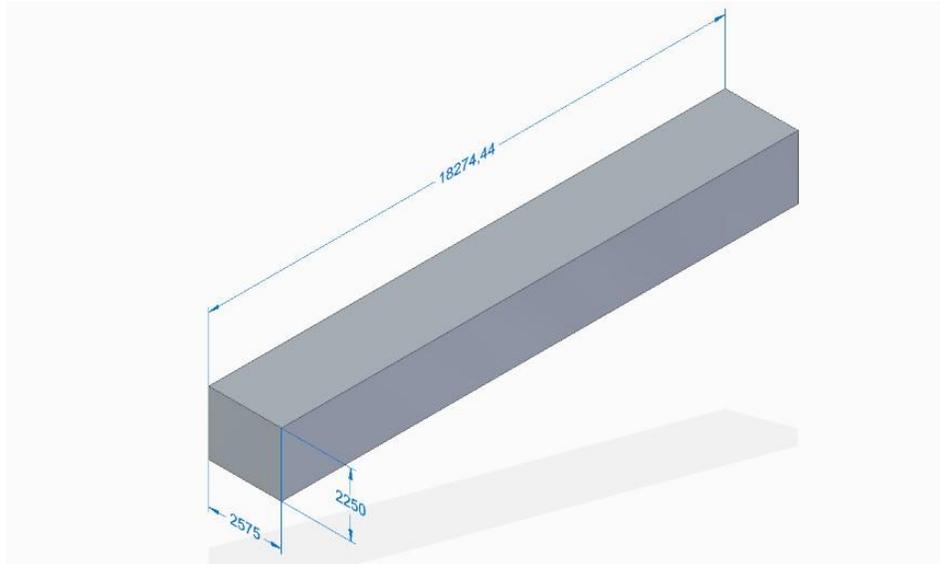
Tabla 10. Dimensiones del kart con alerón modificado.

Concepto	Medida [mm]
Alto	450
Ancho	1030
Largo	1522.87

Fuente: Autores

Con estas medidas y empleando los mismos parámetros de dimensionamiento señalados para el primer volumen, se procedió a realizar el segundo volumen.

Figura 18. Modelado del volumen principal para el kart con alerón modificado.



Fuente: Autores

Tabla 11. Dimensiones exactas del volumen principal para el kart con alerón tradicional.

Concepto	Medida [mm]
Flujo incidente	6091.48
Flujo saliente	10660.09
Ancho V.C	2575
Alto V.C	2250

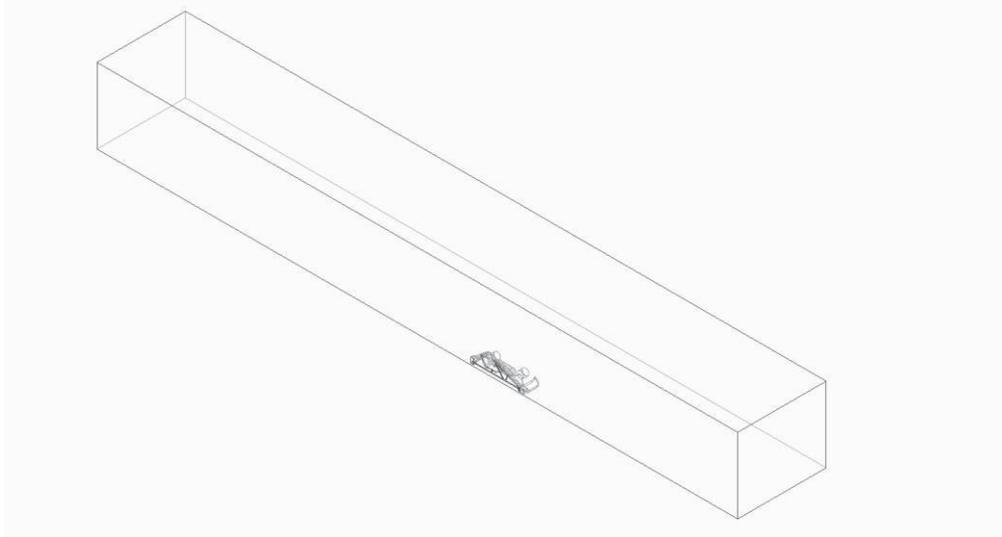
Fuente: Autores

4.2.1. Método De Sustracción Booleana.

Obtenidos cada uno de los volúmenes principales, se procedió a realizar la sustracción booleana con el objetivo de unir el kart modelado y el volumen, de esta manera, se simuló el túnel de viento al que se sometería el kart para estudiar su comportamiento real. Este proceso se realizó en el software Solid Edge ST10 licencia académica personal.

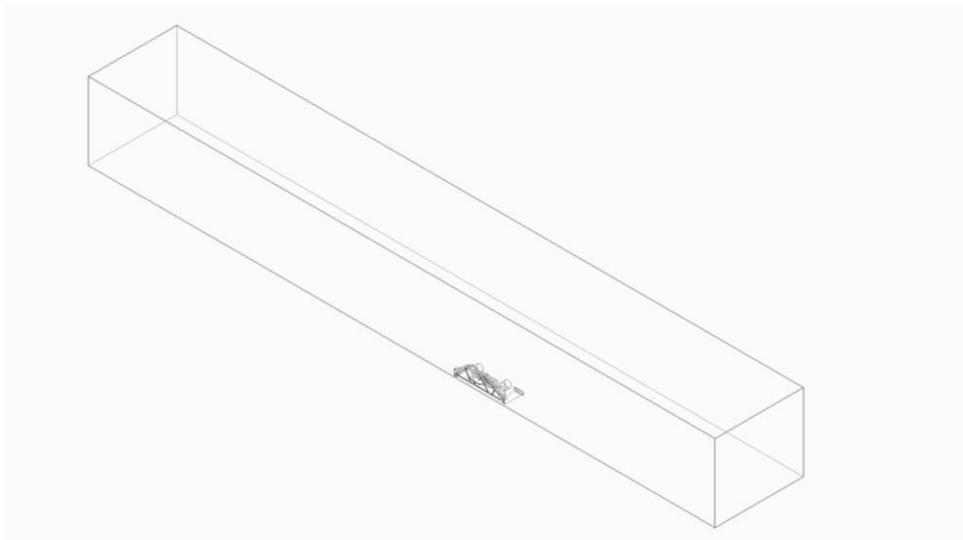
Una vez realizado el proceso de sustracción booleana se obtuvieron los dos volúmenes con su respectivo modelo de kart.

Figura 19. Sustracción booleana para el kart con alerón tradicional.



Fuente: Autores

Figura 20. Sustracción booleana para el kart con alerón modificado.



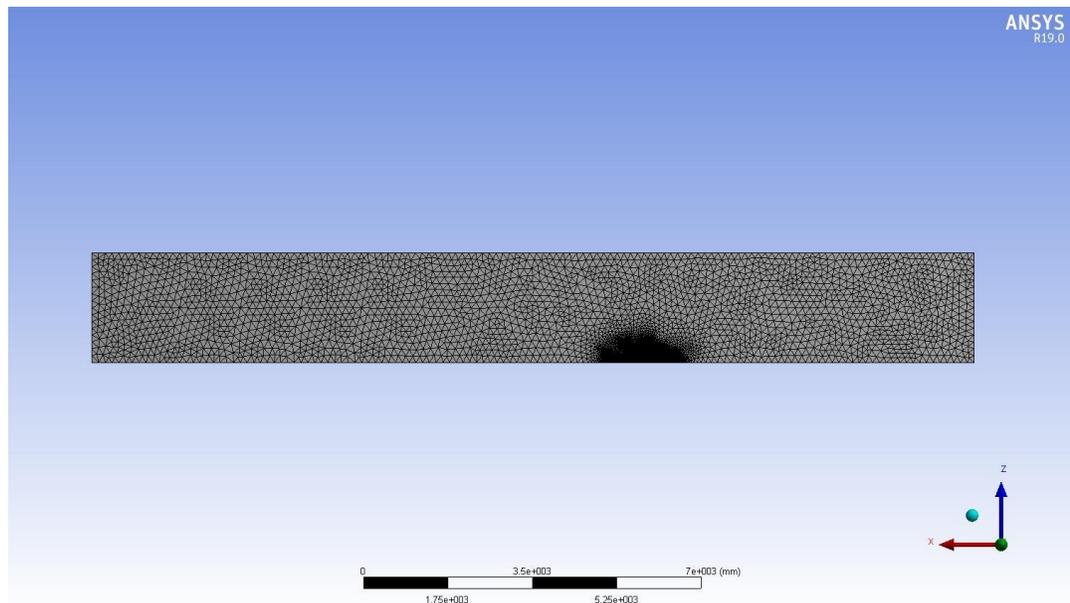
Fuente: Autores

5. MALLA COMPUTACIONAL, MODELO MATEMÁTICO Y CONVERGENCIA NUMÉRICA.

5.1. Refinamiento del mallado

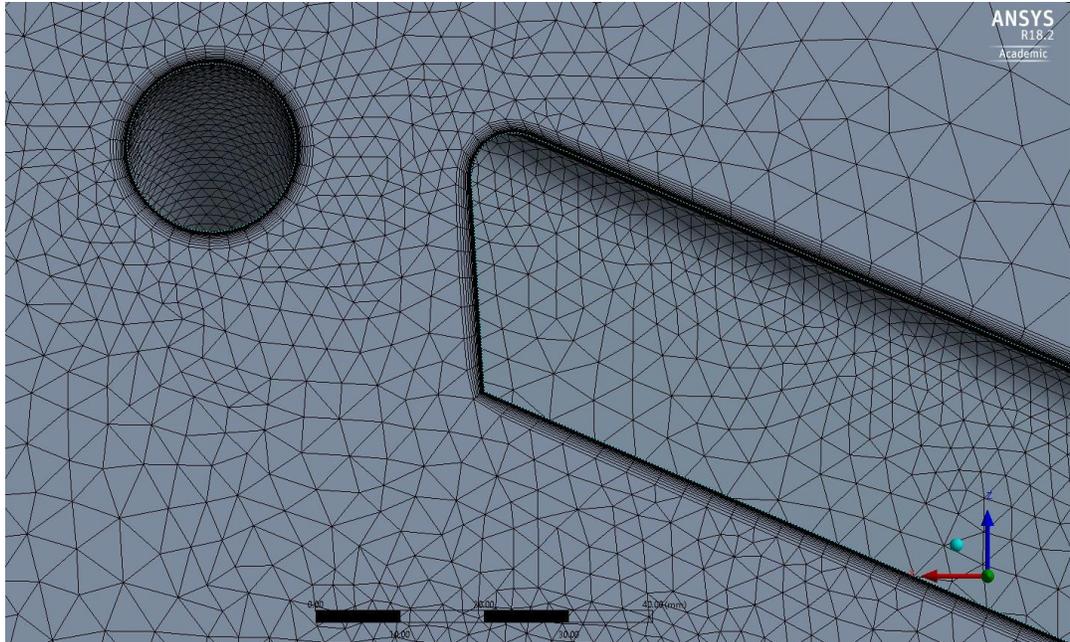
Se realizaron diversas mallas con cada uno de los dominios computacionales variando diferentes parámetros; de ésta manera, se obtuvo una amplia gama de mallas con diversos números de elementos y nodos que fueron empleadas posteriormente para el estudio de independencia de malla. Cabe destacar, que durante el proceso de mallado se realizaron refinamientos alrededor del kart para así obtener resultados físicos lo más coherentes posible, herramientas que provee AnsysWorkbench19 tales como *Sizing*, *Inflation*, *Element Size*, *Curvature Normal Angle* y *Relevance Center* fueron las principales usadas durante este proceso. Además, como previamente se explicó, se usó un segundo dominio computacional con el objetivo de captar con mayor precisión las estelas y el comportamiento del flujo en la parte posterior al kart, esta zona requirió un mayor refinamiento mediante el uso de las herramientas ya mencionadas. En las siguientes imágenes se ven ejemplos del refinamiento y la herramienta *Inflation*.

Figura 21. Ejemplo de mallado en kart con alerón tradicional.



Fuente: Autores.

Figura 22. Detalle del *Inflation* alrededor del kart.



Fuente: Autores.

Las mallas realizadas emplearon 20 capas a un crecimiento de 120%, además, el comando utilizado fue *First Layer Thickness*. Esta opción de *Inflation* permite proveer al software Ansys de la distancia óptima para obtener una primera capa donde se pueden producir los efectos de la capa límite del objeto que se está estudiando, dicha distancia se puede estimar mediante el cálculo de un parámetro adimensional conocido en la mecánica de fluidos como Y^{+27} . La ecuación para calcular este parámetro se presenta a continuación:

$$y^{+} = \frac{y \cdot u_{*}}{\nu} \quad \text{Ecuación 11}$$

Dónde: “y+” es un valor adimensional que permite estimar la distancia a la pared con el objetivo de producir los efectos de la capa límite del kart, “u*” es la velocidad de fricción en la pared más cercana del kart, “y” es la distancia a la pared más cercana del kart y “v” es la viscosidad cinemática del fluido, en este caso aire.

²⁷ J.S Barrera, D.A Maldonado, C.C Ramírez. “ANÁLISIS AERODINÁMICO DE UN VEHÍCULO URBANO MEDIANTE DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONALES APLICADO A LA COMPETENCIA DE SHELL ECO MARATHON”. Depto. Ingeniería Aeronáutica. Universidad San Buenaventura. p.31.

El cálculo de la distancia óptima de la primera capa de *Inflation* se presenta como algo un tanto complejo, sin embargo, con la ayuda de una página web se puede determinar fácilmente el valor de dicho parámetro para cada uno de los karts simulados. Ésta página web fue diseñada por el ingeniero mecánico Raef Kobeissi, quien cuenta con gran cantidad de conocimientos en la mecánica de fluidos, hidráulica, análisis de elementos finitos, entre otros²⁸; debido a su amplio conocimiento es posible y confiable usar esta útil herramienta para determinar el espesor de la primera capa de *Inflation*. De manera preliminar, se requirieron una serie de parámetros, estos, se presentan en la tabla contigua:

Tabla 12. Parámetros físicos para calcular la distancia óptima en ambos kart.

Kart	Velocidad del aire	Densidad del aire	Viscosidad dinámica	Longitud del kart	Número de Reynolds	Espesor de capa límite
1	75km/h = 20.8333 m/s	0,943409 (kg/m ³)	0,000017054 (kg/m*s)	1.53014 m	1763423.669	0.031369932 m
2	75km/h = 20.8333 m/s	0,943409 (kg/m ³)	0,000017054 (kg/m*s)	1.52287 m	1755070.86	0.031242136 m

Fuente: Autores.

NOTA: Los parámetros como velocidad, densidad y viscosidad del aire se tomaron en condiciones de operación sobre Bogotá (2640 m).

Una vez obtenidos los parámetros previos se procedió a calcular el espesor de la primera capa de *Inflation*. Según Raef Kobeissi, para modelos de turbulencia SST se puede emplear un valor de 0.9 para para calcular Y^+ . Con estos parámetros y el valor de 0.9 se calculó la distancia a la pared de la primera capa, a continuación se muestran los valores para cada kart.

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

²⁸ R. Kobeissi. "Raef Kobeissi". [Online]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/in/raefkobeissi>.

Figura 23. Detalle del cálculo de la distancia a la pared de la primera capa de *Inflation* para el kart con alerón tradicional.

This application is designed to find the distance of the first mesh layer from the boundary wall depending on the desired Y+ value.

Free stream velocity, m/s:	<input type="text" value="20.8333"/>	Wall distance, m:	<input type="text" value="1.17510452402899E-05"/>
Density, Kg/m3:	<input type="text" value="0.943409"/>	<input type="button" value="Calculate"/> 	
Dynamic viscosity, kg/ms:	<input type="text" value="0.000017054"/>		
Boundary layer length, m:	<input type="text" value="0.031369932"/>		
Y+ Value:	<input type="text" value="0.9"/>		

Fuente: Autores.

Figura 24. Detalle del cálculo de la distancia a la pared de la primera capa de *Inflation* para el kart con alerón modificado.

This application is designed to find the distance of the first mesh layer from the boundary wall depending on the desired Y+ value.

Free stream velocity, m/s:	<input type="text" value="20.8333"/>	Wall distance, m:	<input type="text" value="1.17449152050655E-05"/>
Density, Kg/m3:	<input type="text" value="0.943409"/>	<input type="button" value="Calculate"/> 	
Dynamic viscosity, kg/ms:	<input type="text" value="0.000017054"/>		
Boundary layer length, m:	<input type="text" value="0.031242136"/>		
Y+ Value:	<input type="text" value="0.9"/>		

Fuente: Autores.

A continuación, se muestran las tablas con los parámetros de modificación así como el número de nodos y elementos para cada una de las mallas generadas con cada uno de los karts modelados.

Tabla 13. Control de mallas para el kart con alerón tradicional.

Malla	Aspecto modificado	# Nodos	# Elementos
1	Num Cells y Curvature normal angle	1167176	3205644
2	Face Size, Num Cells y Curvature normal angle	1671690	4610646
3	Face Size, Num Cells y Curvature normal angle	2195166	6218162
4	Face Size, Num Cells, Curvature normal angle y Element Size	2480348	7102294

Fuente: Autores.

Tabla 14. Control de mallas para el kart con alerón modificado.

Malla	Aspecto modificado	# Nodos	# Elementos
1	Num Cells y Curvature normal angle	2206289	5716396
2	Face Size, Num Cells y Curvature normal angle	2466760	6693940
3	Face Size, Num Cells y Curvature normal angle	2877225	w
4	Face Size, Num Cells, Curvature normal angle y Element Size	2931575	8468611

Fuente: Autores.

Para realizar el análisis de convergencia se usaron todas las mallas mostradas en las tablas 13 y 14 respectivamente.

Cabe destacar, que debido a las limitaciones computacionales se vio la necesidad de utilizar mallas con un número reducido de elementos, esto afectó directamente en los resultados obtenidos, sin embargo, fueron bastante congruentes y estables para su posterior análisis.

Las simulaciones se realizaron en un computador HP Omen, con procesador Intel Core I7 7700HQ, memoria RAM de 12 GB, tarjeta gráfica Nvidia GeForce GTX 1050Ti y sistema operativo Windows 10 Home de 64 bits.

5.2. Ecuaciones fundamentales

Antes de realizar cualquier análisis de fluidos hay que considerar la física detrás de todos los procesos que los programas como Ansys tienen en cuenta para entregar resultados lo más parecidos a la realidad. En mecánica de fluidos las ecuaciones gobernantes son las llamadas “Ecuaciones de Navier-Stokes”, éstas,

se basan en los principios físicos de conservación de masa, conservación de momentum y conservación de energía²⁹. Sin embargo, como se explicará posteriormente, la ecuación de la energía no será incluida en los análisis que se realizarán, por esta razón teóricamente no será tratada en este documento.

De manera general, la técnica para obtener las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido, se basa en considerar un volumen de control a través del cual este se mueve, en dicha aproximación, se tienen en cuenta que la masa y la energía se conservan y que la tasa de cambio de las componentes del momento lineal es igual a las componentes de la fuerza aplicada.

5.2.1. Ecuación de continuidad.

La ecuación de continuidad surge a partir del principio físico de la conservación de la masa; la deducción de dicha ecuación depende del modelo de flujo que se vaya a emplear. Para su deducción se puede considerar un volumen fijo en el espacio y tiempo, en el que la tasa de cambio de la masa dentro del volumen de control es igual al flujo de masa que cruza la superficie del volumen.³⁰

La ecuación de continuidad se puede expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\delta \rho}{\delta t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{Ecuación 12}$$

Esta expresión está dada para un flujo que varía en el tiempo y es compresible, sin embargo, para efectos de este proyecto, se consideró que el flujo sería estacionario y además, se mantendría en un rango de flujo incompresible. Bajo estas condiciones la ecuación de continuidad puede ser reescrita de la siguiente manera:

$$(\nabla \cdot V) = 0 \quad \text{Ecuación 13}$$

5.2.2. Ecuación de momentum.

La ecuación de Momentum surge a partir de la idea de que la tasa de cambio de momento lineal es igual a la suma de fuerzas que están actuando, el principio físico que describe esta ecuación es la segunda ley de Newton.³¹ Para la

²⁹ ANDERSON, John. Computational Fluid Dynamics: The basics with applications. New York: McGraw-Hill, 1995. p. 49-74.

³⁰ FLETCHER, C.A.J. Computational Techniques for Fluid Dynamics, Vols I y II. Berlin: Springer-Verlag, 1991. P. 5.

³¹ FLETCHER, C.A.J. Computational Techniques for Fluid Dynamics, Vols I y II. Berlin:

deducción se tienen en cuenta tanto las fuerzas que actúan directamente sobre el volumen de control, llamadas fuerzas volumétricas y las fuerzas superficiales, que actúan por las distribuciones de presión y los esfuerzos cortantes y normales.³²

La expresión para la ecuación de momentum se puede escribir como sigue:

$$\rho \nabla \cdot (uV) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad \text{Ecuación 14}$$

$$\rho \nabla \cdot (vV) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad \text{Ecuación 15}$$

$$\rho \nabla \cdot (wV) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad \text{Ecuación 16}$$

5.3. Definición de las fronteras

Para realizar el análisis mediante Fluent, se hace vital el realizar la definición de fronteras para el dominio computacional, esto, debido a que de esto dependerá el tipo de análisis que se realice durante la simulación. Además, para poder realizar dicha definición debe tenerse claro en primera instancia qué cara del dominio corresponde a la entrada, salida, simetría entre otras. Cabe destacar que este proceso, se realizó de manera similar en los dominios de los karts modelados en este proyecto, por lo que esto no genera ninguna discrepancia en los resultados obtenidos posteriormente.

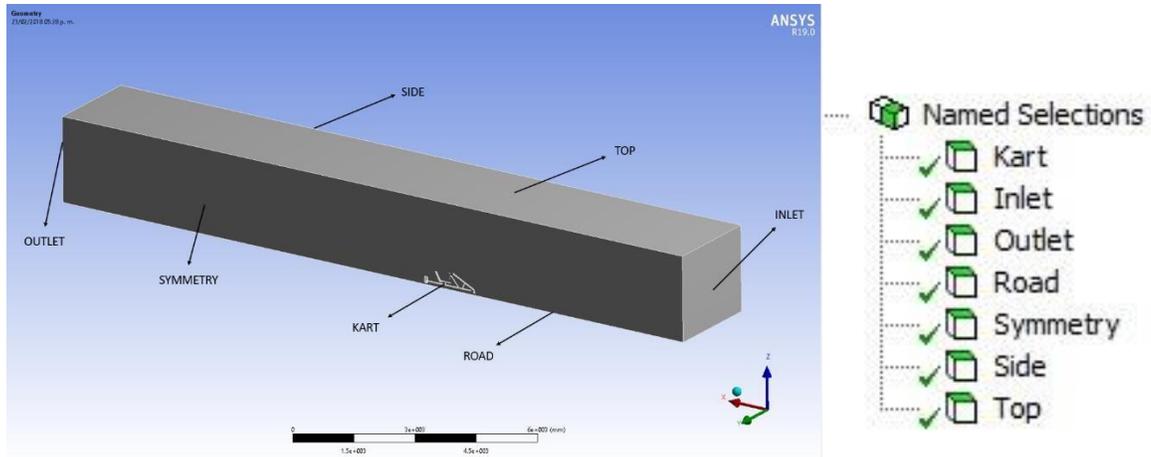
La definición de las fronteras se realizó mediante Ansys Workbench 19, la siguiente ilustración muestra el nombre de la frontera y su respectiva cara:

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Springer-Verlag, 1991. P. 6.

³² ANDERSON, John. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. New York: McGraw-Hill, 1995. p.60.

Figura 25. Fronteras enunciadas para el dominio computacional.



Fuente: Autores.

5.4. Definición de las condiciones de frontera

5.4.1. Aspectos generales

Una vez se han establecido las fronteras del dominio se procede a definir las condiciones de frontera y de operación para realizar la convergencia numérica; es importante aclarar que este proceso no es el mismo que se realizó para la simulación final; en esta parte del proyecto, lo que se pretende, es obtener una malla que arroje los resultados más precisos con el menor gasto computacional, para esto, se asumen una serie de simplificaciones durante el análisis. En primera instancia, la ecuación de energía no será tomada en cuenta dado que en análisis de baja velocidad, como la que se usa en este proyecto, los cambios en los gradientes de temperatura a lo largo de la geometría modelada no son evidentes, de esta forma, se reduce el gasto computacional. Como segunda medida, se considera el modelo de flujo utilizado en esta sección. Se hizo la suposición que el flujo era laminar con el objetivo de reducir el gasto computacional logrando así mayor rapidez en la convergencia numérica, de esta manera se habilitó el modelo *viscoso-laminar*. Seguido a lo anterior, se consideró el número Mach, para este análisis el valor de Mach es de 0.0631 y según Anderson³³, cuando se trabaja con valores inferiores a 0.3 se considera que el flujo es incompresible, es decir, que la densidad no varía; esto claramente indica, que el problema se soluciona basado en la presión. Posteriormente, se consideró también la formulación de velocidad

³³ ANDERSON, John. Fundamentals of Aerodynamics: Fundamental Principles. 3^o Edición. New York: McGraw-Hill, 2001. p. 482-485.

absoluta, ya que según la guía de usuarios de ANSYS Fluent³⁴ esta velocidad es mayormente aplicada en situaciones donde el flujo en la mayor parte del dominio no está rotando, como si es el caso de simulaciones con ventiladores, turbo maquinaria, etc. Finalmente, se deseaba realizar una simulación en un instante de tiempo determinado, por ahorro computacional, por lo cual se eligió el estado estacionario. Para sintetizar lo anterior se puede recurrir a la siguiente tabla:

Tabla 15. Aspectos generales para la convergencia numérica.

Ecuación de Energía	Modelo viscoso	Tipo	Velocidad de formulación	Tiempo
No	Laminar	Basado en la presión	Absoluta	Estacionario

Fuente: Autores.

5.4.2. Condiciones de frontera

Ésta sección se concentró en la definición de las condiciones de frontera para el dominio computacional diseñado. Para poder obtener resultados coherentes, es necesario especificar la información prudente acerca de las variables dependientes del flujo en las fronteras del dominio, para esto, se debe considerar el tipo de condición de frontera que se utiliza, identificar su ubicación y suministrar los datos necesarios dependiendo del tipo de frontera establecido³⁵

Cómo se observó, las fronteras fueron nombradas en la sección 5.2. Las condiciones de frontera se definieron basados en Banga *et al*³³, Nasir *et al*³⁶ y Parab *et al*³⁷. Éstos, tenían la finalidad de realizar el estudio de flujo externo sobre diferentes tipos de vehículos, sin embargo, se debe aclarar que en Banga *et al* se utilizó una pared móvil para el suelo del dominio; y en Nasir *et al*, no se hizo uso de la frontera de simetría lateral del vehículo en estudio.

Los tres artículos definieron las siguientes condiciones de frontera:

- ✓ **Velocity Inlet:** para la cara frontal del volumen de control.
- ✓ **Pressure Outlet:** para la cara posterior del volumen de control.

³⁴ ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Version 16.1. Canonsburg, 2015. P.569-570.

³⁵ ANSYS, Inc... Introduction to ANSYS Fluent: Setting Up Physics. 17^o version. 2016. P.12. ³³ BANGA, Saurabh *et al*. CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. En: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol.; 12. No 4-III (Jul-Ago.2015); p.87-94.

³⁶ NASIR, Rizal *et al*. Aerodynamics of ARTeC's PEC 2011 EMO-C Car. En: Procedia Engineering. Vol.; 41. (2012); p.1775-1780.

³⁷ PARAB, Akshay *et al*. Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent - ANSYS 14.5. En: International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE).

- ✓ **Symmetry:** para el plano de simetría, la cara superior y la cara lateral del volumen de control.
- ✓ **Wall:** para la geometría del vehículo y la cara inferior del volumen de control.

La condición de frontera **Velocity Inlet** fija velocidades entrantes, es usada para flujos incompresibles, donde proporciona un perfil de velocidad uniforme a menos de que éste sea definido, además, cuando se utilizan flujos turbulentos se requiere especificar los parámetros de turbulencia³⁸. La presión se calcula a la salida y es necesario especificar la magnitud y dirección del flujo³⁹.

La condición de frontera **Pressure Outlet** establece la presión estática a la salida del dominio, esta condición es apropiada para flujos tanto incompresibles como compresibles⁴⁰. La velocidad es calculada a la salida y es necesario especificar la presión estática del ambiente en el cual el flujo existe³⁹.

La condición de frontera **Symmetry** puede ser aplicada a planos de simetría, es decir, fija la frontera como un plano de simetría; ambos, la geometría y el flujo deben ser simétricos, la velocidad normal y los gradientes normales de todas las variables en el plano de simetría son iguales a cero, es usada cuando la solución del flujo es simétrica en un plano para reducir el dominio computacional⁴¹. No requiere entrada de datos⁴².

La condición de frontera de pared, fija la frontera como un muro sólido que limita las regiones de fluido, predeterminadamente la condición de no deslizamiento es impuesta para flujos viscosos, el muro puede ser fijo o móvil⁴³.

5.4.3. Valores de referencia

Según la guía de Ansys Fluent, la tabla de valores de referencia permite establecer una serie de valores de referencia usados para computar las variables del campo de flujo. La siguiente tabla establece los valores de referencia usados para el análisis de cada uno de los karts, se debe tener en cuenta que las condiciones atmosféricas se establecieron como las de Bogotá, es decir a una altitud de 2640 m.

³⁸ ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Version 16.1. Canonsburg, 2015. p.286-292.

³⁹ ANSYS, Inc. Introduction to ANSYS Fluent: Setting Up Physics. 17^o Versión. 2016. p.38.

⁴⁰ ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Version 16.1. Canonsburg, 2015. p.305-311. ³⁹ ANSYS, Inc. Introduction to ANSYS Fluent: Setting up Physics, op.cit, p.43.

⁴¹ ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide, op.cit, p.348-350.

⁴² ANSYS, Inc. Introduction to ANSYS Fluent: Setting up Physics, op.cit, p.16.

⁴³ ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide, op.cit, p.324-348.

Figura 26. Tabla de valores de referencia para el análisis de los karts.

Reference Values	
Area (m2)	1
Density (kg/m3)	0.9434083
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	1
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	20.83331
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Fuente: Autores.

5.4.4. Métodos de solución

La idea principal de esta etapa es especificar los diferentes parámetros relacionados con el método de solución en el proceso de cálculo con el propósito de conseguir una convergencia más exacta y más rápida.

Dado que se considera un análisis basado en la presión se hace uso de la sección de acople Presión – Velocidad. Además, se cuenta con una serie de esquemas para este tipo de análisis, entre estos están SIMPLE, SIMPLEC, PISO y COUPLED. La sección de discretización espacial contiene configuraciones que controlan la discretización y el orden de aproximación sobre las ecuaciones que se solucionan internamente en Ansys⁴⁴.

Con el objetivo de establecer los criterios y parámetros más convenientes para el desarrollo del análisis del presente proyecto, se considera la tesis de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA

⁴⁴ G.A. Florez, R. Guzmán. “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014”. Depto. Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores. p. 163. ⁴⁴ BANGA, Saurabh *et al.* CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. En: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol.; 12. No 4-III (Jul-Ago.2015); p.87-94.

2014” donde mencionan los artículos Banga *et al*⁴⁴, Klever⁴⁵ y Parab *et al*⁴⁶, en estos, se realizaron análisis de flujo externo sobre diferentes vehículos bajo un comportamiento de flujo laminar. En la siguiente tabla se muestran parámetros como presión, gradiente y Momentum utilizados en estos trabajos:

Figura 27. Métodos de solución para estudios de flujo externo

Autores Artículos de Estudios Similares	Métodos de Solución			
	Esquema de acople P-V	Discretización Espacial		
		Gradiente	Presión	Momentum
<i>Banga et al</i> ¹⁴³	Coupled	Least Squares Cell Based	Standard	First Order Upwind
<i>Klever</i> ¹⁴⁴	-	-	-	First Order Upwind
<i>Blanco et al</i> ¹⁴⁵	SIMPLE	Least Squares Cell Based	Second Order	Second Order Upwind
<i>Parab et al</i> ¹⁴⁶	Coupled: Pseudo- transient	-	-	First Order Upwind

Fuente: G.A. Florez, R. Guzmán. “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014”. Depto. Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores. p. 164.

Basados en el trabajo de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014” se procedió a seguir el siguiente modelo de solución:

⁴⁵ KLEVER, Andreas. Simulation of Airflow around an OPEL ASTRA Vehicle with FLUENT. En: Journal Articles by Fluent Software Users. Vol.; JA132. (2001); p.1-6.

⁴⁶ PARAB, Akshay *et al*. Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent - ANSYS 14.5. En: International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE).

- ✓ **Esquema de acople P-V:** Coupled, dado que éste método reduce el tiempo de convergencia en general, resolviendo las ecuaciones de presión, momento y continuidad de manera acoplada⁴⁷.
- ✓ **Gradiente:** Least Squares Cell Based, dado que se usa para mallas no estructuradas o de gran complejidad.
- ✓ **Presión:** Second Order, dado que permite obtener una mayor exactitud en los resultados.
- ✓ **Momentum:** First Order Upwind, dado que permite una convergencia más rápida.

5.4.5. Monitores

Los monitores en Ansys permiten establecer una serie de parámetros de referencia para vigilar la convergencia de continuidad, momento y demás parámetros usados en una simulación CFD.

Dentro de los monitores se hizo uso de los residuales y el coeficiente de Drag como parámetro de independencia. A pesar que las simulaciones de Klever⁴⁸ y Blanco *et al*⁴⁹ contaban con un criterio de convergencia de 10^{-3} durante este proyecto se hizo uso de una convergencia libre, esto, con el objetivo de lograr una mayor precisión en los resultados permitiendo alcanzar criterios de 10^{-4} y 10^{-5} .

5.4.6. Inicialización de la simulación

Antes de empezar la simulación es imperativo establecer desde qué región físicamente se iniciará el proceso, por ello, durante la convergencia de malla y la simulación final se estableció una inicialización estándar dado que desde ésta, se puede computar valores desde la información que se encuentra en una frontera específica⁵⁰. La frontera seleccionada para la inicialización fue Inlet.

⁴⁷ G.A. Florez, R. Guzmán. "ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014". Depto. Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores. p. 165.

⁴⁸ KLEVER, Andreas. Simulation of Airflow around an OPEL ASTRA Vehicle with FLUENT. En: Journal Articles by Fluent Software Users. Vol.; JA132. (2001); p.1-6.

⁴⁹ BLANCO, David *et al*. Predicción del Comportamiento Aerodinámico de un Vehículo Comercial Bajo un Ciclo Estándar de Conducción Urbano por medio de Dinámica de Fluidos Computacional. En: CIMM 2015. (Abril 2015); p.1-4.

⁵⁰ ANSYS, Inc. ANSYS Fluent User's Guide. Versión 16.1. Canonsburg, 2015. p.1509-1511. ⁵¹ BANGA, Saurabh *et al*. CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. En: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol.; 12. No 4-III (Jul-Ago.2015); p.87-94.

5.4.7. Ejecución del cálculo

Antes de iniciar cualquier simulación en CFD es recomendable realizar la revisión o chequeo del proceso que se ha seguido desde la carga de la malla en Fluent, esto permite obtener consejos sobre mejoramiento de la calidad de esta misma o la determinación de algún parámetro específico, además, permite obtener una visión clara sobre los problemas que pueden aparecer en la convergencia y posteriormente en los resultados obtenidos luego de la simulación.

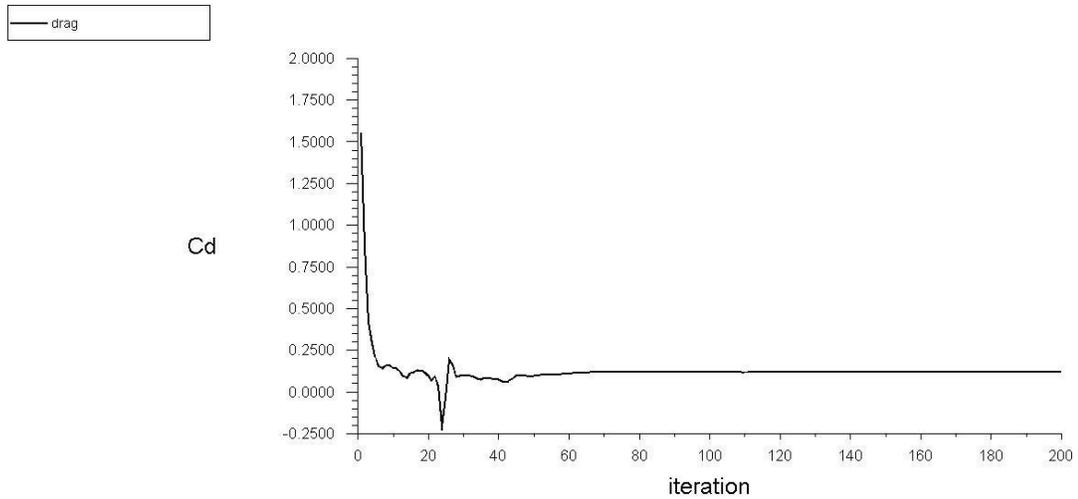
Basándose en la tesis de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014” se estableció que el número de iteraciones a realizar por parte de Fluent para la solución del problema fuera de 200 iteraciones, esto, dado que en dicha tesis, establecen que esta cantidad de iteraciones era un valor intermedio entre la primera y segunda fase de simulación establecidas por Banga *et al*⁵¹ y Parab *et al*⁵¹.

5.5. Análisis de convergencia numérica

Una vez realizado el estudio, se logró obtener una serie de resultados que permitieron elegir la malla más precisa, esto significa, que arrojó resultados sin mucha variación (respecto a las demás mallas), además, indicó que el costo computacional fue menor que el de otras al poseer menor número de nodos y elementos. Para llevar a cabo dicha fase todas las mallas se simularon en iguales condiciones y el estudio se realizó con la variación de dos parámetros, en primera instancia, se consideró el coeficiente de arrastre. Para encontrar dicho valor en cada malla, se tomó como única referencia los valores obtenidos durante el análisis de cada kart, estos se obtuvieron mediante un reporte de Drag establecido previamente a la realización de la simulación. Posteriormente, se determinó la velocidad en dirección paralela al kart respecto de la altura del dominio computacional. Para obtener las velocidades en la sección de CFD – Post se estableció una línea que se muestra en la figura 27, donde cada punto arrojaba su respectivo valor de velocidad. Las imágenes mostradas a continuación ilustran dicho procedimiento.

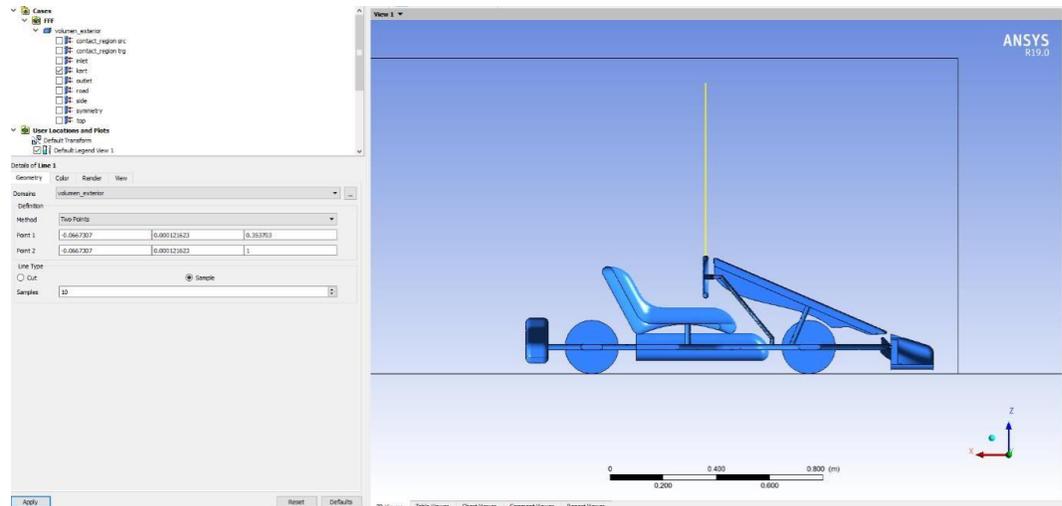
⁵¹ PARAB, Akshay *et al*. Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent - ANSYS 14.5. En: International Journal on Recent Technologies in Mechanical and Electrical Engineering (IJRMEE).

Figura 28. Reporte del coeficiente de arrastre para kart convencional



Fuente: Autores.

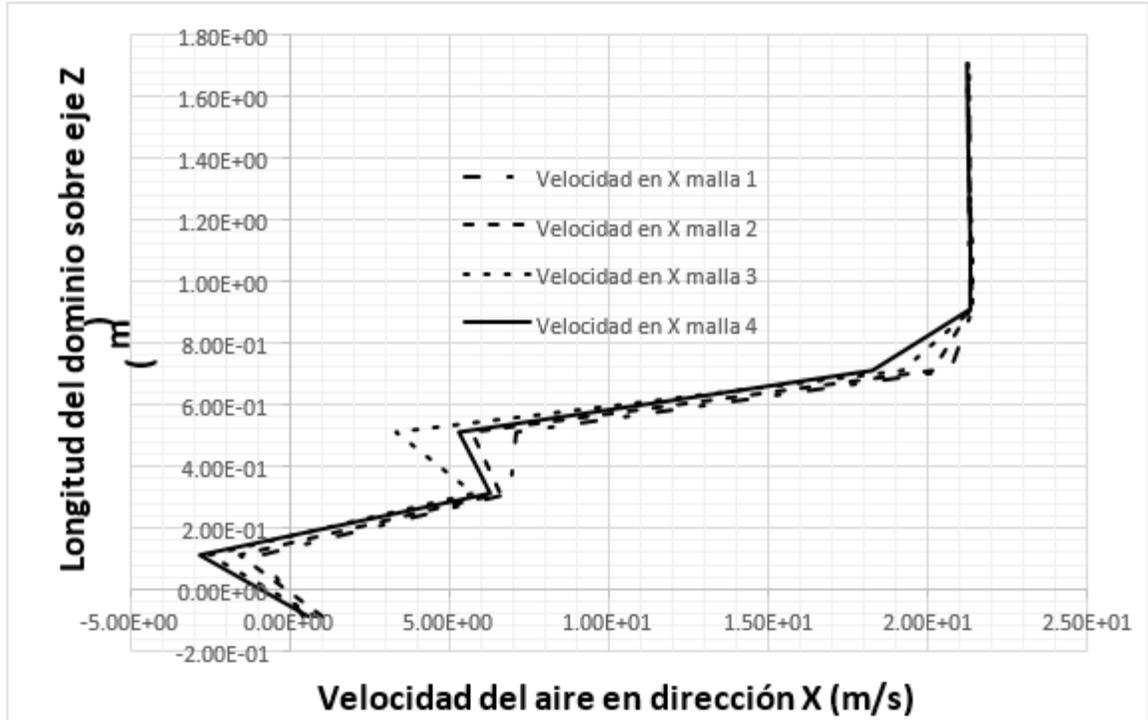
Figura 29. Empleo del CFD – Post para determinar velocidad de flujo.



Fuente: Autores.

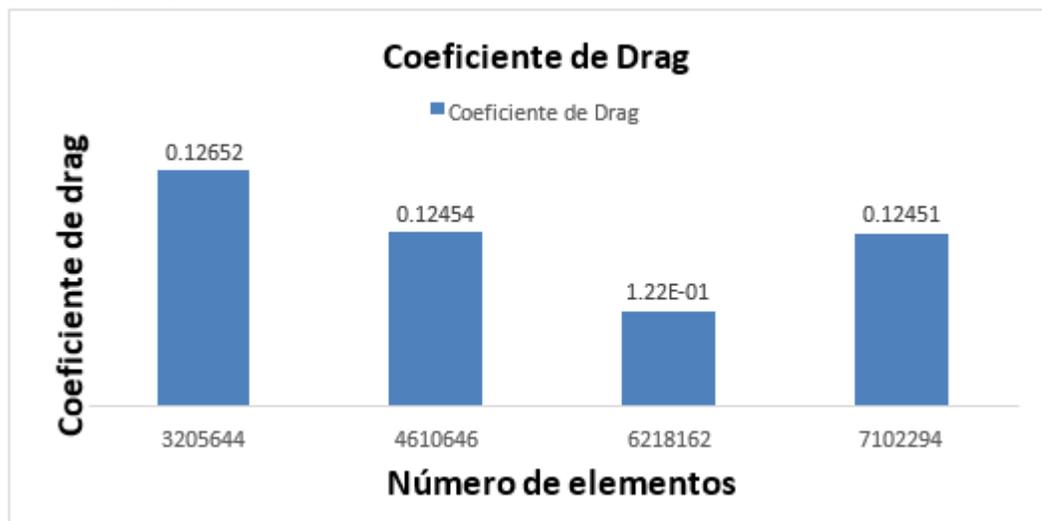
Los resultados obtenidos de los coeficientes de Drag y gráficas de velocidad de flujo para cada uno de los karts se muestran a continuación:

Gráfica 1. Independencia de malla según la velocidad de flujo para el kart con alerón tradicional.



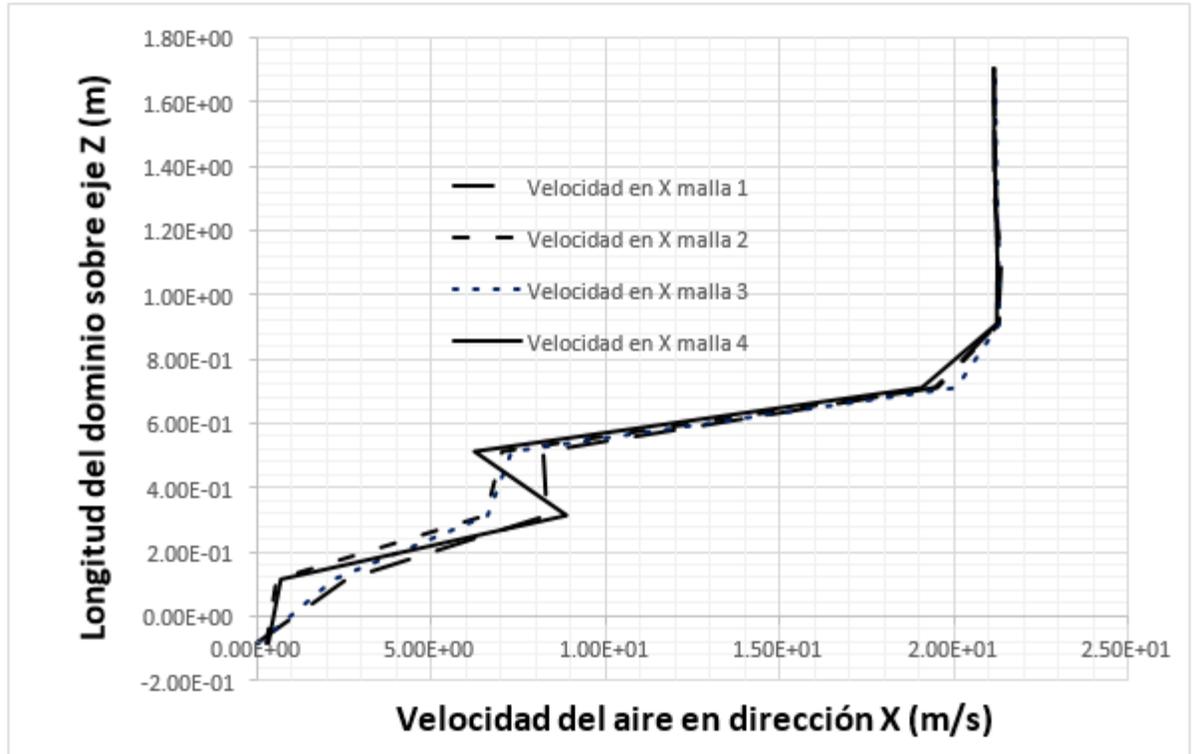
Fuente: Autores.

Gráfica 2. Independencia de malla según el coeficiente de arrastre para el kart con alerón tradicional.



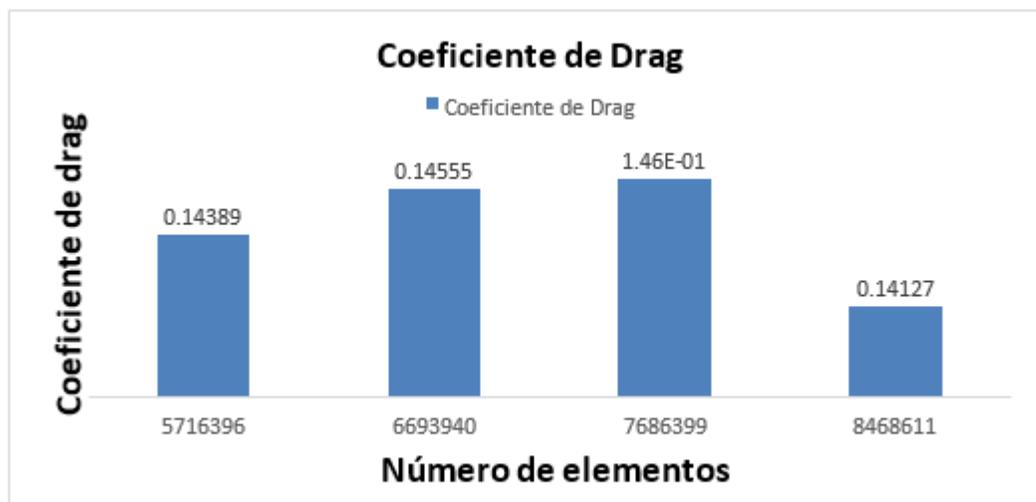
Fuente: Autores.

Gráfica 3. Independencia de malla según la velocidad de flujo para el kart con alerón modificado.



Fuente: Autores.

Gráfica 4. Independencia de malla según el coeficiente de arrastre para el kart con alerón modificado.



Fuente: Autores.

5.6. Evaluación de la calidad de la malla

Para el desarrollo de una simulación es de vital importancia determinar la calidad de la malla con la que se van a llevar a cabo las diferentes simulaciones y análisis del fenómeno en estudio dado que de la calidad y uniformidad de la malla depende mucho la precisión de los resultados simulados comparados con los obtenidos en la vida real; por ello, durante un análisis de CFD en Ansys se hace necesario detenerse a realizar el análisis de las mallas y su calidad para posteriormente realizar las simulaciones.

En ésta sección se analizan los criterios de Skewness y Orthogonal Quality para las mallas seleccionadas durante la convergencia de malla con el propósito de confirmar que su uso sería adecuado y físicamente permitiría lograr los resultados deseados.

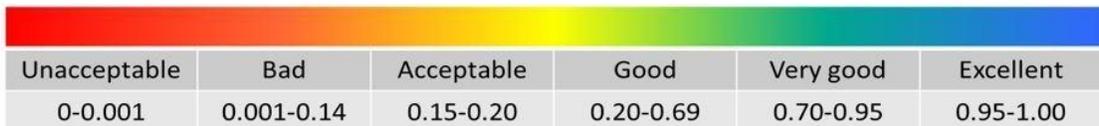
El criterio de Skewness o también llamado asimetría/oblicuidad ayuda a determinar qué tan cerca se encuentra una malla de una cara ideal en un elemento, siendo éstas un cuadrado y un triángulo equilátero. Por otra parte, Orthogonal Quality u ortogonalidad determina el grado de afinidad o similitud hay entre los elementos adyacentes⁵². A continuación se presenta la escala de calidad para analizar las mallas seleccionadas para el análisis.

Figura 30. Escala de calidad para Skewness y Orthogonal Quality

Skewness mesh metrics spectrum:



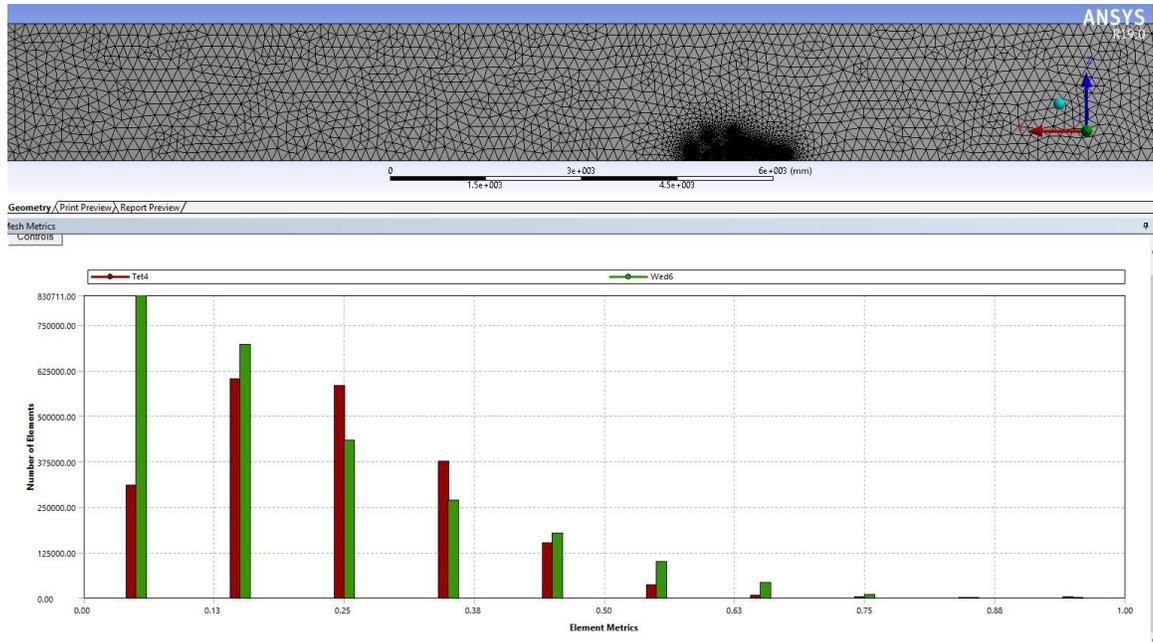
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



Fuente: Tyler Smith. "When the going gets tough, the tough use ANSYS for CFD Meshing". <http://www.padtinc.com/blog/the-focus/when-the-going-gets-tough-the-tough-use-ansys-for-cfd-meshing>.

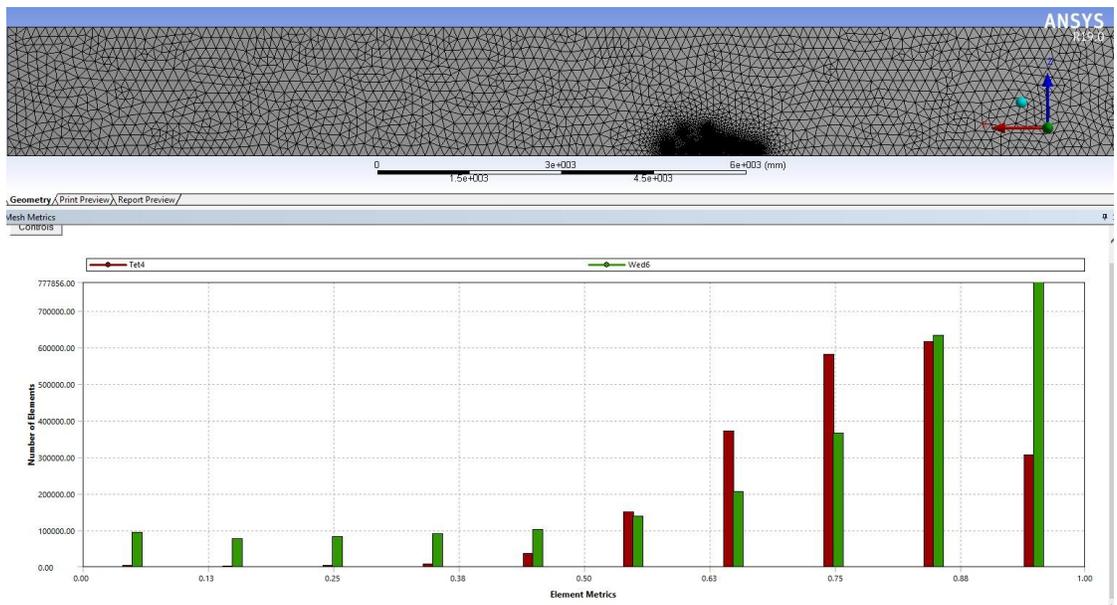
⁵² Alex Toba. Tutorial ANSYS Workbench Estrategias de Mallado (Parte 1/2). https://www.youtube.com/watch?v=kmh_fAoxik8

Figura 31. Skewness para Kart con alerón convencional.



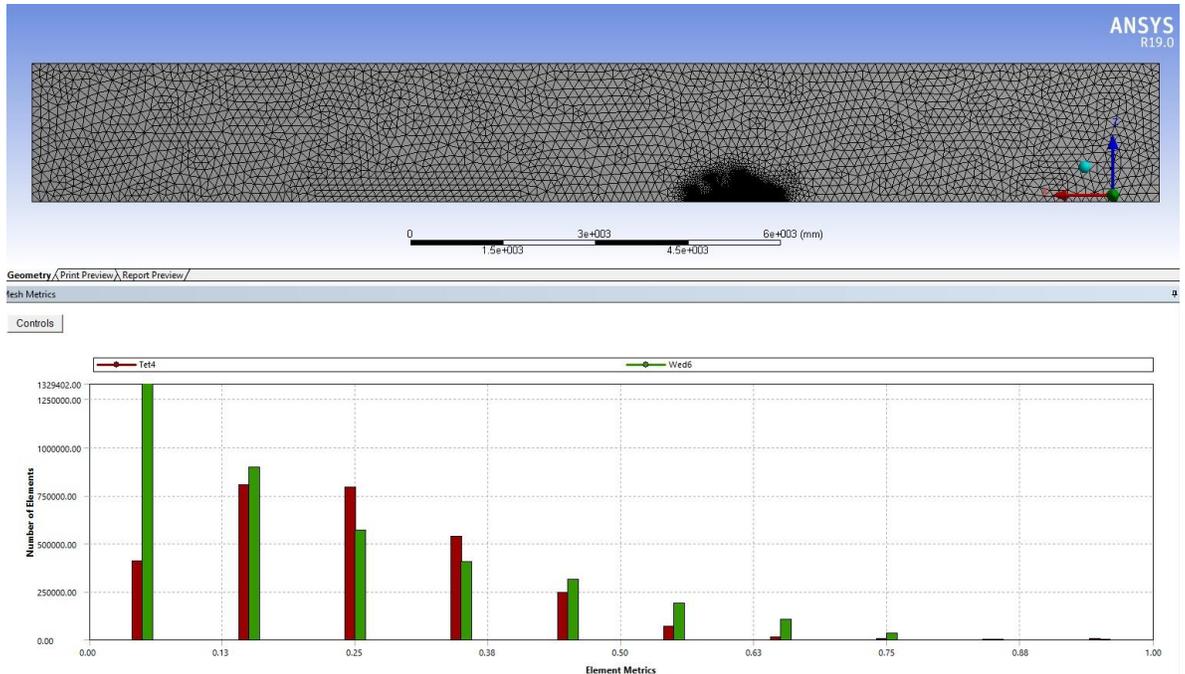
Fuente: Autores.

Figura 32. Orthogonal Quality para Kart con alerón convencional.



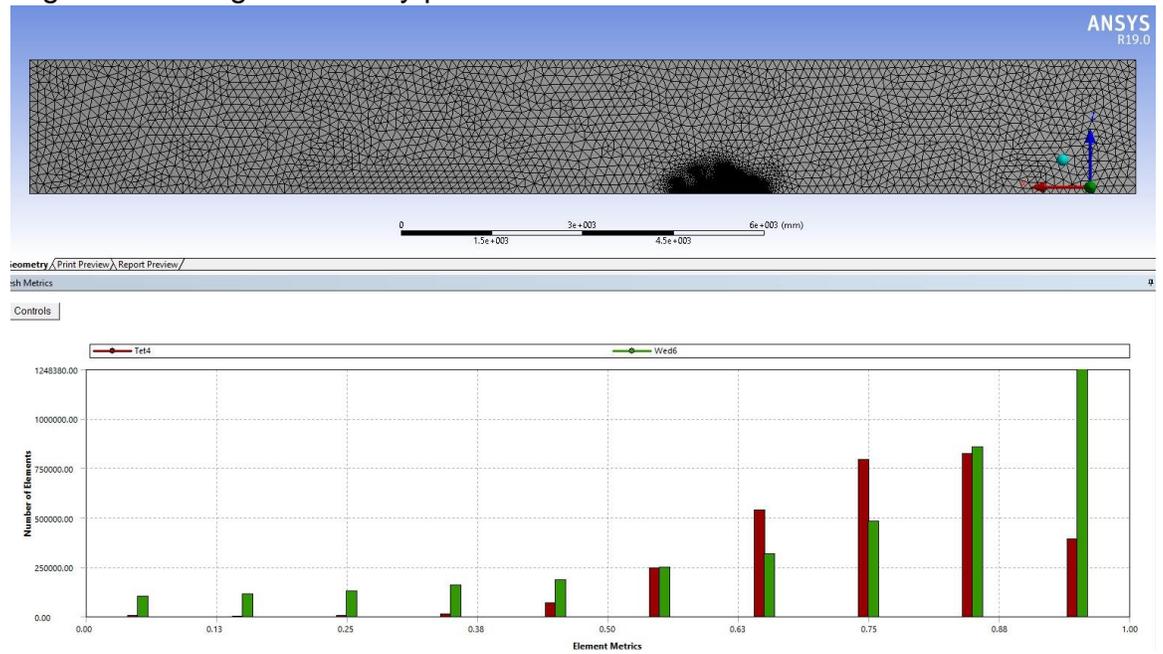
Fuente: Autores.

Figura 33. Skewness para Kart con alerón modificado.



Fuente: Autores.

Figura 34. Orthogonal Quality para Kart con alerón convencional.



Fuente: Autores.

De acuerdo con la figura 28 donde se establecen los parámetros aceptables para la calidad de la malla podemos concluir que los intervalos para Skewness para el kart con alerón convencional y el kart con alerón modificado son los adecuados dado que hasta un valor de 0.6 se considera que la calidad es buena; cabe denotar que los elementos presentes desde 0.8 hasta 1 no se encuentran sobre el kart por lo que no afectarán los resultados obtenidos.

Sucede lo mismo cuando se analizan los valores obtenidos para Orthogonal Quality, según la figura 28 el valor mínimo permitido para obtener una buena calidad en la malla es 0.2, para las mallas seleccionadas el mínimo valor obtenido para los elementos cercanos a la geometría del kart fue 0.45 lo cual indica que se obtuvo uniformidad entre elementos, lo cual entrega resultados acordes a la realidad.

6. SIMULACIÓN FINAL

Una vez se eligen la malla número 2 para cada uno de los karts en análisis se realiza la simulación computacional, en ésta, las condiciones son más complejas, ya que se busca que sean lo más parecidas a las que se tienen cuando el kart está en competencia con el fin de obtener resultados más verídicos; esta simulación se realiza para los dos karts en iguales condiciones y así poder comparar los resultados obtenidos y determinar si el kart con un nuevo alerón presenta mejores resultados que el kart tradicional.

Para realizar el análisis final para cada uno de los karts fue necesario realizar una revisión a los parámetros de análisis en la convergencia numérica, dado que, aunque en algunos aspectos compartían parámetros similares. Sin embargo, fue necesario detenerse a revisar el modelo de turbulencia que debía tomarse en consideración para lograr la mayor exactitud en los resultados finales.

Las mallas fueron elegidas considerando el valor de arrastre encontrado y el número de elementos para cada una. Para el caso del kart con alerón convencional se encontró que el valor de coeficiente de arrastre para la malla de 4610646 de elementos era de 0.12454 y para la malla de 7102294 el coeficiente fue de 0.124541, se puede apreciar que el valor fue muy aproximado para éstas mallas, por cuestiones de ahorro computacional se hizo uso de la malla número 2 con 4610646 de elementos. El mismo criterio se usó para seleccionar la malla del kart con alerón modificado.

6.1. Definición de las condiciones de frontera.

6.1.1. Aspectos generales

En la sección 5.3.1. Se establecieron los aspectos generales para el análisis de convergencia numérica, sin embargo, para el análisis final deben realizarse ciertos cambios en los parámetros de análisis; en primera instancia, tanto en la independencia de malla como en el análisis final la ecuación de la energía no fue incluida en el análisis, la razón de esta decisión igualmente se encuentra en la sección inicialmente mencionada, el tipo de análisis, la velocidad de formulación y el tiempo, se mantuvieron invariables a los parámetros empleados en el análisis final, las razones, igualmente, se encuentran en la sección 5.3.1.

El único parámetro general que se modificó fue el modelo de turbulencia. En un principio, cuando se realizó la convergencia numérica se hizo la suposición de que

el flujo de aire era de tipo laminar con el objetivo de reducir el gasto computacional, sin embargo, como se apreció en los cálculos realizados, para una velocidad de flujo de 75km/h - 20.8333 m/s se obtiene un valor de Reynolds de aproximadamente 1763449.359 para el kart con alerón tradicional y 1755070.86 para el kart con alerón modificado; por lo que se puede concluir que el flujo es turbulento, por esta razón, se implementó un modelo Viscoso – Turbulento; mencionada velocidad fue empleada teniendo en cuenta que al momento de tomar curvas esta puede ser bastante significativa, debido a que es en esta sección de la pista donde mayor inestabilidad surge en el kart, esta es la razón principal por la que los pilotos, prefieren reducir su velocidad antes de conducir en estas lo que implica perder segundos bastante significativos de la carrera, si se cuenta con un alto valor de carga aerodinámica se podría tomar la curva a mayor velocidad ya que esto evitaría el derrape del kart.

El patrón elegido para la realización del trabajo fue el modelo viscoso – $k\omega$ SST. La implementación de este modelo se basó en la tesis de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014”, donde se menciona que en el estudio “Comparación de Diferentes Modelos de Turbulencia en Aplicaciones Aerodinámicas” realizado por Arbeláez y López⁵³ afirman que actualmente, es imposible resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos con geometrías complejas y altos números de Reynolds, por esto, se hace imperativo recurrir a modelos que reduzcan el gasto computacional del análisis sin perder precisión en los resultados. Durante el estudio compararon cinco modelos de turbulencia, con los resultados obtenidos se pudo concluir que los que mejor comportamiento presentaron fueron el $k\omega$ SST y el Spalart Allmaras, sin embargo este último presentó una menor precisión comparado al $k\omega$ SST. Adicionalmente, mencionan Florez y Guzmán en su tesis que respaldando lo ya citado, se consideró la evaluación de desempeño de los modelos de turbulencia en aplicaciones aeroespaciales de Versteeg y Malalasekera⁵⁴, donde se expresa que los modelos anteriormente mencionados son adecuados para análisis de flujo externo, sin embargo, el modelo $k\omega$ SST es más general, además de proporcionar un rendimiento superior.

⁵³ ARBELÁEZ, Daniel y LÓPEZ, Omar. Comparación de Diferentes Modelos de Turbulencia en Aplicaciones Aerodinámicas. En: VIII Congreso Colombiano de Métodos Numéricos: Simulación en Ciencias y Aplicaciones Industriales. Vol.; 8CCMN. (Ago.2011); p.1-2.

⁵⁴ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2º Edición. Harlow: Pearson, 2007. p.92.

Como ya se explicó, el modelo de flujo viscoso elegido por razones claramente justificadas fue el $k\omega$ SST. Las ecuaciones que Ansys Fluent resolvió se expresan posteriormente.

$k - \omega$ model cuenta con dos modelos de ecuaciones de transporte, donde k corresponde a la energía cinética turbulenta y ω corresponde a la tasa de disipación específica⁵⁵.

Así pues, para k se describe la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\rho k)}{\delta t} + \text{div}(\rho k U) \\ = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] \\ + P_k - \beta \rho k \omega \end{aligned} \quad \text{Ecuación 17}$$

Para efectos de este proyecto, se hacen algunas simplificaciones dentro de las ecuaciones que reducen el gasto computacional, previamente se estableció que el análisis era de tipo estacionario, es decir, que los cambios en el tiempo son iguales a cero, por ende, la ecuación 17 que Ansys resuelve se puede reescribir de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho k U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right] \\ + P_k - \beta \rho k \omega \end{aligned} \quad \text{Ecuación 18}$$

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad}(\omega) \right] \\ + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} \right) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho \omega U) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\omega} \right) \text{grad}(\omega) \right] \\ + \gamma_1 \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} \right) \\ - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\delta U_i}{\delta x_j} \delta_{ij} - \beta_1 \rho k \omega^2 \end{aligned} \quad \text{Ecuación 20}$$

⁵⁵ G.A. Florez, R. Guzmán. "ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014". Depto. Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores. p. 73-75.

De la misma forma, la ecuación para ω se describe de la siguiente manera:

$$-\frac{2}{3}\rho\omega\frac{\delta U_i}{\delta x_j}\delta_{ij}) - \beta_1\rho k\omega^2$$

De la misma forma, al considerar el análisis estacionario, la ecuación 19 se puede reescribir como sigue:

Cuando se realiza un análisis con modelo de turbulencia $k\omega$ SST se debe considerar un pequeño cambio en la formulación de las ecuaciones.

El modelo $k\omega$ SST Fue desarrollado por Menter en 1994, con el propósito de integrar la formulación del “ $k-\omega$ Model” en las regiones cercanas a las paredes, con las ventajas ofrecidas por el “ $k-$ Model” en los lugares más lejanos a las superficies.

La ecuación para ω se mantiene igual que la mostrada en la ecuación 20, sin embargo, para k se realiza la modificación como se muestra a continuación:

$$\begin{aligned} & \frac{\delta(\rho\omega)}{\delta t} + \text{div}(\rho\omega U) \\ & = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\omega}\right)\text{grad}(\omega)\right] \\ & + \gamma_1\left(2\rho S_{ij}\cdot S_{ij}\right. \\ & \left. - \frac{2}{3}\rho\omega\frac{\delta U_i}{\delta x_j}\delta_{ij}\right) - \beta_1\rho k\omega^2 \\ & + 2\frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega}\frac{\delta k}{\delta x_k}\frac{\delta\omega}{\delta x_k} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 21}$$

Nuevamente, la ecuación 21 puede ser simplificada como sigue:

$$\begin{aligned} \text{div}(\rho\omega U) & = \text{div}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_\omega}\right)\text{grad}(\omega)\right] \\ & + \gamma_1\left(2\rho S_{ij}\cdot S_{ij}\right. \\ & \left. - \frac{2}{3}\rho\omega\frac{\delta U_i}{\delta x_j}\delta_{ij}\right) - \beta_1\rho k\omega^2 \\ & + 2\frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega}\frac{\delta k}{\delta x_k}\frac{\delta\omega}{\delta x_k} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 22}$$

6.1.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera para la simulación final corresponden a los mismos empleados en la convergencia numérica, sin embargo, cuando se emplea un modelo de turbulencia para las condiciones en los tipos de fronteras **Velocity Inlet** y **Pressure Outlet**, se deben especificar ciertos parámetros de turbulencia y contraflujo respectivamente. Para el caso de **Velocity Inlet**, se establecen parámetros de intensidad turbulenta y razón de viscosidad turbulenta, mientras que para el caso de **Pressure Outlet** se deben especificar los parámetros de intensidad turbulenta de contraflujo y razón de viscosidad turbulenta.

Cuando no se posee información acerca de la turbulencia en la entrada, los valores predeterminados representan una aceptable aproximación. Para análisis de flujo externo la intensidad turbulenta oscila en valores entre 1% y 5% y la razón de viscosidad turbulenta oscila entre valores de 1 a 10. Para este trabajo, se utilizaron valores de intensidad turbulenta y razón de viscosidad turbulenta en **Velocity Inlet** y **Pressure Outlet** de 1% y 10 y 5% y 10 respectivamente.

Los valores previamente establecidos fueron tomados en consideración de la tesis de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014” donde se cita que los valores fueron planteados por Banga *et al*⁵⁶ en su artículo “CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body”.

6.1.3. Métodos de solución

Como ya se mencionó, el modelo viscoso $k\omega$ SST involucra dos parámetros adicionales que son la energía cinética turbulenta y la tasa disipación específica; esto, propició la necesidad de establecer métodos de discretización para cada uno de estos parámetros con el objetivo de no exceder el gasto computacional y mantener una precisión aceptable. Por ello y basados en el trabajo de grado “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014⁵⁸” las siguientes técnicas de discretización seleccionadas fueron:

- ✓ Energía cinética turbulenta: First Order Upwind. (Para lograr una convergencia más rápida).

⁵⁶ BANGA, Saurabh *et al*. CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. En: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. Vol.; 12. No 4-III (Jul-Ago.2015); p.87-94. ⁵⁸G.A. Florez, R. Guzmán. “ANÁLISIS Y VALIDACIÓN AERODINÁMICA PARA EL VEHÍCULO MONOPLAZA DE COMPETICIÓN ELÉCTRICO DE LA ESCUDERÍA DCM PARA LA FÓRMULA SENA 2014”. Depto. Ingeniería Aeronáutica. Fundación Universitaria Los Libertadores. p. 172.

- ✓ Tasa de disipación específica: First Order Upwind. (Para lograr una convergencia más rápida).

6.1.4. Ejecución del cálculo

El número de iteraciones escogido para la simulación final fue de 200, este valor fue establecido por conveniencia dado que durante el análisis de convergencia de malla se apreció que algunas mallas carecían de convergencia antes de 150 iteraciones. Además, debido a las limitaciones de la malla escogida por temas computacionales se hace imperativo un valor donde se asegure una estable convergencia.

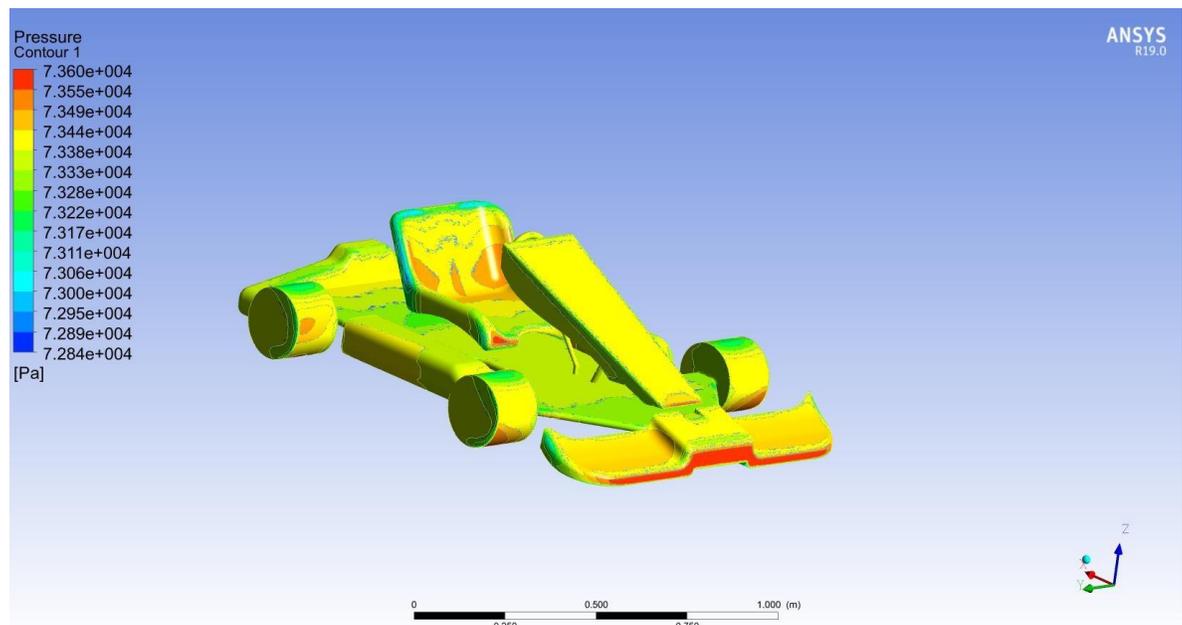
7. RESULTADOS, ANÁLISIS Y VALIDACIÓN

En esta fase se analizan los resultados obtenidos en la simulación anterior, para esto se comparan los resultados del kart tradicional y el modificado con el objetivo de poder plantear una conclusión final del proyecto, además se buscan artículos que permitan validar el proyecto, es decir, que presente una hipótesis concreta respecto a la estabilidad del kart.

Una vez realizadas las respectivas simulaciones en Ansys Workbench con la malla escogida para cada uno de los karts bajo análisis se procedió a extraer los resultados gráficos representados en contornos para la presión y velocidad del aire y en líneas de flujo con el objetivo de observar de manera clara y sencilla el comportamiento que tenía el aire cuando era atravesado por el kart.

7.1. CONTORNOS DE PRESIÓN.

Figura 35. Contorno de presión sobre kart con alerón convencional.



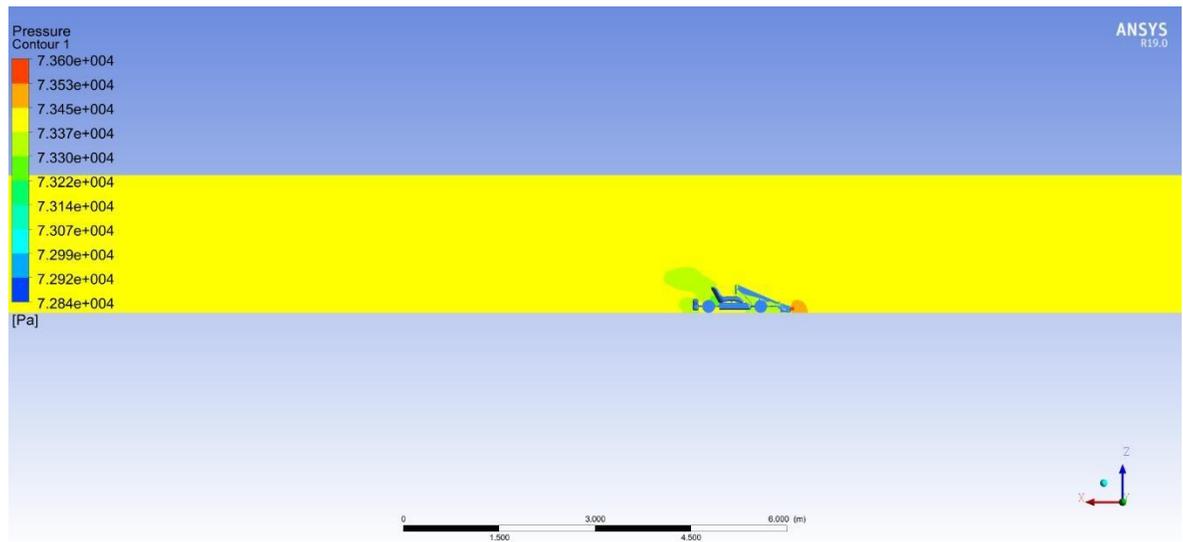
Fuente: Autores.

En primera instancia, se puede observar en la figura 33 el comportamiento de la presión alrededor del kart con alerón tradicional, allí, es posible encontrar puntos críticos donde los valores de presión aumentan respecto de la presión ambiente,

estos puntos son principalmente en la parte frontal del alerón delantero, las caras normales de los neumáticos respecto de la dirección del flujo de aire así como la base del asiento del piloto, dichas zonas se diferencian sobre todo por su coloración rojiza, donde considerando la escala de presiones manejada para éste análisis ronda entre 73550 y 73600 pascales.

Por otra parte, zonas como la sección lateral del asiento, caras perpendiculares de los neumáticos respecto la dirección del flujo de aire y la base del chasis del kart presentan una coloración verde que ronda los valores de presión entre 73170 y 73380 pascales; éstos resultados pueden ser explicados debido a la posición en la que se encuentran dichas secciones respecto de la dirección del aire, al tener orientación paralela presentan un menor choque con el aire, viéndose ligeramente incrementada la presión, caso contrario con las secciones que tienen una orientación perpendicular a la dirección del aire ofreciendo una zona de impacto más pronunciada.

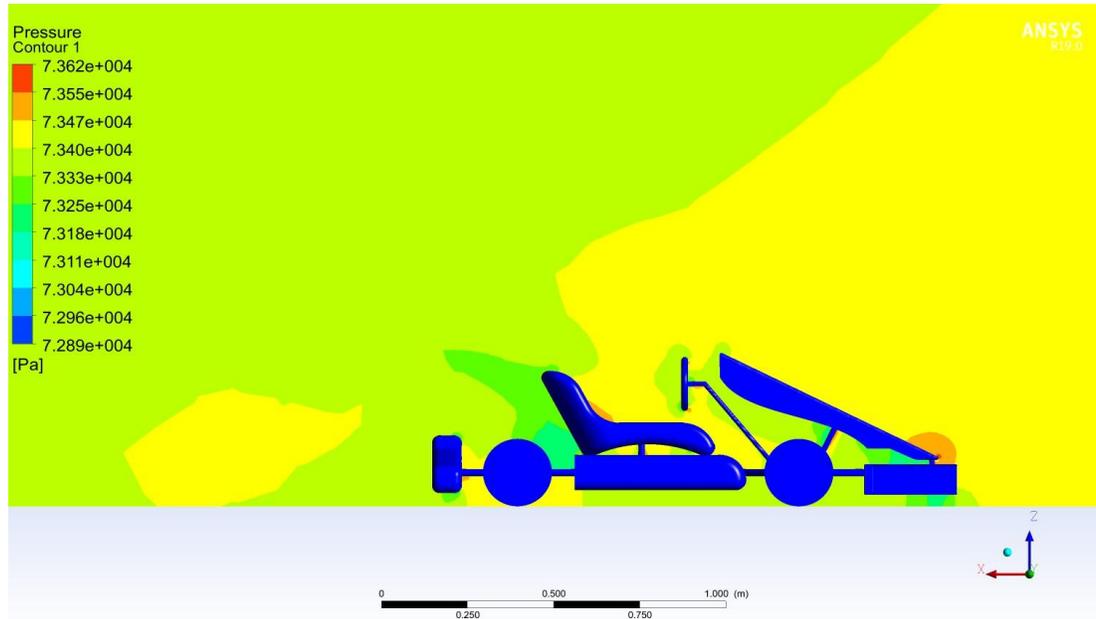
Figura 36. Contorno de presión sobre kart con alerón convencional sobre plano de simetría.



Fuente: Autores.

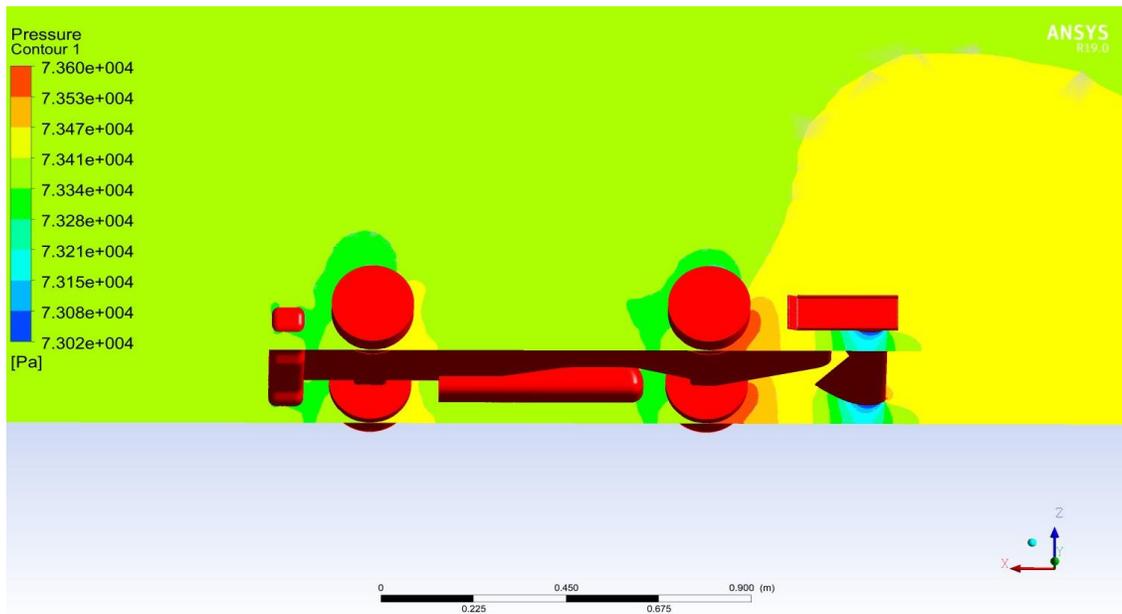
La figura 34 contempla en menor detalle los contornos de presión presentes alrededor del kart con alerón convencional, en ésta figura es posible observar el comportamiento completo de la presión en el interior del volumen de estudio, se aprecia cómo la presión aumenta alrededor del kart, presentando una coloración verde alrededor de este, evidenciando un ligero aumento; mientras que en la zona frontal, sobre el alerón se presenta el mayor aumento de la presión, denotado con un color naranja.

Figura 37. Contorno de presión sobre kart con alerón modificado sobre plano de simetría.



Fuente: Autores.

Figura 38. Contorno de presión en kart con alerón modificado en los neumáticos.



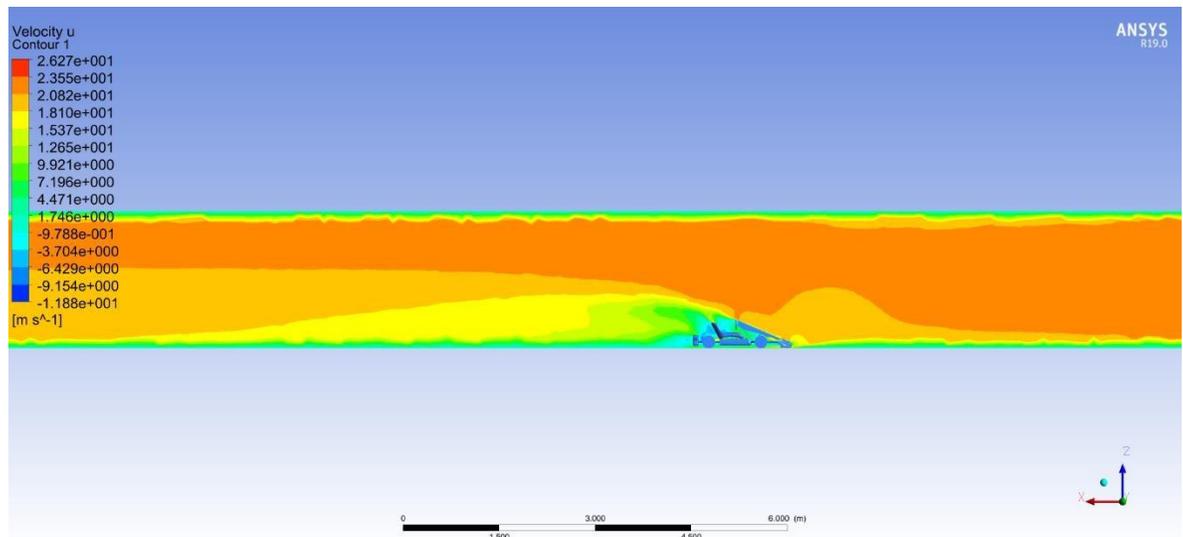
Fuente: Autores.

Una vez obtenidos los contornos de presión para el kart con alerón tradicional, se procedió a extraer los resultados del kart con alerón modificado, para éste, se obtuvieron contornos de presión sobre el plano de simetría del kart como en planos cercanos a los extremos del mismo para apreciar los cambios de la presión en diferentes secciones.

En la figura 35 se puede apreciar un comportamiento de la presión muy similar que en el kart con alerón tradicional, se observa un ligero aumento alrededor de casi todo el kart en la presión, sin embargo, el mayor aumento se presenta en la zona del alerón, sección que choca con el aire de manera perpendicular, además de esto, en el kart modificado se puede apreciar un aspecto importante dentro del análisis aerodinámico de un alerón; la diferencia de presión presente entre el intradós y el extradós de un perfil es lo que finalmente genera la fuerza de sustentación o dicho propiamente en el ámbito automovilístico: carga aerodinámica; en la figura 36 es claramente visible cómo la presión disminuye cuando pasa por la zona del extradós del alerón instalado presentando una coloración azul oscura y azul marina, donde los valores obtenidos para la presión rondan entre 73210 y 73020 pascales; de ésta manera, es posible concluir con certeza que el alerón modificado genera la carga aerodinámica, la cual pretende aprovechar para el funcionamiento del kart, mientras el alerón convencional no presenta dicha variación en la presión.

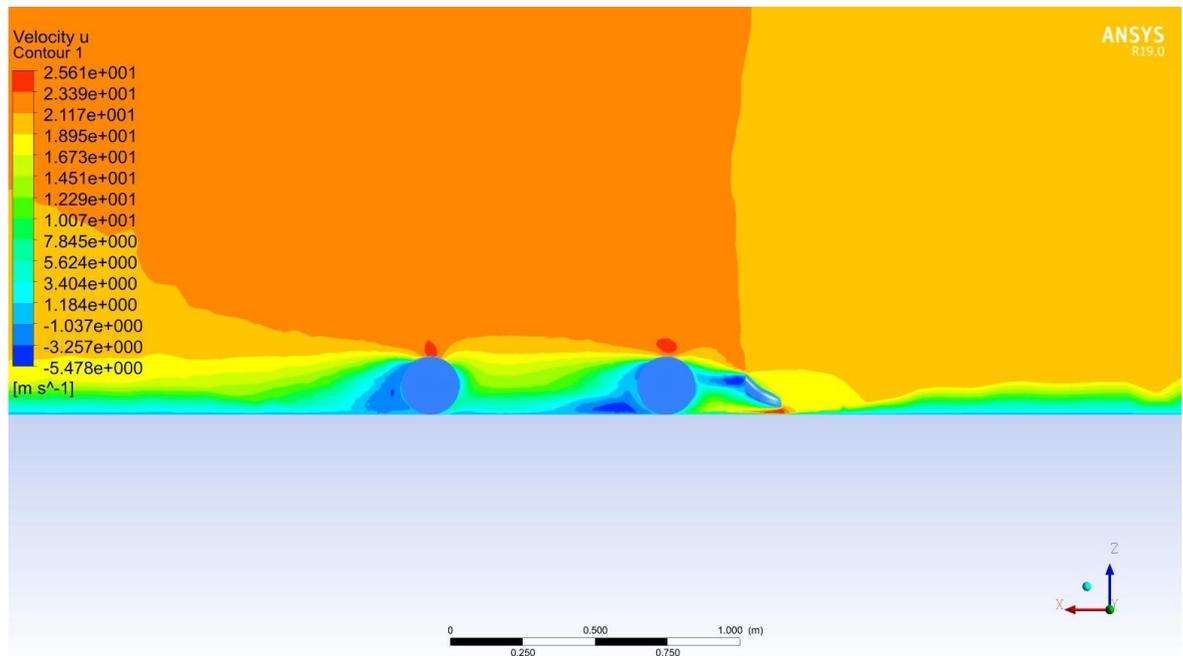
7.2. CONTORNOS DE VELOCIDAD.

Figura 39. Contorno de velocidad sobre kart con alerón convencional en plano de simetría.



Fuente: Autores.

Figura 40. Contorno de velocidad sobre kart con alerón convencional en los neumáticos.



Fuente: Autores.

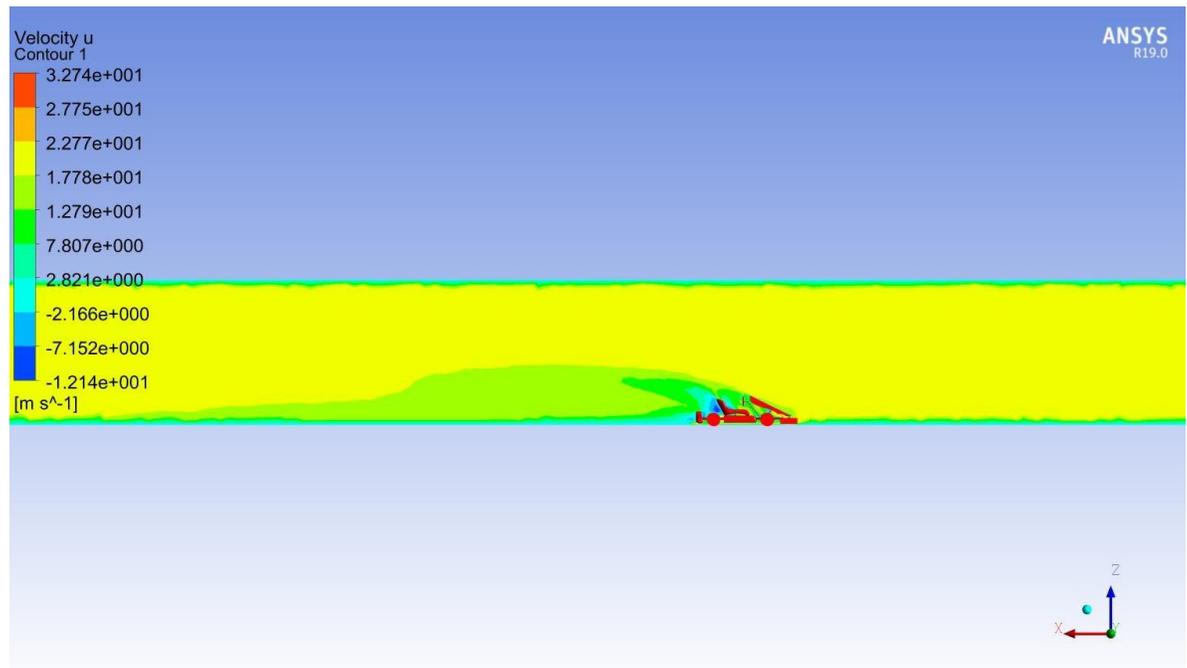
Durante la obtención de los resultados en CFD - Post fue relevante apreciar el comportamiento del flujo de aire que circula alrededor del kart en diferentes secciones. Para el caso del kart con alerón convencional, se extrajeron los contornos de velocidad sobre el plano de simetría del monoplaza y planos sobre los extremos del mismo.

En las figuras 37 y 38 se observan dichos patrones. Cabe destacar, que las zonas con menor velocidad son aquellas donde se encuentra una superficie por delante, lo que genera una serie de vórtices y estelas de flujo. En la figura 37 se puede apreciar la estela de flujo obtenida cuando el kart atraviesa el aire, se observa como esta se extiende a casi 6 longitudes del monoplaza de manera uniforme sobre el volumen de estudio. Es importante destacar que la franja de color azul que se encuentra en la parte inferior del plano de simetría indica que la velocidad en el piso es igual a cero, debido a su tipo de condición de frontera, representado por el fenómeno físico conocido como “condición de no deslizamiento”. Es posible apreciar además, los ligeros aumentos del flujo de aire que recorren el kart en las zonas del parachoques en la parte delantera representada por un color naranja, mientras que la sección trasera presenta una disminución de la velocidad del aire indicada con un color azul marino.

En la figura 38 se puede apreciar en más detalle el comportamiento del flujo de aire sobre los neumáticos y el alerón, se observa un aumento considerable en la parte delantera del alerón denotada por una coloración roja con magnitud aproximada de 25.61 m/s. Así mismo, es posible ver una coloración azul oscura en la parte posterior del alerón y los neumáticos con magnitud negativa; éste resultado puede deberse a la condición de remolino o desorden en la dirección del flujo de aire debido a la forma circular de los neumáticos, generando así, un desorden del flujo y haciendo que las partículas del aire tiendan a avanzar y retroceder, es por este motivo que se puede estar presentando que la dirección de la velocidad cambie.

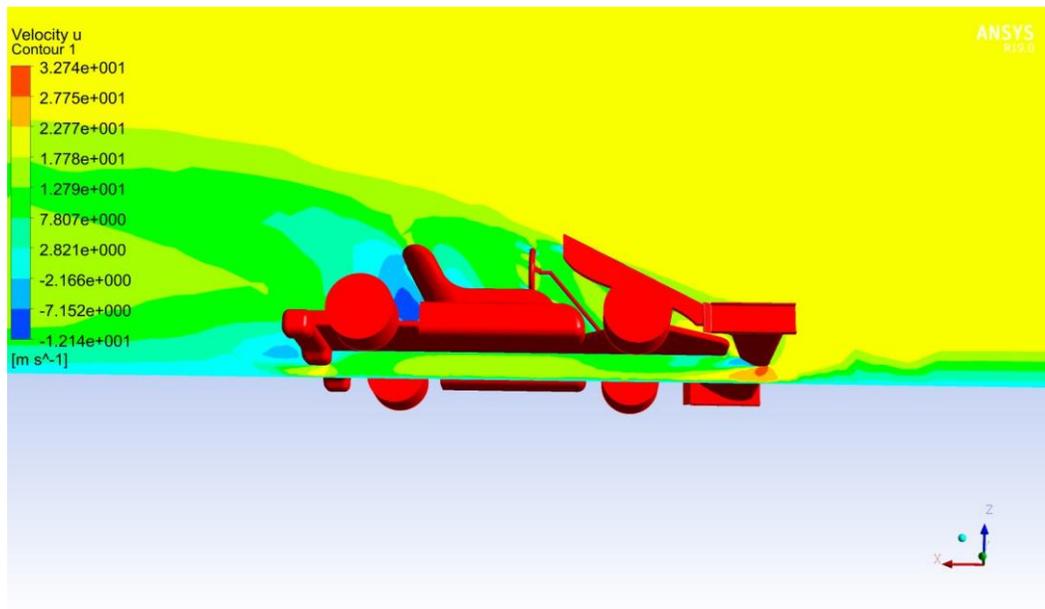
Es de gran importancia indicar que los resultados obtenidos no son los más exactos debido a la necesidad de trabajar con una malla relativamente refinada con precisión producto de la limitación computacional con la que se trabajó durante el desarrollo del proyecto.

Figura 41. Contorno de velocidad sobre kart con alerón modificado en plano de simetría.



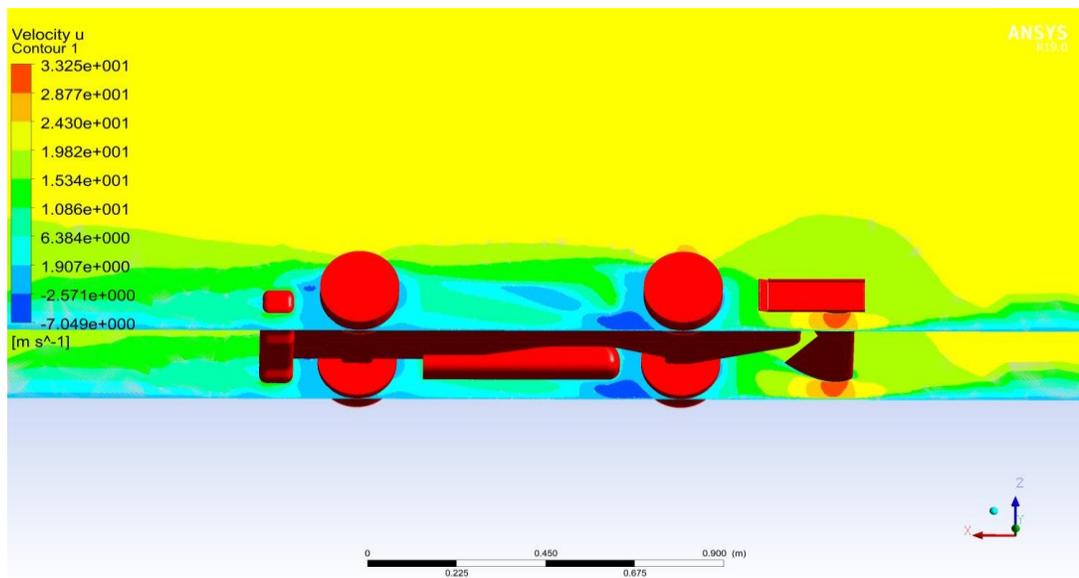
Fuente: Autores.

Figura 42. Contorno de velocidad sobre kart con alerón modificado en plano de simetría con mayor detalle.



Fuente: Autores.

Figura 43. Contorno de velocidad sobre kart con alerón modificado en los neumáticos en mayor detalle.



Fuente: Autores.

De la misma forma que se hizo con los contornos de presión, una vez obtenidos los contornos de velocidad del kart con alerón convencional se procedió a extraer los contornos de velocidad para el kart con alerón modificado, éstos resultados se encuentran en las figuras 39, 40 y 41 del presente documento.

La figura 39 expresa el contorno de velocidad para todo el volumen de control obtenido, allí, es posible apreciar la formación de la estela de flujo una vez el kart atraviesa el aire, sin embargo, comparado al kart convencional, se observa una reducción en la longitud de la estela de flujo, esto se debe principalmente a un flujo más ordenado y uniforme que deja el kart debido a su modificación en el alerón que evidentemente mejora la calidad del aire y lo distribuye de forma más ordenada. En otras secciones del kart se observan los mismos patrones en el aumento de la velocidad como es el caso de la parte frontal del parachoques delantero mientras la sección posterior presenta una reducción de la misma.

Las figuras 40 y 41 representan los contornos de velocidad en detalle para el plano de simetría del kart con alerón modificado y los contornos sobre planos cercanos a los extremos del monoplaza.

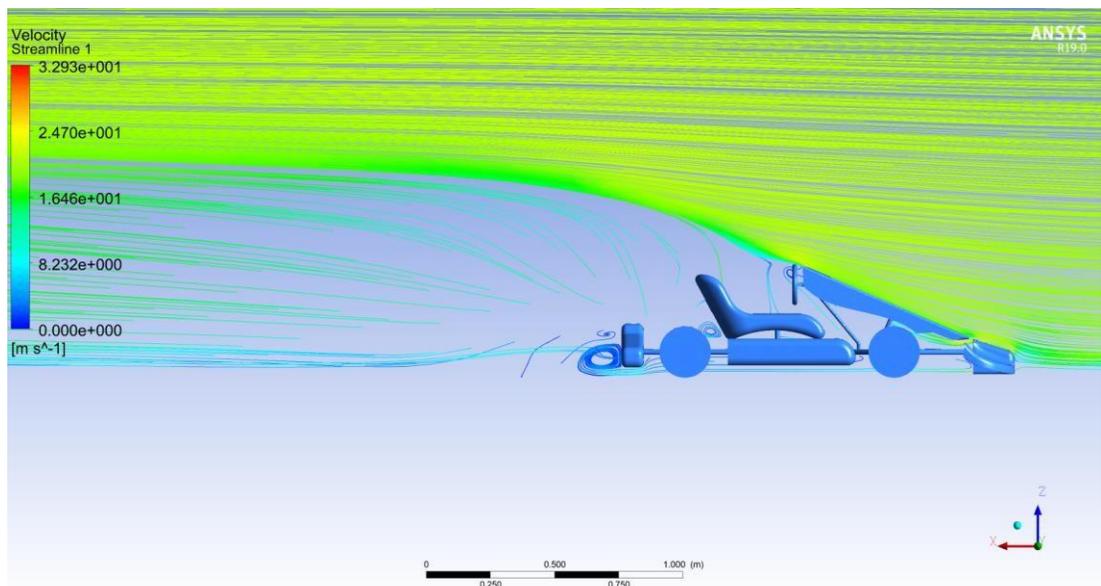
En la figura 40 se observa de manera más detallada el comportamiento del contorno de la velocidad de flujo sobre el plano de simetría del kart con alerón modificado. En primera instancia, se aprecia una zona de alta velocidad en el extradós del alerón, de coloración roja, de ésta manera, se puede confirmar la teoría del fenómeno físico donde se indica que la caída de presión se compensa con un aumento en la velocidad del flujo, en la figura 36 se observó la disminución de la presión. Adicionalmente, se aprecia alrededor del kart una coloración verde dominante ligeramente inferior a la velocidad ambiente rondando entre 12.79 y 17.78 m/s. Por otra parte, se observa una disminución de la velocidad en la parte posterior de la silla, debido a la dificultad del aire de alcanzar dicha zona se presentan una serie de vórtices e inversiones de flujo traducidas en velocidades negativas.

La figura 41 representa los contornos de velocidad presentes en el kart con alerón modificado en la zona de los neumáticos y zona cercana al endplate del alerón, en ésta figura, se observa el aumento de la magnitud de la velocidad del aire sobre el extradós comparado con el aumento presente sobre el plano de simetría, esto se debe físicamente a la mayor longitud del perfil sobre los extremos del alerón, de esta manera, existe un aumento en la velocidad debido a la generación de una menor presión sobre dicha zona. Los contornos de velocidad presentes alrededor de los neumáticos indican un comportamiento similar al ya explicado, la disminución de la velocidad de aire se debió a la recirculación e inversión del flujo de aire producto del movimiento circular continuo.

7.3. COMPARATIVA EN LAS LÍNEAS DE FLUJO SOBRE EL KART CONVENCIONAL Y MODIFICADO.

El siguiente paso en la obtención de resultados después de la extracción de los contornos de presión y velocidad fue la simulación de las líneas de flujo de aire para apreciar su comportamiento general una vez que el kart lo atravesaba. Los resultados de estas simulaciones se pueden apreciar en las siguientes imágenes organizadas según las orientaciones visuales para su respectivo análisis.

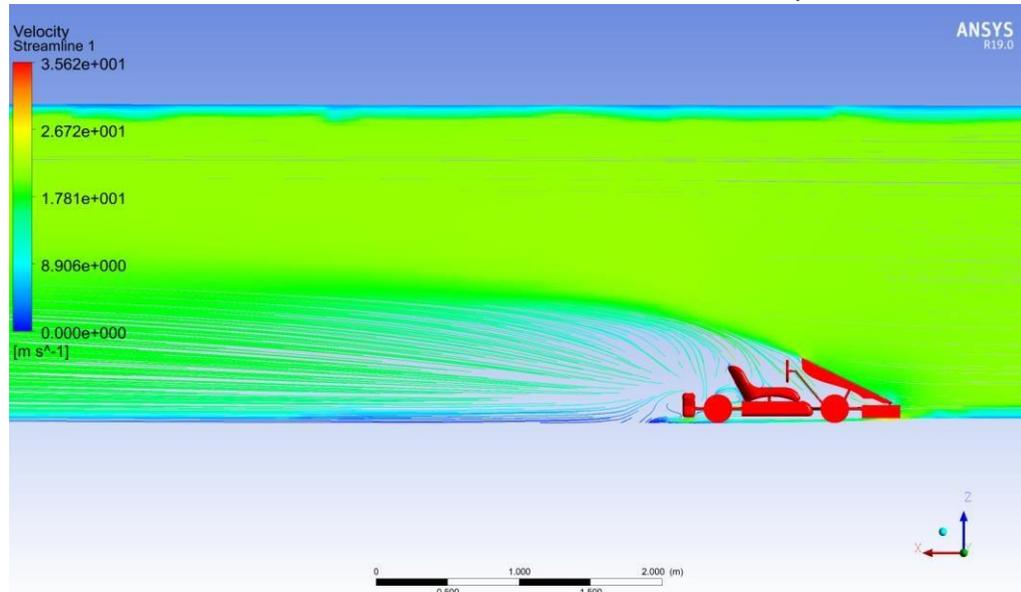
Figura 44. Streamlines sobre kart con alerón convencional en plano de simetría.



Fuente: Autores.

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

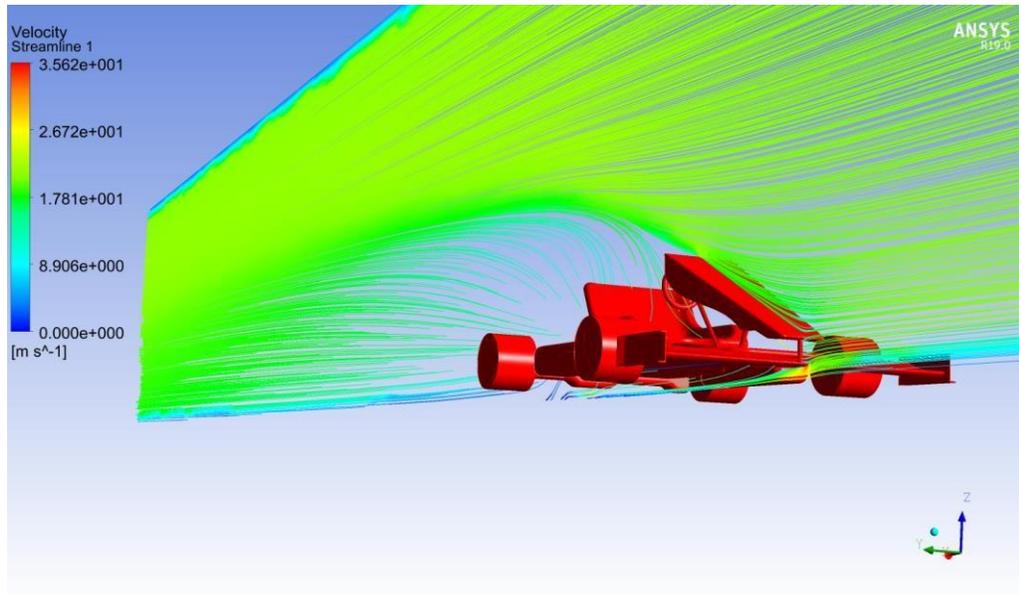
Figura 45. Streamlines sobre kart con alerón modificado en plano de simetría.



Fuente: Autores.

En las figuras 42 y 43 se indican el comportamiento de las líneas de flujo alrededor del kart con alerón convencional y alerón modificado sobre un plano de simetría respectivamente, la velocidad que experimenta el flujo en zonas como el parachoques y timón es muy similar, presentando un color verde claro con una magnitud de alrededor 17.81 m/s, la sección de la silla y parte posterior de ambos karts presenta una coloración azul marina por lo que se deduce que la velocidad en éstas secciones ronda los 8.232 m/s. Sin embargo, el aspecto más relevante de éstos resultados es la formación de torbellinos e inversión de las líneas de flujo en la parte posterior del kart con alerón convencional. Uno de los aspectos que se consideraron en el presente documento fue la capacidad de realizar una modificación al alerón delantero capaz de mejorar el comportamiento y uniformidad del aire una vez se encontraba con ésta sección del kart. En la figura 43 se aprecia claramente en la parte trasera del kart la reducción del torbellino que se encuentra presente en el kart con alerón convencional, esto, claramente indica la mejoría de la distribución del flujo y la capacidad que tiene el alerón modificado de brindar un mayor grado de uniformidad al flujo comparado al alerón convencional.

Figura 46. Streamlines sobre kart con alerón modificado en plano de simetría, vista de perspectiva.

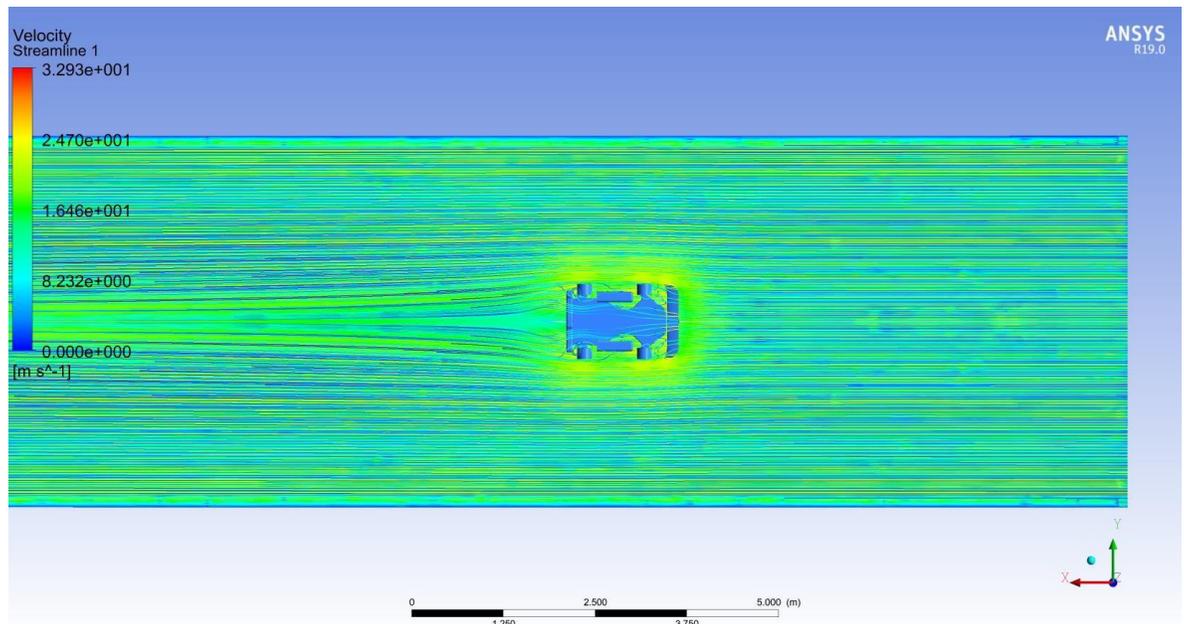


Fuente: Autores.

La figura 44 muestra desde una mejor perspectiva lo anteriormente mencionado, sobre el plano de simetría se aprecia el comportamiento del flujo de aire sobre el parachoques del kart, adicionalmente, se observa el aumento de la velocidad sobre la sección del extradós del alerón como era de esperarse para finalmente reducir nuevamente su velocidad en la parte inferior del monoplaza, éste fenómeno es de vital importancia en competencias automovilísticas dado que el aumento de la velocidad se ve reflejado en una disminución en la presión del aire, lo que produce que el kart se adhiera más a la pista. Dicho fenómeno es conocido como efecto de fondo plano, que simula un efecto de Venturi y que presenta enormes ventajas a la hora de competir, un claro ejemplo de aplicación es la fórmula 1 donde los ingenieros diseñan el monoplaza para lograr la mayor succión que el fondo plano puede generar para producir más agarre del auto sobre la pista y poder ganar segundos en carrera.

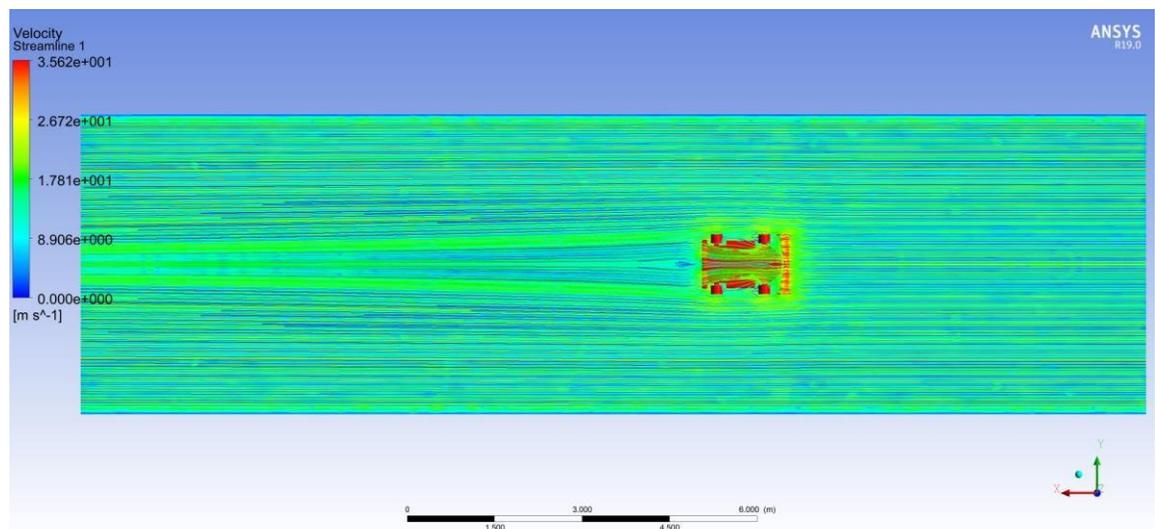
INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Figura 47. Streamlines sobre kart con alerón convencional, vista inferior del volumen de control.



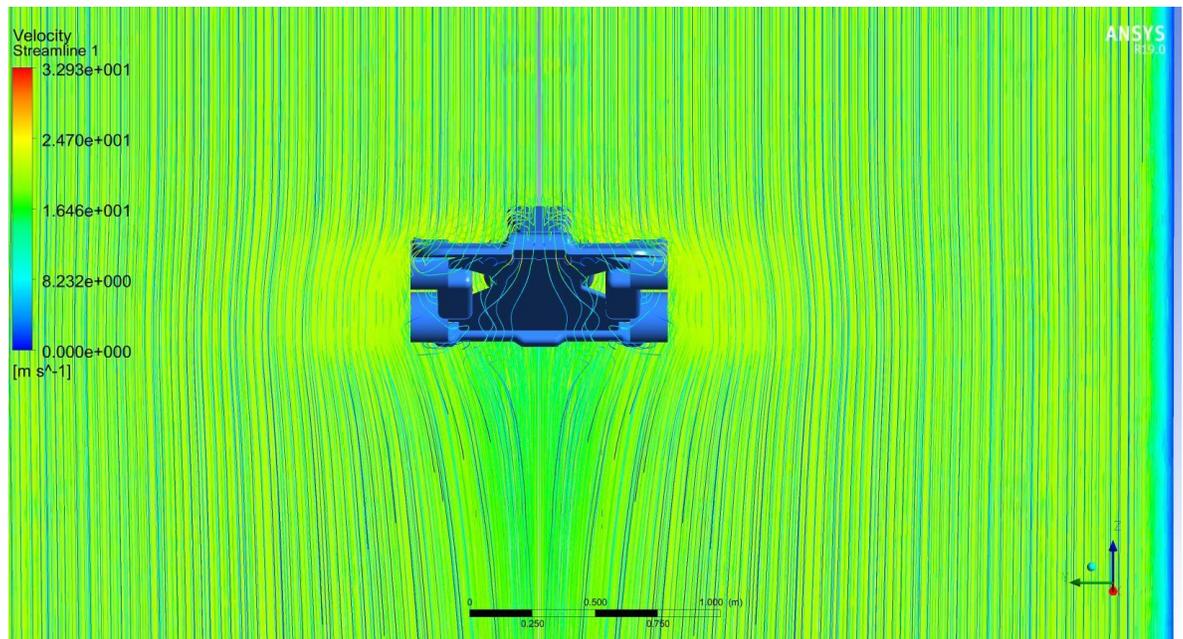
Fuente: Autores.

Figura 48. Streamlines sobre kart con alerón modificado, vista inferior del volumen de control.



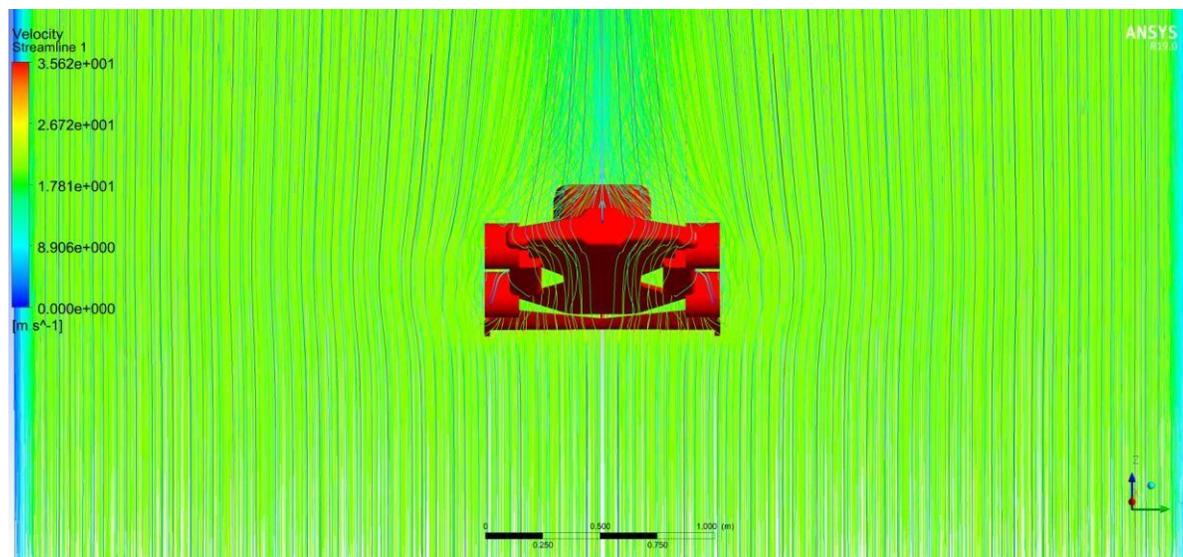
Fuente: Autores.

Figura 49. Streamlines sobre kart con alerón convencional, vista frontal del volumen de control.



Fuente: Autores.

Figura 50. Streamlines sobre kart con alerón modificado, vista frontal del volumen de control.



Fuente: Autores.

Los resultados explicados mediante las figuras 42, 43 y 44 se pueden apreciar de mejor manera en las figuras 45, 46, 47 y 48 donde se observa el comportamiento de las líneas de flujo de aire sobre el fondo plano y la parte posterior del monoplaza, esto, representa una gran ayuda dado que permite entender cómo se comporta el aire y qué dirección sigue considerando el ancho total del kart.

En las figuras 45 y 47 es claramente visible la formación de pequeños remolinos y circulaciones de aire al atravesar la sección del alerón convencional y los neumáticos delanteros, se observa que las líneas de flujo tienden a desviarse del centro del kart a los laterales, posteriormente cuando el aire desordenado atraviesa los neumáticos traseros y la parte posterior del kart genera aun mayor circulación y flujo turbulento, de manera directa, éste comportamiento aumenta el arrastre generado sobre el kart lo que obliga a generar una mayor aceleración para vencer ésta fuerza.

Por otra parte, en las figuras 46 y 48 se aprecia el comportamiento del aire sobre el kart con alerón modificado en las mismas condiciones atmosféricas y de velocidad. Es claramente visible la reducción en las perturbaciones del flujo de aire una vez atraviesa la zona del alerón y los neumáticos, se evidencia cómo la modificación del alerón y un diseño más suave logra reducir la formación de flujo turbulento, además, presenta una mejoría en la organización del flujo de aire, un aspecto de vital importancia en los deportes de motor. Por los resultados obtenidos se puede inferir una reducción en la fuerza de arrastre total generada sobre el kart.

Un aspecto que vale la pena considerar dentro del análisis del comportamiento del flujo es la esbeltez de la estela generada por el kart una vez atraviesa el aire. De manera muy clara se aprecia dicho criterio en las figuras 45 para el kart con alerón convencional y figura 46 para el monoplaza con alerón modificado.

En la figura 45 se observa una estela de flujo ancha y con variaciones en la velocidad visibles en las coloraciones azul marina y verde; sin embargo, en la figura 46 se observa que el kart con alerón modificado presenta una estela de flujo mucho más organizada, más angosta y constante en su coloración verde sobre los límites de dicho fenómeno, éste, es un indicador más que debe ser considerado en la evaluación sobre el desempeño que presenta el alerón modificado respecto del alerón convencional.

7.4. COMPARATIVA ENTRE VALORES DE PRESIÓN Y VELOCIDAD PARA EL KART CONVENCIONAL Y MODIFICADO.

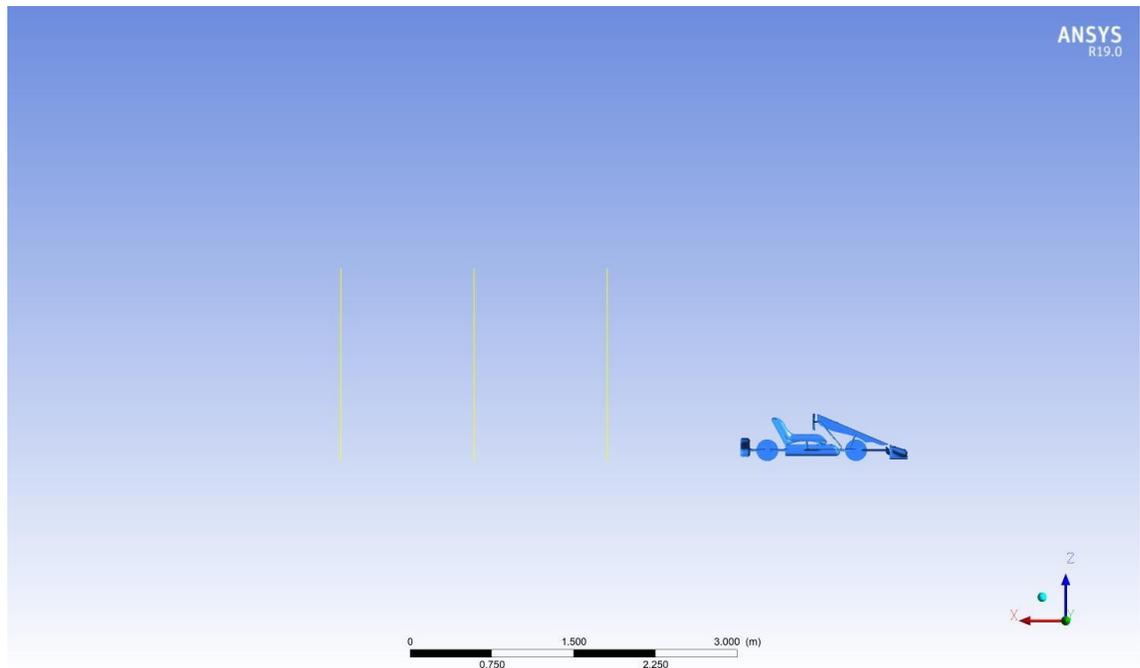
Posterior al análisis de contornos y líneas de flujo se procede a estudiar de manera más clara y numérica el comportamiento de la presión y la velocidad en la zona posterior del kart donde se genera la estela de flujo. Para la extracción de los datos

se empleó una función que tiene CFD-Post, ésta, se basa en ubicar una serie de coordenadas, éstas se indican en la tabla 16, así se genera una línea de análisis, sobre el plano de simetría y en la dirección Z, por lo que se consideró la altura del túnel diseñado. A lo largo de dicha línea se generan una serie de puntos que son los encargados de medir las magnitudes de velocidad y presión; para éste análisis se emplearon 50 puntos a lo largo de las líneas establecidas. En la figura 49 se presentan las tres líneas empleadas para la extracción de los resultados.

En la figura 50 se presenta el comportamiento de la presión respecto de la altura de la línea en dirección Z. Se aprecian cada una de las líneas donde la coloración verde representa la línea 1, siendo ésta la más cercana al kart, posteriormente se encuentra la línea 2 con una coloración azul y finalmente la línea 3 con una coloración roja que se encuentra como la última.

Para realizar la extracción de datos que se presentan en las figuras siguientes se hizo necesario determinar tres líneas con 50 puntos de análisis, las medidas a lo largo del eje longitudinal se hicieron considerando la distancia entre ejes del kart, la figura donde se evidencian dichas líneas se muestra a continuación:

Figura 51. Líneas de análisis para extracción de datos.



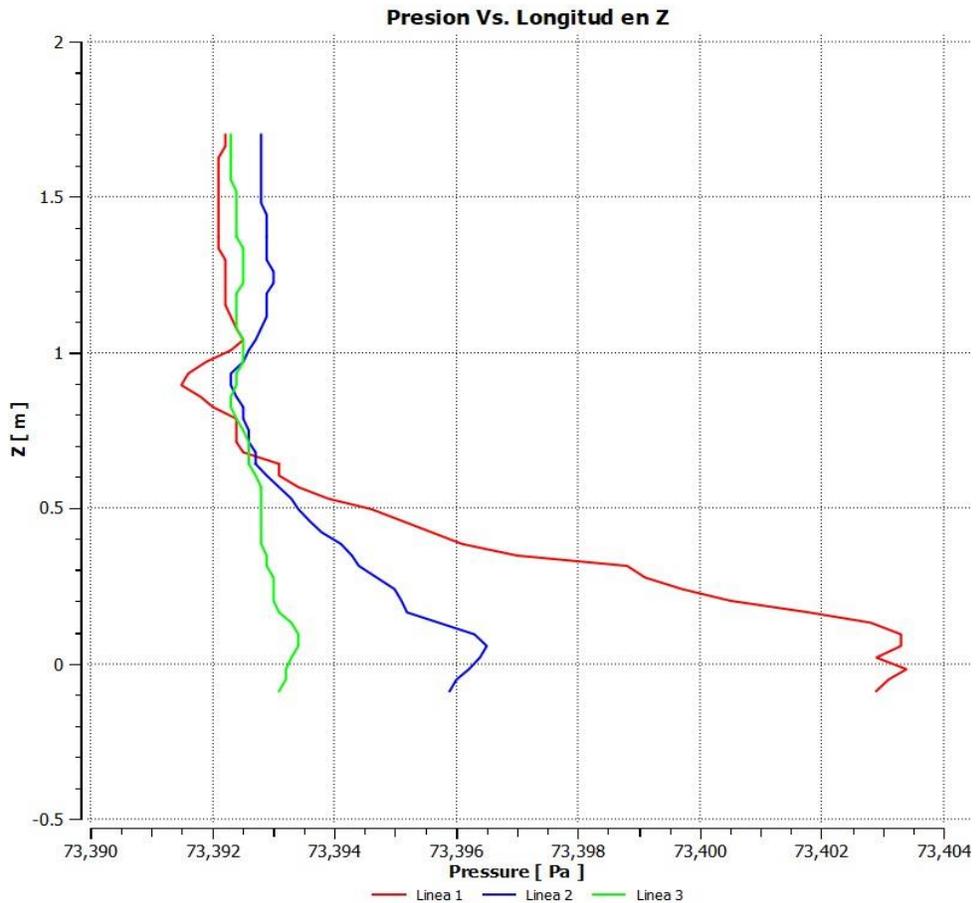
Fuente: Autores.

Tabla 16. Coordenadas de las líneas de análisis sobre plano de simetría.

Línea \ Eje	Dirección eje X	Dirección eje Y	Dirección eje Z
Línea 1	1.8291 - 1.8291	4.37819e-05 - 4.37819e-05	-0.0896 - 1.7
Línea 2	3.05052 - 3.05052	4.37819e-05 - 4.37819e-05	-0.0896 - 1.7
Línea 3	4.27194 - 4.27194	4.37819e-05 - 4.37819e-05	-0.0896 - 1.7

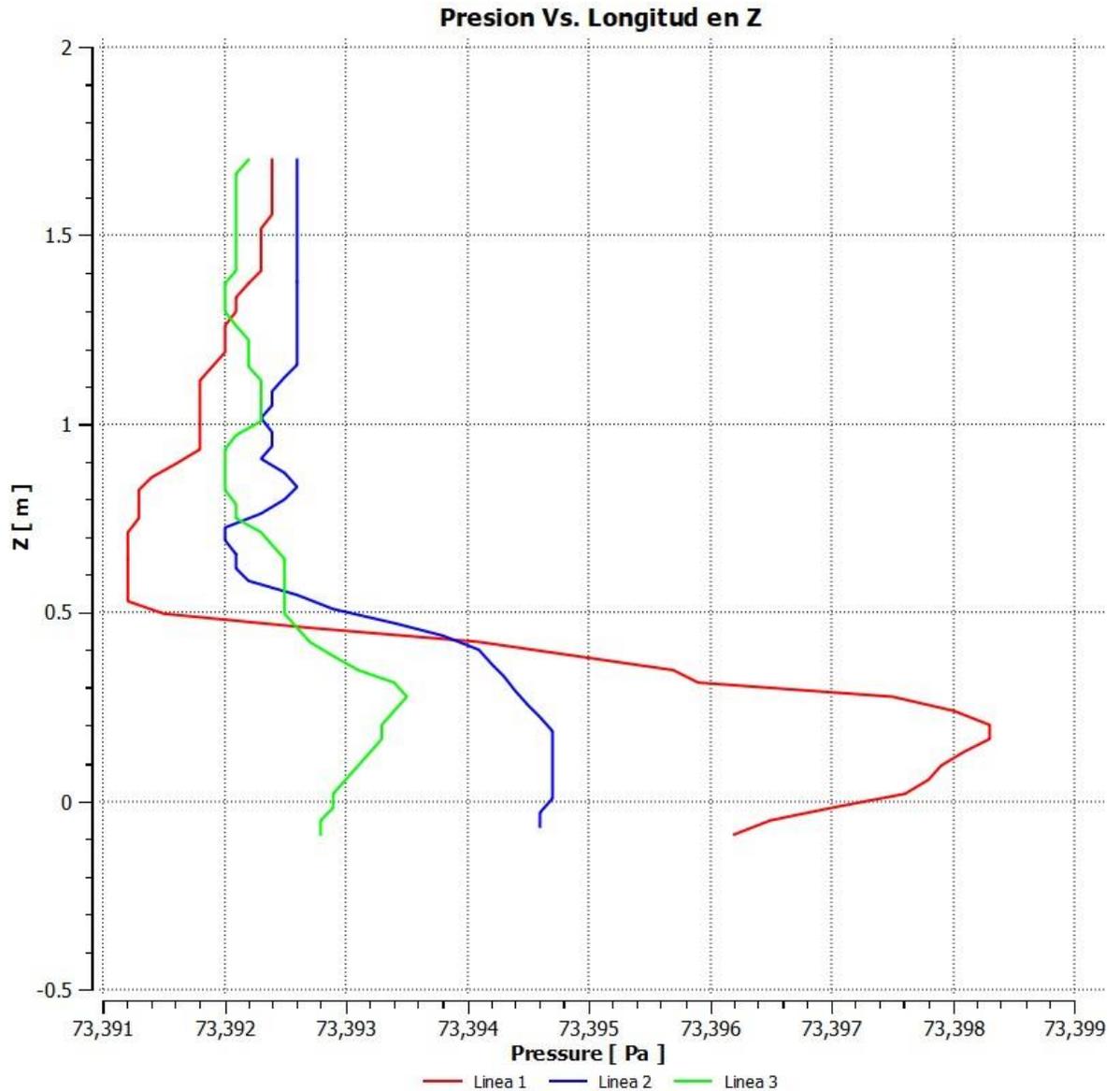
Fuente: Autores.

Figura 52. Gráfica de presión sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón convencional.



Fuente: Autores.

Figura 53. Gráfica de presión sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón modificado.



Fuente: Autores.

Se puede observar que las 3 líneas parten del mismo valor de presión cuando la longitud es máxima, lo cual concuerda con la realidad dado que en dicha altura, se encuentra la presión atmosférica con un valor aproximado de 73393 Pascales, se observa que a medida que la longitud de la línea es menor la presión tiende a aumentar debido a que la presencia de una estela de flujo se presenta como un

flujo desordenado, turbulento lo que genera una circulación en flujo de aire afectando directamente la velocidad del aire.

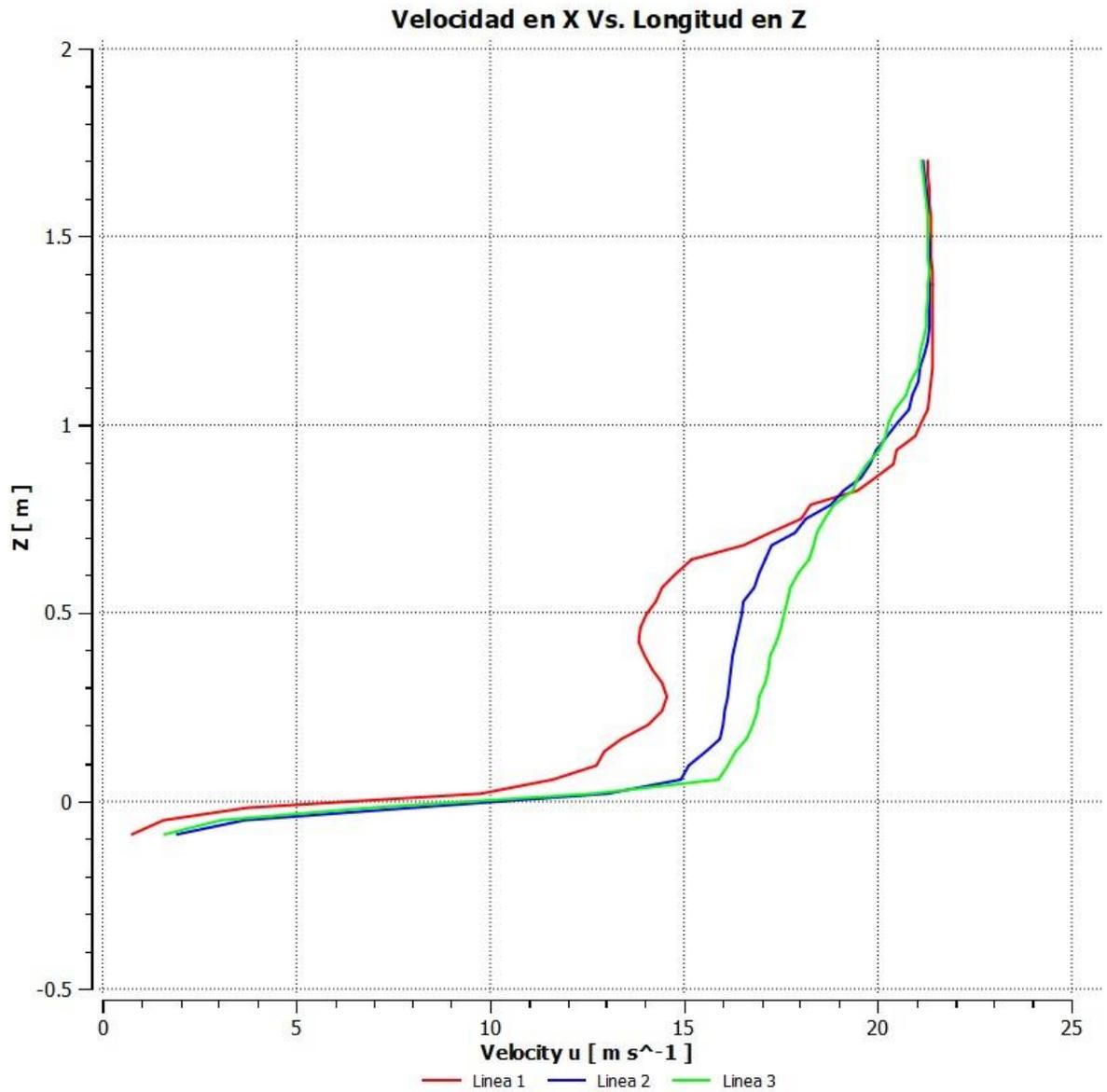
La línea 1, es decir, la más cercana a la parte posterior del kart presenta la mayor variación en la presión cuando la longitud de la línea de análisis está al mismo nivel del kart, esto indica una disminución en la velocidad del aire producto de la estela que genera el kart cuando atraviesa el aire; gradualmente, la línea 2 presenta una variación menor a la línea 1 pero mayor a la número 3. De ésta manera se aprecia que la presión conforme la línea de estudio se aleja del kart tiende a disminuir hasta volver a ser la misma presión atmosférica.

De manera simultánea, la figura 51 presenta la variación de la presión sobre las 3 líneas de análisis cuando se analiza el kart con alerón modificado. Como se observa, el comportamiento de la presión es muy similar al presente cuando el análisis se realiza con el kart con alerón tradicional, la presión de la que parte el análisis es la atmosférica, por ello, el comportamiento en ambos casos sobre la máxima longitud de la línea de estudio es la misma. Por otra parte, se observa nuevamente que la línea 1 es la que presenta la mayor variación de presión respecto de la presión medida en la línea 2 y 3 que es la de menor variación por lo que se concluye que la velocidad vuelve a experimentar una disminución cuando la longitud tiende a disminuir.

Es importante apreciar que la zona más crítica es la comprendida entre una longitud de 1 a -0.1 metros, dicha medida coincide con la altura del kart, esto, demuestra la influencia del kart sobre las variaciones de la presión y la velocidad del flujo de aire. Es de relevancia aclarar que las variaciones en la presión y la velocidad son muy pequeñas debido principalmente a que la velocidad de operación era de 20.83 m/s, es decir, que las variaciones en la energía presente no serán de relevancia, por ésta razón los análisis en temperatura no se llevaron a cabo.

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

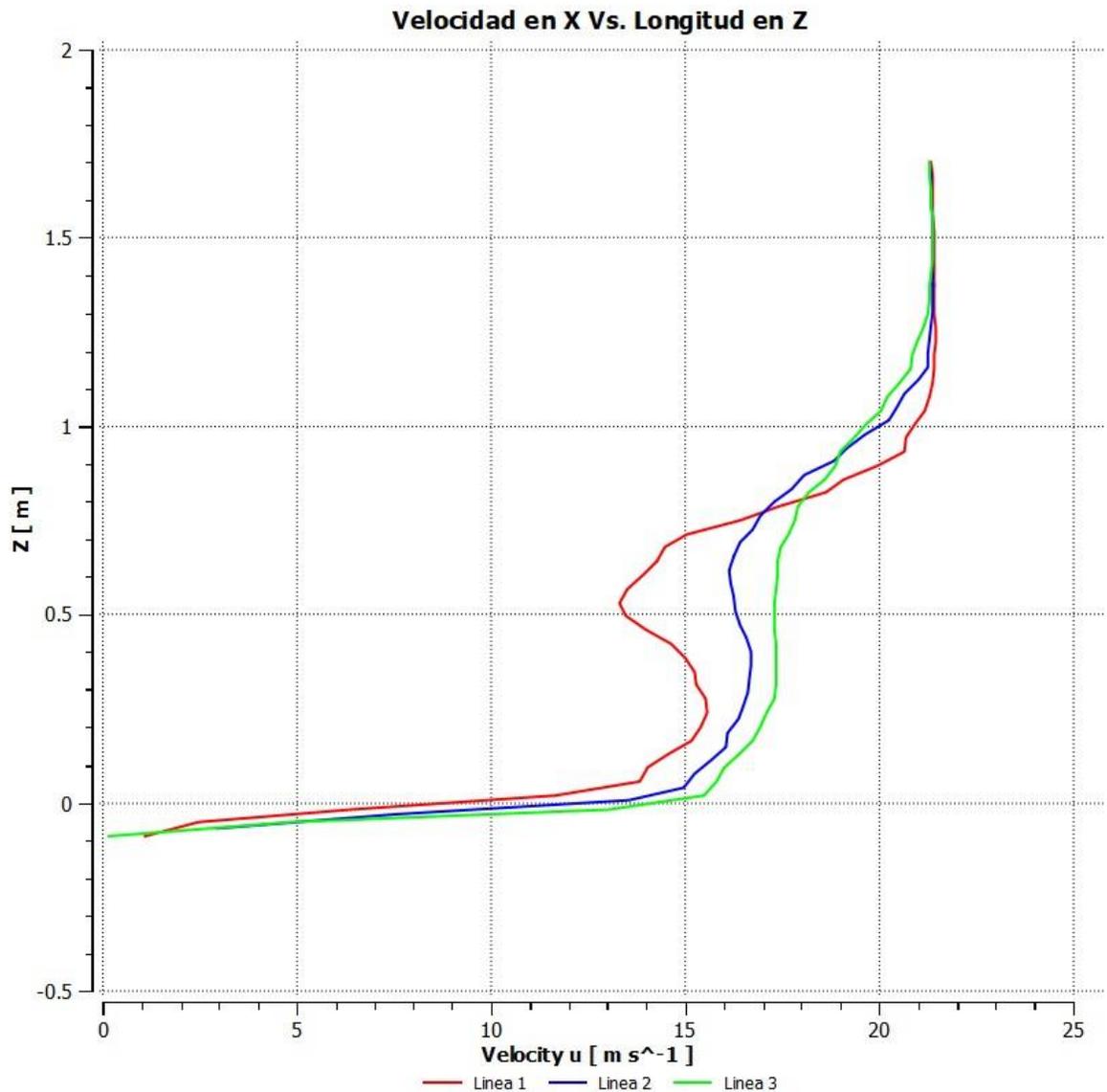
Figura 54. Gráfica de velocidad de flujo sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón convencional.



Fuente: Autores.

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

Figura 55. Gráfica de velocidad de flujo sobre las tres líneas de análisis versus longitud del túnel en dirección Z para kart con alerón modificado.



Fuente: Autores.

Las figuras 52 y 53 presentan la variación de la velocidad del flujo de aire cuando se analiza el kart con alerón convencional y modificado respectivamente. En los resultados obtenidos se aprecia que la línea 1 de coloración roja es la que presenta mayor variación en la velocidad como era de esperarse dado que la presión aumentó sobre ésta, posteriormente la línea 2 presenta la variación intermedia mientras la línea 3 de coloración verde es la de menor variación.

Se observa que los comportamientos en la velocidad son muy parecidos para ambos karts, sin embargo, se observa que el punto de mayor variación es sobre una longitud de 0.5 metros, dicha medida coincide con la altura donde se encuentra el asiento del kart lo que contribuye a la disminución y formación de flujo turbulento sobre la estela que se genera posterior al paso del kart.

Finalmente, es importante indicar la coherencia de los resultados iniciales y finales del proceso. Sobre una longitud de 1.5 metros se observa cómo las líneas parte con una misma velocidad de 20.833 m/s que representa la velocidad de operación que se estableció en la fase inicial del proceso. También se observa que, a medida que disminuye la longitud de las líneas de estudio la velocidad también tiende a descender hasta llegar a un valor de cero, éste valor es coherente dado que el suelo del volumen de estudio se configuró como una pared y de acuerdo con la teoría de la mecánica de fluidos la velocidad del flujo sobre una pared es igual a cero debido a la condición de no deslizamiento.

7.5. COMPARACIÓN Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.

Tabla 17. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para medio kart con alerón convencional y modificado.

Concepto	Kart con alerón tradicional	Kart con alerón modificado
Coefficiente de arrastre	0.70500051	0.64857663
Fuerza de arrastre	28.158657 N	25.097762 N
Coefficiente de carga aerodinámica	-0.26399583	-0.34396171
Carga aerodinámica	-10.215762 N	-13.738288 N

Fuente: Autores.

Tabla 18. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para kart completo con alerón convencional.

KART CON ALERÓN CONVENCIONAL			
Coefficiente de arrastre total	Arrastre total	Coefficiente de carga total	Carga total

1.41000102	56.317314 N	-0.52799166	-20.431524 N
------------	-------------	-------------	--------------

Fuente: Autores.

Tabla 19. Valores de carga aerodinámica y fuerza de arrastre para kart completo con alerón modificado.

KART CON ALERÓN MODIFICADO			
Coefficiente de arrastre total	Arrastre total	Coefficiente de carga total	Carga total
1.29715332	50.195524 N	-0.68792342	-27.476576 N

Fuente: Autores.

Tabla 20. Diferencia porcentual entre valores de eficiencia, arrastre y carga aerodinámica para kart con alerón convencional y alerón modificado.

Concepto	Kart con alerón convencional	Kart con alerón modificado	Diferencia porcentual
Eficiencia aerodinámica	36.279 %	54.739 %	18.46 %
Fuerza de arrastre	56.317314 N	50.195524 N	10.87 %
Carga aerodinámica	20.431524 N	27.476576 N	34.48 %

Fuente: Autores.

Los resultados numéricos obtenidos durante la simulación se expresan en las tablas 17, 18, 19 y 20. En la tabla 17 se tabularon los resultados directamente obtenidos de Ansys Fluent, éstos, corresponden a medio kart que fue el empleado para reducir costo computacional, por esta razón se calcularon los valores exactos para el kart completo, éstos resultados están en las tablas 18 y 19 para el kart con alerón convencional y modificado respectivamente. Finalmente, se calculó la eficiencia aerodinámica empleando la ecuación 7 y la diferencia porcentual, estos resultados finales se encuentran en la tabla 20.

Al concentrar la atención en los resultados de la tabla 20 es posible analizar los valores de diferencia porcentual para eficiencia, fuerza de arrastre y carga aerodinámica.

De acuerdo a lo anterior, la eficiencia aerodinámica para el kart con alerón convencional es de 36.379 % mientras que para el kart con alerón modificado la eficiencia aumenta hasta el 54.739 % lo que se traduce en un aumento del 18,46%, de acuerdo con esto.

Por otro lado, la fuerza de arrastre neta para el kart con alerón convencional es de 56.31 N mientras que para el kart modificado es de 50.19 N, representando así una disminución del 10.87 %.

Finalmente, la carga aerodinámica para el kart con alerón convencional es de 20.43

N mientras que para el kart modificado es de 27.47 N, es decir, que se aumenta en un 34.48 % la fuerza de adhesión sobre el kart en las condiciones de operación simuladas.

Los resultados anteriores indican claramente una notable mejoría en el desempeño que genera la implementación de un alerón más aerodinámico un diseño más conservador y de menor tamaño, así pues la carga aerodinámica aumenta mientras la fuerza de arrastre disminuye, lo que genera que la eficiencia también aumente a más del 50 %, con esto se confirma que implementar un alerón como el diseñado durante este proyecto reduce el consumo de combustible al generar menos arrastre por lo que se requiere menos potencia para poder avanzar, así mismo, se aumenta la adhesión del kart a la pista permitiéndole tomar curvas a una velocidad superior que el kart con alerón convencional, lo que ayudará a reducir el tiempo por vuelta, sumado a esto, la organización y mejoramiento en el recorrido que sufre el aire cuando pasar por el alerón modificado contribuyen a mejorar la estabilidad del monoplaza.

Por otra parte, dentro del análisis del comportamiento de un vehículo es de vital importancia realizar la validación de los resultados obtenidos dentro del estudio para determinar el grado al cual el modelo empleado en el estudio es representativo respecto del comportamiento del mismo en la realidad⁵⁷

Para realizar la validación de los resultados se hace necesario llevar a cabo un marco referencial de trabajos realizados por institutos de investigación, empresas o universidades y así poder respaldar que los resultados obtenidos durante todo el estudio son coherentes y aún más importante, son válidos para determinar que el análisis realizado y el proceso llevado a cabo son verídicos.

⁵⁷ VERSTEEG, H.K. y MALALASEKERA, W... An Introduction to Computational Fluid Dynamics. 2ª Edición. Harlow: Pearson, 2007. p.293.

El análisis de flujo alrededor de un kart de competencia que se consideró durante éste trabajo para realizar la validación de los resultados obtenidos fue llevado a cabo por la Universidad “Tor Vergata” de la ciudad de Roma en Italia, en el departamento de ingeniería mecánica a través del doctor Marco Evangelos Biancolini en el grupo de investigación “Tor Vergata Karting – TVK”; dicho trabajo de investigación se titula “The evaluation of aerodynamic drag of go-karts by means of coast down test and cfd analysis”⁵⁸.

Los resultados obtenidos durante los estudios realizados por dicha universidad evidenciaron una carga aerodinámica de 30 N mientras que la fuerza de arrastre fue de 173 N.

Considerando los resultados que arrojó el presente estudio la carga aerodinámica de 27.47 N se encuentra muy cercano al valor obtenido por el grupo de investigación “Tor Vergata Karting – TVK”, la diferencia es de apenas 2.53 N, que visto en valor porcentual es de 8.43 %. Las discrepancias en dicho valor se deben principalmente a la geometría del kart la cual presenta un alerón y fondo plano diferente, así mismo, la velocidad que es un parámetro clave en el aumento o reducción de la carga aerodinámica para el presente estudio fue de 75 km/h mientras que el parámetro escogido por la universidad “Tor Vergata” fue de 90 km/h. De ésta manera se confirma que los resultados son aceptables y pueden ser validados con criterio.

Finalmente, dentro de la validación es importante comparar el valor de fuerza de arrastre total obtenido en el presente estudio dado que existe gran diferencia con el valor obtenido por el Doctor Marco Evangelos Biancolini. En números el resultado de arrastre obtenido durante el análisis fue de 50.19 N mientras que el valor del Doctor Marco fue de 173 N. Porcentualmente representa el 29.01 %, ésta variación es debida a la diferencia de karts que se consideraron durante los estudios, por cuestiones de simplicidad y limitaciones computacionales, el presente documento empleó un fondo plano y diversas simplificaciones en el diseño como ausencia del piloto, motor y detalles de sujeciones. Así mismo, la fuerza de arrastre aumenta con la velocidad, por ende, era de esperarse que el estudio realizado por la universidad “Tor Vergata” presenta un aumento de dicha fuerza en los resultados.

⁵⁸ Marco Evangelos Biancolini. “EVALUATION OF AERODYNAMIC DRAG OF GO KART BY MEANS OF COAST DOWN TEST AND CFD ANALYSIS”. *Department of Mechanical Engineering Tor Vergata University, Rome Italy.*

<http://www.torvergatakarting.it/filemanager/download/191/The%20evaluation%20of%20aerodynamic%20drag%20of%20go-karts%20by%20means%20of%20coast%20down%20test%20and%20CFD%20analysis.pdf>

8. CONCLUSIONES

- ✓ Uno de los aspectos más importantes para realizar la modificación del alerón delantero es la realización de una línea base de perfiles aerodinámicos que permitan simular diferentes condiciones de operación para poder determinar el perfil que mejor se ajuste a los requisitos de mayor coeficiente de sustentación con el menor arrastre generado, de ésta forma se garantiza una elección fundamentada y acertada para poder desarrollar el diseño y conseguir los resultados que se esperan cuando se ajuste el alerón al kart.
- ✓ Por otra parte, se puede concluir que el alerón implementado durante el proceso de estudio introdujo tres mejoras principales, en primera instancia redujo la fuerza de arrastre un 10.87%, aumentó la carga aerodinámica un 34.48% y mejoró la eficiencia aerodinámica en 18.48%, de esta manera, aumentó el rendimiento del kart, reduciendo la potencia requerida y la estabilidad del mismo confirmando la correcta elección del perfil por medio del base line.
- ✓ Así mismo, se puede concluir que para obtener los resultados más precisos y cercanos a la realidad se hace imperativa la necesidad de contar con una máquina con recursos computacionales amplios para así poder desarrollar un diseño más detallado, evitando de ésta forma la simplificación del CAD que resulta en la reducción de precisión en los resultados, además, permite lograr una malla con alto grado de refinamiento y lograr un análisis más completo y exacto que pueda ser incorporado en la industria.
- ✓ Debido a la complejidad que puede presentar el manejo de la herramienta de simulación Ansys, se puede concluir que para poder llevar a cabo un trabajo de grado es importante conocer todo el trabajo físico y matemático que realiza Ansys para poder lograr una serie de resultados en un problema específico, de ésta forma, se logra entender diversas herramientas importantes y que mejoran la experiencia en el uso de Ansys. Así mismo, se concluye que es muy útil desarrollar un trabajo autónomo en el manejo del programa para poder conocer todas las herramientas que Ansys brinda.
- ✓ Finalmente, se concluye que para considerar los resultados obtenidos como coherentes se hace necesario realizar la validación con algún estudio llevado a cabo por algún centro de investigación, universidad o instituto, así, se confirma que los resultados arrojados por el estudio realizado son válidos y no están alejados de la realidad, afirmando el correcto uso de los programas de modelamiento y simulación, así mismo, determinar que las consideraciones realizadas al inicio del

estudio han sido acertadas, como lo son las condiciones de operación y conceptos físicos inmersos en la simulación.

9. RECOMENDACIONES

Los autores de este documento, sugieren una serie de recomendaciones para proyectos que se realicen posterior a este estudio; las cuales son:

- Acercamiento a los Software empleados para el desarrollo del programa; con fines de poder encontrar los resultados esperados se sugiere que antes de iniciar el proceso computacional, los estudiantes tengan un conocimiento previo de las herramientas de cada uno de los programas de simulación empleados.
- Conocer las limitaciones computacionales con las que se cuenta, para el desarrollo del proyecto; cuando se conocen limitaciones del equipo en el que se lleva a cabo el procesamiento, es fácil establecer hasta qué punto los resultados obtenidos son verídicos o útiles para posterior aplicación.
- En caso de no contar con recursos computacionales suficientes para el análisis, se recomienda la simplificación de las geometrías estudiadas.
- Considerar un volumen de control lo suficientemente amplio para poder estudiar el comportamiento del flujo a lo largo del mismo y la influencia del elemento de estudio en el fluido.
- Para reducir costo computacional, se recomienda emplear una malla que alrededor del elemento en estudio sea más refinada (para ver el comportamiento de manera más clara) y conforme se aleja de este, sea menos refinado (debido a que entre más lejos del elemento, no se requiere gran precisión en los resultados).
- Considerar los valores de arrastre encontrados en cada uno de los elementos del CAD, por separado; para poder realizar la comparación de la reducción del mismo obteniendo un resultado más preciso y adecuado.

10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] (2013), Mecánica y motores: *Tipos de Carreras*, (<http://www.mecanicaymotores.com/tipos-de-carreras.html>)
- [2] Torres, S., (2017), Soy motor: *Hamilton: “El kart estaba dañado, era muy inestable”*, (<http://soymotor.com/noticias/hamilton-el-kart-estaba-danado-era-muyinestable-919691>)
- [3] Grajales, T., (2000), Tipos de Investigación, (<http://tgrajales.net/investipos.pdf>)
- [4] Borja, A., (2015), *Estudio mecánico y aerodinámico del comportamiento del alerón trasero de un automóvil*, Madrid, España: Universidad Carlos III de Madrid
- [5] Morocho, D., (2012), *diseño y construcción aerodinámica tuning para faldones, alerones y estribos de un vehículo chevrolet esteem 2002*, Latacunga, Ecuador; Escuela politécnica del Ejército Latacunga
- [6] Cengel, Y., & Cimbala, J., (2006), *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*, México: McGraw-Hill
- [7] Scarpin, G., (2002), *Aerodinámica de perfiles*, Córdoba, Argentina: Instituto Universitario Aeronáutico
- [8] P., D., (2013), Volar, el sueño del hombre: *Sustentación y resistencia aerodinámica*, (<http://pdctdrlasallebonanova.blogspot.com.co/p/aerodinamicaii.html>)
- [9] ANDERSON, J., (1995), *Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications*, New York, Estados Unidos: McGraw-Hill
- [10] CAMUÑEZ, R., (2014), *Elementos y dispositivos en la Fórmula 1: Parte central del vehículo*, Barcelona, España: Escuela técnica superior.
- [11] VERSTEEG, H., & MALALASEKERA, W., (2017), *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*, New York, Estados Unidos: Harlow – Pearson
- [12] Santín, E., & Toro, D., (2013), *Diseño y construcción de un kart según las normas cik/fia*, Chimborazo, Ecuador: Escuela superior politécnica de Chimborazo
- [13] Cortex Colombia, (2017), *Reglamento deportivo campeonato rok cup colombia by vortex temporada 201*, Colombia: Federación Colombiana de Karts

- [14] Barrera, S., & Maldonado, D., (2014), *Análisis aerodinámico de un vehículo urbano mediante dinámica de fluidos computacionales aplicado a la competencia de shell eco maratón*, Bogotá, Colombia: Universidad San Buenaventura
- [15] Kobeissi, R., Linked in Raef Kobeissi, *Computational Fluid Dynamics*, (<https://www.linkedin.com/in/raefkobeissi>)
- [16] Fletcher, A., (1991), *Computational Techniques for Fluid Dynamics*, Berlin, Alemania: Springer-Verlag
- [17] Anderson, J., (2001), *Fundamentals of Aerodynamics: Fundamental Principles*, New York, Estados Unidos: McGraw-Hill
- [18] ANSYS, Inc., (2015), *ANSYS Fluent User's Guide*, Pennsylvania, Estados Unidos
- [19] ANSYS, Inc., (2016), *Introduction to ANSYS Fluent: Setting Up Physics*, Pennsylvania, Estados Unidos
- [20] Bang, S., Zunaid, A., Sharma, S., & Singh, R., (2015), *CFD Simulation of Flow around External Vehicle: Ahmed Body. En: IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Delhi, India: Delhi Technological University
- [21] Rizal, E., Mohamad, F., Kasiran R., Adenan, M., Fiaza, M., Hanif, M., & Amir, R., (2012), *Aerodynamics of ARTeC's PEC 2011 EMO-C Car*, Shah Alam, Malasia: University Teknologi MARA
- [22] Parab, A., Sakarwala, A., Paste, B., Patil, & V., Magrulkar A., (2014), *Aerodynamic Analysis of a Car Model using Fluent - ANSYS 14.5*, Mumbai, India: Rajiv Gandhi Institute of Technology
- [23] Florez, G., & Guzman, R., (2016), *Análisis y validación aerodinámica para el vehículo monoplace de competición eléctrico de la escudería dcm para la fórmula sena 2014*, Bogotá, Colombia: Fundación Universitaria Los Libertadores
- [24] Kleber, A., (2001), *Simulation of Airflow around an OPEL ASTRA Vehicle with FLUENT*, Journal Articles by Fluent Software Users
- [25] Blanco, D., (2015), *Predicción del Comportamiento Aerodinámico de un Vehículo Comercial Bajo un Ciclo Estándar de Conducción Urbano por medio de Dinámica de Fluidos Computacional*, Bogotá, Colombia: Universidad de los Andes

- [26] Toba, A., (2015), *Tutorial ANSYS Workbench Estrategias de Mallado* (Formato de Video), (https://www.youtube.com/watch?v=kmh_fAoxik8)
- [27] Evangelos, M., (2007), *Evaluation of aerodynamic drag of go kart by means of coast down test and cfd analysis*, Roma, Italia, Università degli Studi di Roma Tor Vergata

11. ANEXOS

Los cálculos realizados para el análisis presentado en el presente documento se realizaron a la altura de operación del kart, es decir, en Bogotá Colombia; cuya altura promedio son 2640 m sobre el nivel del mar; donde las propiedades atmosféricas son:

Parámetro	Magnitud
Altitud	2640 (m)
Temperatura	271,062 (K)
Viscosidad dinámica	0,000017054 (kg/m*s)
Densidad	0,943409 (kg/m ³)

11.1 Conversión de velocidad

$$R_e = \frac{\rho * l * v}{\mu}$$

$$v = 75 \frac{km}{h} * \frac{1000 m}{1 km} * \frac{1 h}{60 min} * \frac{1 min}{60 s}$$

$$v = 20,8333 \left(\frac{m}{s}\right)$$

11.2 Calculo de Reynolds a 75 km/h para kart con alerón tradicional

$$R_e = \frac{0,943409 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * (1.53014 m) * 20.8333 \left(\frac{m}{s}\right)}{0,000017054 \left(\frac{kg}{m} * s\right)}$$

$$R_e = 1'.763.423,669$$

11.3 Calculo de Reynolds a 75 km/h para kart con alerón modificado

$$R_e = \frac{0,943409 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) * (1.52287\text{m}) * 20.8333 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{0,000017054 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}} * \text{s}\right)}$$

$$R_e = 1',755.070,86$$

11.4 Calculo de número Mach

$$M_a = \frac{v}{V_s}$$

$$V_s = \sqrt{R * T * \gamma}$$

$$V_s = \sqrt{286,9 \left(\frac{\text{J}}{\text{kg}} * \text{K}\right) * 271,062 (\text{K}) * 1.4}$$

$$V_s = 329.961 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_a = \frac{20,8333 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}{329.961 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)}$$

$$M_a = 0.0631$$

11.5 Cálculo eficiencia aerodinámica del Kart con alerón tradicional

$$n = \frac{-20.431524 \text{ N}}{56.317314 \text{ N}}$$

$$n = 0.36279$$

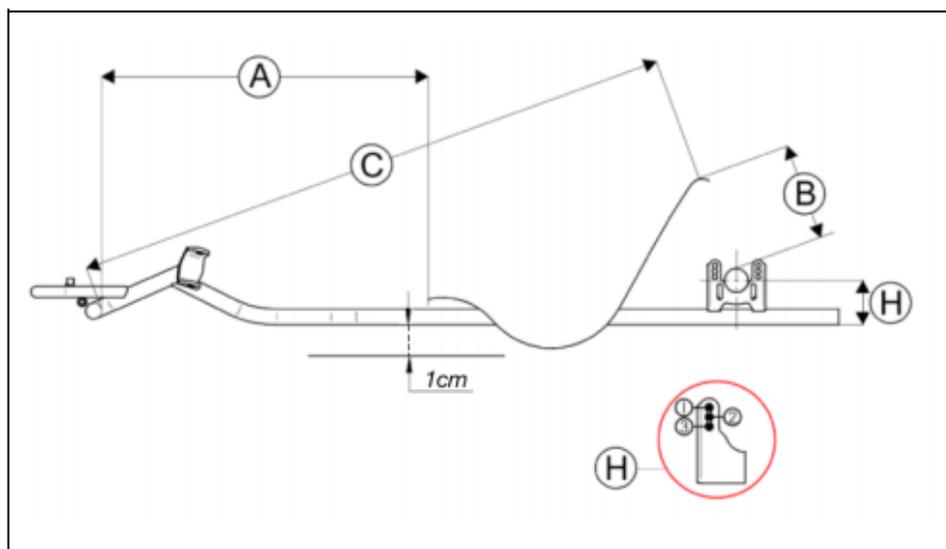
11.6 Cálculo eficiencia aerodinámica del Kart con alerón modificado

$$n = \frac{-27.476576 \text{ N}}{50.195524 \text{ N}}$$

$$n = 0.54739$$

Nota: El signo negativo, en los numerales 11.5 y 11.6 indican la dirección de la carga aerodinámica; teniendo en cuenta que el diseño del alerón se realizó a partir de un perfil aerodinámico invertido, lo que se espera es lograr mayor adherencia al suelo, a partir de la generación de carga aerodinámica, caso contrario cuando los perfiles se emplean en los planos de las aeronaves para generar sustentación, esta es representada como un vector positivo que levanta la aeronave del suelo.

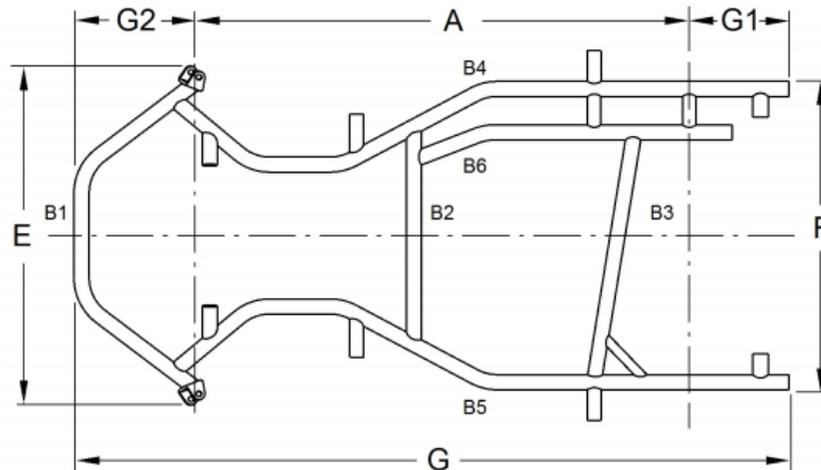
11.7 Posición del asiento Kart Birel – Art



<u>CHASSIS MODEL:</u>	H	A [SX]	B	C
RY30 - RY32	2	-	22	126
CRY30 - CRY32	2	-	20	127
R30C-Y	-	59	24	-
AR28-RX	-	57	23	-
AM 29-Y	-	57	23	-
L28C-Y	-	45	22	-
C28-R	2	48	22	-
B25-X	-	42	19	-

Fuente: Compañía Birel – Art

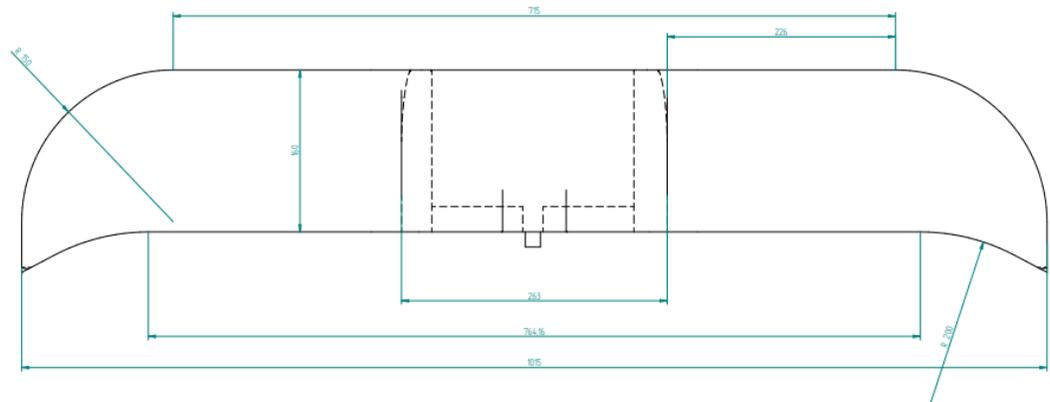
11.8 Dimensiones del Kart Birel – Art



1. Cadre	1. Frame	Données	Tolérances
		<i>Data</i>	<i>Tolerances</i>
A= Empattement mesures fixes	A= Wheel base fixed measurements	1045 mm	+/- 10mm
B= Tubes principaux de la structure, diamètre minimum 21mm, d'une longueur supérieure à 150mm, à l'exception des tubes d'un diamètre inférieur à 21mm et tous les supports pour les accessoires.	B= Main tubes of the structure, minimum diameter of 21mm, length over 150mm, except tubes with a diameter of less than 21mm and all the supports for the accessories.	1) 30 mm 2) 30 mm 3) 30 mm 4) 30 mm 5) 30 mm 6) 30 mm	+/- 0.5mm +/- 0.5mm +/- 0.5mm +/- 0.5mm +/- 0.5mm +/- 0.5mm
C = Nombre de courbes dans les tubes de Ø supérieur à 21mm	C = Number of bends on the tubes with a diameter greater than 21mm.	9	
D = Nombre de tubes ayant un Ø supérieur à 21mm	D = Number of tubes with a diameter greater than 21mm	6	
E = Largeur avant extérieure	E = Outer front width	725	+/- 10mm
F = Largeur arrière extérieure	F = Outer rear width	640	+/- 10mm
G1 = Porte-à-faux arrière des tubes principaux (obligatoire)	G1 = Rear overhang for the main tubes (mandatory)	210	+/- 15mm
G2 = Porte-à-faux avant du tube principal	G2 = Front overhang for the main tube	260	+/- 10mm

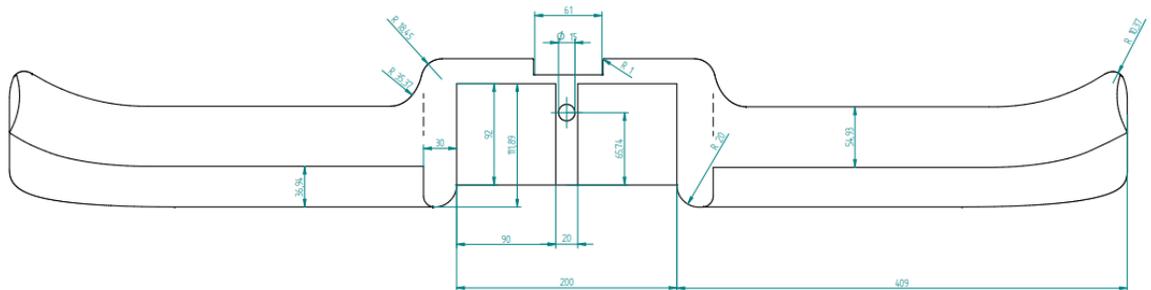
Fuente: Compañía Birel – Art

11.9 Vista superior del alerón tradicional del kart Birel – Art



Fuente: Autores

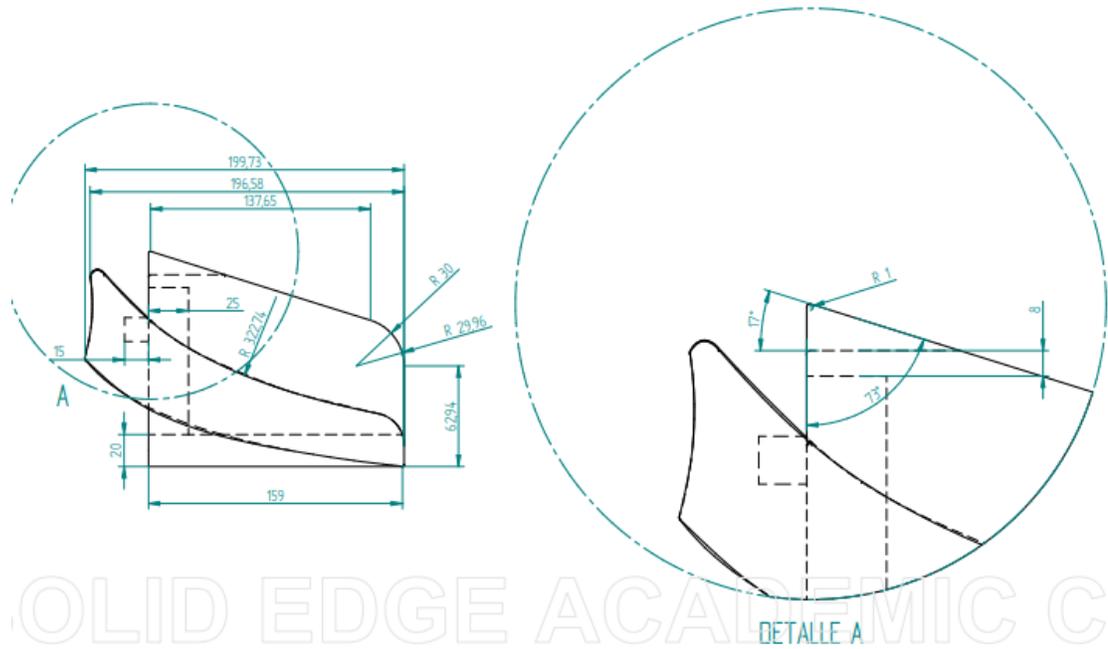
11.10 Vista frontal del alerón tradicional del kart Birel – Art



Fuente: Autores

INTENCIONALMENTE EN BLANCO

11.11 Vista lateral del alerón tradicional del kart Birel – Art



Nota: Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$