



UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ

**DISEÑO AERODINÁMICO DEL ALERÓN
DELANTERO DE UN MONOPLAZA DE
FÓRMULA 1 BAJO LAS CONDICIONES DEL
AUTODROMO NAZIONALE DI MONZA
MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS DE
APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD**

Autor:

Abruscato Z. Antonio J.

C.I.: 26.495.883



Teléfono: (0241) 8714240 (Máster) - Fax: (0241) 871239

**REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO AERODINÁMICO DEL ALERÓN DELANTERO DE UN
MONOPLAZA DE FÓRMULA 1 BAJO LAS CONDICIONES DEL
AUTODROMO NAZIONALE DI MONZA MEDIANTE EL USO DE
TÉCNICAS DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD**

Proyecto del Trabajo de Grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO

Autor: Abruscato Z. Antonio J.

C.I. V – 26.495.883

Tutor: Ing. Gruber Caraballo

San Diego, Octubre 2019



FI-N-002-2019-2CE

Valencia, 02 de Julio de 2019

Ciudadanos:
Antonio Abruseato
C.I:26.495.883
Presente-

Cumplo con informarle que la Comisión de Trabajo de Grado y Pasantías de la Facultad de Ingeniería en su reunión N° 01-2019 de fecha 02-07-2019 aprobó el proyecto de trabajo de grado titulado diseño **AERODINÁMICO DEL ALERÓN DELANTERO DE UNA MONOPLAZA DE FORMULA 1 BAJO LAS CONDICIONES DEL AUTODROMO NAZIONALE DI MONZA MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CDF** presentado por usted (es) como requisitos para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Se ratifica la designación del Ing. Gruber Caraballo, C.I: 12.014.408 y la Ing. Alicia De Pizzela C. I:4.598.880 como Tutores Académico y Metodológico que los asesoraran en el desarrollo de este proyecto.

Atentamente,

Prof. Luis Lira

Decano de la Facultad de Ingeniería



c.c: Coordinación de Pasantías y Trabajo de Grado (1).

L/lc.



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ACEPTACIÓN DEL TUTOR

Quien suscribe, Ingeniero Gruber Caraballo portador de la cedula de identidad C.I V-12.014.408, en mi carácter de tutor de trabajo Especial de Grado presentado por el ciudadano Antonio Abruscato, portador de la cedula de identidad C.I V-26.495.883, titulado **“DISEÑO AERODINÁMICO DEL ALERÓN DELANTERO DE UN MONOPLAZA DE FÓRMULA 1 BAJO LAS CONDICIONES DEL AUTODROMO NAZIONALE DI MONZA MEDIANTE EL USO DE TÉCNICAS DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD”**, Presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico, considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometidos a la presentación publica y evaluación por parte del jugado examinador que se designe.

En San Diego a los 4 días de mes de Octubre del año dos mil diecinueve.

Ing. Gruber A. Caraballo V

C.I 12.014.408

Tutor Académico

AGRADECIMIENTOS

Inicialmente quiero agradecer a **Dios** por darme las herramientas necesarias para cumplir mis metas y permitirme aprender de cada una de las personas que ha puesto en mi camino.

Agradezco especialmente a **mi familia**, mi madre **Rosaisy Zapata**, mi padre **Antonio Abruscato** y mi hermana **Antonella Abruscato**, quienes en todo momento me han dado su apoyo y ayuda en cada etapa de mi vida y la carrera universitaria.

A mi apreciadísima y especial **Alessandra Vallone**, quien me ha motivado y acompañado durante este gran periodo de la mejor manera, esperando siempre lo mejor de mí, siendo fuente de mi inspiración.

A mi tutor académico **Ing. Gruber Caraballo**, quien ha estado desde las materias impartidas con su mayor empeño de formar ingenieros competentes, con un gran compromiso en cada momento.

A mi tutora metodológica y madrina de promoción **Ing. Alicia de Pizzella**, por compartir sus conocimientos en cada momento y sus enseñanzas que van más allá de lo académico.

A **cada uno de los profesores** que han hecho posible mi formación universitaria y que generalmente dejan una enseñanza en lo personal.

Abruscato, Antonio.

ÍNDICE

CONTENIDO	pp.
ÍNDICE DE CUADROS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xvi
NOMENCLATURA	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO	
I EL PROBLEMA	
1.1 Planteamiento del problema.....	3
1.2 Formulaciòn del problema.....	6
1.3 Objetivos de la Investigación.....	6
1.3.1 Objetivo General.....	6
1.3.2 Objetivos Especificos.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Limitaciones.....	7
1.6 Alcance.....	8
II MARCO TEÓRICO	
2.1. Antecedentes de la Investigación.....	9
2.2. Bases Teóricas.....	13
2.2.1. Definición de fluido.....	13
2.2.2. Propiedades de un fluido.....	13
2.2.2.1. Densidad.....	13
2.2.2.2. Presión de los fluidos.....	13
2.2.2.3. Viscosidad.....	14
2.2.2.4. Número de Reynolds.....	15
2.2.3. Ecuaciones de Balance.....	17
2.2.3.1. Ecuación de balance de masa.....	17

2.2.3.2. Ecuación de balance de momento.....	18
2.2.4. Ecuación de Bernoulli.....	19
2.2.5. Ley de Kutta-Joukovsky.....	21
2.2.6. Airfoil.....	23
2.2.7. Generalidades sobre perfiles aerodinámicos.....	24
2.2.8. Capa límite.....	26
2.2.9. Coeficiente de sustentación.....	27
2.2.10. Coeficiente de arrastre.....	27
2.2.11. Coeficiente de presión.....	28
2.2.12. Federación Internacional del Automóvil (FIA).....	28
2.2.13. Fórmula 1.....	29
2.2.14. Monoplaza de fórmula 1.....	30
2.2.15. Carga aerodinámica.....	30
2.2.16. Alerón delantero.....	34
2.2.17. Resistencia Aerodinámica.....	37
2.2.18. Eficiencia aerodinámica.....	38
2.2.19. Autodromo Nazionale di Monza.....	39
2.2.20. Niveles de aproximación numérica.....	43
2.2.21. Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	46
2.2.21.1. Generación del modelo 3D.....	47
2.2.21.2. Métodos numéricos aplicados a mecánica de fluidos.....	47
2.2.21.3. Métodos de elementos finitos (FEM).....	48
2.2.21.4. Herramientas de diseño asistido por computadora CAD.....	49
2.2.21.5. Análisis de resultados por técnicas CFD.....	49
2.2.22. Método de solución numérica.....	50
2.2.23. Método de discretización.....	51

2.2.24. Mallado o discretización numérica.....	51
2.2.24.1. Mallas estructuradas.....	51
2.2.24.2. Cuadrículas (mallado) poco estructuradas.....	54
2.3. Bases Legales.....	57
2.3.1. Reglamento FIA para la Temporada 2019 en Aerodinámica de Alerones delanteros.....	57
2.3.1.1. Regulación Técnica 3.3.3 Dimensiones Generales.....	57
2.3.1.2. Regulación Técnica 3.3.4 Definición de Componentes.....	58
2.3.1.3. Regulación Técnica 3.3.5 Placa Frontal del Alerón Delantero.....	58
2.3.1.4. Regulación Técnica 3.3.6 Perfiles del Alerón Delantero.....	60
2.3.1.5. Regulación Técnica 3.3.7 Ajustabilidad del Alerón Delantero.....	62
2.3.1.6. Regulación Técnica 3.3.8 Rayas Delanteras.....	63
2.3.1.7. Regulación Técnica 3.3.9 Componentes Auxiliares del Alerón Delantero.....	64
2.4. Definición de términos.....	67
III MARCO METODOLÓGICO	
3.1. Tipo de Investigación.....	69
3.2. Nivel de Investigación.....	70
3.3. Diseño de la Investigación.....	71
3.4. Población y Muestra.....	72
3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....	72
3.6. Fases de la Investigación.....	73

IV RECURSOS	
4.1 Identificación de las variables que influyen en el diseño del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1.....	76
4.1.1 Condiciones atmosféricas adaptadas al día de la competencia..	76
4.1.2 Carga aerodinámica necesaria y características relacionadas al trazado del monoplaza en el autódromo.....	78
4.1.3 Selección del perfil aerodinámico del alerón delantero en estudio.....	81
4.2 Modelado mediante una herramienta CAD el alerón delantero en estudio.....	84
4.3 Simulación bajo condiciones aerodinámicas del alerón delantero en estudio usando herramientas de dinámica de fluidos computacional...	100
4.4 Evaluación de los resultados en función de las características funcionales registradas para las condiciones de operación.....	111
CONCLUSIONES	125
RECOMENDACIONES	127
REFERENCIAS	128

ÍNDICE DE CUADROS

	CONTENIDO	pp.
CUADROS		
1	Temperatura en Monza durante la competencia.....	77
2	Condiciones atmosféricas en la competencia.....	78
3	Propiedades del aire a 24°C.....	106
4	Condiciones iniciales en la simulación.....	107

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	CONTENIDO	pp.
1	Elemento de superficie	

18	Secciones del alerón delantero de una monoplaça de fórmula 1 regido bajo la normativa de la FIA para las temporadas anteriores a la del 2019.....	36
19	Relación porcentual de cargas experimentadas en un monoplaça de fórmula 1.....	38
20	Secciones del Autodromo Nazionale di Monza.....	40
21	Esquematzación de las velocidades promedio por sector del Autodromo Nazionale di Monza.....	40
22	Estados de avance del monoplaça de fórmula 1 en el sector 1 del Autodromo Naziona di Monza.....	41
23	Estados de avance del monoplaça de fórmula 1 en el sector 2 del Autodromo Naziona di Monza.....	42
24	Estados de avance del monoplaça de fórmula 1 en el sector 3 del Autodromo Naziona di Monza.....	42
25	Técnicas de aproximación numérica en mecánica de fluidos....	46
26	Malla estructurada.....	52
27	Cuadrícula estructurada en 2D.....	52
28	Mallado estructurado con interfaz ajustada.....	53
29	Mallado estructurado en bloque 2D sin interfaces ajustadas.....	54
30	Mallado compuesto en 2D.....	54
31	Malla no estructurada; (a) Malla triangular, (b) Malla cuadrilátera.....	56
32	Ejemplo de mallado no estructurado en 2D.....	56
33	Representación gráfica de las dimensiones del alerón delantero de un monoplaça de fórmula 1 en vista frontal, regido por la FIA para la temporada de 2019.....	66
34	Representación gráfica de las dimensiones del alerón delantero de un monoplaça de fórmula 1 en vista de planta, regido por la FIA para la temporada de 2019.....	66
35	Medida de cuerda máxima del perfil aerodinámico.....	81
36	Perfil aerodinámico Goe 431.....	82

37	Relación Cl/Cd del perfil aerodinámico GOE 431 a diferentes números de Reynolds.....	83
38	Obtención de datos de formato selig del perfil aerodinámico GOE 431.....	84
39	Orden de coordenadas del perfil aerodinámico GOE 431 en Excel.....	85
40	Tercera columna de coordenadas del perfil aerodinámico G0431 en Excel.....	86
41	Inserción de curva por puntos del perfil GOE 431 en Solidworks.....	86
42	Curva del perfil aerodinámico GOE 431 en Solidworks.....	87
43	Conversión de entidad de la geometría del perfil aerodinámico GOE 431.....	88
44	Medidas y ángulo de croquis de los flaps del alerón delantero...	89
45	Separación entre los flaps del alerón delantero.....	89
46	Extrusión inicial de los flaps del alerón delantero.....	90
47	Corte de perfil en construcción del Endplate.....	90
48	Construcción de uno de los endplate del alerón delantero.....	91
49	Construcción del endplate foot.....	91
50	Construcción de la 2da parte de uno de los endplate foot.....	92
51	Finalización de la construcción de uno de los endplate foot.....	92
52	Construcción del croquis de extrusión media del alerón delantero.....	93
53	Restricción de 20 grados de proyección máxima del alerón delantero.....	94
54	Extrusión media del mainplane del alerón delantero.....	94
55	Finalización de la extrusión media de los flaps del alerón delantero.....	95
56	Construcción del FIA control section del alerón delantero.....	95
57	Corte a la superficie del FIA control section.....	96
58	Corte al endplate del alerón delantero.....	96
59	Identificación de juntas entre flaps y mainplane.....	97

60	Versión final del alerón delantero en diseño.....	97
61	Comprobación de altura reglamentaria del alerón delantero.....	98
62	Comprobación profundidad máxima del alerón delantero.....	99
63	Comprobación profundidad máxima de cascada de flaps.....	99
64	Comprobación ancho máximo del alerón delantero.....	100
65	Cápsulas volumen de cápsula del volumen de control de la simulación.....	100
66	Modelado de la cápsula que contiene al alerón delantero.....	101
67	Volumen de control del alerón delantero con vista solo aristas...	101
68	Operación de combinación de sólidos.....	102
69	Selección de sólido principal en la combinación de sólidos.....	102
70	Esquema del proceso simplificado de simulación.....	103
71	Exportación del modelado hecho a SimScale Workbench.....	103
72	Características del tipo de fluido de la simulación.....	104
73	Fijación del dominio de la simulación.....	105
74	Mallado del volumen de control de la simulación.....	105
75	Refinado del mallado en el volumen correspondiente al alerón delantero.....	106
76	Características del aire presentado en el caso de estudio.....	107
77	Elementos de las condiciones de borde.....	108
78	Cara representativa de la velocidad de entrada.....	108
79	Condiciones de flujo másico de entrada.....	109
80	Cara representativa de la presión de salida.....	110
81	Condición de presión de salida.....	110
82	Condiciones del control de la simulación.....	111
83	Cambio de velocidades del aire sobre la sección transversal del perfil de los flaps del alerón delantero en estudio.....	115
84	Zonas de comportamiento de flujo del alerón delantero.....	116

85	Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.....	116
86	Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.....	117
87	Comportamiento del flujo a través de la segunda zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.....	118
88	Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.....	118
89	Comportamiento del flujo a través de la tercera zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.....	119
90	Comportamiento del flujo a través de la tercera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.....	119
91	Comportamiento del flujo a través de la cuarta zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.....	120
92	Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.....	121
93	Plot del Dragforce del alerón delantero en estudio.....	122
94	Tiempo por sector de la pista de cada piloto de la competencia...	123
95	Ritmo sectorial por piloto en menor tiempo.....	124

ÍNDICE DE GRÁFICOS

	CONTENIDO	pp.
GRÁFICOS		
1	Temperatura en Monza durante la competencia.....	77
2	Gráfico de convergencia de variables de la simulación.....	112
3	Convergencia de las curvas relacionadas a velocidades en la simulación.....	112
4	Convergencia de la curva relacionada a la presión en la simulación.....	113
5	Convergencia de la curva relacionada a la energía cinética de turbulencia.....	113
6	Convergencia de la curva relacionada a la tasa de dispersión de energía cinética de turbulencia.....	114

NOMENCLATURA

SÍMBOLO	DESCRIPCIÓN
A	Área de la sección transversal
C	Cuerda
	Coeficiente de Arrastre
	Coeficiente de Sustentación
—	Eficiencia Aerodinámica
	Coeficiente de Presión
D	Sección del paso del fluido
	Diferencial de Fuerza
	Diferencial de Masa
	Diferencial de Superficie
	Diferencial de Volumen
—	Cambio de la Velocidad de un Estrato del Fluido que está a la Altura y Sobre la Superficie de la Placa Inferior
g	Fuerza de Gravedad
F	Fuerza
	Fuerza de Arrastre
	Campo de Aceleraciones Creado por las Fuerzas Aplicadas Sobre el Cuerpo

K	Fuerza Descendente
L	Sustentación
l	Longitud
m	Masa
	Vector Unitario Normal a la Frontera del Volumen de Control
p	Presión
Re	Número de Reynolds
	Componentes Cartesianas de la Velocidad
	Volumen
v	Velocidad Relativa del Fluido
	Velocidad del Coche
	Velocidad del Fluido
	Velocidad tangencial
Z	Altura en dirección de la gravedad desde una cota de referencia
	Coefficiente de Fricción entre Neumáticos y Asfalto
	Densidad del fluido
	Esfuerzo Cortante
	Coefficiente de Viscosidad Dinámica
	Coefficiente de Viscosidad Cinemática

— Derivada Parcial de la Velocidad en (Función del
Tiempo)

— Derivada Parcial de la Velocidad (Función de
Superficie)

Circulación en Perfil Aerodinámico

Variación de Presión en Extremos de la Cuerda del
Perfil Aerodinámico



REPÚBLICA BOLIVARIANA DE VENEZUELA
UNIVERSIDAD JOSÉ ANTONIO PÁEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO AERODINÁMICO DEL ALERÓN DELANTERO DE UN
MONOPLAZA DE FÓRMULA 1 BAJO LAS CONDICIONES DEL
AUTODROMO NAZIONALE DI MONZA MEDIANTE EL USO DE
TÉCNICAS DE APROXIMACIÓN NUMÉRICA CFD**

Autor: Abruscato Z. Antonio J.

Tutor: Ing. Gruber A. Caraballo V.

Fecha: Agosto 2019.

RESUMEN INFORMATIVO

La presente investigación consiste en el diseño del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1 mediante el estudio del comportamiento de su campo de flujo y su influencia bajo las condiciones del Autodromo Nazionale di Monza utilizando técnicas de aproximación numérica CFD (computational fluid dynamics por sus siglas en inglés). Con ello se pretende analizar las variables que conllevan al comportamiento necesario del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1, rigiendo su diseño por las regulaciones técnicas impuestas por la Federación Internacional del Automóvil (FIA), ente rector de la fórmula 1. Por lo que se debe modelar el diseño del alerón delantero en estudio utilizando una herramienta CAD (computational assisted design), y de esta manera, mediante la dinámica de fluidos computacional, CFD, someter el diseño en estudio a condiciones específicas presentadas durante el recorrido de un monoplaza de fórmula 1 en sectores que caracterizan al autódromo que forma parte de la investigación, lo cual permite obtener patrones de flujo en forma de data, curvas y gráficos, los cuales serán comparados con datos presentados en competiciones llevadas a cabo en dicho autódromo, permitiendo de esta manera deducir el comportamiento del alerón delantero diseñado. La técnica CFD permite evaluar las ecuaciones de dinámica de fluidos que no se pueden trabajar analíticamente debido a sus complejidades matemáticas, es decir, se usa para resolver numéricamente las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), evitando así los costos en equipos e instalaciones de pruebas.

Descriptor: Alerón delantero, fórmula 1, aerodinámica, Federación Internacional del Automóvil (FIA), dinámica de fluidos computacional (CFD).

INTRODUCCIÓN

Desde el periodo de invención del automóvil, se han dado continuamente constantes investigaciones que han permitido mejorar su desempeño progresivamente, estas mejoras, al inicio tenían relación con la parte mecánica del automóvil. De esta manera, al momento de crearse las diferentes organizaciones de competiciones automovilísticas aceleraron dicho proceso de mejora, con el propósito de lograr la victoria en las competiciones llevadas a cabo. Con el pasar del tiempo, las condiciones requeridas han llevado a aplicar la aerodinámica en las competiciones automovilísticas, ya que, es la parte de la mecánica de fluidos que estudia el movimiento del aire a través de los cuerpos, y las fuerzas creadas debido a la geometría del automóvil, determinando por ende la resistencia aerodinámica y/o adherencia del automóvil en una pista de carreras, parámetros determinantes para definir una competición por milésimas de segundos.

Los automóviles de competiciones, sin embargo, con la necesidad de abordar curvas a la mayor velocidad posible manteniendo la estabilidad del mismo, necesitan elementos adicionales a la carrocería. Uno de estos elementos adicionales en un monoplaza de fórmula 1 es el alerón delantero, que dependiendo del perfil aerodinámico, la velocidad relativa del aire y el ángulo de ataque del mismo, determina parámetros tales como el coeficiente de sustentación y el coeficiente de arrastre, necesarios para establecer una estrategia para la competición en un autódromo, tomando en cuenta las condiciones que este presenta, tales como la cantidad y agresividad de las curvas presentadas.

La presente investigación tiene como objetivo diseñar el alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1 bajo las condiciones del Autodromo Nazionale di Monza, bajo las regulaciones técnicas impuestas por la Federación Internacional del Automóvil (FIA) para la temporada del año 2019, simulando mediante técnicas de aproximación numérica los parámetros del autódromo para su posterior comparación con datos presentados en competiciones pasadas.

En el **capítulo I**, se presenta el planteamiento del problema, la formulación del problema, los objetivos de la investigación, la justificación de la investigación, así como su alcance y limitación.

En el **capítulo II**, se presentan los antecedentes en el ámbito de estudio, investigaciones realizadas por otros autores que tienen relación directa con el tema de estudio. Así como también se presentan los fundamentos teóricos en los que se basa la investigación, además, las bases legales que representan las regulaciones técnicas del diseño del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1 impuestas por la Federación Internacional de Automóvil (FIA).

En el **capítulo III**, se presenta la metodología planteada para el diseño en estudio, así como distintos aspectos de la investigación, tal como el diseño y tipo de la misma, entre otros aspectos de la investigación seleccionados para cumplir con los objetivos propuestos.

En el **capítulo IV** se expresan los resultados con su respectivo procedimiento de cada una de las fases metodológicas descritas en el capítulo anterior, cumpliendo de esta manera con los objetivos planteados en el presente trabajo final de grado.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA

1.1 Planteamiento del problema

Uno de los inventos más característicos del siglo XIX ha sido sin duda el automóvil. Los primeros prototipos se crearon a finales del siglo XIX pero no fue hasta la primera década del XX donde el público empezó a observarlos como algo útil. La , "a sí mismo", y del latín , "que se mueve", sobre todo para distinguir entre los vehículos a motor y los de tracción animal. De estos vehículos autopropulsados se conocieron muchos tipos diferentes a través de las épocas. (Anónimo. 2019)

Los rápidos progresos y los descubrimientos se debían al deporte ligado al automóvil. A partir de 1894 empezaron los concursos de velocidad y de seguridad. La primera carrera considerada como tal, aunque en sentido estricto ya habían existido algunas antes en Inglaterra y Francia, fue la de París a Burdeos y regreso, entre el 11 y el 13 de junio de 1895, en la cual Émile Levassor llevó un Panhard et Levassor hasta la victoria, con una media de 24,5 Km/h en un recorrido de 1.1175 Km. En 1901 la carrera París-Berlín fue ganada por Henri Fournier a la velocidad media de 71,4 Km/h, digna de un automóvil actual con las carreteras de hoy en día. Hay que tener en cuenta que las carreteras no estaban asfaltadas, sino cubiertas de polvo. (Casucci, Piero. 1981)

Dichos avances automovilísticos permitieron la construcción de espacios destinados a ello, uno de estos espacios destacados es el **Autodromo Nazionale di Monza**, un autódromo situado en el parque de la villa real de Monza en las cercanías de Monza, región de Lombardía, Italia, unos 20 km al norte de la ciudad de Milán. La pista original fue construida entre los meses de mayo y julio de 1922.

El establecimiento de estos espacios para el desarrollo de competiciones automovilísticas, dieron paso a las denominadas carreras de Gran Premio, las cuales tienen sus raíces en las carreras automovilísticas surgidas en Francia en 1894. Antes de

la Segunda Guerra Mundial se habían establecido las reglas para las competiciones de *Grandes Premios*, que debían obedecer tanto autos como pilotos. Estas reglas, conocidas en su conjunto como *Reglas de los Grandes Premios*, no se concretaron hasta que en 1947 es creada la Federación Internacional del Automóvil, conocida por las siglas "FIA". Con sede central en París, al final de la temporada de 1949 anunció que para 1950 unirían varios Grandes Premios nacionales para crear un Campeonato Mundial de Pilotos, por lo que en 1950 se celebró el primer campeonato de Fórmula 1.

La aerodinámica del automóvil no fue estudiada detenidamente sino hasta principios de la década de 1960. La reducción de la resistencia del aire sigue siendo importante, pero un nuevo concepto (idea) ha tomado prioridad: la producción de una fuerza aerodinámica dirigida hacia abajo (sustentación negativa), que es considerada más importante que la reducción de la resistencia. Para la época, los carros se habían tornado más y más rápidos. La velocidad ya había alcanzado un nivel peligroso. Para disminuir la velocidad y aumentar la seguridad, se decretaron algunas reglas para limitar la potencia del motor y talla de los neumáticos. Puesto que la resistencia del aire producida por el vehículo y los neumáticos ya había sido reducida, los diseñadores necesitaban encontrar alguna otra cosa que les diera a sus coches una ventaja sobre los demás. Ahora, la mayoría de los automóviles producen sustentación. Conforme la velocidad aumenta, la fuerza de sustentación aumenta y el auto se vuelve inestable. Para contrarrestar el problema de la sustentación, los autos de carreras modernos están diseñados para producir sustentación negativa. Esto significa que al auto se le agregan algunos dispositivos que causan que el auto presione contra el suelo y se mantenga más cerca de él. Estos dispositivos neutralizan la sustentación producida por el vehículo o crean de hecho sustentación negativa (fuerza que apunta hacia abajo). (Hans-Otto. 1995).

Hasta el día de hoy se siguen desarrollando estudios sobre la aerodinámica y como sacar el mayor provecho de esta. Debido a los constantes cambios durante los campeonatos de la fórmula uno, el autódromo Nazionale di Monza, se ha modificado, de manera de que El **Gran Premio de Italia en Monza** es la carrera más rápida de la

temporada, con sólo tres curvas, por lo que cada monoplaza busca un reglaje aerodinámico que permita mantener una buena velocidad punta no solo en recta, sino también curva. Motivo de estos avances, los ingenieros de la fórmula uno cada año se ven obligados a la continua mejora de detalles mínimos en la aerodinámica especialmente para ganar milésimas de segundo que le permitan conseguir un resultado óptimo a su escudería, todos estos parámetros deben estar bajo la regla que impone la FIA y factibles bajo las condiciones ambientales al momento de la carrera, tales como la presión atmosférica, la viscosidad del aire, la temperatura, la humedad, entre otros parámetros. Por ende se considera el estudio de los perfiles aerodinámicos que permitan excelentes rendimientos bajo condiciones específicas requeridas en un lugar en específico.

Actualmente las diversas tecnologías computacionales brindan grandes ventajas a la hora de realizar cálculos y estudios es por esto que las técnicas utilizadas para el estudios aerodinámicos se ven han visto conglomeradas en programas que realizan el estudio de diseño y comportamiento de diferentes perfiles aerodinámicos dentro de una corriente de viento, a los programas creados con dicha finalidad son colocados en un grupo denominado dinámica de fluidos computacional (CFD. Por sus siglas en ingles – Computational Fluid Dynamics)

El análisis de diseño aerodinámico de alerones delanteros en vehículos de competición requieren ser ejecutados en periodos de tiempo relativamente cortos, debido a que las configuraciones aerodinámicas varían de carrea en carrera, por ende se requieren métodos y herramientas que permitan llevar a cabo el proceso de manera eficiente, de resultados confiables y en poco tiempo, por lo que actualmente diversas tecnologías computacionales brindan grandes ventajas a la hora de realizar cálculos y estudios, por esta razón se suele apoyar el diseño en un modelado 3D del alerón en una herramienta de diseño asistido por computadora (CAD) para llevar a cabo un análisis inicial mediante técnicas de aproximación numérica por medio de la dinámica de fluidos computacional (CFD), el cual permite evaluar datos de variables determinadas para un desempeño específico, evaluando la fiabilidad de crear físicamente el diseño y

someter al mismo a un análisis más exhaustivo en un túnel de viento. Para la ejecución de proyectos aerodinámicos menores, se opta por realizar el análisis con técnicas de aproximación numérica como único análisis aerodinámico, ya que, esta nueva herramienta es de gran versatilidad y permite realizar diversas pruebas al modificar las características del fluido estudiado, y la configuración propia del objeto de estudio. Además de esto, al ser una herramienta computacional provee resultados muy cercanos a la realidad, permitiendo de esta forma una toma de decisiones óptima.

1.2. Formulación del problema

¿Cómo determinar el comportamiento del campo de flujo alrededor del alerón delantero de un monoplace de la fórmula 1 bajo las condiciones del autódromo Nazionale di Monza empleando técnicas de aproximación numérica en dinámica de fluidos CFD?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo General

Diseñar el alerón delantero de un monoplace de fórmula 1 bajo las condiciones del autódromo Nazionale di Monza mediante el estudio de su campo de flujo empleando técnicas de aproximación numérica CFD.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Identificar las variables que influyen en el diseño de un alerón delantero de baja resistencia aerodinámica en un fórmula 1.
2. Modelar mediante una herramienta CAD el alerón delantero, según las normas existentes.
3. Simular bajo condiciones aerodinámicas específicas el alerón delantero usando una herramienta de dinámica de fluidos computacional CFD.
4. Evaluar los resultados en función de las características funcionales requeridas para las condiciones de operación.

1.4 Justificación de la investigación

Las técnicas de dinámica de fluidos computacional (CFD) es una herramienta que permite ahorrar tiempo al dejar la realización de los modelos matemáticos al programa computacional, el cual es capaz de generar los resultados de forma confiable y precisa, además de ser capaz de plasmar la simulación del campo de flujo alrededor del objeto estudiado sin la necesidad de elaborar prototipos físicos del objeto o utilización de equipos externos de simulación, esto permite eliminar una parte importante de los gastos presentes en un estudio que no utiliza técnicas de CFD.

1.5 Limitaciones

En todo proceso en el que se realiza una investigación se ven presente limitaciones que registren o dificultan la realización de la misma y este no es una excepción, las limitaciones de esta investigación son las siguientes:

Limitado manejo de las herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD), debido a que no existe en la Universidad José Antonio Páez (UJAP) programa alguno que brinde la instrucción de dicha herramienta, por lo que se ve la necesidad de realizar estudios y capacitación por vías externas con la finalidad de tener la capacidad necesaria para realizar los estudios de simulación de CFD.

La existencia nula en el país de monoplazas en original o réplicas de los empleados en fórmula 1 dificulta la posibilidad de observar ejemplares físicos que permitan adquirir de manera directa conocimiento relacionado con el funcionamiento y diseño de los alerones empleados en dicha competición automovilística, así como también de autódromos con características similares a las del Autodromo Nazionale di Monza. Por ende, se debe recurrir a fuentes extranjeras para la obtención de los datos y diseños necesarios para realizar la investigación pertinente.

La posibilidad de realizar un ensayo físico de la interacción del fluido con un modelo a escala de los alerones delanteros de baja resistencia aerodinámica es escasa, debido a la existencia en minoría, casi nula de los laboratorios en el país, que posean los equipos necesarios para la realización de dichos ensayos. Es gracias a esto que el estudio del comportamiento de los alerones delanteros de baja resistencia aerodinámica

en un campo de flujo deberá ser realizado por medio del software de simulación de fluidos.

Las capacidades técnicas recomendadas para manejar de manera fluida el software de dinámica de fluidos computacional es elevada y superior a las capacidades que se poseen, por lo que se deberá manejar el software tomando la previsión de inconvenientes, retrasos y posibles fallas a la hora de su ejecución.

1.6 Alcance

En esta investigación solo se encargará del estudio aerodinámico del alerón delantero determinado, esto en virtud a que la elaboración de estudios para una variedad de alerones delanteros requeriría un período prolongado de tiempo al disponible para la presentación del estudio en cuestión. Dicho estudio se realizará con el fin de poder observar el comportamiento de del alerón delantero bajo condiciones aerodinámicas usando el número de Reynolds. La simulación se realizará para un modelo específico de perfil aerodinámico y serán comparados con características funcionales expuestas en carreras anteriores llevadas a cabo en el autodromo Nazionale di Monza bajo condiciones atmosféricas similares a las introducidas para la simulación computacional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

El marco teórico representa la exposición de la teoría para comprender la naturaleza del hecho investigado, de esta manera, sustentar teóricamente el estudio. Constituye un aspecto de mucha importancia dentro de la investigación, en el cual el investigador crea un espacio en el que se apoya para comprender las situaciones de la problemática planteada, como solucionarla y descubrir con bases teóricas el problema presente.

Es un espacio donde se examinan conclusiones de otras investigaciones realizadas, por otros autores, que se han interesado en aportar conocimientos de sus investigaciones, vinculadas directa o indirectamente con el problema de esta investigación.

2.1 Antecedentes

Benedito, J (2017) en la Universitat Politècnica de València realizó su proyecto de grado titulado “**Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas del Porsche 911 GT3 mediante técnicas CFD**” consistió en el estudio de cómo afecta aerodinámicamente la implantación de un alerón con diferentes grados de incidencia sobre un coche. Para obtener los datos necesarios, se empleó un modelo en CAD del coche a estudiar y un programa de elementos finitos que calculó las fuerzas necesarias.

En dicho estudio, se evaluaron datos adaptados al autodromo Nazionale di Monza, así como diferentes autódromos con características similares, expresando así, diferentes tiempos de vuelta teóricos con sus debidos ángulos de incidencia del alerón del modelo de automóvil empleado.

En la comparativa de los tiempos empleados de los circuitos en estudio, se logró evidenciar que en Monza tiene mayor importancia la aerodinámica. Este estudio argumenta los resultados principalmente a la propia longitud del circuito, pero también a las largas rectas y rápidas curvas del circuito, ya que con al aumentar el ángulo del

alerón, disminuye la aceleración a velocidades altas, provocando así un aumento de tiempo en recta para estos modelos.

Barrera, J. en conjunto con Velásquez R. (2017). En la Universidad Libre de Colombia, llevaron a cabo un estudio titulado **“Análisis aerodinámico del carrozado frontal de un vehículo de competición prototipo de la categoría FL2”**, donde se realizó un análisis aerodinámico de la parte frontal de un vehículo de competencia por medio de simulaciones numéricas. Se digitalizó la carrocería del vehículo en el programa de diseño SOLIDWORKS, luego se estudiaron las propiedades dinámicas del circuito de interés el “Autódromo de Tocancip ” ubicado en el departamento de Cundinamarca, Colombia. Se estudiaron factores como la velocidad promedio y la velocidad máxima de la curva más crítica según el último récord de vuelta registrado en el circuito.

Se exportó la mitad de la carrocería digitalizada del vehículo al software ANSYS, en dónde se le realizó una simulación numérica en tres dimensiones (3D), se analizó y se comparó con una simulación de dos dimensiones (2D) con las mismas condiciones, comparando en los puntos de un mismo elemento la presión, dónde se determinó el error máximo y mínimo entre los datos de las dos simulaciones. Posteriormente se analizó aerodinámicamente los elementos frontales del vehículo como los alerones, guardafangos, carrozados y un elemento central en forma de punta, por medio de simulaciones numéricas en dos dimensiones (2D).

Las simulaciones aerodinámicas efectuadas al carrozado frontal del vehículo permitieron identificar la capacidad que posee el vehículo para desempeñarse a las condiciones establecidas. Se monitorearon las variables como presión, velocidad, esfuerzo cortante, coeficientes de sustentación y arrastre, dónde se identificó mediante el análisis de los datos obtenidos, las características aerodinámicas de los elementos que componen el carrozado frontal a las condiciones de simulación establecidas, se evidencio la necesidad de modificar los elementos.

De tal manera, se implementó así un teórico alerón delantero al vehículo de competición, el cual al diseñarlo, se logró incrementar un 3.46 % la carga descendente

del alerón delantero original, además, disminuyó la variación de presiones en comparación perfil de alerón original, aunque se redujo la distribución de los esfuerzos cortantes en el alerón propuesto, la eficiencia aerodinámica disminuyó en un 48% para la simulación de velocidad en curva, pero aumentó el coeficiente de sustentación en la simulación de la velocidad promedio.

Ortiz, J (2014) en conjunto de la Universidad de Granada y la Universidad de Málaga, realizó su proyecto final del Máster Oficial en Hidráulica Ambiental, especialidad en Aero-hidrodinámica de Vehículos, titulado **“Estudio aerodinámico en túnel de viento de un alerón frontal de un coche de competición GP2”** el cual partió del alerón frontal de un vehículo de competición de GP2 cedido por el equipo de competición francés Racing Engineering, se estudió la influencia del ángulo de inclinación del flap externo en el rendimiento aerodinámico de dicho elemento a través de su influencia en los coeficientes de sustentación y de arrastre.

En el estudio llevado a cabo, el ángulo de inclinación del alerón se varió desde 0° a 32° . Para su análisis se dividió el alerón por la parte central, por ser simétrico, y se unió solidariamente a una balanza de precisión alojada en un túnel de viento, capaz de medir fuerzas en las tres componentes del espacio. Con este estudio, se ha logrado conocer la configuración óptima del alerón según el circuito en el que compita el monoplaza. Hay veces donde un coeficiente adquiere mucha mayor importancia que el otro, por lo que, la relación entre el coeficiente de sustentación y de arrastre se adapta a las circunstancias del circuito de carreras.

Su estudio concluyó que, Una mayor velocidad puede implicar unos coeficientes de arrastre menores. Lo que una mayor velocidad no provocará mayor gasto de combustible, teniendo en cuenta sólo la aerodinámica. A medida que aumenta la velocidad, también lo hará la sustentación. Siempre que no se desprenda la capa límite excesivamente a cierta inclinación, haciendo que la sustentación baje drásticamente.

La eficiencia también será mayor conforme aumente el Reynolds, pero tendrá el mismo inconveniente que la sustentación cuando la capa límite se desprenda, es decir, también disminuirá bruscamente. La eficiencia máxima no se dará siempre al mismo

ángulo de inclinación para distintos Reynolds. Por lo que será determinante conocer la velocidad media del vehículo en pista, y así, hallar de manera correcta la máxima eficiencia. Dependerá el circuito en el que competirá el monoplaza para una relación del coeficiente de sustentación y de arrastre idónea. Para circuitos rápidos interesarán relaciones de sustentación/arrastre pequeñas y para los lentos, relaciones elevadas.

León, L. (2007). En la Universidad Simón Bolívar, realizó la investigación titulada **“Adaptación y análisis de perfiles para su uso como elemento aerodinámico en un Fórmula SAE”**, donde planteó como objetivo adaptar perfiles aeronáuticos para su uso como elemento aerodinámico trasero de un Formula SAE, analizar los perfiles adaptados con herramientas computacionales y construir un modelo del elemento aerodinámico para su ensayo en un túnel de viento subsónico de ciclo abierto. Se trabaja con un perfil Wortmann FX63137 de aerodelismo para el alerón y un Sez. 3A para el flap. La norma SAE dicta que el borde de salida de los perfiles no puede tener un radio menor a 3 mm, con el programa EXEL 2003 se realiza la adaptación mediante 5 transformaciones: Offset-Girado-Redondeado-Normalizado-Escalado. Se crea un dominio computacional con el programa Gambit 2.3.16 donde el elemento aerodinámico tiene una zona interior y una zona exterior conformadas por una parábola y una recta que une a la parábola. Los elementos de malla son triangulares y se encuentran alrededor de los 210000 elementos. Con el programa Fluent 6.3 se analiza el elemento aerodinámico conformado por un alerón y un flap donde se busca la posición más favorable para generar la mayor sustentación posible en dirección a tierra y crear el efecto suelo del formula. Con el Fluent 6.3 se crea las condiciones físicas del caso en estudio las cuales consisten en un flujo de aire uniforme e incompresible a bajo Reynolds. El modelo de turbulencia que se utiliza es el K-epsilon de segundo orden y se tomarán en cuenta los efectos de los gradientes de presión en las paredes del arreglo aerodinámico ya que la densidad se considera constante por su condición de incompresible.

2.2 Bases Teóricas

2.2.1. Definición de fluido

De manera general, la materia se puede clasificar, desde un punto de vista microscópico, en sólidos y fluidos. Un fluido es una sustancia capaz de fluir, que se adapta a la forma de los recipientes que los contienen. Fluir significa desplazarse y deformarse; simultáneamente. Por ello el término fluido incluye a los líquidos y los gases.

2.2.2. Propiedades de un fluido

Los fluidos se describen a partir de ciertos parámetros que lo identifican. A continuación, se describen algunos de ellos:

2.2.2.1. Densidad

La densidad suele denotarse con la letra ρ , depende de muchos factores, como la temperatura y la presión a la que se encuentra sujeto. Para los líquidos la densidad varía muy poco dentro de amplios márgenes de presión y la temperatura. La densidad de un gas es muy sensible a los cambios en la temperatura y la presión. En la forma:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

2.2.2.2. Presión de los fluidos

Existe una diferencia entre la forma en que una fuerza de superficie actúa sobre un fluido y sobre un sólido. Para un sólido no hay restricciones sobre la dirección de dicha fuerza, pero para un fluido en reposo, la fuerza de superficie siempre debe estar dirigida en ángulo recto a la superficie. Esto se debe a que un fluido en reposo no puede tolerar una fuerza tangencial; simplemente, las capas fluidas se deslizan unas sobre otras, resultando así en un movimiento de fluido que finalmente alcanza el equilibrio. En realidad, los fluidos no pueden resistir a estas fuerzas tangenciales o esfuerzo cortante, lo que les da su capacidad característica de cambiar su forma y fluir.

Por esto, es conveniente describir a la fuerza que actúa sobre el fluido especificando la presión, que se define como la magnitud de la fuerza normal por unidad de área superficial. La presión se transmite a las paredes sólidas que los limitan, o a través de secciones arbitrarias del fluido en ángulo recto a dichas paredes o

secciones en todos sus puntos. La presión es una cantidad escalar. La unidad del SI (Sistema internacional) de presión es Pascal, esta unidad se denomina así en honor al científico francés Blas Pascal (1623-1662). Otras unidades son el bar ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$), la atmosfera ($1 \text{ atm} = 14.7 \text{ lb/plg}^2 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$) y el milímetro de mercurio o Torr ($760 \text{ mm Hg} = 760 \text{ Torr} = 1 \text{ atm}$), esta unidad fue denominada así en honor al matemático italiano Evangelista Torricelli (1608-1647) (ver figura 1).



Figura 1. Elemento de superficie con su magnitud.

Fuente: Paniagua Adriana (2018)

Considere una superficie cerrada que contiene un fluido (Ver figura 1) un elemento de superficie, suficientemente pequeña, se puede representar por un vector, cuya magnitud es la del área del elemento y cuya dirección se toma normal y hacia afuera de la superficie del elemento. La fuerza ejercida sobre el fluido en este elemento de superficie. La presión p se puede representar de la forma:

$$\text{—} \tag{2}$$

2.2.2.3. Viscosidad

La viscosidad de un fluido es aquella propiedad que determina la resistencia opuesta a las fuerzas cortantes. La viscosidad se debe principalmente a las interacciones entre las moléculas del fluido. El físico y matemático inglés Sir Isaac Newton (1643-1727), encontró esta evidencia experimental, así como el análisis dimensional de las variables que intervienen y propuso la célebre ley que lleva su nombre.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (3)$$

Siendo τ el cambio de la velocidad de un estrato del fluido que está a la altura y sobre la superficie de la placa inferior, τ es el esfuerzo cortante que se resiste al movimiento libre de la placa y μ es el factor de proporcionalidad. Este factor recibe el nombre de viscosidad dinámica, o también viscosidad cortante y sus unidades en el SI son:

$$\mu = \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \quad (4)$$

A estas unidades se les denomina “Stokes” en memoria del científico británico que desarrolló formalmente la ciencia de los fluidos Sir George Gabriel Stokes (1819-1903).

2.2.2.4. Número de Reynolds

Como consecuencia de los experimentos efectuados por el ingeniero y físico Osborne Reynolds (1842-1912), en 1883 estudia el comportamiento de las corrientes de los fluidos en las tuberías, a cuyo fin usó tubos de diferentes tamaños y empleó diversos líquidos, encontró que a pequeñas velocidades la corriente era uniforme o laminar, mientras que a grandes velocidades se tornaría turbulenta. Reynolds demostró que el hecho que la corriente fuese laminar o turbulenta dependía de una relación entre la velocidad del fluido, la sección de paso del fluido, la densidad del fluido y el coeficiente de viscosidad dinámica del mismo. Esta relación conocida como número de Reynolds, es:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (5)$$

Aunque los experimentos de Reynolds se limitaron a las tuberías, esta relación “sustituyendo D por otra dimensión lineal L ”, tiene una importancia fundamental en aerodinámica. El número de Reynolds queda:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (6)$$

Donde ν es la viscosidad cinemática y ρ es el coeficiente de dividir la viscosidad dinámica por la densidad ρ . Este número también es adimensional, y combina los efectos de cuatro de las variables más importantes que intervienen en las fuerzas aerodinámicas. Es fácil ver que, para un número de Reynolds dado, la relación entre las fuerzas debidas a la densidad y las fuerzas debidas a la viscosidad es constante. En efecto: con un sistema adecuado de unidades, se tendría que la fuerza debida a la densidad sería:

$$F \propto \rho V^2 L^2 \quad (7)$$

Por otra parte, la fuerza debida a la viscosidad, en dos placas cuadradas paralelas de lado L, que tuvieran una velocidad relativa V, sería:

$$F \propto \mu V L \quad (8)$$

Por lo tanto:

$$\frac{F}{\rho V^2 L^2} \propto \frac{\mu V L}{\rho V^2 L^2} \quad (9)$$

Luego dicha relación sería constante e igual al valor del número de Reynolds dado.

Es conveniente observar que el valor del número de Reynolds sólo tiene aprovechamiento para comparar las propiedades aerodinámicas de series de formas, elementos o cuerpos geométricos semejantes. Como el tipo de la corriente varía con la forma de los objetos de la serie examinada, la longitud característica que se adopta también variará según los casos. Para las alas se toma para la l la longitud de la cuerda c , o sea, la recta que une, en una sección longitudinal, el punto más avanzado con el punto más retirado. Para cuerpos fuselados, l podrá ser la longitud total del cuerpo o la raíz cúbica de su volumen. Una de las más importantes aplicaciones del número de Reynolds es que permite, de los resultados obtenidos, deducir los resultados que podrán obtenerse con un perfil aerodinámico de baja resistencia.

2.2.3. Ecuaciones de balance

Para describir la conducta de los fluidos, Stokes (1819-1903) dedujo un juego de expresiones diferenciales con las cuales en principio es posible encontrar matemáticamente aquellas funciones que los caracterizan. Se trata de las llamadas ECUACIONES DE BALANCE y para los fluidos con un solo componente químico y en una sola fase, son las siguientes:

Ecuación de Balance.

Ecuaciones de Balance De Momento

Ecuación de Balance De Energía

Dentro de este contexto, esta última ecuación no será considerada ya que no juega un papel relevante en el problema que aquí se desarrolla.

2.2.3.1 Ecuación de balance de masa

La conservación de la masa es un principio fundamental en la física. Afirma que la masa no puede ser creada ni destruida, por lo que masa de un volumen de control debe conservarse (ver figura 2).

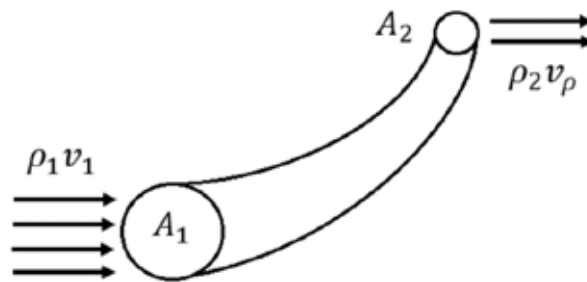


Figura 2. Representación del balance de masa en un ducto.

Fuente: Salazar Iván (2010)

observando la Figura 2 donde se ha dibujado un ducto rígido, impermeable por el cual fluye un fluido, es más o menos sencillo obtener el siguiente resultado para conducto, ignorando los efectos de borde:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (10)$$

Esta es lo que se denomina ecuación de balance de masa.

2.2.3.2 Ecuación de balance de momento

Es importante considerar los fluidos en movimiento; ahora considerando fluidos que se encuentren fluyendo, sobre los que actúan fuerzas definidas. Una manera de descubrir el movimiento de un fluido consiste en dividirlo en elementos infinitesimales de volumen, a los que se pueden llamar partículas fluidas y seguir en movimiento de cada una de dichas partículas. Se pueden dar coordenadas x , y y z a cada una de estas partículas de fluidas, para después especificarlas como funciones del tiempo t y la posición inicial de la partícula X_0 , Y_0 y Z_0 . Este procedimiento es una generalización directa de los conceptos de la mecánica de la partícula y fue desarrollado, en primer lugar, por Joseph Louis Lagrange (1736-1813).

Un fluido perfecto no ofrece ninguna resistencia a los esfuerzos cortantes. Por ello, las fuerzas que existan entre dos porciones de dicho fluido, o entre el fluido y la superficie de un cuerpo en contacto con él, serán normales a la superficie de contacto, ya que, si existiese una componente tangencial, el fluido se deslizaría en el sentido de dicha componente.

Los fluidos perfectos no existen, pero es útil suponer su existencia para el desarrollo de ciertas teorías, aunque para su aplicación práctica tengan que ser posteriormente corregidas.

La segunda Ley de Newton para un sistema de masa m sometido a una fuerza neta se expresa como:

$$\frac{dL}{dt} = \sum \tau \quad (11)$$

Donde L es el momento lineal del sistema. Notando que tanto la densidad como la velocidad pueden cambiar de punto a punto dentro del sistema, la segunda ley de Newton se puede expresar de manera más general como:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho (\mathbf{r} \times \mathbf{v}) dV = \int_V \rho (\mathbf{r} \times \mathbf{g}) dV + \int_S \mathbf{r} \times \mathbf{t} dA \quad (12)$$

donde m es la masa de un elemento diferencial de volumen, ρ , y \mathbf{v} es su cantidad de movimiento. Por lo tanto, la segunda ley de Newton puede enunciarse como la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre un sistema es igual a la razón de cambio respecto al tiempo del momento lineal de ese sistema.

La ecuación anterior es para una masa dada de un sólido y es de uso limitado en la mecánica de fluidos, ya que la mayoría de los sistemas de flujo se analizan con el uso de volúmenes de control. El teorema del transporte de Reynolds proporciona las herramientas necesarias para pasar de la formulación de sistema a la de volumen de control.

El teorema del transporte de Reynolds puede expresarse para el momento lineal como:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \mathbf{v} dV + \int_{CS} \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = \sum \mathbf{F} \quad (13)$$

Sin embargo, por la ecuación 11, la parte izquierda de esta ecuación es igual a $\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \mathbf{v} dV$. Cuando se sustituye, se obtiene que la forma general de la ecuación del momento lineal que se aplica a los volúmenes de control fijo, en movimiento o deformación, es:

$$\frac{d}{dt} \int_{CV} \rho \mathbf{v} dV + \int_{CS} \rho \mathbf{v} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}) dA = \sum \mathbf{F} \quad (14)$$

Lo cual se puede enunciar como la suma de todas las fuerzas externas que actúan sobre un volumen de control, es igual a la razón del cambio respecto al tiempo del momento lineal del contenido de volumen de control en adición con el flujo neto del momento lineal hacia fuera de la superficie de control por el flujo de masa.

2.2.4. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli es una relación aproximada entre la presión, la velocidad y la elevación, y es válida en regiones de flujo estacionario e incompresible en donde las fuerzas netas de fricción son despreciables (ver figura 3).

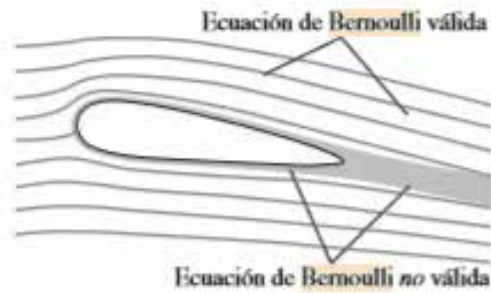


Figura 3. Representación de la validez de la ecuación de Bernoulli para flujos estacionarios e incompresibles.

Fuente: Cengel y Cimbala (2006)

$$- \quad - \quad (15)$$

Ésta es la famosa ecuación de Bernoulli, la cual es de uso común en mecánica de fluidos para el flujo estacionario e incompresible, a lo largo de una línea de corriente, en las regiones no viscosas del flujo. El valor de la constante puede evaluarse en cualquier punto de la línea de corriente donde se conozcan la presión, la densidad y elevación. La ecuación de Bernoulli también puede escribirse entre dos puntos cualesquiera sobre la misma línea de corriente como:

$$- \quad - \quad - \quad - \quad (16)$$

La ecuación de Bernoulli se obtiene a partir de la conservación de la cantidad de movimiento para una partícula de fluido que se desplaza a lo largo de una línea de corriente.

Describiendo el movimiento de una partícula en términos de su distancia s , a lo largo de una línea de corriente, se describe la velocidad por:

$$- \quad (17)$$

Tomando la velocidad v de una partícula de fluido como una función de s y t se expresa matemáticamente, de esta manera, cuando se toma la diferencial total de $V(s, t)$ y se dividen ambos miembros entre ds da:

$$\frac{dV}{ds} = \frac{dV}{dt} \frac{dt}{ds} + \frac{dV}{ds} \quad (18)$$

Y

$$\frac{dV}{ds} = \frac{dV}{dt} \frac{dt}{ds} + \frac{dV}{ds} \quad (19)$$

De manera análoga, cuando se usan los 2 términos de las expresiones anteriores, se puede demostrar que la ecuación de Bernoulli para el flujo no estacionario y compresible es:

$$\frac{dV}{ds} = \frac{dV}{dt} \frac{dt}{ds} + \frac{dV}{ds} \quad (20)$$

2.2.5. Ley de Kutta-Joukovsky

El teorema de Kutta-Joukovsky es un teorema fundamental de la aerodinámica. Estudiado por el alemán Martin Wilhelm Kutta (1867-1944), en 1902, para el caso particular del cilindro de base circular, su aplicación fue extendida en 1905 por Nicolái Yegórovich Zhukoviski (1847-1921) “transcrito también como Joukovsky”. El teorema relaciona la fuerza de sustentación generada por un cilindro recto con la velocidad del fluido por el cilindro, la densidad del fluido, y la circulación. La circulación es la integral de la línea del fluido, en una curva cerrada que contiene al cilindro. Puede ser entendido como la cantidad total “hilado” del fluido alrededor del cilindro. En las descripciones del teorema de Kutta-Joukovsky el cilindro recto por lo general es limitado a un cilindro circular o un perfil alar.

El teorema se refiere al flujo bidimensional alrededor de un cilindro (o un cilindro de envergadura de ala infinito) y determina la sustentación generadora por unidad de envergadura (ver figura 4).

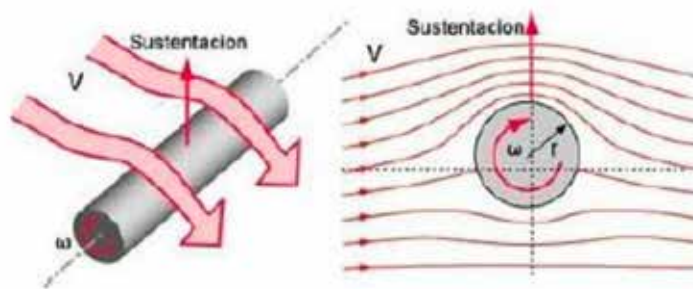


Figura 4. Representación gráfica del caso de un cilindro inmerso en un fluido que lo remonta.

Fuente: Avial C. (2008)

Cuando se conoce la circulación Γ , la sustentación L por envergadura de unidad del cilindro puede ser calculada en primera aproximación usando la ecuación siguiente:

$$(21)$$

La circulación Γ , puede ser definida de la siguiente manera:

$$(22)$$

Otra interpretación es la que hacen los autores del libro “fundaciones de la aerodinámica: base del diseño aerodinámico” Arnold M. Kuethe y Julius D. Schetzer que aclaran el teorema de Kutta-Joukovsky como:

La fuerza por unidad de longitud que actúa sobre un cilindro recto de cualquier sección transversal tiene $\rho V \Gamma$ y dirección ortogonal a v .

Para el caso en el cual se considera una superficie sustentadora fina de cuerda c y envergadura infinita, moviéndose a través del aire de densidad ρ . Dejando el perfil alar que sea inclinado al flujo de acercamiento a producir una velocidad de aire v sobre un lado del perfil alar y una velocidad de aire del otro lado $v + \Delta v$. La circulación es:

$$(23)$$

La diferencia de presión Δp mediante la aplicación de la ecuación de Bernoulli:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \rho (v_2^2 - v_1^2) \quad (24)$$

Desarrollando el binomio cuadrado, se tiene: Factorizando se obtiene:

$$- \quad - \quad (25)$$

Factorizando se obtiene:

$$- \quad (26)$$

Si se ignora el último término de la ecuación, resulta:

$$(27)$$

Entonces la fuerza de sustentación por unidad de envergadura es:

$$(28)$$

Una versión diferencial de este teorema se aplica sobre cada elemento de la placa y es la base de la teoría del perfil alar delgado.

2.2.6. Airfoil

El aire a través de la parte superior de una superficie aerodinámica convencional experimenta un estrechamiento de las líneas de flujo e incrementa la velocidad relativa del aire en el ala. Éste causa una disminución de la presión en la parte superior de acuerdo con la ecuación de Bernoulli y produce una fuerza de sustentación. La aerodinámica usa el modelo de Bernoulli para relacionar las medidas de presión realizadas en los túneles de viento y afirman que cuando se realizan las medidas de presión en varios lugares alrededor de la superficie de sustentación y se suman, están razonablemente de acuerdo con la elevación observada.

Existe además la apelación al modelo basado en la ley de Newton y afirma que la sustentación principal, viene como resultado del ángulo de ataque. Parte del modelo de la ley de Newton de una parte de la fuerza de sustentación, implica la fijación de la capa límite de aire sobre la parte superior del ala, con el resultado de una caída de flujo de aire por detrás del ala. Si el ala le da al aire una fuerza hacia abajo, entonces por la tercera ley de Newton, el ala experimenta una fuerza en la dirección opuesta -elevación.

El incremento del ángulo de ataque proporciona una mayor elevación proveniente de la componente vertical de la presión ejercida sobre la parte de abajo del

ala. Esa fuerza de elevación puede considerarse como una fuerza de reacción derivada mediante la tercera ley de Newton por la fuerza que ejerce hacia abajo el ala sobre el aire. Con un ángulo de ataque demasiado alto, se incrementa drásticamente la turbulencia del flujo y la aeronave entra en pérdida (ver figura 5).

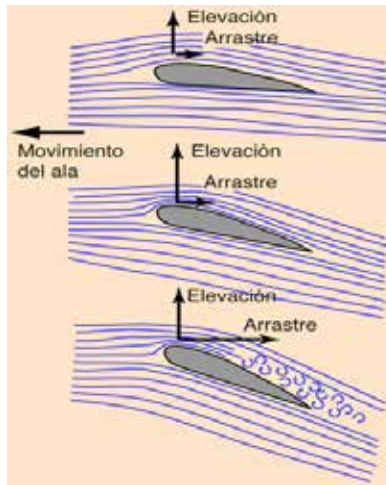


Figura 5. Relación elevación – arrastre a diferentes ángulos de incidencia de un fluido sobre un perfil alar.

Fuente: physics-links.blogspot.com.

2.2.7. Generalidades sobre perfiles aerodinámicos

Cada alerón tiene un perfil variable con forma aerodinámica; estos perfiles tienen un extremo, que es el borde de ataque, mientras que el otro extremo, de forma afilada, es el borde de salida. Los perfiles tienen distintos nombres según su geometría. Se denomina biconvexo si el intradós (cara inferior) y el extradós (cara superior) son convexos y plano-convexos si tienen el extradós convexo y el intradós plano y de doble curvatura si el intradós y el extradós son cóncavos. En el estudio de los perfiles se ignora la configuración en proyección horizontal del alerón, como así también los efectos de extremo del alerón: flecha y otras características de diseño, para facilitar su cálculo.

En el diseño de perfiles aerodinámicos es necesario mantener claro una serie de conceptos:

- I. **La línea de cuerda** es una línea recta que une al borde de ataque y el borde de salida del perfil.
- II. **La cuerda** es la longitud de esa línea. Todas las dimensiones de los perfiles se miden en términos de la cuerda.
- III. **La línea de curvatura** es la línea media entre el extradós y el intradós, tomadas como segmentos perpendiculares de la cuerda, a lo largo de ella.
- IV. **Curvatura máxima** es la distancia máxima entre la línea de curvatura media y la línea de cuerda. La posición de la curvatura máxima es importante en la determinación de las características aerodinámicas de un perfil.
- V. **Espesor máximo** es la distancia máxima entre la superficie superior e inferior (extradós e intradós). La localización del espesor máximo también es importante.
- VI. **Radio de borde de ataque** es una medida de la curvatura del borde de ataque. Puede variar desde cero, para perfiles supersónicos afilados o hasta un 2% (de la cuerda) para perfiles más bien achatados.

En la figura 6 se muestran explícitamente estos parámetros.

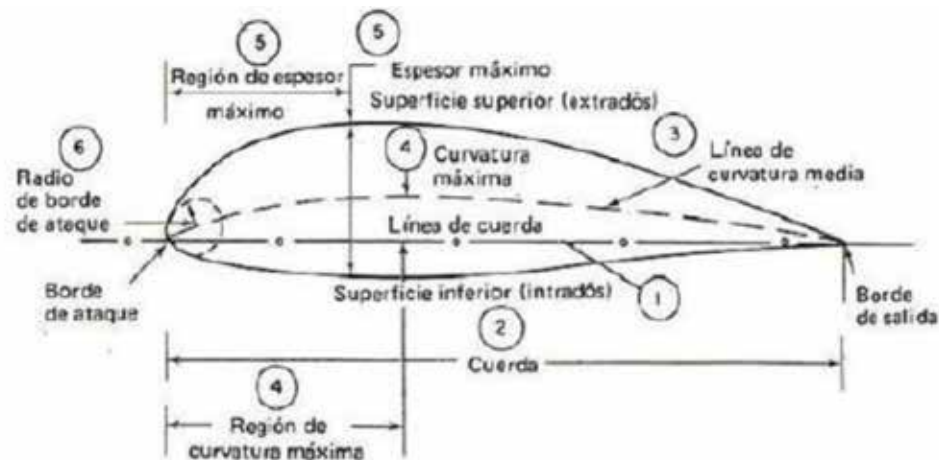


Figura 6. Terminología básica de perfiles alares.

Fuente: González Francisco (2008).

En la geometría de un perfil existen cuatro variables principales:

- I. Configuración de la línea de curvatura media. Si esta línea coincide con la línea de cuerda, el perfil es simétrico. En los perfiles simétricos la superficie superior e inferior tiene la misma forma y equidistan de la línea de cuerda.
- II. Espesor.
- III. Localización del espesor máximo.
 - Radio del borde de ataque. Configuración de la línea de curvatura media.

2.2.8. Capa límite

En mecánica de fluidos, la capa límite o capa fronteriza de un fluido es la zona donde el movimiento de este es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido, respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada. El espesor de la capa límite en la zona del borde de ataque o de llegada es pequeño, pero aumenta a lo largo de la superficie. Todas estas características varían en función de la forma del objeto (menor espesor de capa límite cuanto menor resistencia aerodinámica presente la superficie: ej. forma fusiforme de un perfil alar).

El flujo laminar va perdiendo velocidad a lo largo de la capa límite, hasta que finalmente se para o incluso retrocede, provocando que la capa límite se desprenda y el flujo ya no siga la forma de la superficie (ver figura 7).

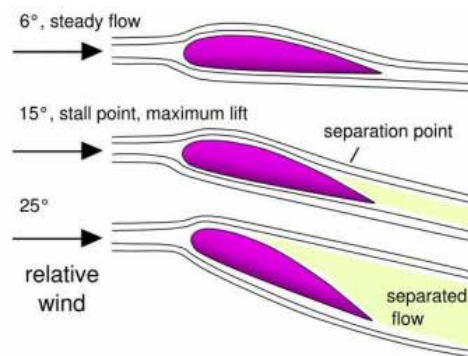


Figura 7. Desprendimiento de la capa límite en un perfil alar a diferentes ángulos de ataque del fluido.

Fuente: Interiot (2006).

2.2.9. Coeficiente de sustentación

La sustentación es la fuerza generada sobre un cuerpo que se desplaza a través de un fluido, de dirección perpendicular a la de la velocidad de la corriente incidente. La aplicación más conocida es la del ala de un ave o un avión, superficie generada por un perfil alar.

Como con otras fuerzas aerodinámicas, en la práctica se utilizan coeficientes adimensionales que representan la efectividad de la forma de un cuerpo para producir sustentación y se usan para facilitar los cálculos y los diseños.

El modelo matemático de la fuerza de sustentación es:

$$- \quad (29)$$

$$\frac{\quad}{-} \quad (30)$$

2.2.10. Coeficiente de arrastre

En Mecánica de Fluidos, el coeficiente de arrastre (comúnmente denotado como: c_d , c_x o c_w) es una cantidad adimensional que se usa para cuantificar la resistencia de un objeto en un medio fluido como el aire o el agua. Es utilizado en la ecuación de resistencia, en donde un coeficiente de resistencia bajo indica que el objeto tendrá menos resistencia aerodinámica o hidrodinámica. El coeficiente de arrastre está siempre asociado con una superficie particular.

El coeficiente de arrastre de cualquier objeto comprende los efectos de dos contribuciones básicas a la resistencia dinámica del fluido: la resistencia de forma y de superficie. El coeficiente de resistencia de un perfil aerodinámico o hidrodinámico incluye también los efectos de la resistencia inducida. El coeficiente de arrastre de una estructura completa como una aeronave incluye también los efectos de la resistencia de interferencia.

$$- \quad (31)$$

_____ (32)

2.2.11. Coeficiente de presión

El coeficiente de presión es un número adimensional que describe la presión relativa a través de un campo de flujo en dinámica de fluidos. El coeficiente de presión es usado en aerodinámica e hidrodinámica. Cualquier punto inmerso en el flujo de un fluido tiene su propio y único coeficiente de presión, C_p .

En algunas situaciones en aerodinámica e hidrodinámica, el coeficiente de presión de un punto cerca de un cuerpo es independiente del tamaño del cuerpo.

En consecuencia, un modelo ingenieril puede ser probado en un túnel de viento o en un túnel de agua, de esta forma se pueden calcular los coeficientes de presión en puntos críticos alrededor del modelo, y estos coeficientes de presión pueden ser usados para estimar la presión del fluido en esos puntos críticos en el prototipo a escala real.

_____ (33)
—

2.2.12. Federación Internacional del Automovil. (FIA)

Es una organización sin ánimo de lucro con sede en la Plaza de la Concordia de París, Francia, y que incluye 268 organizaciones automovilísticas de 143 países. Fundada en 1904, es mundialmente conocida por regular las competiciones de automovilismo más importantes del mundo, pero su ámbito de aplicación incluye todos los aspectos del automóvil, las carreteras, la movilidad, el medio ambiente o seguridad vial. Su historia es la siguiente:

La Association Internationale des Automobile Clubs Reconnus (AIACR) fue fundada en París el 20 de junio de 1904.

En 1922, la FIA delegó la organización de carreras de automóviles a la Commission Sportive Internationale (CSI), un comité autónomo que más tarde se convirtió en la Fédération Internationale du Sport Automobile (FISA).

En 1950, organizaron el primer campeonato mundial automovilístico, actualmente conocido como la Fórmula 1.

En 1973, la FIA extendió su alcance para incluir carreras de rally; el Rally de Montecarlo fue el primer evento de ese tipo organizado por la FIA.

Una reestructuración de la FIA en 1993 dio lugar a la desaparición de la FISA, poniendo las carreras de coches bajo la administración directa de la FIA (ver figura 8).



Figura 8. Logo de la Federación Internacional del Automóvil (FIA).

Fuente: Inkscape (2018)

2.2.13. Fórmula 1

El Campeonato Mundial de Fórmula 1 de la FIA, más conocida como Fórmula 1 o F1, es la máxima competición de automovilismo internacional y campeonato de deporte motor más popular y prestigioso del mundo. La entidad que la dirige es la Federación Internacional del Automóvil (FIA). El Formula One Group es propiedad y operado por la empresa estadounidense Liberty Media desde septiembre de 2016.

El inicio de la Fórmula 1 moderna se remonta al año 1950, en el que participaron escuderías como Ferrari, Alfa Romeo y Maserati. Algunas fueron reemplazadas por otras nuevas como McLaren, Williams, Red Bull, Renault y otras que volvieron como Mercedes que se han alzado varias veces con el Campeonato Mundial de Constructores. Las escuderías tienen que planear sus fichajes y renovación de contratos 2 o 3 carreras antes del fin de la temporada. Por su parte, los pilotos deben contar con la superlicencia de la FIA para competir, que se obtiene sobre la base de resultados en otros campeonatos (ver figura 9).



Figura 9. Logo de la Fórmula 1.

Fuente: Liberty Media (2017).

2.2.14. Monoplaza de fórmula 1

Los automóviles de carreras suelen ser de una única plaza y están diseñados especialmente para competiciones de automovilismo (en particular de automovilismo de velocidad). La cámara está diseñada lo menos ancho posible para reducir la superficie frontal y mejorar la aerodinámica. Actualmente, los monoplazas más potentes suelen utilizar alerones que empujan al automóvil contra el suelo, aumentando la adherencia de los neumáticos (ver figura 10).

Debido a su bajo peso y excelente aerodinámica, los monoplazas son los automóviles de carreras más rápidos tanto en recta como en curva. Esto también los hace difíciles de maniobrar, porque las reacciones ante frenadas, aceleraciones y virajes son más fuertes.



Figura 10. Monoplaza de la fórmula 1 de la temporada del año 2019.

Fuente: Foxsports.com.au (2019).

2.2.15. Carga aerodinámica

La carga aerodinámica o downforce es una fuerza vertical descendiente. El propósito de la carga aerodinámica es aumentar la fuerza vertical de los neumáticos y

así tener más adherencia y poder tomar las curvas más rápido. Para aumentar la adherencia de los neumáticos también se podría añadir peso al coche, el problema es que este haría que el coche fuese más lento porque pesa más, lo que se usa para no penalizar el ritmo por vuelta es la carga aerodinámica, que aumenta la adherencia de los neumáticos y hace un coche mucho más rápido.

Un avance vino inspirado en las alas de los aviones, pero simplemente con una función inversa, ya que estas alas están fabricadas para hacer todo lo contrario en lo que respecta a la aviación, teniendo como objetivo utilizar el aire en pro al agarre del auto, empujándolo hacia abajo, de manera que se pierda lo menos posible el contacto de las llantas contra el suelo.

Los alerones de un F1 operan igual que las alas de un avión pero al revés. El aire fluye a diferentes velocidades por los dos lados del ala por tener que recorrer distancias diferentes y esto crea una diferencia de presión según el principio de Bernoulli. En los aviones esa diferencia de presiones produce sustentación para mantenerlo en el aire, y en un F1 produce lo contrario a la sustentación, es decir, carga aerodinámica empujándolo hacia abajo (ver figuras 11 y 12).

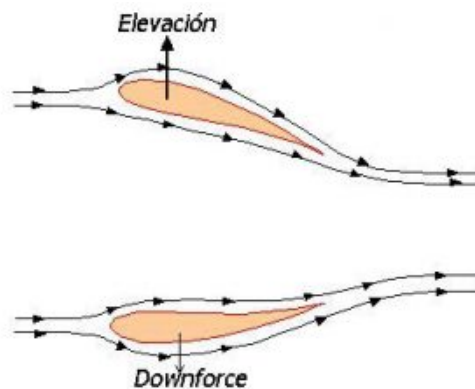


Figura 11. Downforce o carga aerodinámica en analogía a la elevación.

Fuente: formula1atmosphere (2018).

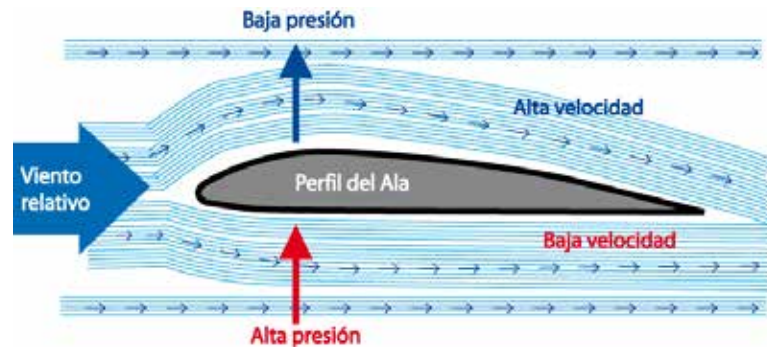


Figura 12. Efecto de carga sobre un perfil aerodinámico bajo el principio de Bernoulli.

Fuente: Begoña Santoro (2018).

La fórmula del downforce está determinada por la **velocidad al cuadrado**, esto significa que la carga aerodinámica es exponencial. Esto quiere decir que si un coche va a 300 km/h tendrá cierta carga aerodinámica, pero a 320 km/h tendrá muchísima más porque sigue una trayectoria exponencial y a medida que aumenta un poco la velocidad, la carga aerodinámica aumenta muchísimo. Además, **que la velocidad este elevada al cuadrado significa que en las curvas lentas la aerodinámica prácticamente no hará efecto, pero en las curvas de alta velocidad y en las rectas la aerodinámica estará trabajando a pleno rendimiento.**

(34)

En cuanto a la carga aerodinámica necesaria para evaluar la estabilidad y permanencia de un monoplaza en una curva, puede determinarse conociendo su **carga descendente**, la cual se calcula teniendo en cuenta su masa m , su velocidad, el coeficiente de fricción entre los neumáticos y el asfalto μ , y el radio de curvatura por el cual éste atraviesa r .

(35)

Posteriormente, se procede a sustraer la carga descendente ejercida por acción de la fuerza de gravedad, resultando de esta manera la carga aerodinámica necesaria en una curva.

La carga aerodinámica se puede conseguir por diversos métodos:

Mediante la altura del coche: un coche más bajo creará más succión que uno muy alto, por lo tanto el coche se pegará más al asfalto.

Aumentando los apéndices aerodinámicos: la carga aerodinámica es muy fácil de conseguir, pones un montón de alerones y ya está. Lo realmente difícil es que esa carga sea eficiente y no se pierda velocidad punta.

Aumentando el ángulo de ataque de los alerones: el problema de este método es que aumenta la resistencia aerodinámica y si el ángulo de ataque es muy elevado puede aparecer el desprendimiento de la capa límite (ver figura 13).

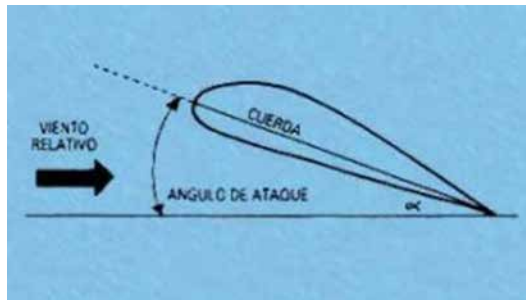


Figura 13. Rango del ángulo de incidencia de un perfil aerodinámico para modificar la carga sobre él mismo.

Fuente: formula1atmosphere (2018).

Aumentando el rake del coche (ver figura 14).



Figura 14. Variación del rake en un monoplaza de fórmula 1.

Fuente: formula1atmosphere (2018).

2.2.16. Alerón delantero

Un alerón delantero es un elemento aerodinámico que permite generar carga aerodinámica. Es el primer elemento del monoplace que entra en contacto con el aire, es por esto que este apéndice aerodinámico es de vital importancia, ya que determinará cómo se mueve el aire a través del coche, ya sea por los lados, por la parte superior o la inferior (ver figura 15).

Su función es redirigir el flujo de aire para evitar los neumáticos porque éstos crean muchas turbulencias y resistencia aerodinámica. Además también sirve para generar carga aerodinámica y vórtices, los cuales ayudarán a dirigir el aire a través del coche y a crear aún más carga aerodinámica. Por último, el alerón delantero también sirve para convertir el flujo turbulento en laminar para que el aire sea más fácil de manejar.

La parte frontal del coche tiene una gran importancia en la creación de carga aerodinámica porque determina cuál será el camino a seguir del flujo de aire.

El alerón delantero tiene varios objetivos.

Crear carga aerodinámica: el alerón delantero sirve para generar downforce, pero este no es su objetivo principal.

Evitar a los neumáticos: los neumáticos crean muchísima resistencia aerodinámica, ya que crean muchas turbulencias. Una función del alerón es evitarlos para aumentar la eficiencia del F1.

Tratar de ordenar el flujo de aire: el flujo de aire puede ser turbulento si dos coches están muy juntos, pues el coche de delante crea turbulencias, las cuales le afectan al de atrás, una función del alerón delantero es transformar el flujo turbulento en laminar.

El alerón tiene una desventaja que se llama resistencia aerodinámica, esto hace que sea uno de los elementos del Fórmula 1 que más drag genera (ver figura 16).



Figura 15. Alerón delantero de un monoplaza de la fórmula 1.

Fuente: RV RACING PRESS (2018).



Figura 16. Comparativa de los reglajes aerodinámicos del alerón delantero de un monoplaza de la escudería Red Bull en los autódromos del gran premio de Monaco y Monza.

Fuente: Sutton Images.

Mediante la siguiente figura, se visualizarán distintas partes constituyentes del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1. Cabe destacar que para la temporada 2019 de la fórmula 1, debido al reglamento dictado por la FIA, los alerones delanteros cuentan con menos componentes de los mostrados en la figura 17 y figura 18, por lo que seguidamente se mencionarán los componentes del alerón delantero vigentes para la temporada del 2019.

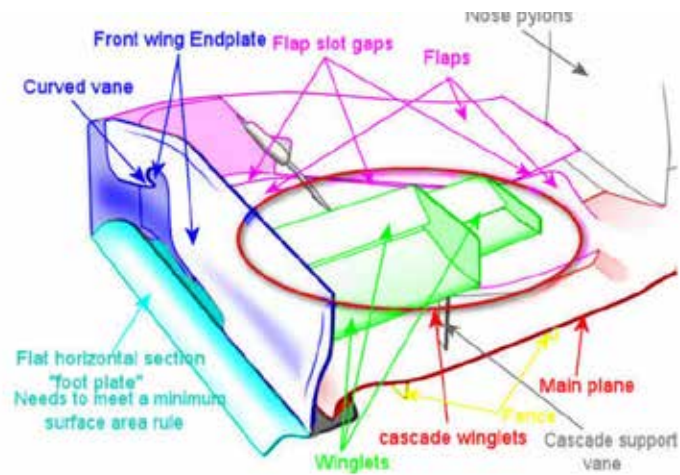


Figura 17. Representación gráfica de las partes de un alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1 regido bajo la normativa de la FIA para las temporadas anteriores a la del 2019.

Fuente: formula1atmosphere (2018).

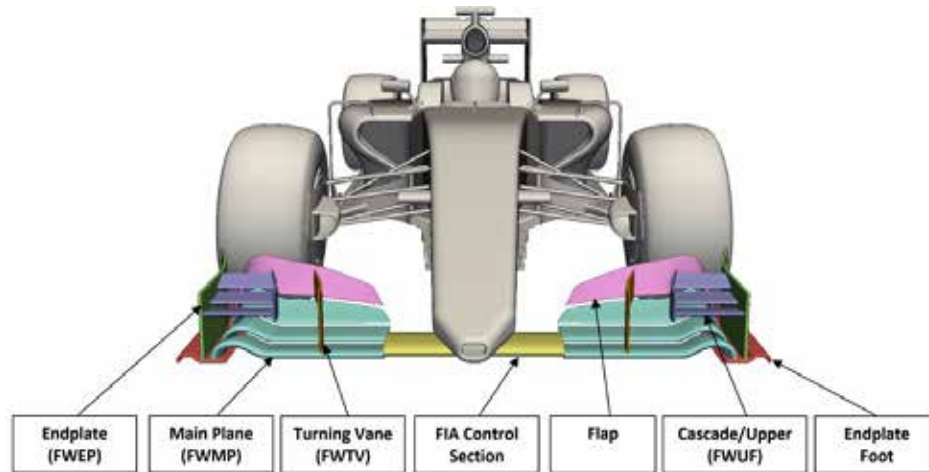


Figura 18. Secciones del alerón delantero de una monoplaza de fórmula 1 regido bajo la normativa de la FIA para las temporadas anteriores a la del 2019.

Fuente: TotalSim (2016).

De tales componentes, para la temporada de 2019, lo que representa la parte en estudio, se establecen bajo el reglamento vigente impuesto por la FIA, los siguientes componentes:

Un “main plane” o plano principal qué es la base del alerón. Este plano principal se intenta que vaya lo más bajo posible para potenciar el efecto suelo y así ganar carga.

Un “endplate”: Los endplates son elementos muy comunes en un Fórmula 1, se pueden encontrar también en el alerón trasero o en los winglets. Son estos objetos perpendiculares al suelo que tienen como objetivo evitar que la zona de mayor presión vaya hacia la de menor (el aire siempre tendrá a igualar presiones en una ala, por lo tanto, la zona de mayor presión tiende a ir a la de menor, para más información consulta nuestro artículo sobre los vórtices) porque actúan como separadores entre una zona de alta presión y otra de baja.

Unos elementos llamados “fence”: estos elementos se sitúan en la zona inferior del alerón y tienen como objetivo redirigir el flujo de aire y transformar el flujo turbulento en uno laminar, además también crean vórtices que se utilizarán para mejorar el rendimiento del monoplaça.

Unos “flaps” qué sirven para generar carga aerodinámica y evitar los neumáticos mediante su inclinación. Estos flaps están divididos para evitar la separación de la capa límite. Además, todos acaban en forma de punta porque generan el vórtice más importante del Fórmula 1, el vórtice Y250. Se llama así porque este vórtice está a 250 mm de la zona central del alerón.

Cascade Supports Vane.

Foot plates.

2.2.17. Resistencia Aerodinámica

DRAG o resistencia aerodinámica es el precio que hay que pagar por producir downforce es el drag o resistencia al avance. Las turbulencias generadas por los alerones y las ruedas al descubierto, así como el flujo de aire necesario para refrigerar el motor y los frenos “frenan” a los F1, mucho más que a un coche de calle. A pesar de que un F1 pasa de 0 a 300 km/h en poco más de ocho segundos, su aerodinámica dificulta enormemente que los F1 puedan superar 350 km/h, al sacrificar la velocidad

punta por una mayor velocidad de paso por curva rápida. Esta alta resistencia al avance hace que cuando un F1 llega a 300km/h a una curva, sólo con levantar el pie del acelerador la deceleración sea de 1g, similar a la deceleración de un deportivo utilizando al máximo sus frenos. Cuando el F1 aplica sus frenos de carbono, la deceleración puede llegar a 5g, parando un monoplaza que rueda a 300km/h en menos de 4 segundos. Al reducir la resistencia al avance el consumo de gasolina disminuye, por lo que los equipos trabajan en ello para poder comenzar las carreras con menos kilos en sus depósitos. Una vez diseñado un F1, se varía el número de alas montadas en el alerón delantero o trasero y su perfil, para adecuarse a las necesidades de cada circuito. Así, en circuitos lentos y revirados como Mónaco se pueden ver alerones muy “cargados” con perfiles agresivos para aumentar el downforce, mientras que en circuitos de alta velocidad como Monza los coches reducen al máximo el ala para reducir la resistencia al avance y aumentar la velocidad en las largas rectas, siempre buscando la configuración más rápida a lo largo de toda la vuelta.

Esta llamada resistencia al estudiarse en dos dimensiones, se dividen en; resistencia por fricción y resistencia. La resistencia por fricción habla de la resistencia por características de flujo sobre una superficie y su fricción, mientras que la resistencia por forma representa la resistencia que ofrece un cuerpo por su geometría (ver figura 19).

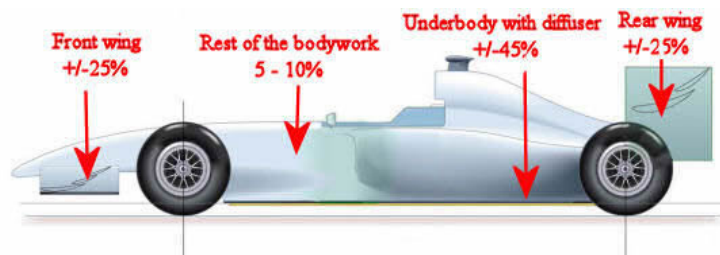


Figura 19. Relación porcentual de cargas experimentadas en un monoplaza de fórmula 1.

Fuente: formula1atmosphere (2018).

2.2.18. Eficiencia aerodinámica

La eficiencia aerodinámica es un concepto que permite saber qué coche tiene la mejor relación velocidad punta y velocidad en curva.

Si se comparan dos F1 distintos que llegan a la misma velocidad punta de 320 km/h en el mismo tiempo, pero uno es más rápido que otro significa que uno es más eficiente aerodinámicamente que el otro. Si los dos tienen la misma punta, pero uno corre más en las rectas que el otro significa que el que va más rápido en las curvas, y por lo tanto es más eficiente.

Se denomina eficiencia aerodinámica a la relación entre el coeficiente de sustentación y el coeficiente de resistencia aerodinámica (CL/CD o CZ/CX).

— (37)

2.2.19. Autodromo Nazionale di Monza

El Autódromo Nazionale di Monza es un autódromo situado en el parque de la villa real de Monza en las cercanías de Monza, región de Lombardía, Italia, unos 20 km al norte de la ciudad de Milán.

Apodado el templo de la velocidad, Monza es el prototipo de circuito rápido por excelencia. Rectas muy largas y numerosas salpicadas de chicanes hacen que lo más importante a la hora de afrontar este reto sea un coche con mucha velocidad punta y una sobresaliente capacidad de estabilidad en frenada y tracción.

Ello obliga a reducir al mínimo la carga aerodinámica del monoplaza para ser lo más rápido posible en las rectas, pero eso no significa que el coche no tenga que ser eficiente aerodinámicamente hablando, pues cuenta con dos curvas de alta velocidad en las que es importante aprovechar al máximo la poca carga aerodinámica de la que dispone el coche.

En la variante Ascari y en la Parabólica, el coche pasa mucho tiempo girando en apoyo y a mucha velocidad, por lo que un monoplaza que sea capaz de tener agarre sin penalizar en velocidad punta, será muy rápido en esa zona y tendrá mayor velocidad inicial en la recta principal (ver figura 20, 21, 22, 23 y 24).

Aerodinámica: carga aerodinámica baja. En 2016, que fue la sesión de clasificación más seca de los últimos años, la pole se consiguió con una velocidad media de 257km/h. Eso hace que Monza sea la vuelta más rápida de la temporada y, como consecuencia, el circuito con carga aerodinámica más baja. Con menos agarre aerodinámico, los coches son más inquietos de lo normal, sobre todo en la frenada.

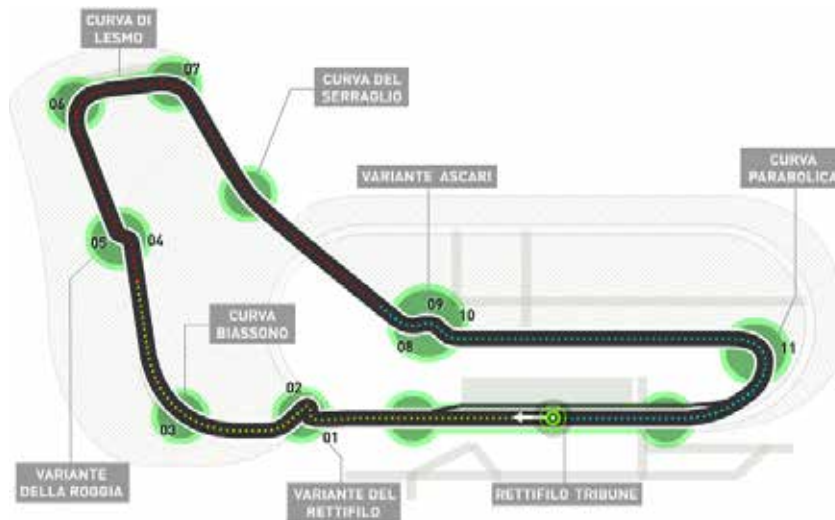


Figura 20. Secciones del Autodromo Nazionale di Monza.

Fuente: Motor.es (2013).

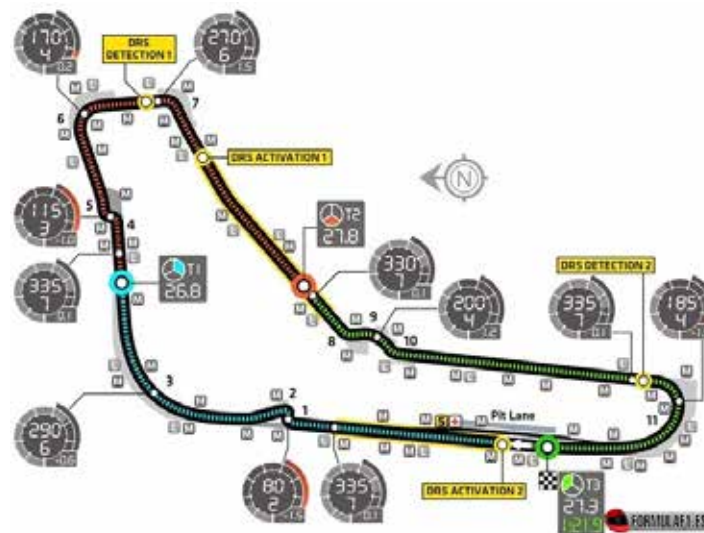


Figura 21. Esquematización de las velocidades promedio por sector del Autodromo Nazionale di Monza.

Fuente: Fórmula 1.es

Longitud: 5.793 metros.

Número de vueltas: 53.

Distancia de carrera: 306,720 km.

Altitud geográfica: 153,2 m.s.n.m.

Carga aerodinámica: Baja.

Velocidad máxima: 360 km/h (con DRS), 345 km/h (sin DRS).

Porcentaje de tiempo con el acelerador a fondo: 74% (alto).

Porcentaje de tiempo frenando: 11%.

Desgaste de frenos: Alto.

Pérdida de tiempo por vuelta por cada 10kg de combustible a bordo: 0,35 segundos (medio/alto).

Tiempo total necesario para cada parada en boxes: 25 segundos (alto).

Récord: 1:19.119 (Fórmula 1) Kimi Räikkönen Ferrari (2018).



Figura 22. Estados de avance del monoplaza de fórmula 1 en el sector 1 del Autodromo Naziona di Monza.

Fuente: @DPlazaV, @motorpuntos.



Figura 23. Estados de avance del monoplaza de fórmula 1 en el sector 2 del Autodromo Naziona di Monza.

Fuente: @DPlazaV, @motorpuntos.



Figura 24. Estados de avance del monoplaza de fórmula 1 en el sector 3 del Autodromo Naziona di Monza.

Fuente: @DPlazaV, @motorpuntos.

El comportamiento promedio de los perfiles de baja resistencia en competencia

Coeficiente de Arrastre	$C_d = 0,7$
Coeficiente de Sustentación	$C_l = 3,8$

Cuadro 1. Coeficiente de arrastre y sustentación promedio en Monza.

Fuente: formula1atmosphere.com

2.2.20. Niveles de aproximación numérica

El desarrollo de las técnicas numéricas y su aplicación a cualquier ciencia o tecnología han dado lugar al desarrollo y a la concienciación generalizada de uno de los conceptos básicos en ingeniería como es el de grado de aproximación. Esta idea es bastante clara si se considera que lo que se pretende con cualquier técnica numérica es conocer las variables físicas a partir de la resolución numérica de una serie de ecuaciones que gobiernan el fenómeno.

Se han de definir y establecer las distintas aproximaciones que introducen los métodos numéricos. En lo referente a la Mecánica de Fluidos, la primera aproximación que aparece es el planteamiento del modelo fisicomatemático que defina el comportamiento real de un determinado flujo. Dicho modelo matemático está habitualmente basado en la hipótesis del continuo, válida para la mayor parte de problemas industriales, pero que tiene sus limitaciones para casos extremos de flujos de gases. Una vez hecha esta salvedad, aplicando las leyes básicas de la física clásica se puede establecer una serie de ecuaciones diferenciales que gobiernan el comportamiento matemático de toda partícula fluida. La resolución exacta de dichas ecuaciones serviría para determinar completamente cualquier movimiento en el seno de un fluido. Se puede decir que un modelo matemático se define únicamente tras haber considerado el nivel de aproximación a la realidad requerido a la hora de obtener la exactitud deseada en el cálculo de una serie de variables dependientes. Desafortunadamente, debido a la complejidad de las ecuaciones diferenciales que aparecen, a la complejidad geométrica de los flujos, y a la complejidad de las condiciones de contorno iniciales, no resulta posible obtener soluciones analíticas de dichas ecuaciones de gobierno.

Establecidas las ecuaciones de gobierno resulta imprescindible introducir una segunda aproximación al problema. La forma clásica de abordarlo sería construir un modelo a escala reducida del flujo en cuestión y analizarlo experimentalmente en el laboratorio. La aproximación numérica implica introducir algunas hipótesis simplificadas que aproximen lo más posible los resultados finales a los que se

obtendrían si se pudiera calcular la solución exacta. Dichas hipótesis se dirigen habitualmente hacia la simplificación tanto de la geometría a estudiar como de las ecuaciones a resolver. Obviamente, al no disponerse de la solución analítica exacta resulta bastante complicado establecer de antemano qué hipótesis sirven y cuales son descartables y, por tanto, en cualquier simulación aplicada a la Mecánica de Fluidos, es preciso dedicar mucho esfuerzo al análisis de los resultados obtenidos antes de aceptarlos como válidos.

Una vez definidas las ecuaciones diferenciales simplificadas, aparece otro problema relacionado con el posible tratamiento que se pueda hacer de dichas ecuaciones usando técnicas computacionales. Por medio de los ordenadores resulta muy fácil resolver una ecuación o sistema de ecuaciones algebraico, sin embargo, las ecuaciones que estudian el movimiento de los fluidos son ecuaciones diferenciales no lineales. Resulta obligatorio realizar la transformación de las ecuaciones de forma que puedan ser resueltas por un ordenador. El paso de las ecuaciones diferenciales a sus equivalentes lineales constituye otro nivel de aproximación y normalmente recibe el nombre de discretización de las ecuaciones.

En cuanto a la geometría a estudiar, se debe señalar que la aproximación a la que debe someterse no sólo es de orden descriptivo respecto a su contorno, sino que además ha de establecerse la definición del espacio ocupado por el fluido. En este sentido, resulta imprescindible referir los puntos a un determinado sistema de coordenadas en los que se pretenderá resolver las ecuaciones para obtener soluciones de las variables deseadas. Aunque el campo fluido sea un continuo, no se puede pretender resolver las ecuaciones en todos los puntos de un determinado volumen, porque entonces se tendría un número enorme de ecuaciones a resolver. Por tanto, hay que elegir cierto conjunto de puntos en los que se resolverán las mencionadas ecuaciones y que serán los puntos dónde finalmente se conocerán los valores de las variables fluidas. La definición de estos puntos es lo que se denomina habitualmente discretización espacial del dominio (también se habla de generación del mallado). El proceso descrito no deja de ser otra

aproximación que se introduce en el cálculo y que define el nivel de aproximación espacial.

En el caso de tener ecuaciones que dependan de la variable tiempo (flujo no estacionario) es esencial la definición de un nivel de aproximación temporal. No es posible tampoco estudiar la evolución de las variables en el tiempo de forma continua. El nivel indicará la forma de modelizar la evolución real introduciendo lo que se denomina discretización temporal del sistema de ecuaciones. A partir de la solución calculada se podrá realizar un promediado temporal oportuno para estudiar ciertas características medias de flujo que dependan de la evolución de las variables con el tiempo.

Finalmente, se pueden manipular las ecuaciones eliminando ciertos términos cuya influencia en un determinado problema se considere despreciable. La conclusión de que algún término no afecta a la solución de un determinado flujo se debe alcanzar tras analizar detenidamente la sensibilidad del problema ante valores dispares de dicho término. Normalmente dicho estudio se hace tras dimensionar convenientemente las ecuaciones y realizar el correspondiente análisis de semejanza (técnicas asintóticas). Esta cuestión es de importancia capital en la Mecánica de Fluidos y está en el origen de cualquier estudio experimental. Desde el punto de vista numérico, la eliminación de algún término en las ecuaciones introduce lo que se denomina nivel de aproximación dinámico de las ecuaciones consideradas.

Resumiendo, desde el modelo matemático (ecuaciones diferenciales no lineales) que aproxima la realidad física en un medio continuo se llega a un número finito de ecuaciones algebraicas que eliminan algún término de las ecuaciones de partida y que aproximan la evolución temporal real que, tras resolver con técnicas apropiadas, proporcionan una aproximación al valor de las variables incógnita en los puntos elegidos como discretización espacial del dominio de cálculo. En definitiva, se establece un nivel de aproximación numérico límite por debajo del cual será imposible acercarse al valor real de las variables en los puntos elegidos. Sin embargo, desde un punto de vista ingenieril, el proceso descrito es perfectamente válido y ha significado

a lo largo de la evolución de las técnicas numéricas, la posibilidad de mejorar diseños y ahorrar mucho esfuerzo que de otra manera supondría trabas insalvables a la evolución de muchos sectores industriales. En la figura 25 se muestra gráficamente la panorámica explicada en este apartado.



Figura 25. Técnicas de aproximación numérica en mecánica de fluidos.

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide

2.2.21. Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Es la rama de mecánica de los fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos, las computadoras son utilizadas para simular la interacción de los líquidos y gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y ordenadores de alto rendimiento, solo se puede alcanzar resultados aproximados en muchos casos.

La incorporación de software aumenta la velocidad de cálculo como así disminuye también el margen de error, al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los fluidos turbulentos. La verificación de los datos obtenidos por CFD suele realizarse en túneles de viento u otros modelos físicos a escala, por ejemplo, prueba de vuelo.

La base fundamental de todos los problemas CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, que define muchos flujos de fluidos monofásicos (de gas o líquidos, pero no ambos). Estas ecuaciones pueden simplificarse eliminando los términos que describen acciones viscosas para producir las ecuaciones de Euler. Una mayor simplificación a eliminar los términos que describen la vorticidad arroja las ecuaciones de potencial

completo. Finalmente, para pequeñas perturbaciones en flujos subsónicos y supersónicos (no transónicos o hipersónicos), estas ecuaciones pueden linealizarse para producir las ecuaciones de potencial linealizadas. Se han desarrollado métodos bidimensionales (2D), utilizando transformaciones conformales de flujo alrededor de un cilindro hasta el flujo alrededor de un perfil aerodinámico.

La potencia de la computadora disponible estimuló el desarrollo de métodos tridimensionales. Probablemente, el primer trabajo que uso computadora para modelar el flujo de fluidos, como se rige por las ecuaciones de Navier-Stokes, se realizó en el Laboratorio Nacional Los Álamos, este grupo fue dirigido por Francis H. Harlow, quien es ampliamente considerado como uno de los pioneros de CFD. Este grupo entre los años 1957 y 1960 desarrolló una variedad de métodos numéricos para simular flujos bidimensionales transitorios, como el método particular en celda (Harlow, 1957) método de fluido en celda (Gentry, Martin y Daly 1966), método de la fundición de corriente de vorticidad (Jake Fromm, 1963) y método Marker-and-cell (Harlow y Welch, 1965). El método de la función de flujo de vorticidad de Fromm para flujos bidimensionales, transitorios e incompresibles fue el primer tratamiento de flujos incompresibles de fuerte contorsión en el mundo.

2.2.21.1 Generación del modelo 3D

La generación de un modelo tridimensional CAD de la geometría del dominio fluídico es el primer paso para una simulación en CFD. El sólido debe mantener la geometría inicial y las características y propiedades relevantes para capturar el flujo, se puede pasar por alto detalles que a nivel de fabricación serían esenciales, pero desde el punto de vista de los procesos físicos que ocurren se considera de nula importancia.

2.2.21.2 Métodos numéricos aplicados a mecánica de los fluidos

Las ecuaciones de Navier-Stokes reciben su nombre de Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes respectivamente. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor

de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.

Esta expresión representa el principio de conservación del momento lineal aplicada a un fluido general:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV = \int_V \rho \mathbf{f} dV + \int_S \rho \mathbf{v} \mathbf{n} dS \quad (38)$$

La ley de conservación de la masa se describe:

$$\frac{d}{dt} \int_V \rho dV = 0 \quad (39)$$

En un sistema de coordenadas cartesianas de la velocidad, \mathbf{F} el campo de aceleraciones creado por las fuerzas aplicadas sobre el cuerpo, como la gravedad, P la presión dinámica.

2.2.21.3 Métodos de elementos finitos (FEM)

El método de elementos finitos (FEM) se utiliza en el análisis estructural de sólidos, pero también es aplicable a fluidos. Sin embargo, la formulación FEM requiere cuidados especiales para garantizar una solución conservadora. La formulación FEM se ha adaptado para su uso con dinámica de fluidos que rige las ecuaciones. Aunque FEM debe formularse cuidadosamente para ser conservador, es mucho más estable que el enfoque de volumen finito. Sin embargo, FEM puede requerir más memoria y tiempos de solución más lentos que el método de volumen finito FVM.

Los métodos de elementos finitos son métodos numéricos para aproximar las soluciones de problemas matemáticos que generalmente se formulan para expresar con precisión una idea de algún aspecto de la realidad física. Un método de elementos finitos se caracteriza por una formulación variacional, una estrategia de discretización, uno o más algoritmos de solución y procedimientos de post-procesamiento. Existen varios algoritmos de solución numérica que se pueden clasificar en dos categorías amplias; solucionadores directos e iterativos. Estos algoritmos están diseñados para

explotar la escasez de matrices que dependen de las elecciones de formulación variacional y estrategia de discretización.

La estabilidad de la discretización seleccionada generalmente se establece de forma numérica en lugar de analíticamente como con problemas lineales simples. También se debe tener especial cuidado para garantizar que la discretización maneje las soluciones discontinuas con elegancia. Las ecuaciones de Euler y las ecuaciones de Navier-Stokes admiten choques y superficies de contacto.

2.2.21.4 Herramientas de diseño asistido por computadora CAD

Las herramientas CAD o CADD (diseño y dibujo asistido por computadora) permiten hacer uso de las tecnologías informáticas para el diseño y la documentación sobre diseño. El software de diseño reemplaza los dibujos a mano con procesos automatizados.

Si trabaja en los sectores de arquitectura, MEP o ingeniería estructural, es muy probable que haya usado programas CAD 2D o 3D. Estos programas pueden ayudarlo a explorar ideas de diseño, visualizar conceptos mediante renderizaciones fotorrealistas y simular el rendimiento de un diseño en el mundo real. El software AutoCAD fue el primer programa CAD, y sigue siendo la aplicación CAD más utilizada.

Esta herramienta facilita el diseño del perfil aerodinámico usado en el presente trabajo de investigación para mejor estética y otros métodos que ayudarán a la simulación.

2.2.21.5 Análisis de resultados por técnicas CFD

Regularmente, al análisis y post proceso de los resultados se le da una menor importancia de la que realmente tienen. Una vez resueltas las ecuaciones, se dispone de los valores de las variables que definen el problema en cada uno de los elementos de la malla. Si además el problema es no estacionario, se obtiene un conjunto de datos por cada paso de tiempo. Además de estos datos numéricos es posible obtener otra información como: geometría del dominio, gráficas vectoriales y de partículas, gráficas de superficies en 2D y 3D, trayectorias de partículas, animaciones de los resultados dinámicos. Los estudios responsables de arrojar estos datos pueden ser realizado por el software Qblade diseñado por alemanes específicamente para estudios de

aerodinámicos, haciendo el cálculo de los coeficientes prácticos y rápido al momento de realizar la simulación.

2.2.22. Método de solución numérica

Existen dos métodos fundamentales para el diseño y el análisis de sistemas en ingeniería relacionados con el flujo de fluidos: uno es la experimentación y otro es el cálculo. La experimentación, es basada mediante la construcción de modelos que son ensayados en instalaciones, mientras el segundo, el cálculo significa la resolución de ecuaciones diferenciales, estas ecuaciones se resuelven por métodos analíticos tradicionales o por métodos alternativos como se aplica a este trabajo, la cual es el método de volumen finito, en ambos métodos se puede hacer el uso de las herramientas computacionales para rapidez de cálculos.

Ambos métodos se complementan entre sí, por ejemplo, los ingenieros podrían obtener propiedades globales, como sustentación, fuerza de arrastre, caída de presión o potencia, experimentalmente; pero emplean la CFD para obtener detalles acerca del campo de flujo, como los esfuerzos de corte, velocidad y perfiles de presión y líneas de corriente. Además, los datos experimentales se emplean con frecuencia para validar soluciones de CFD al comparar cantidades globales determinadas de manera computacional y experimental. La CFD se emplea para reducir la cantidad necesaria de análisis experimental. Actualmente la dinámica de fluidos computacional puede manejar flujos laminares, pero los flujos turbulentos de interés práctico son difíciles de resolver sin tener que recurrir a los modelos de turbulencia. Por desgracia, ningún modelo de turbulencia es universal y una buena solución en CFD de flujo turbulento depende de que tan apropiado sea el modelo de turbulencia aplicado. A pesar de esta limitación, los modelos estándares producen resultados razonables para muchos problemas prácticos de ingeniería. Continuando con lo antes dicho, se tiene que el punto de partida de cualquier método numérico es el modelo matemático, la selección las ecuaciones diferenciales o integrales y las condiciones de borde. Se elige un modelo apropiado para la aplicación (flujos compresibles o incompresibles, turbulentos, de dos o tres dimensiones, etc.). Como ya dijimos, este modelo podría incluir simplificaciones

de las leyes de conservación. Un método de solución es designando un modelo para una ecuación en particular seleccionada.

2.2.23. Método de discretización

Después de seleccionar el modelo matemático, se tiene que elegir un método de discretización apropiado, un método de aproximación de las ecuaciones diferenciales por un sistema de ecuaciones algebraicas para las variables en estudio de localizaciones discontinuas en espacio y tiempo. Hay muchos enfoques, pero los más importante son: diferencia finita (FD), volumen finito (FV) y los métodos de elemento finito (FE). Cada método produce la misma solución si el mallado es muy refinado. Sin embargo, algunos métodos son más apropiados para alguna clase de problemas que otros. A menudo la preferencia es determinada por la actitud del desarrollador.

2.2.24. Mallado o discretización numérica

La generación de la malla donde se definen las celdas que es el punto de partida para el cálculo de las variables de flujo (velocidad y presión, etc.), en todo el dominio computacional. Los modernos paquetes comerciales de CFD vienen con sus propios generadores de malla y también están disponibles programas para generar mallas independientes.

Las ubicaciones discontinuas en las que las variables calculadas son definidas por la discretización numérica que es esencialmente una representación discontinua del dominio geométrico sobre el cual el problema será solucionado. Divide el dominio de solución en un número finito de subdominios (elementos, volúmenes de control, etc.). Algunas de las opciones disponibles son las siguientes:

2.2.24.1. Mallas estructuradas

Consta por celdas planas con cuatro lados (2D) o celdas volumétricas con seis caras (3D). Aunque la forma rectangular de las celdas podría estar distorsionada, cada celda se enumera de acuerdo con los índices (i, j, k) que no necesariamente corresponden a las coordenadas “x”, “y” y “z”.

A continuación, en la figura 26 se muestra un ejemplo de malla estructurada bidimensional con nueve nodos y ocho intervalos en el lado superior e inferior, y cinco

nodos y cuatro intervalos en los lados derecho e izquierdo. Se muestran los índices i y j . La celda sombreada está en $(i=4, j=3)$

El mallado estructurado o regular está constituido por familias de cuadrículas lineales con la propiedad de que miembros de una familia no cruzan con otras y cada miembro cruza con otra familia sólo una vez. Esto permite que las líneas de una selección en particular sean enumeradas consecutivamente. La posición de cualquier punto de la cuadrícula (o el volumen de control) dentro del dominio es excepcionalmente identificado para la selección de dos o tres dimensiones. Esta es la estructura de cuadrícula más simple, ya que es de manera lógica equivalente a una cuadrícula cartesiana. Cada punto tiene cuatro vecinos cercanos en dos dimensiones y seis en tres dimensiones; uno de los índices de cada vecino del punto p (i, j, k) es diferente por ± 1 del índice correspondiente de p . Un ejemplo de una cuadrícula de 2D estructurada es indicado la figura 27.

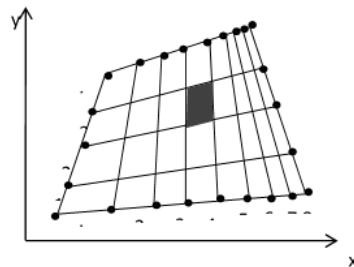


Figura 26. Malla estructurada.

Fuente: ANSYS CFX-SolverTheory Guide

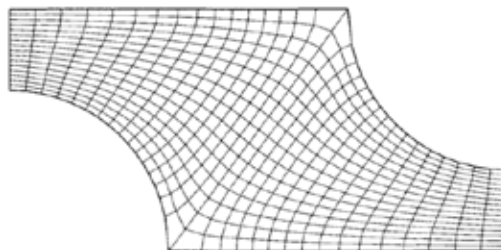


Figura 27. Cuadrícula estructurada en 2D.

Fuente: A. Pérez y C. Garre

Efectivamente, hay muchos solvers eficientes aplicables solamente a cuadrículas estructuradas. La desventaja de cuadrículas estructuradas es que pueden ser usadas solamente para dominios de solución geométrica simple. Otra desventaja es que podría ser difícil controlar la distribución de los puntos de la cuadrícula: la concentración de puntos en una región para razones de exactitud produce pequeños espacios innecesarios en otras partes del dominio solución y un desperdicio de recursos. Este problema es exagerado en los casos de 3D. Las celdas largas también podrían afectar la convergencia adversamente.

En las cuadrículas estructuradas en un bloque, hay dos (o más) niveles de subdivisión del dominio solución. Sobre el nivel rugoso, hay bloques en el que son relativamente grandes los segmentos del dominio; su estructura podría ser irregular y pueden o no ser superpuestos. Sobre el nivel (dentro de cada bloque) es definida una cuadrícula estructurada. El trato especial es necesario en las interfaces. En la figura 28 un mallado estructurado de bloque con combinación en las interfaces, es designado para el cálculo de la circulación del flujo en 2D alrededor de un canal cilíndrico y contiene tres bloques.

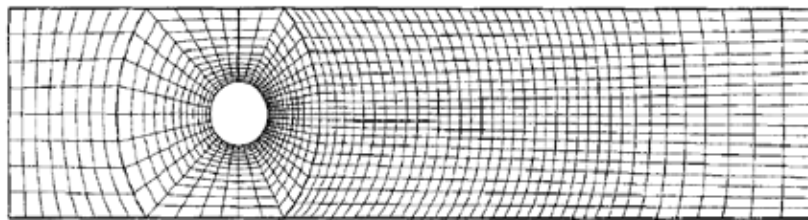


Figura 28. Mallado estructurado con interfaz ajustada.

Fuente: A. Pérez y C. Garre

En la figura 29 se presenta un mallado estructurado en bloque sin ajuste en la interfaz; usado para calcular la circulación alrededor de un hidrodenslizador sumergido (hydrofoil). Consta de cinco bloques de cuadrículas de diferentes tamaños. Esta clase de cuadrícula es más flexible que los previos, cuando admite el uso de cuadrículas más finas en las regiones donde es requerida una gran resolución. El no ajuste en las interfaces puede ser tratado de una manera completamente conservadora. La

programación es más difícil que para tipos de cuadrícula descritos antes. El Solver para mallas estructuradas puede ser aplicable como bloque, y los dominios de flujo complicados pueden ser tratados con estas cuadrículas. Es posible la refinación local del modo bloque (la cuadrícula puede ser refinada en algunos bloques).

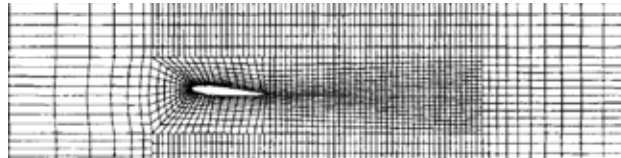


Figura 29. Mallado estructurado en bloque 2D sin interfaces ajustadas.

Fuente: A. Pérez y C. Garre

Las cuadrículas estructuradas con bloques con superposición se muestran en la figura 30. En la región de superposición, las condiciones de bordes para un bloque son obtenidas interpolando la solución del otro bloque (en superposición). La desventaja de estas cuadrículas es que las leyes de conservación no se hacen cumplir fácilmente en los límites del bloque. La ventaja de este enfoque es que los dominios complicados son arreglados con más facilidad y puede ser usado en los siguientes cuerpos móviles: un bloque es fijado al cuerpo y se mueve con él, mientras que una cuadrícula inactiva cubre los entornos.

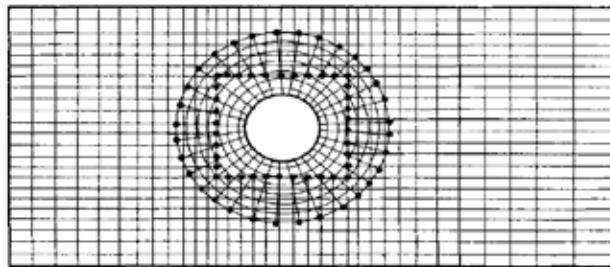


Figura 30. Mallado compuesto en 2D.

Fuente: A. Pérez y C. Garre

2.2.24.2 Cuadrículas (mallado) poco estructuradas

Consta de celdas de varias formas, comúnmente se emplean triángulos o cuadriláteros (2D) o tetraedros o hexaedros (3D). Se generan dos mallas no estructuradas para el mismo dominio que el de la figura 30, con la misma distribución

de intervalo en los lados. A diferencia de la malla estructurada, en la no estructurada, no puede identificarse a las celdas de manera única mediante los índices i y j , en cambio, las celdas se numeran internamente de alguna otra manera por el paquete de la CFD.

Para configuraciones geométricas complejas, por lo general, es más fácil para el usuario del paquete de generación de malla crear una no estructurada. Por ejemplo, algunos paquetes de CFD (usualmente antiguos) están escritos de manera específicas para mallas estructuradas, estos convergen con mayor rapidez y con mayor exactitud, por utilizar la identificación celdas por índices como se hace en caso de mallas estructuradas; los modernos paquetes de CFD de aplicación general ya no presentan este problema ya que pueden manejar mallas estructuradas y no estructuradas. Por lo que se generan menos celdas con una malla estructuradas que con una no estructurada.

En la figura 30 la malla estructurada de $8 \times 4 = 32$ celdas, mientras que la malla triangular no estructurada de la figura 31(a) tiene 76 celdas, y la malla cuadrilátera no estructurada de la figura 31(b) tiene 38 celdas, aun cuando se aplica la distribución de nodos en los lados de los tres casos.

A continuación, se presenta un ejemplo de malla no estructurada bidimensional con 9 nodos y 8 intervalos en los lados superior e inferior, y 5 nodos y 4 intervalos en los lados izquierdo y derecho. También la misma distribución de nodos que en la figura 31 (a) malla triangular no estructurada y (b) malla cuadrilátera no estructurada. La celda sombreada en (a) es levemente sesgada.

Útil para configuraciones muy complicadas, es el tipo de cuadrícula más flexible que puede ajustarse al límite de un dominio de solución arbitraria. En principio, tales cuadrículas podían ser usadas con cualquier plan de discretización, pero se adaptan mejor al volumen finito y aproximaciones a elemento finito. Los elementos o los volúmenes de control podrían tener cualquier forma; no hay una restricción sobre el número de elementos vecinos o nodos. En la práctica, las cuadrículas hechas de triángulos o cuadriláteros en 2D, y tetraedros o hexaedros en 3D son usados a menudo. Tales cuadrículas pueden ser generadas automáticamente por los algoritmos existentes.

Si se desea, la cuadrícula puede ser hecha de forma ortogonal, el radio de aspecto es fácilmente controlado, y la cuadrícula puede ser refinada fácilmente a nivel local. La ventaja de la flexibilidad es compensada por la desventaja de la irregularidad de la estructura de los datos. Las ubicaciones de los nodos y las conexiones vecinas necesitan ser especificadas explícitamente. Los “Solvers” para los sistemas de ecuaciones algebraicas son generalmente más lentos que para cuadrículas regulares.

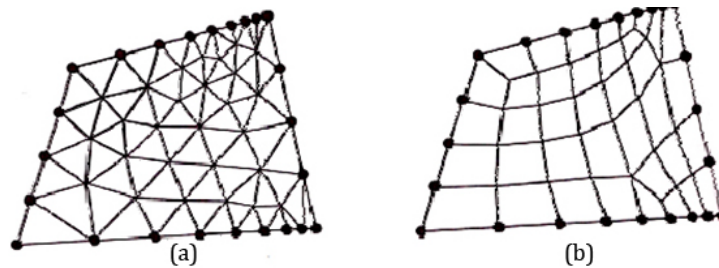


Figura 31. Malla no estructurada; (a) Malla triangular, (b) Malla cuadrilátera.

Fuente: A. Pérez y C. Garre

Las mallas poco estructuradas son usadas con métodos de elemento finitos, y cada vez más, con los métodos de volumen finitos. Los códigos de computación para cuadrículas poco estructuradas son más flexibles. No necesitan ser cambiados cuando la cuadrícula es refinada a nivel local, o cuando son usados los elementos o volúmenes de control de formas diferentes. Sin embargo, la generación del mallado y el pre-procesamiento son generalmente más difíciles. Un ejemplo de una cuadrícula poco estructurada se muestra en la figura 32.

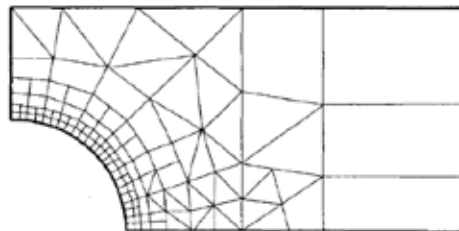


Figura 32. Ejemplo de mallado no estructurado en 2D.

Fuente: A. Pérez y C. Garre.

En las capas límite, donde las variables de flujo cambian con rapidez en la dirección normal de la pared y requieren de mallas de alta resolución en la cercanía de

ésta, las mallas estructuradas permiten una resolución mucho más fina que las no estructuradas para el mismo número de celdas. Las celdas de mallas estructuradas son más delgadas y están muy compactadas cerca del lado derecho a diferencia que las celdas de mallas no estructuradas.

2.3. Bases Legales

2.3.1. Reglamento FIA para la Temporada 2019 en Aerodinámica de Alerones Delanteros.

Uno de los objetivos clave de la FIA es fomentar e implementar la adopción de regulaciones comunes para todas las formas de deportes de motor y series en todo el mundo. Para la temporada 2019 de categoría fórmula uno, se establecieron las siguientes especificaciones en cuanto a alerón delantero se refiere:

Material alerones delanteros de fórmula 1: fibra de carbono, debido a enorme resistencia y a su ligereza.²

Dimensiones:

Datos importantes en el reglamento:

Solo pueden tener un máximo de 5 flaps por lado.

No tener más de 5mm de espesor en punta de ataque del perfil. Se permitirá un radio de filete no mayor a 2mm.

Alerón delantero como una sola pieza podrá tener máximo 15 grados de caída.

Uso máximo de hasta 2 fence's en el alerón delantero.

Estas características se establecen de la siguiente manera en el manual de regulaciones técnicas de la fórmula uno de la FIA para la temporada de 2019:

2.3.1.1. Regulación Técnica 3.3.3 Dimensiones Generales:

Toda la carrocería situada delante de un punto situado a 330 mm detrás de la línea central de la rueda delantera, y a más de 250 mm del plano central del vehículo, no debe ser inferior a 75 mm ni superior a 300 mm por encima del plano de referencia. Cuando se ve desde arriba, esta carrocería debe estar dentro del área delimitada por la intersección de cuatro líneas:

a) Una línea diagonal desde un punto 1225 mm hacia delante de la línea central de la rueda delantera y en el plano central del vehículo hasta un punto a 1025 mm delante de la Rueda delantera de la línea central y 1000 mm desde el plano del centro del coche.

b) Una línea longitudinal paralela y 1000 mm desde el plano del centro del vehículo.

c) Una línea diagonal desde un punto a 650 mm por delante de la línea central de la rueda delantera y en el plano central del automóvil hasta un punto de 450 mm por delante de la línea central de la rueda delantera y 1000 mm desde el plano central del automóvil.

d) Una línea longitudinal paralela y 250 mm desde el plano del centro del vehículo.

2.3.1.2. Regulación Técnica 3.3.4 Definición de Componentes

En el costado del automóvil, el volumen descrito en el Artículo 3.3.3 solo puede contener los siguiente componentes:

- a) La placa terminal del alerón delantero definida en el Artículo 3.3.5.
- b) Los perfiles del alerón delantero definidos en el artículo 3.3.6.
- c) Un máximo de dos deformaciones del alerón delantero como se define en el Artículo 3.3.8.
- d) Los componentes auxiliares del alerón delantero definidos en el Artículo 3.3.9.

2.3.1.3. Regulación Técnica 3.3.5 Placa Frontal del Alerón Delantero

Una superficie matemática (denominada "superficie de la placa terminal virtual") debe construirse para definir posteriormente la placa de extremo.

La superficie de la placa terminal virtual debe:

- a) Recuéstese entre 910 mm y 950 mm desde el plano del centro del automóvil.
- b) Extender hacia adelante, hacia atrás, hacia arriba y hacia abajo de manera que se intersecte las superficies delimitadoras hacia adelante, hacia abajo, hacia

arriba y hacia abajo del volumen definido en el Artículo 3.3.3 sobre toda su longitud y altura.

c) En su lugar, tenga una normal que subtenda un ángulo mayor que 15° a un eje normal al plano centro del coche.

d) Produce una sola curva continua, que es completamente visible desde la vista lateral, cuando se intersecta con cualquier plano lateral vertical u horizontal.

La placa frontal del alerón delantero se define como la carrocería creada por la unión de dos volúmenes. El primer volumen de este tipo:

e) Debe cubrir completamente un mínimo del 95% de la superficie de la placa de extremo virtual.

f) Por encima de su avance 150 mm, medido en la dirección longitudinal, no debe en ninguna parte distante a más de 10 mm de la superficie de la placa terminal virtual, mientras que en el resto de su superficie el volumen en ninguna parte debe estar a más de 6 mm de distancia de la superficie de la placa terminal virtual.

g) Es un volumen único que no contiene aberturas y ninguna intersección con cualquier lateral o el plano horizontal solo puede producir una sola sección cerrada. El segundo de tales volúmenes:

h) No debe tener ninguna parte que esté a más de 30 mm de la superficie de la placa terminal virtual hacia el centro del coche plano. Cualquier parte de la superficie de la placa terminal virtual debe estar en su totalidad entre 75 mm y 85 mm por encima del plano de referencia.

i) Se encuentra en su totalidad entre 75 mm y 110 mm desde el plano de referencia.

j) Es un volumen único que no contiene aberturas ni ranuras.

k) Cuando se ve desde abajo, tiene un límite que no contiene ningún local externo radio de curvatura cóncavo menor a 200mm.

Una vez que se hayan definido los dos volúmenes, se permitirá un radio de empalme de hasta 5 mm donde se entrecruzan. Cualquier sección transversal del

volumen unificado con un plano vertical lateral debe contener solo una única sección cerrada.

Con el fin de evitar daños a otros automóviles, la placa completa, con la excepción de las partes del segundo volumen de la superficie de la placa terminal virtual deben ser de al menos 10 mm grueso (siendo la distancia mínima cuando se mide a la superficie en cualquier dirección) con un radio de 5 mm aplicado a todas las extremidades.

Además, los 50 mm principales de esta carrocería deben ser de un laminado prescrito, detalles de este laminado se encuentra en el Apéndice del Reglamento Técnico.

2.3.1.4. Regulación Técnica 3.3.6 Perfiles del Alerón Delantero

Los perfiles del alerón delantero se definen como la carrocería que está contenida en el volumen que se extiende de 250 mm a 950 mm desde el plano del centro del vehículo y dentro del volumen definido en el artículo 3.3.3. Deben cumplir los siguientes criterios:

a) Cualquier intersección de estos perfiles con cualquier plano vertical longitudinal no puede contener más de cinco secciones cerradas, cada una de las cuales no puede contener un radio cóncavo de curvatura inferior a 50mm.

b) 400 mm desde el centro del plano del coche.

i) El punto más posterior de una sección cerrada debe ser visible cuando se ve desde la parte anterior.

ii) Con la excepción de la sección cerrada posterior, el punto más posterior de cada sección cerrada que no debe ser visible cuando se ve desde arriba.

iii) La normal a cualquier punto de la superficie de los perfiles no debe subtender un ángulo mayor 15° a un plano vertical que es normal a la línea diagonal descrita en

Artículo 3.3.3 (a).

c) Fuera de un avión que se encuentra a 400 mm del plano del centro del automóvil a la distancia mínima entre las secciones adyacentes en cualquier

plano vertical longitudinal debe estar entre 5 mm y 15mm en su posición más cercana.

Una vez que el perfil más posterior se ha definido como una sola pestaña de ajuste de tipo camilla, se puede ajustar el borde posterior siempre que no haya una dimensión en una sección longitudinal vertical supera los 10 mm. Esta parte debe cumplir con las restricciones del Artículo 3.3.6 (b) (iii), con la excepción de 10 mm más alejados (medidos en una dirección normal al plano del centro del automóvil) donde estas las restricciones no se aplican. Para mayor claridad, las camillas que se superponen con el ajustable y no será considerado como un solo camilla, siempre que cumplan con todos los criterios anteriores en la posición de diseño de los perfiles. Excepciones mínimas a los criterios geométricos anteriores.

Secciones transversales longitudinales consecutivas con un número diferente de perfiles individuales fuera de un plano longitudinal que se encuentra a 400 mm del plano del centro del vehículo, tales cambios pueden solo por seccion de bifurcacion cerrada y el método de construcción de esta transición se detalla a continuación.

El área de transición estará definida por dos planos verticales, que son paralelos entre sí, separados hasta 20 mm, y forman un ángulo de no más de 20 ° con respecto al plano central del vehículo. Dentro de esta area:

d) La superficie del perfil interior (único) debe definirse en el intervalo completo de la transición zona en pleno cumplimiento del artículo 3.3.6.

e) Las superficies del perfil externo (dos o más) deben definirse en el intervalo completo de la zona de transición en pleno cumplimiento del artículo 3.3.6. superficie, y compartir el mismo acorde general.

f) Una vez que se han definido las superficies del perfil interior y exterior, las superficies de fusión debe definirse para unir los perfiles. Estas superficies deben estar dentro del volumen del perfil interior simple, de la superficie, y completamente dentro del volumen de transición una vez que se han definido

estas superficies de transición mínimas, las superficies originales superpuestas de los perfiles interior y exterior deben recortarse en consecuencia.

Una vez que se definieron los perfiles del alerón delantero, estos deben ser recortados por la placa de extremo virtual superficie definida en el Artículo 3.3.5, y la parte de los perfiles del alerón delantero fuera de ese. La superficie debe ser desechada. Donde los perfiles del alerón delantero intersectan la placa de extremo del alerón se puede aplicar un radio máximo de filete de 10 mm.

2.3.1.5. Regulación Técnica 3.3.7 Ajustabilidad del Alerón Delantero

Una vez que los perfiles del ala frontal hasta cuatro de los perfiles más posteriores, pueden ser ajustables para recortar el frente del ala aerodinámica de carga. Para este propósito:

a) Las partes de los perfiles del alerón delantero que se incluyen dentro de la parte ajustable no deben tener grados de libertad entre ellos.

b) El ajuste solo puede ser por rotación alrededor de un eje fijo. En vista en planta, este eje no debe subtender un ángulo superior a 20 grados con respecto a la línea diagonal descrita en el Artículo 3.3.3 (a), y en vista frontal, no debe subtender un ángulo mayor que 15 grados al plano horizontal. Para la extensión completa del perfil externo de un avión que se encuentra a 400 mm desde el plano central del vehículo, y en cualquier plano vertical longitudinal, este eje debe estar entre dos líneas verticales, una que pasa a través del punto más adelantado de la parte ajustable de los perfiles en esa sección, y otro 30mm detrás de la primera línea.

c) La unión entre las partes ajustables y no ajustables de los perfiles debe ser definida por una o dos superficies del eje fijo de rotación definido en 3.3.7 b. Además, cualquier superficie normal de revolución no puede subtender un ángulo mayor que 55° a una línea que es normal al plano del centro del automóvil. Estas superficies de la revolución también debe incluir la superficie de la placa terminal virtual definida en el Artículo 3.3.5.

d) La posición original de estos perfiles (según se define en el Artículo 3.3.6) debe ser incluido dentro del rango general de ajuste. Además, la desviación máxima para cualquier punto de estos perfiles entre el ángulo de ajuste superior e inferior no debe superar los 35mm.

e) El artículo 3.3.6 para los perfiles de ala podrá ser hecho en la unión entre las partes ajustables y no ajustables, para garantizar el nivel necesario de sellado. Dichas partes deben estar dentro de 3 mm de una de las dos superficies de revolución y su tamaño máximo deben ser la cantidad mínima necesaria requerida para lograr una superposición de 20 mm entre partes ajustables y no ajustables de los perfiles en toda la gama de movimiento. Para evitar dudas, el ajuste permitido bajo este el coche está parado y de acuerdo con la Fórmula 1 Sporting Regulations. Además, cualquier variación de incidencia mantiene el cumplimiento de toda los reglamentos de carrocería, con excepción de los Artículos 3.3.6 (a) y 3.3.6 (b).

2.3.1.6. Regulación Técnica 3.3.8 Rayas Delanteras

Las correas se pueden construir una vez que se hayan definido los perfiles del alerón delantero. Para cada golpe, una primera línea virtual debe definirse primero, que debe:

- a) Estar conectado a la parte no ajustable de los perfiles del alerón delantero.
- b) Recuéstese en su totalidad entre dos planos longitudinales verticales, separados 20 mm, y entre 500 mm y 800 mm desde el plano del centro del coche.
- c) Recuéstese totalmente entre 75 mm y 150 mm desde el plano de referencia.
- d) No más cerca de 50 mm en cualquier punto a la otra superficie virtual.
- e) En su lugar, tenga una normal que subtenda un ángulo mayor que 10° a un eje normal al plano centro del coche.
- f) No debe contener más de una curva cuando se interseca con cualquier plano lateral vertical u horizontal. En vista lateral, ninguna parte de la superficie virtual puede obstruirse ninguna otra parte del mismo. Una vez que se ha definido el golpe virtual, el mismo debe:

- g) Encierre completamente toda la superficie de la banda virtual.
- h) En ninguna parte se encuentra verticalmente sobre la superficie de los perfiles del alerón delantero definidos en el Artículo 3.3.6.
- i) Estar a más de 6 mm de la superficie virtual, excepto la parte más trasera 100 mm (medido en la dirección longitudinal), donde esta distancia máxima debe exceder de 3mm.

Una vez que se haya definido el volumen de corte real, se permitirá un radio de empalme de hasta 5 mm donde este volumen de cortes se interseca con los perfiles individuales descritos en el Artículo 3.3.6.

2.3.1.7. Regulaciones Técnicas 3.3.9 Componentes Auxiliares del Alerón Delantero.

Los siguientes componentes se añadirán a la carrocería definida en los artículos 3.3.5, 3.3.6 y 3.3.8 por razones principalmente mecánicas, estructurales o de medición:

- a) Dos corchetes que definen el eje de giro del lado frontal. Perfil, y permitir el movimiento necesario. Estos soportes deben:
 - Estar en su totalidad dentro de 40 mm desde la parte fija y la ajustable. De los perfiles en toda la gama de ajuste.
 - No tener más de 5mm de espesor. Se permitirá un radio de filete no mayor a 2mm.

donde estos soportes se unen a los dos perfiles

 - No tienen una dimensión superior a 80mm.
- b) Hasta dieciséis (en total, por lado) soportes de separador de espacio de ranura que se conectan consecutivamente Perfiles de alerón delantero. Estos soportes deben:
 - Estar en su totalidad dentro de 30 mm desde los dos perfiles que soportan en relación entre sí.
 - No tener más de 5mm de espesor. Se permitirá un radio de filete no mayor a 2mm donde estos soportes se unen a los dos perfiles
 - No tienen una dimensión superior a 60mm.

c) Mecanismo con o sin carenado para contener.

los perfiles del alerón delantero, tal como se definen en el Artículo 3.3.7. Este mecanismo y carenado deben encajar dentro de un cuboide de 25 mm de ancho, 60 mm de largo y 60 mm de alto. Este cuboide puede tener una orientación libre en el espacio, pero debe cruzar tanto la estacionaria como el perfil ajustable para toda la gama de ajuste.

d) Un carenado que contiene un solo sensor de temperatura de neumático. Todo el carenado y sensor, debe:

- encaja en la unión entre dos volúmenes, un cuboide de 15 mm de ancho y 60 mm de largo y 50 mm de alto y un cilindro circular que tiene un diámetro de 30 mm y una altura de 60mm. El eje del cilindro debe coincidir con el eje mayor de una de las caras de 15mm x 60mm del cuboide.

- Sea simétrico respecto a un plano paralelo a las caras de 50 mm x 60 mm de los cuboides, y - intersectan los perfiles definidos en el Artículo 3.3.6 o la placa de extremo definida en el Artículo 3.3.5. Se permitirá un filete de radio no mayor de 5 mm a lo largo de la periferia de esta intersección.

Además, todos los componentes enumerados anteriormente deben ser visibles desde abajo, con la parte frontal placas laterales de ala definidas en el Artículo 3.3.5 y las franjas de ala delantera definidas en el Artículo 3.3.8 eliminado, y debe estar en la superficie de la placa terminal virtual definida en el Artículo 3.3.5.

En caso de que sea necesario agregar algún componente adicional, el equipo debe escribir específicamente a la FIA con una explicación, diseño y efecto aerodinámico calculado, con el fin de obtener la aprobación. Dicha comunicación se distribuirá a los equipos rivales si se considera que cubren un nuevo aspecto que anteriormente no había sido considerado.

2.4 Definición de términos

Monoplaza

Automóvil de competición con una sola plaza para el piloto.

Aerodinámica

Parte de la mecánica que estudia el movimiento de los gases sobre los cuerpos estacionados y el comportamiento de los cuerpos que se mueven en el aire.

Mecánica de los fluidos

Es la rama de la física comprendida dentro de la mecánica de medios continuos que estudia el movimiento de los fluidos, así como las fuerzas que lo provocan.

Flujo laminar

Movimiento de un fluido cuando éste es ordenado, estratificado, suave. En un **flujo laminar** el fluido se mueve en láminas paralelas sin entremezclarse y cada partícula de fluido sigue una trayectoria suave, llamada línea de corriente.

Flujo turbulento

En mecánica de fluidos, se llama **flujo turbulento** al movimiento de un fluido que se da en forma caótica, en que las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños remolinos periódicos.

Zona de transición

Zona que delimita entre el flujo laminar y flujo turbulento, en la cual se manejan propiedades de estudio que no se aplican en los dos casos mencionados.

Presión

Magnitud física que mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular por unidad de superficie. Fuerza que ejerce un gas, un líquido o un sólido sobre una superficie.

Temperatura

Magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

Velocidad punta

Magnitud escalar relacionada con la energía interna de un sistema termodinámico, definida por el principio cero de la termodinámica.

Densidad

Magnitud escalar referida a la cantidad de masa en un determinado volumen de una sustancia o un objeto sólido.

Volumen de control

Es un volumen del espacio que aislamos a través de superficies reales o imaginarias para someterlo a estudio.

Diseño Asistido por Computadora (CAD)

Amplio rango de herramientas computacionales que asisten a ingenieros, arquitectos y a otros profesionales del diseño en sus respectivas actividades.

Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

La metodología, hace referencia al conjunto de procedimientos racionales utilizados para alcanzar el objetivo o la gama de objetivos que rige una investigación científica, una exposición doctrinal o tareas que requieran habilidades, conocimientos o cuidados específicos.

Para Hernández (2006) los estudios cuantitativos siguen un patrón predecible y estructurando el proceso. En una investigación cuantitativa se pretende explicar y predecir los fenómenos investigados, buscando regularidades y relaciones causales entre elementos. (p. 18)

Así mismo Arias (2006) explica el marco metodológico como el “Conjunto de pasos, técnicas y procedimientos que se emplean para formular y resolver problemas” (p.16). Este método se basa en la formulación de hipótesis las cuales pueden ser confirmadas o descartadas por medio de investigaciones relacionadas al problema.

Por ende, en el presente capítulo se realizará la debida descripción de cada uno de los pasos y la metodología en general llevada a cabo en la investigación, especificando tópicos tales como; el enfoque de la investigación, el tipo de investigación, nivel de la investigación, diseño de la investigación, fases de la investigación, población y muestra, y técnicas e instrumentos de recolección de datos.

3.1. Tipo de Investigación

Para la determinación del tipo de investigación, se toma en cuenta que la misma se basa en el análisis del comportamiento del entorno circundante de un cuerpo o elemento de estudio determinado, para la realización del estudio se obtienen diversos datos que permiten caracterizar la reacción del objetivo, de esta forma, permitir proseguir con el análisis de los mismos, resaltando que “El propósito del análisis es aplicar un conjunto de estrategias y técnicas que le permiten al investigador obtener el conocimiento que estaba buscando, a partir del adecuado tratamiento de los datos recogidos.” (Hurtado, 2000:181).

Además, por su parte, según Tamayo y Tamayo M. (Pág. 35), en su libro *Proceso de Investigación Científica*, la investigación descriptiva “comprende la descripción, registro, análisis e interpretación de la naturaleza actual, y la composición o proceso de los fenómenos. El enfoque se hace sobre conclusiones dominantes o sobre grupo de personas, grupo o cosas, se conduce o funciona en presente” Al haber expuesto lo expresado por Tamayo y Tamayo M, se evidencia que la investigación llevada a cabo se identifica como una investigación descriptiva.

Debido a los conceptos expuestos anteriormente, se establece que la investigación es de carácter analítico-descriptiva, la cual, de acuerdo con Hurtado (2000), este tipo de investigación “tiene como objetivo analizar un evento y comprenderlo en términos de sus aspectos más evidentes (...) propicia el estudio y la comprensión más profunda del evento en estudio” (p.269).

3.2. Nivel de la Investigación

El nivel de una investigación es determinado por la hondura y trascendencia que se pretende con la misma, por lo que presenta una estrecha relación con la problemática y objetivos planteados. De esta manera, la investigación basada en el diseño del alerón delantero de un monoplaza de fórmula uno bajo las condiciones del Autodromo Nazionale di Monza, se discurre como una investigación de nivel descriptivo, debido a que su objetivo es estudiar las variables que determinan un determinado comportamiento aerodinámico y las características que permiten la adecuación de dicho alerón delantero a las condiciones del espacio planteado.

Respecto a este tópico, Sabino (1986) expresa “Mediante este tipo de investigación, que utiliza el método de análisis, se logra caracterizar un objeto de estudio o una situación concreta, señalar sus características y propiedades. Combinada con ciertos criterios de clasificación sirve para ordenar, agrupar o sistematizar los objetos involucrados en el trabajo indagatorio. Al igual que la investigación que hemos descrito anteriormente, puede servir de base para investigaciones que requieran un mayor nivel de profundidad”. Logrando de esta manera obtener una noción básica de los lineamientos a seguir en el transcurso de la investigación.

3.3. Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación permitirá de una manera concisa y clara dar los pasos necesarios en los cuales se realizará la investigación. Según Sabino (2000) su objeto es proporcionar un modelo de verificación que permita contrastar hechos con teorías, y su forma es la de una estrategia o plan general que determina las operaciones necesarias para hacerla. (p.91). Establece que: El diseño de la investigación se refiere a la manera, como se dará respuesta a las interrogantes formuladas en la investigación. Por supuesto que estas maneras están relacionadas con la definición de estrategias a seguir en la búsqueda de soluciones al problema planteado.

No obstante, el diseño de la investigación está accedido por varios tipos pero según Bavaresco (2006), los más recomendados son los diseños bibliográficos y de campo, siendo este último experimental, postfacto, encuesta, panel y el estudio de casos. Pero a su vez antes de determinar el diseño correspondiente de la presente investigación se debe tener presente que Tamayo (2007, p.110), argumenta “cuando los datos se recogen directamente de la realidad, por lo cual se denomina primarios, su valor radica en que permiten cerciorarse de las verdaderas condiciones en que se han obtenido los datos”.

Al tener en cuenta las últimas premisas se determina que la presente investigación posee como datos primarios aquellos recolectados de forma experimental, siendo este el estudio llevado por medio de las técnicas de CFD, pero adicionalmente también posee datos secundarios los cuales son obtenidos por forma bibliográfica, los cuales son aquellos provistos por estudios previamente realizados a alerones de vehículos de competición que son utilizados como punto de comparación en la investigación. Debido a esto se estableció el diseño de la investigación como uno de campo apoyado en investigaciones documentales, permitiendo de esta forma la comparación de datos obtenidos cada uno por un diseño diferente, así como la comparación con datos experimentales, registrados en carreras llevadas a cabo en el autódromo mencionado.

3.4. Población y Muestra

En la presente investigación no existe la necesidad de establecer población y muestra, ya que se fundamenta bajo parámetros obtenidos debido a medios bibliográficos y procedimientos puntuales durante la simulación experimental, para una posterior comparación de los datos resultantes con los datos que se han registrado en el autódromo en el que se basa la investigación, y finalmente dictar las conclusiones pertinentes.

3.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

Es de suma importancia destacar que la información congrega aspectos relacionados con el compromiso de la obtención, análisis y presentación de la información, por lo cual serán utilizadas diferentes técnicas en la recolección de datos para la presentación de la investigación.

Según Méndez (1999, p.143) las fuentes y técnicas para recolección de la información son los hechos o documentos a los que acude el investigador y que le permiten tener información. También señala que las técnicas son los medios empleados para recolectar información, además manifiesta que existen: fuentes primarias y fuentes secundarias. Las fuentes primarias es la información oral o escrita que es recopilada directamente por el investigador a través de relatos o escritos transmitidos por los participantes en un suceso o acontecimiento, mientras que las fuentes secundarias es la información escrita que ha sido recopilada y transcrita por personas que han recibido tal información a través de otras fuentes escritas o por un participante en un suceso o acontecimiento.

De esta manera, una de las técnicas e instrumento de recolección de datos es la revisión de documentos, de lo cual Baena (1985) considera que “La investigación documental es una técnica que consiste en la selección y recopilación de información por medio de la lectura y crítica de documentos y materiales bibliográficos, de bibliotecas, hemerotecas, centros de documentación e información”. Destacando que la revisión de documentos la técnica más utilizada en la presente investigación debido

a que por medio de ella se identificó la información necesaria para el cumplimiento paulatino de los objetivos planteados.

Los recursos bibliográficos revisados abarcaran desde publicaciones científicas en el área de la mecánica de fluidos, textos, artículos en revistas, investigaciones particulares, trabajos de grado, páginas web, cursos y tutoriales acerca del manejo del softwares como lo son SolidWorks, Autodesk Flow Design y SimScale Workbench. También se estudiarán publicaciones a cerca de la historia de los alerones delanteros en la fórmula 1, y de su funcionamiento técnico en autodromos con características similares al Autodromo Nazionale di Monza, permitiendo así una mejor comprensión sobre el sistema. Aunque la investigación bibliográfica es la más utilizada, los datos primordiales para la realización de la investigación serán el resultado de la investigación experimental la cual fue provista por medio de la simulación en los programas SimScale Workbench o ANSYS Workbench, dichos softwares permitirán sustituir la experimentación física en un laboratorio por una virtual arrojando resultados confiables y precisos.

3.6. Fases de la Investigación

Al igual que en la totalidad de proyectos de envergadura, la presente investigación será desarrollada al ser dividida en una serie de fases, las cuales presentan correlación con los objetivos planteados, permitiendo realizar un objetivo de carácter macro a través de la realización de múltiples objetivos de carácter micro. Esta manera de realizar la investigación brinda al investigador la posibilidad de avanzar paulatinamente, administrando eficientemente los recursos, como son el tiempo y esfuerzo invertido en la misma.

Fase I: Identificación de las variables que influyen en el diseño del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1

En esta primera fase se debe realizar la búsqueda de información correspondiente a las condiciones que demanada el autodromo que forma parte del estudio, así como los diferentes tipos de perfiles aerodinámicos que corresponden a las regulaciones técnicas impuestas por la FIA para la temporada del año 2019, además las variables

que determinan las condiciones aerodinámicas del paso del monoplaça de fórmula 1 al recorrer el autódromo, por lo que no se descarta un diseño propio de perfil aerodinámico. Es necesario indagar información de características de diferentes alerones delanteros implementados por distintas escuderías de la fórmula uno, los cuales pueden visualizarse en páginas web y tener en cuenta datos post-carrera de competencias anteriores. En esta primera fase de la investigación se hace uso de una de las herramientas mencionadas anteriormente, siendo esta la de investigación bibliográfica, toda la información recopilada en esta etapa es obtenida de estudios previamente realizados, catalogados y estandarizados.

Fase II: Modelado mediante una herramienta CAD el alerón delantero en estudio. En esta segunda fase se buscará realizar la modelación virtual del alerón delantero en estudio, con cada una de sus características. La modelación virtual del objeto se llevará a cabo por medio de un software CAD siendo sus siglas en inglés Computer-Aided Design (Diseño Asistido por Computadora). Esta modelación puede ser realizada en una gran variedad de programas, sin embargo, para objetos de la investigación se mantienen en consideración los siguientes programas; uno de los softwares de mayor preferencia es SolidWorks el cual es un software para modelado mecánico en 2D y 3D, este programa posee una gran confiabilidad debido a su tiempo en existencia y su alto impacto comercial, permitiendo al usuario realizar la modelación necesaria sin inconvenientes. La segunda opción es el programa QBlade el cual es un software de plataforma abierta que permite al usuario el diseño de superficies aerodinámicas de forma personalizada, este programa es especializado en el área mecánica de fluidos y en los elementos que trabajan con este entorno. Es un programa con poco tiempo en el mercado por lo que el conocimiento sobre su uso es escaso. Como tercera opción para el diseño virtual del objeto se tiene el programa ANSYS Workbench el cual es un software de simulación ingenieril que trabaja bajo la teoría de elemento finito, este programa permite al usuario además de simular, diseñar el elemento al que se le aplicara la simulación. Es un software de gran regularidad en el tiempo, por lo que es muy comercial en el área de ingeniería.

Fase III: Simulación bajo condiciones aerodinámicas del alerón delantero en estudio usando dinámica de fluidos computacional.

En esta fase entra en juego la utilización de las técnicas de CFD siendo sus siglas en inglés Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional), esta es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver problemas sobre el flujo de los fluidos. En otras palabras, en esta fase permitirá realizar el estudio de del alerón delantero modelado por medio de la simulación del flujo alrededor del mismo, estableciendo valores de las variables que influyen en el estudio, adaptándolas a los valores presentados en competiciones anteriores llevadas a cabo en el Autodromo Nazionale di Monza en la categoría de fórmula 1. Para realizar la simulación necesaria se debe seleccionar el programa que cuente con las herramientas de CFD, existe una gran variedad de estos programas, pero para efectos de la presente investigación se sugieren los siguientes; SimScale Workbench, Aurtodesk Flow Design y ANSYS Workbench, softwares descritos previamente en la fase II.

Fase IV: Evaluación de los resultados en función de las características funcionales registradas para las condiciones de operación .

En esta fase se buscará la presentación clara y concisa de los datos obtenidos en el paso anterior, esta presentación permitirá evaluar por medio de comparación los datos obtenidos de forma experimental con aquellos recopilados bibliográficamente dando así una conclusión sobre ellos. Los datos para ser evaluados de forma directa y sencilla serán representados en tablas o gráficas que faciliten su lectura y comprensión, por consiguiente, su evaluación se verá libre de dificultad y distracciones, permitiendo de esta manera comprobar la factibilidad y desempeño del diseño llevado a cabo.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En el presente capítulo se efectuará el desarrollo de las fases metodológicas establecidas en el capítulo III de la investigación, de esta manera, cumplir los objetivos relacionados al diseño alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1 bajo las condiciones del Autodromo Nazionale di Monza mediante el análisis numérico del campo de flujo del mismo.

4.1 Identificación de las variables que influyen en el diseño del alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1.

Debido a que el análisis del campo de flujo del alerón delantero está siendo analizado bajo condiciones específicas, se deben expresar de manera clara y concisa el conjunto de variables necesarias que permitan el correcto diseño y por ende teórico buen rendimiento de este. De esta manera, se presenta a continuación el conjunto de variables a tomar en cuenta para el diseño del alerón delantero en estudio.

4.1.1 Condiciones atmosféricas adaptadas al día de la competencia: Debido a que el estudio es aplicado a la temporada de fórmula 1 del año 2019, se deben conocer variables tales como lo son; velocidad del viento, temperatura a la hora de competición, presión atmosférica, humedad y viscosidad cinemática del aire. Dichos valores se presentarán a continuación en la gráfica 1 y cuadros 2, 3 y 4, adaptados al día 8 del mes de septiembre del año 2019 a las 3 horas y 10 minutos de la tarde (horario de Monza), día y hora de la competición. Los datos fueron tomados del portal web es.weatherspark.com. A continuación, se presentan los valores de temperaturas que se dieron en Monza el día 8 de Septiembre del año 2019 en horas de la tarde (ver gráfico 1).

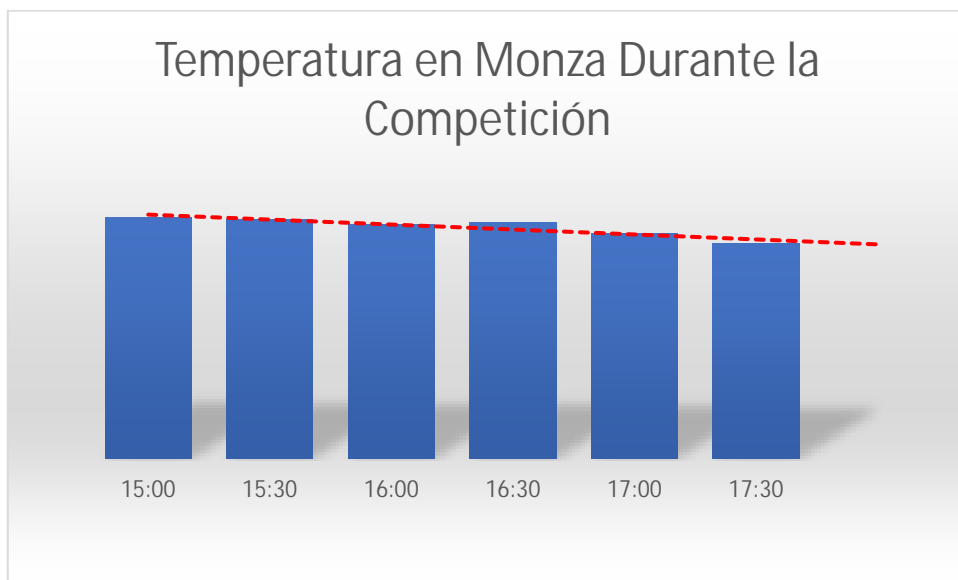


Gráfico 1. Temperatura en Monza durante la competencia.

Fuente: Abruscato (2019)

Se procede a determinar el valor medio de las temperaturas presentadas desde las 15:00 horas del día, teniendo en cuenta que la duración del Gran Premio de Italia inicia a las 15:10 horas, con una duración aproximada de 2 horas y media. Para determinar el valor medio se toma el valor máximo de temperatura y el valor mínimo, se suman y se divide el resultado entre 2, de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Temperatura Máxima} + \text{Temperatura Mínima}}{2}$$

Al haber calculado el valor medio de la temperatura presentada en Monza para el día de la competición, se procede a identificar otras variables ambientales que

determinarán el diseño y comportamiento del alerón delantero en estudio, (ver cuadro 2).

CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EN LA COMPETENCIA	
Viento	7 Km/h
Temperatura Promedio	24 °C
Presión Atmosférica	1017 hPa
Humedad	55%

Cuadro 2. Condiciones atmosféricas en la competencia.

Fuente: Abruscato (2019)

4.1.2 Carga aerodinámica necesaria y características relacionadas al trazado del monoplaza en el autódromo: el autódromo en estudio, es denominado el más rápido de la temporada de fórmula 1, debido a que posee abundantes trazados rectos y pocas curvas, y estas últimas representan son los sectores en los que se debe emplear mejor la carga aerodinámica, debido a que son los sectores determinantes en los tiempos por vueltas, una buena carga aerodinámica se traduciría en acortes de tiempo, por ende se estudian las denominadas “curve di Lesmo”, en las cuales se entran con una velocidad elevada, por lo que mientras mayor sea la carga aerodinámica menor será la frenada a realizar y se perderá menos tiempo en dichas curvas, sin perder la velocidad punta alcanzada en las rectas. A continuación, se presentan los datos de las curvas y el respectivo cálculo de la carga aerodinámica requerida por el alerón en diseño.

1. Primera curva di Lesmo: Esta curva pertenece al sector número 2 del autódromo, en la cual en el tiempo de vuelta más rápido registrado en la figura 21, presenta un valor de 170 km/h al pasar por la curva. Por medio de las ecuaciones 35 y 36 se determina la carga aerodinámica necesaria para la mejor eficiencia registrada en dicha curva. Teniendo en cuenta que la masa del monoplaza, y tomando un coeficiente de rozamiento entre los neumáticos y el asfalto de 0,8 cuyo valor es tomado del libro “Engineering

Automotive” página 380, tomando en cuenta el coeficiente de fricción del asfalto.

Para el cálculo de la masa, se debe tener en cuenta que bajo el reglamento FIA, la masa del monoplaza no debe ser menor a 660 Kg y que el conjunto de la masa del piloto y su asiento, no debe ser menor a 80 Kg; por ende, la masa total a considerar es de 740 Kg.

Al haber determinado la masa total del monoplaza,

— — —

—

Para recorrer la primera curva de Lesmo a la mejor velocidad registrada en ese sector, se requiere que el monoplaza posea una carga aerodinámica total de _____, del cual, según la distribución de carga aerodinámica del monoplaza, el alerón delantero aporta entre el 20 % de dicha carga aerodinámica, por lo que se expresa:

El procedimiento se repite para el cálculo de la carga aerodinámica necesaria para la segunda curva de Lesmo, variando solo el radio de la curva y la velocidad durante su paso, resultando así:



4.1.3 Variables relacionadas al tipo de perfil aerodinámico: Debido a las cargas aerodinámicas a las cuales el alerón delantero está sometido, se debe elegir un tipo de perfil aerodinámico de baja resistencia, capaz de manejar los coeficientes de sustentación y arrastre expresados en el cuadro 1, además de manejar el ángulo de caída permitido por la Federación Internacional del Automóvil (FIA) para las competiciones fijadas, y el número de Reynolds de trabajo. A continuación, se presentan dichos valores que permitirán seleccionar un perfil aerodinámico adecuado.

Según las regulaciones técnicas, para el cálculo de la longitud de cuerda, es necesario expresar que el alerón delantero tiene un ángulo de inclinación máximo de 15° desde su base hasta su punto más alto, logrando formar un triángulo con un ángulo recto, en lo que el cateto base viene dado por la medida del main plate, la cual establece la FIA que es 575 milímetros en su parte más alejada, así como la altura del alerón delantero (300 mm) de esta manera se procede a calcular la cuerda del perfil aerodinámico (ver figura 35).

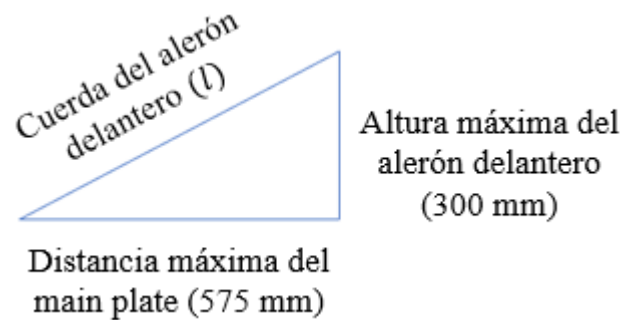


Figura 35. Medida de cuerda máxima del perfil aerodinámico.
Fuente: Abruscato (2019).

4. 1. 3 Selección del perfil aerodinámico del alerón delantero en estudio: Debido a la poca información relacionada a los perfiles empleados en la fórmula 1, y considerando que los perfiles empleados en dicha categoría, parten de un tipo de perfil y este es modificado a conveniencia según las características requeridas, se considerarán los perfiles aerodinámicos tipo GOE, ya que se aprecian características como la cuerda similar a los alerones delanteros de los monoplazas de fórmula 1, entonces, partiendo de los datos presentados anteriormente y teniendo en cuenta que para circuitos rápidos como Monza, el perfil aerodinámico debe poseer relaciones de arrastre y sustentación muy pequeñas.

De esta manera se procede a ingresar los valores en consideración a la base de datos del software profili 2.3 y la página web airfoiltools.com, siendo seleccionado por la biblioteca del sitio web referido el perfil aerodinámico GOE 431 (ver figura 36).

GOE 431 AIRFOIL (goe431-il)

GOE 431 AIRFOIL - Gottingen 431 airfoil

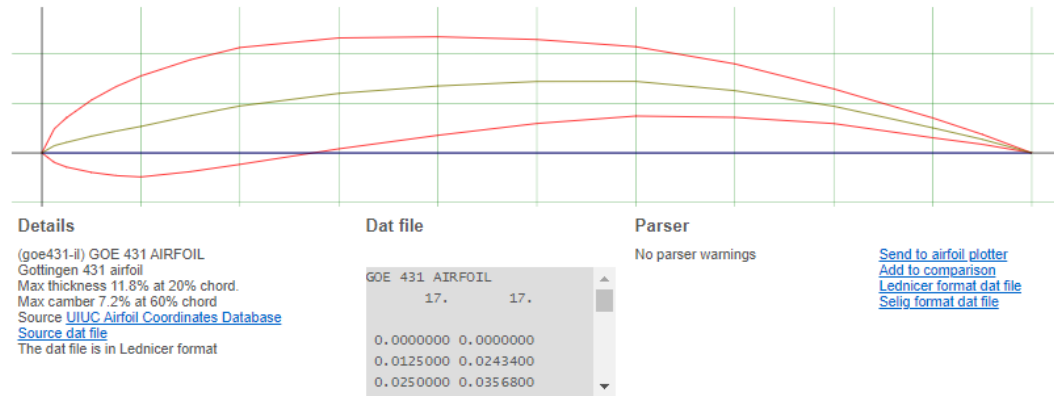


Figura 36. Perfil aerodinámico Goe 431.

Fuente: airfoiltools.com

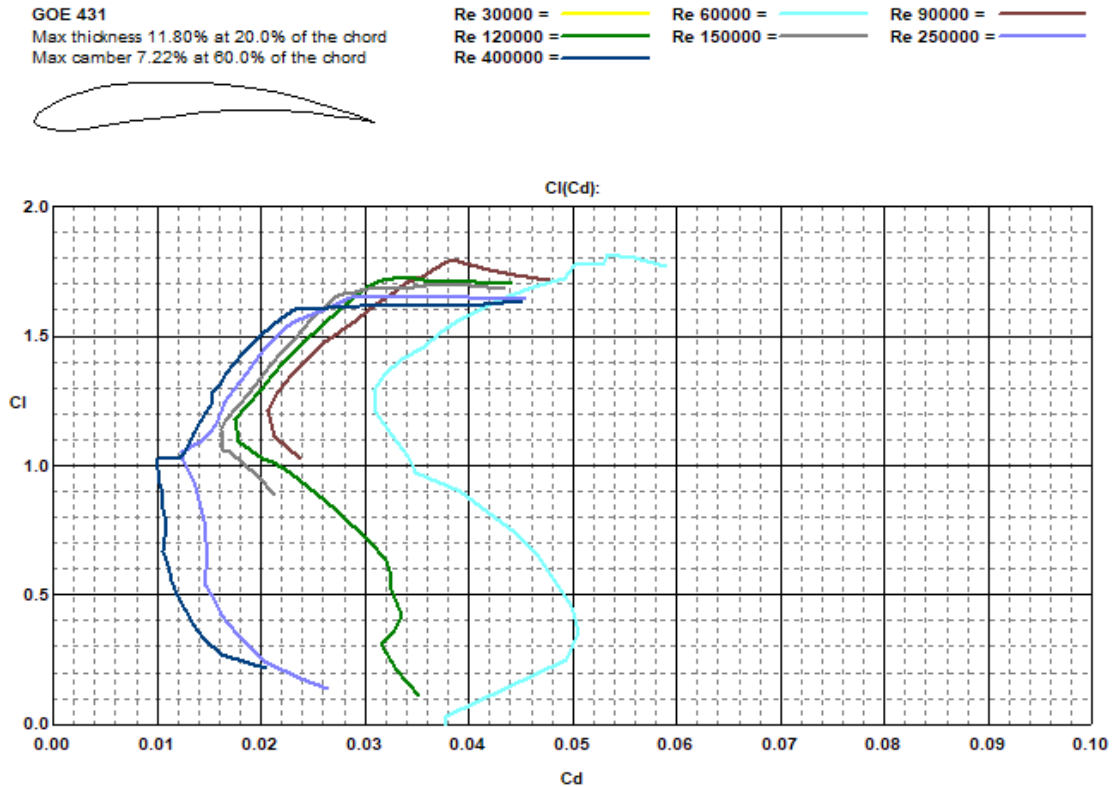
Dicho perfil aerodinámico posee las siguientes características:

 Espesor máximo: de 11.8% a 20% de la cuerda

 Peralte máximo: de 7.2% a 60% de la cuerda.

Para comprender mejor su comportamiento, se consultan sus datos en la librería del software profili 2.3 (ver figura 37).

Comportamiento de la relación C_l/C_d (eficiencia aerodinámica) a diferentes números de Reynolds:



Page 1 of 3 - Drawn by Profili 2.30b on data processed by XFOil - Copyright (C) 1995-2014 - All rights reserved.

Figura 37. Relación Cl/Cd del perfil aerodinámico GOE 431 a diferentes números de Reynolds.

Fuente: Profili versión 2.3

Como se puede observar en la figura 37, el perfil aerodinámico seleccionado maneja relaciones Cl/Cd (eficiencia aerodinámica) muy pequeñas, el cual es un parámetro fundamental y necesario en lo que respecta al circuito en cuestión, debido a que haciendo referencia al cuadro 1, el cual especifica los valores promedio del coeficiente de arrastre y el coeficiente de sustentación del conjunto de los componentes aerodinámicos del monoplaza en el circuito de Monza, sin embargo, se debe tener en cuenta que dichos coeficientes disminuyen en las curvas, los puntos críticos que están siendo estudiados, por ende, procederá a expresar el valor de eficiencia aerodinámica promedia y establecer un valor para la curva crítica en estudio.

4.2 Modelado mediante una herramienta CAD el alerón delantero en estudio.

Con el fin de simular el elemento de estudio y determinar su factibilidad en las condiciones presentadas, es necesario realizar el modelado 3D del alerón delantero tomando en cuenta las regulaciones establecidas por la FIA. Además, basarse en el modelo de perfil aerodinámico seleccionado, siendo este GOE 431.

Inicialmente se procede a trasladar la geometría del perfil aerodinámico del portal web airfoiltool.com al software de diseño asistido por computadora Solidworks, en su versión 2013 edición 64 bits, donde se realizarán las operaciones necesarias para obtener el modelado 3D requerido. Esta exportación de la geometría es posible mediante la parametrización de la curva que es generada por un conjunto de coordenadas que están disponibles en la página mencionada por lo que se procede a descargarlas y representarlas en Solidworks.

Para obtener las coordenadas del perfil seleccionado, se hace click sobre la opción “selig dat format file” o archivo datos de formato selig (ver figura 38).

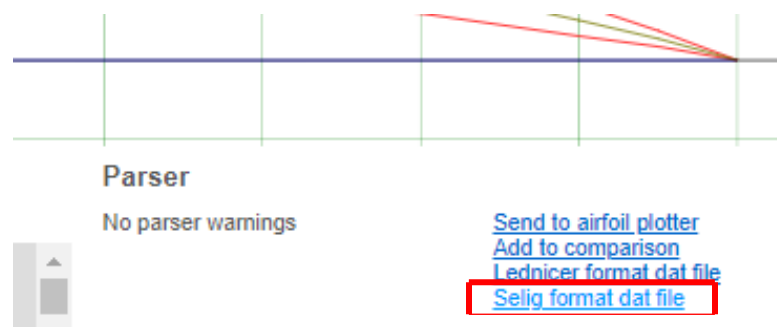


Figura 38. Obtención de datos de formato selig del perfil aerodinámico GOE 431.

Fuente: airfoiltools.com

Se copian las coordenadas que la librería ofrece y posteriormente se debe crear un documento en excel en el que se inserten dichas coordenadas en forma de datos en tabla (ver figura 39).

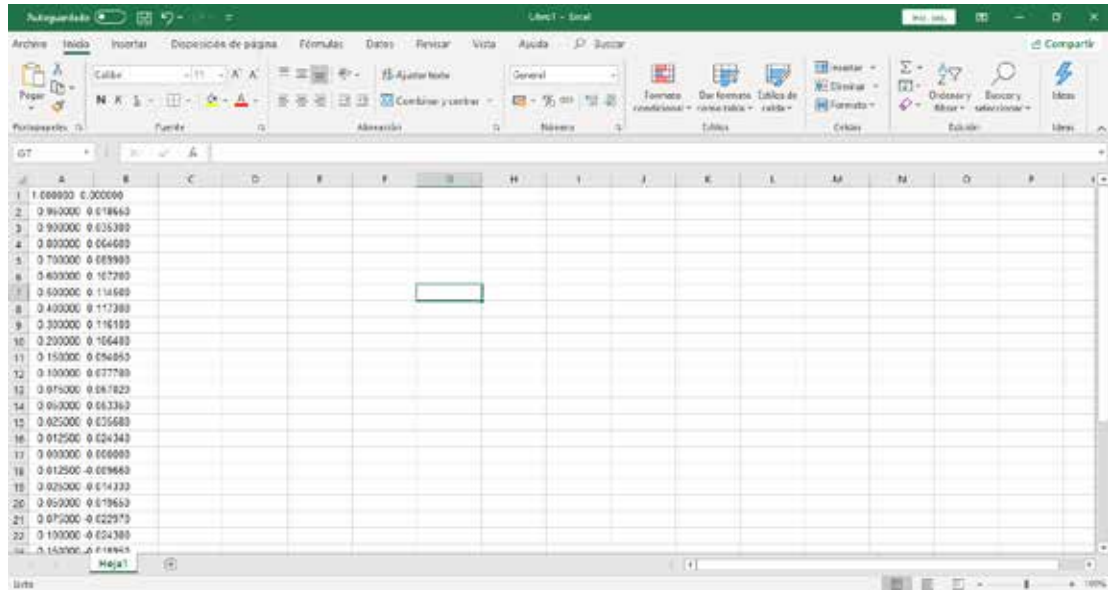


Figura 39. Orden de coordenadas del perfil aerodinámico GOE 431 en Excel.

Fuente: Abruscato (2019).

Para poder abrir dichas coordenadas en Solidworks, se debe añadir otra columna, con valores iguales a cero, que represente puntos de la curva con un tercer eje, permitiendo así leer las coordenadas con 3 dimensiones. Al haber ingresado esta tercera columna de la tabla de datos, se debe guardar el documento en formato “Texto (definido en tabulación)” (ver figura 40).

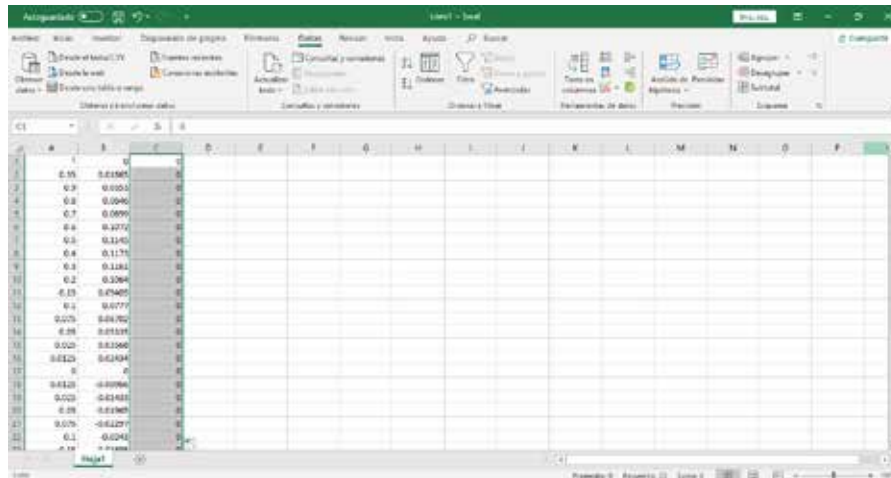


Figura 40. Tercera columna de coordenadas del perfil aerodinámico G0431 en Excel.

Fuente: Abruscato (2019).

Tras haber guardado el documento en el formato mencionado, se ejecuta el software Solidworks, en el que se iniciará a crear un nuevo documento en forma de pieza “.sldprt”, y a continuación añadir la curva de interés mediante la operación el comando Insertar >> Curva >> Curva por puntos XYZ (ver figura 41).

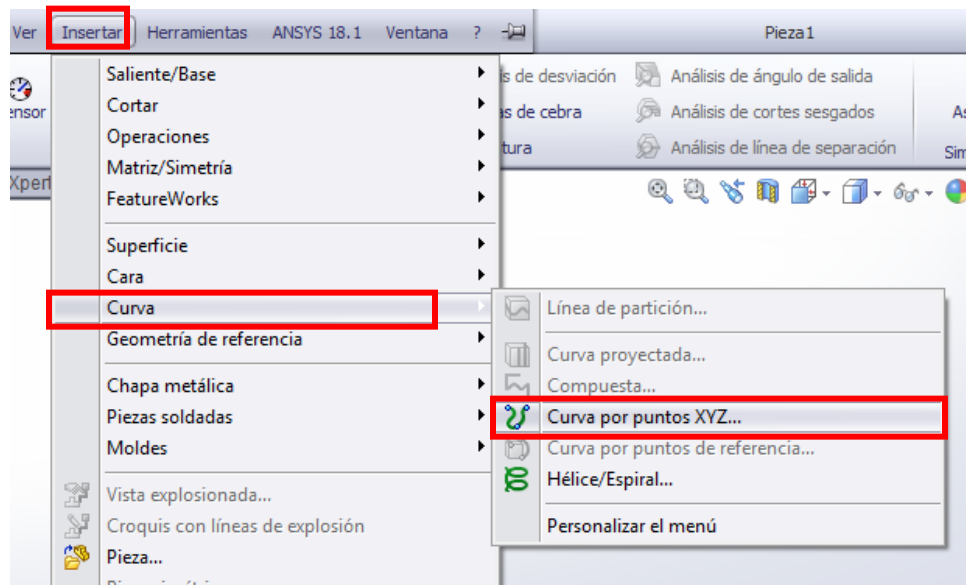


Figura 41. Inserción de curva por puntos del perfil GOE 431 en Solidworks.

Fuente: Abruscato (2019)

Una vez cargada la curva correspondiente a la geometría del perfil aerodinámico GOE 431 (ver figura), es necesario girar 180 grados la geometría, debido a que el perfil tiene una orientación para producir una sustentación positiva, lo cual es totalmente todo lo contrario a lo que se busca en un monoplaza de fórmula 1, que es la sustentación negativa, mejor conocida como downforce (ver figura 42), para ello es necesario emplear la operación de . De la misma manera se señalan los parámetros más importantes señalados por la FIA a tomar en cuenta durante el modelado 3D del alerón delantero.

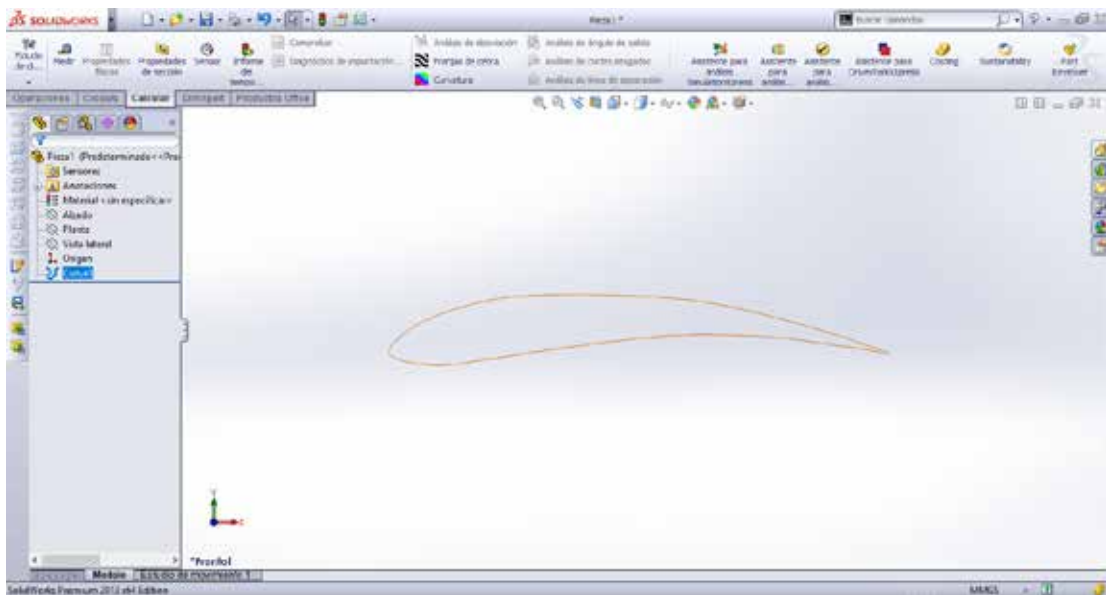


Figura 42. Curva del perfil aerodinámico GOE 431 en Solidworks.

Fuente: Abruscato (2019).

Cabe destacar que la curva cargada en Solidworks, tiene un espesor y cuerda por defecto, por lo que se debe emplear el comando de “Convertir Entidades” que permita reflejar dicha curva en un plano, pudiendo de esta manera modificar su orientación y sus dimensiones (ver figura 43).

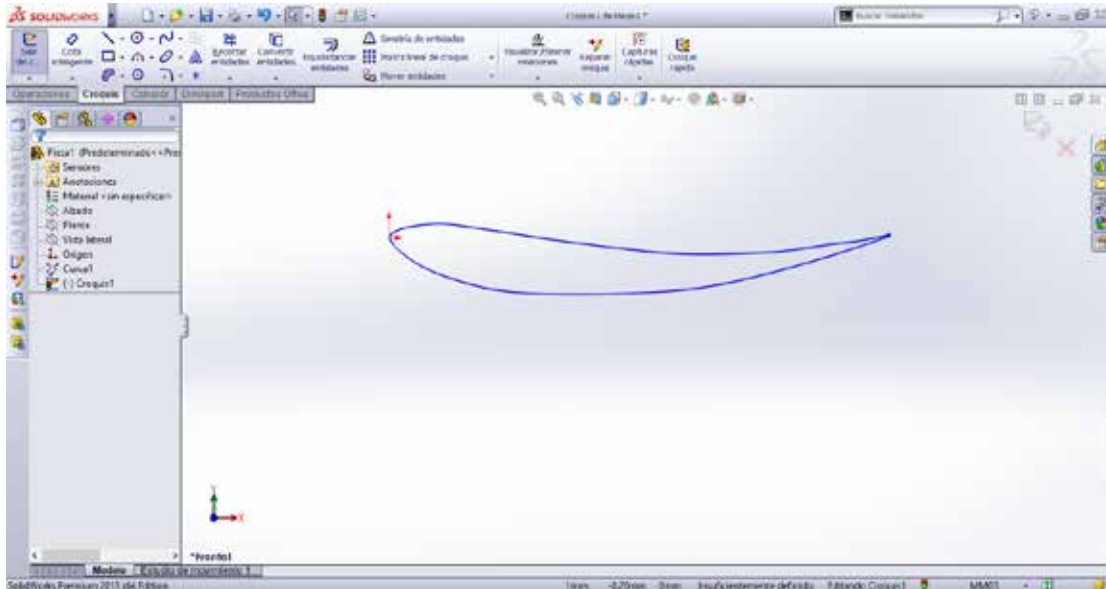


Figura 43. Conversión de entidad de la geometría del perfil aerodinámico GOE 431.

Fuente: Abruscato (2019).

Tras modificar las dimensiones del perfil (ver figura 44), respetando los parámetros dimensionales que maneja el perfil aerodinámico como son el espesor y el peralte, ajustándolo a las regulaciones fijadas por la FIA. Se establecen 3 flaps de 5 permitidos en conjunto con el mainplane, en el mismo croquis, con una inclinación máxima de 15 grados con respecto a la horizontal como lo indica la regulación técnica sobre alerones delanteros de la FIA, generando así la cascada de flaps que determinarán el comportamiento del paso del fluido que a través de ellos fluya (ver figura lsjgbaogupbq). Cabe destacar que las medidas que se presentan en las figuras son magnitudes en milímetros.

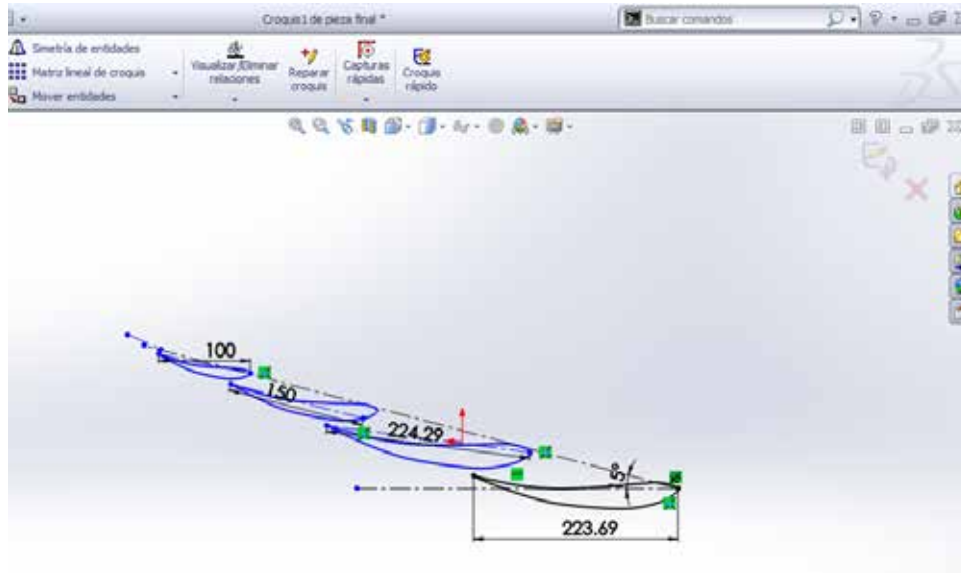


Figura 44. Medidas y ángulo de croquis de los flaps del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Cumpliendo con las regulaciones impuestas por la FIA, los flaps poseen una separación superior a 5 mm (ver figura 45).

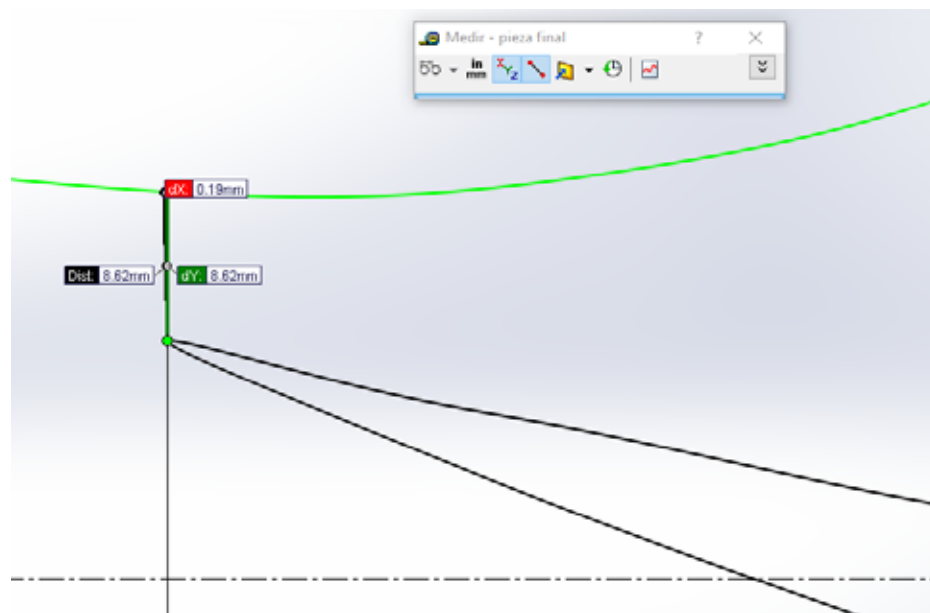


Figura 45. Separación entre los flaps del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Se realiza la operación de “Extruir” dicho croquis compuesto por los 4 flaps señalados (ver figura 46). Esta extrusión tiene una longitud de 161,72 mm, representando la parte del alerón delantero que además de generar carga aerodinámica, desvía el fluido a la parte externa del mismo, permitiendo de esta manera evitar el choque brusco entre el fluido y los neumáticos, ubicados en la parte posterior del alerón delantero.

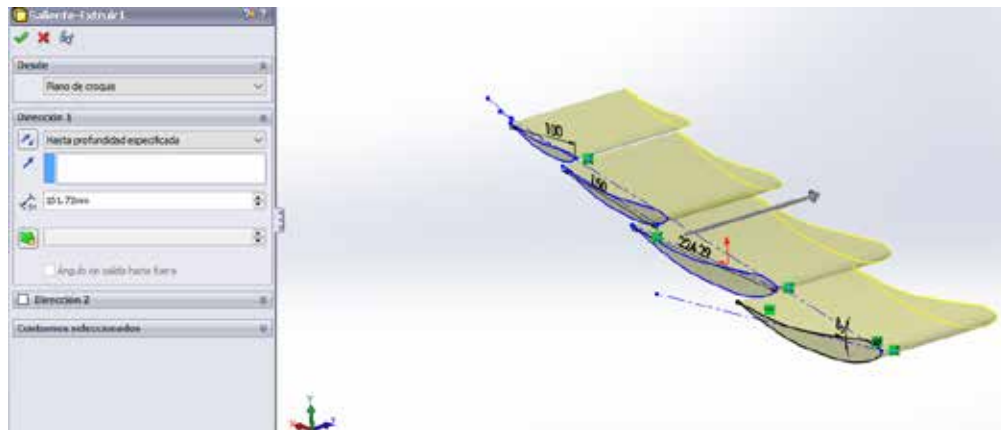


Figura 46. Extrusión inicial de los flaps del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Para el modelado del Endplate, se debe realizar un corte a los flaps desde la vista de planta, manteniendo la magnitud extruida del mainplane al 100% (ver figura 47).

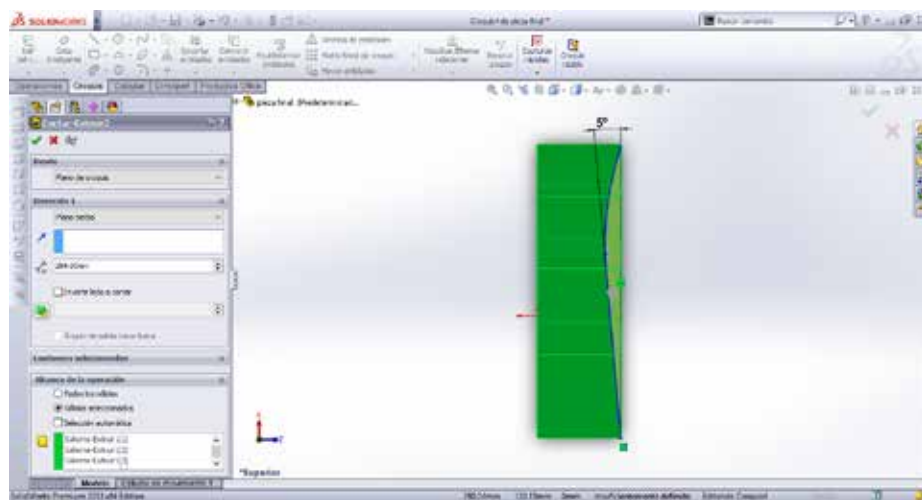


Figura 47. Corte de perfil en construcción del Endplate.

Fuente: Abruscato (2019).

Realizando el croquis con las medidas correspondientes, se logra modelar el endplate (ver figura 48).

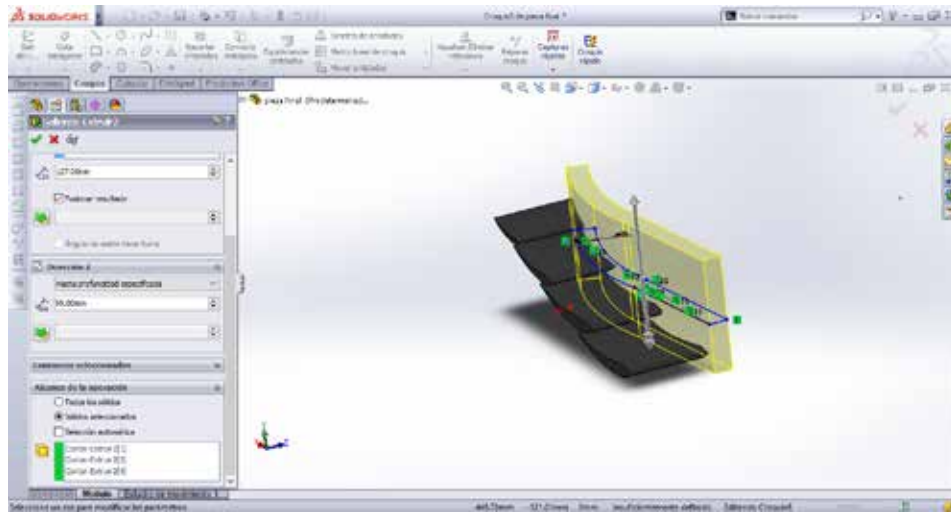


Figura 48. Construcción de uno de los endplate del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Se completa la operación y se añaden los redondeos de bordes y caras correspondientes para un manejo de fluidos más sutil. De esta manera, introduciendo los planos correspondientes y respetando las medidas del reglamento, mediante la herramienta barrido se consigue representar el endplate foot correspondiente (ver figuras 49 y 50).

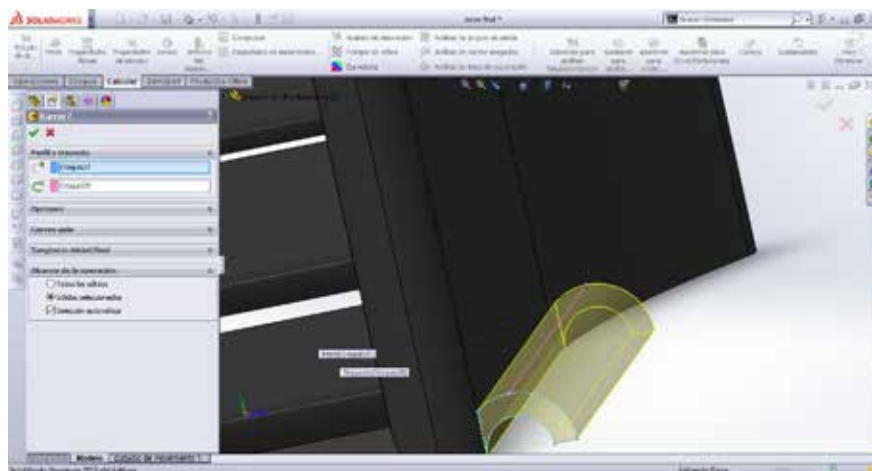


Figura 49. Construcción del endplate foot.

Fuente: Abruscato (2019).

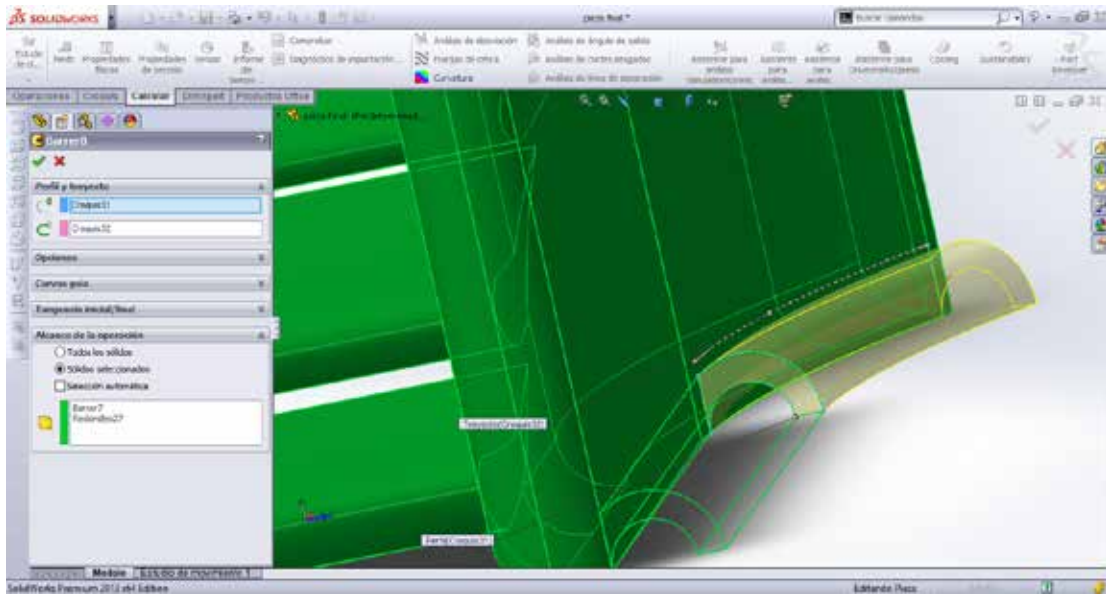


Figura 50. Construcción de la 2da parte de uno de los endplate foot.

Fuente: Abruscato (2019).

Obteniendo de esta manera un conjunto más cercano al final al aplicar los redondeos correspondientes (ver figura 51).

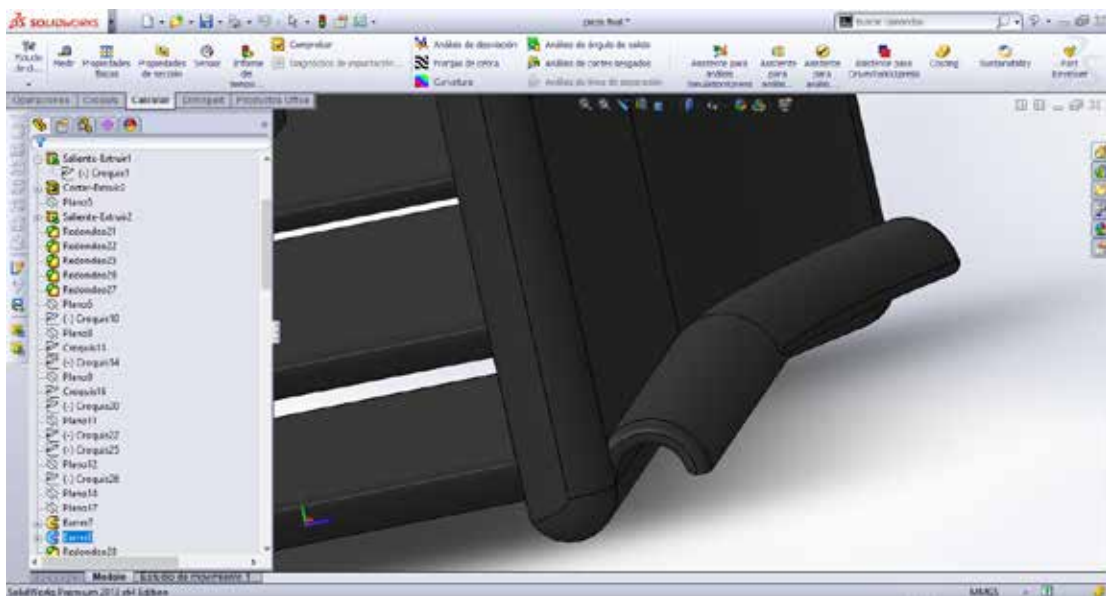


Figura 51. Finalización de la construcción de uno de los endplate foot.

Fuente: Abruscato (2019).

Para completar las secciones del alerón delantero en diseño, se realizan planos intermedios para generar la superficie faltante del alerón delantero, convirtiendo entidades de los croquis iniciales sobre los planos creado, dándoles un desfase de posicionamiento en el eje x y estableciendo las dimensiones necesarias para asegurar el cambio progresivo de sección conforme el alerón delantero se ubica más al centro (ver figura 52), con lo cual, al generar la operación de barrido estableciendo la trayectoria sin exceder los 20 grados de dirección del mainplane como norma establecida del ente regulador FIA (ver figura 53).

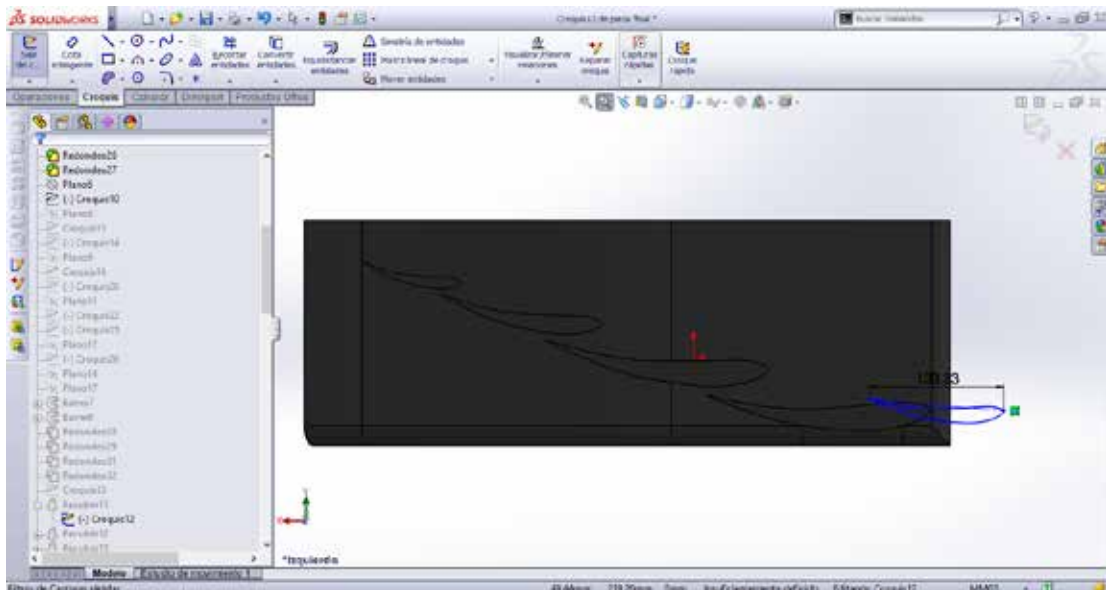


Figura 52. Construcción del croquis de extrusión media del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

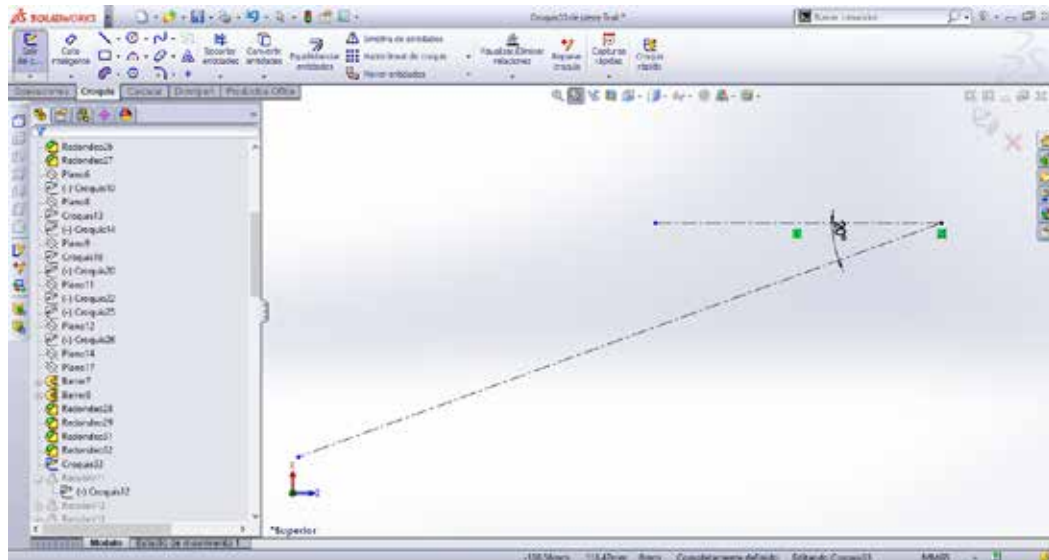


Figura 53. Restricción de 20 grados de proyección máxima del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

La separación entre los cambios de dirección, representan la segunda sección del alerón delantero encargada de dirigir el flujo hacia arriba, generando así una gran resistencia aerodinámica, por ende, carga aerodinámica. (ver figura 54)

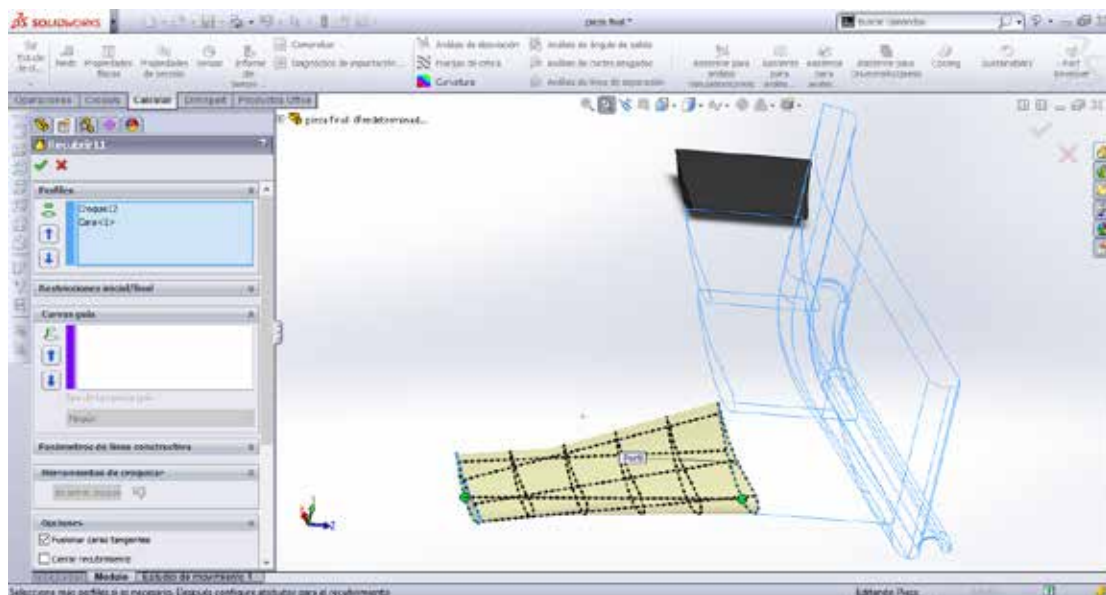


Figura 54. Extrusión media del mainplane del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019)

El proceso se lleva a cabo de la misma manera con los 3 flaps obteniendo el resultado que presenta la figura 55.

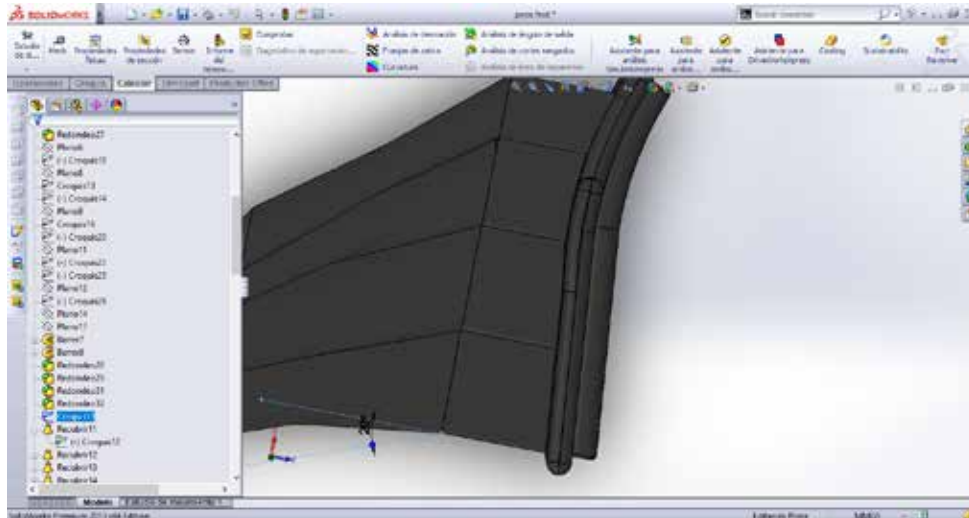


Figura 55. Finalización de la extrusión media de los flaps del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Al repetir el proceso aportando diferentes ángulos de trayectoria para la operación de barrido, se llega a la sección media del alerón delantero denominada “FIA Control Section” representada en la figura 18 y la figura 56.

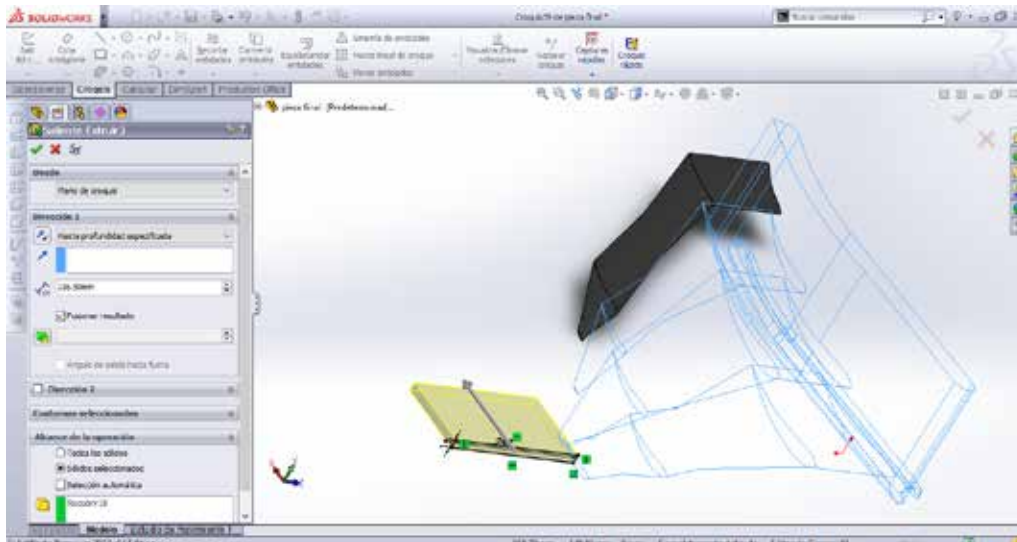


Figura 56. Construcción del FIA control section del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Se hace el respectivo corte para hacer la sección de control más sutilmente aerodinámica (figura 57).

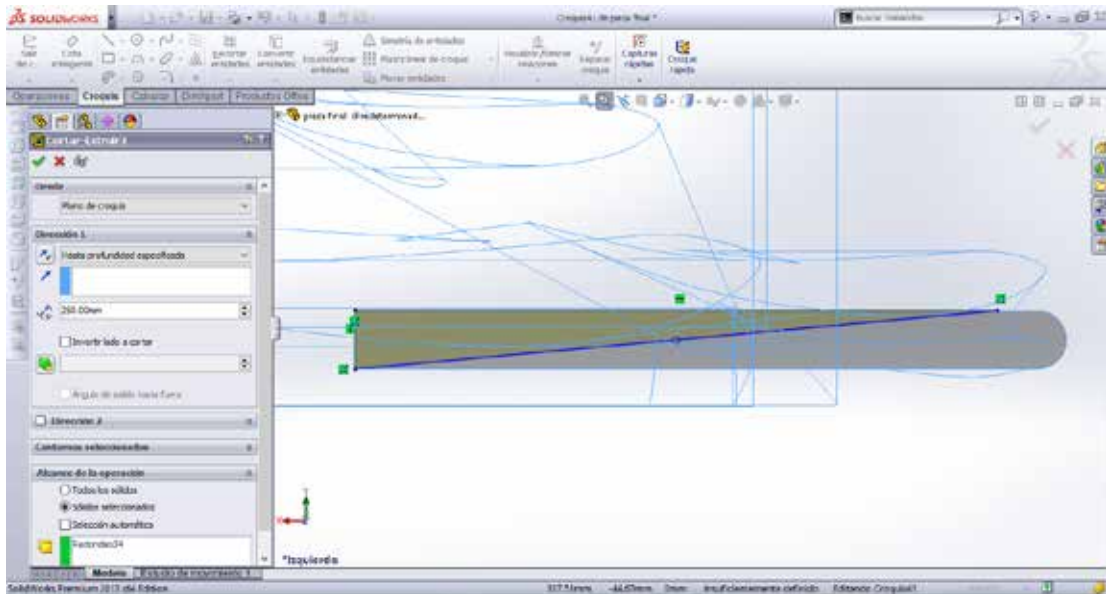


Figura 57. Corte a la superficie del FIA control section.

Fuente: Abruscato (2019)

Se procede a realizar un corte que permita una vía de desahogo para el fluido hacia la parte externa desde el alerón delantero, atravesando el endplate (ver figura 58).

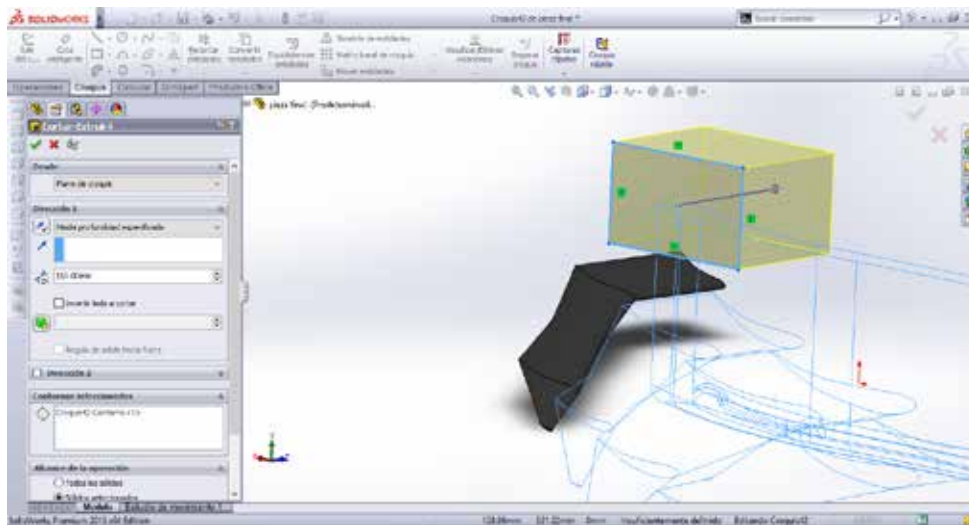


Figura 58. Corte al endplate del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Empleando el redondeo de casa y bordes, adicionalmente, generando las pequeñas juntas entre los flaps presentados y un fence bajo el mainplate, se obtiene el modelo presentado en la figura 59.

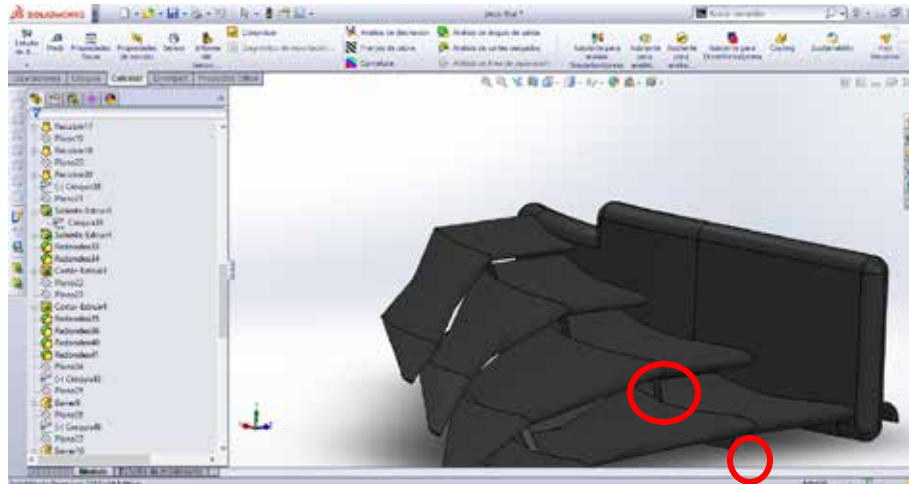


Figura 59. Identificación de juntas entre flaps y mainplane.

Fuente: Abruscato (2019)

Al realizar la operación de simetría mediante un plano medio, se obtiene el diseño de alerón delantero final, a continuación, se procede a presentar el alerón delantero en su versión final empleando la herramienta de renderizado de Solidworks; PhotoView 360 (ver figura 60).



Figura 60. Versión final del alerón delantero en diseño.

Fuente: Abruscato (2019)

Observando en la figura 61 que la altura máxima del alerón delantero cumple el parámetro impuesto por la FIA, ya que solo cuenta con 225,98 mm de altura de los 300 mm máximos.

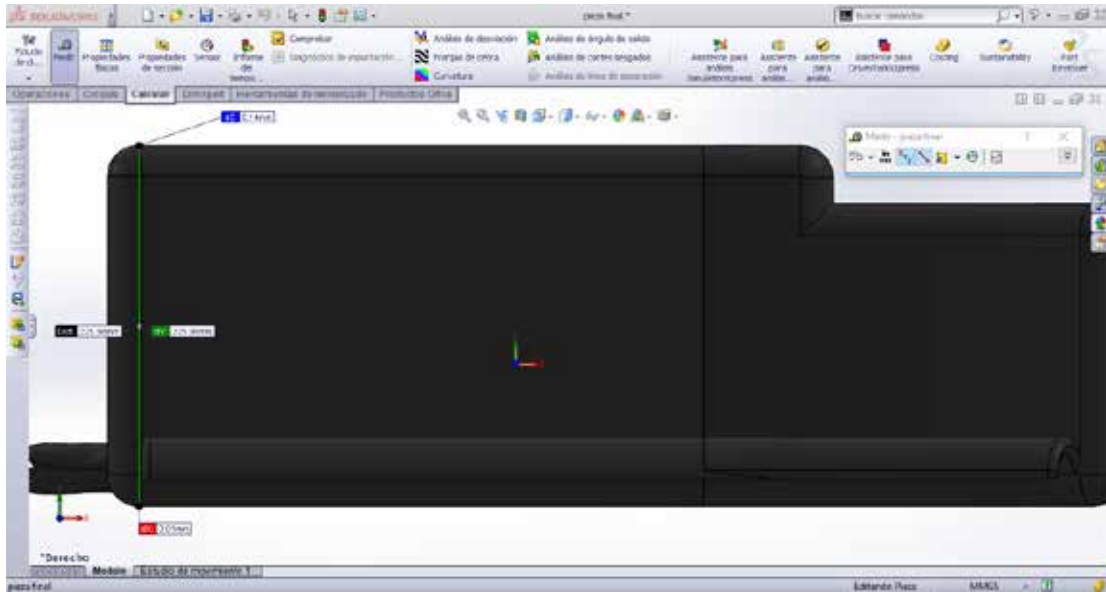


Figura 61. Comprobación de altura reglamentaria del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019)

El alerón delantero cuenta con una profundidad de 635,68 mm (ver figura 62) de los cuales, la profundidad que representa el cateto adyacente a la cuerda del perfil GOE 431 empleado tiene una medida de 563,95 mm (ver figura 63), valor permitido en las regulaciones técnicas de la FIA, de igual manera que es permitido al relacionarlo con el valor de cuerda máximo, cuyo cateto representa una el valor de esta profundidad cuerda máximo que ha sido determinado y cuyo valor es de 570 mm.

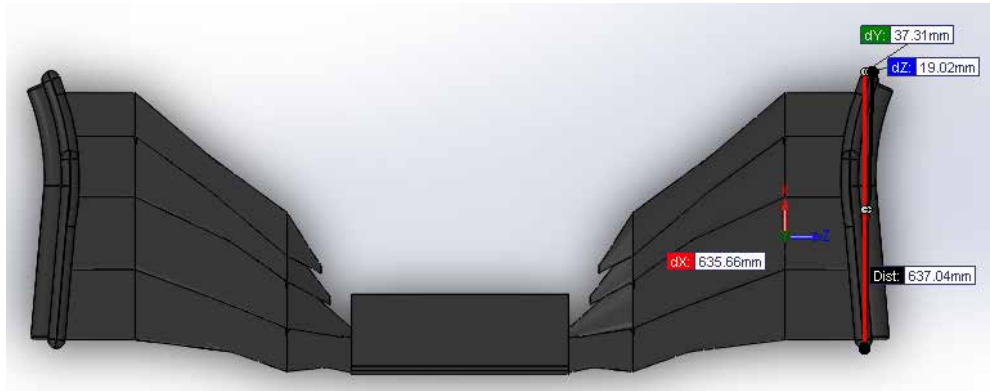


Figura 62. Comprobación profundidad máxima del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019)

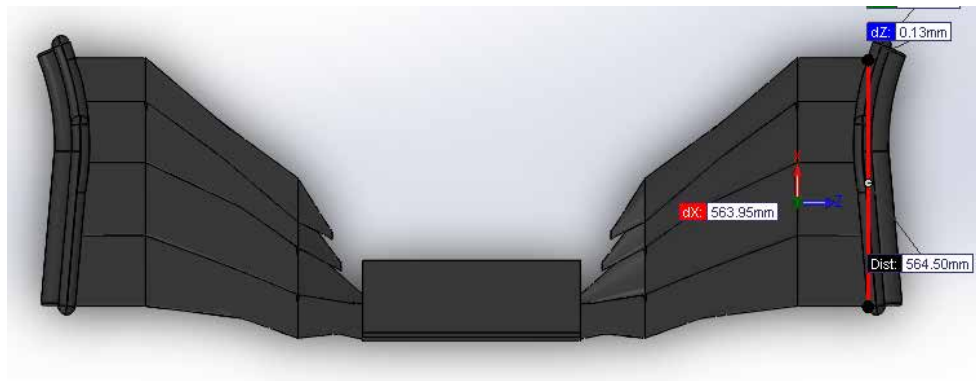


Figura 63. Comprobación profundidad máxima de cascada de flaps.

Fuente: Abruscato (2019)

La medida con mayor tolerancia es la del ancho del alerón delantero, en donde su medida nominal es 2.000 mm, sin embargo, el alerón delantero en estudio fue diseñado con un ancho de 1.975, 11 mm (ver figura 64).

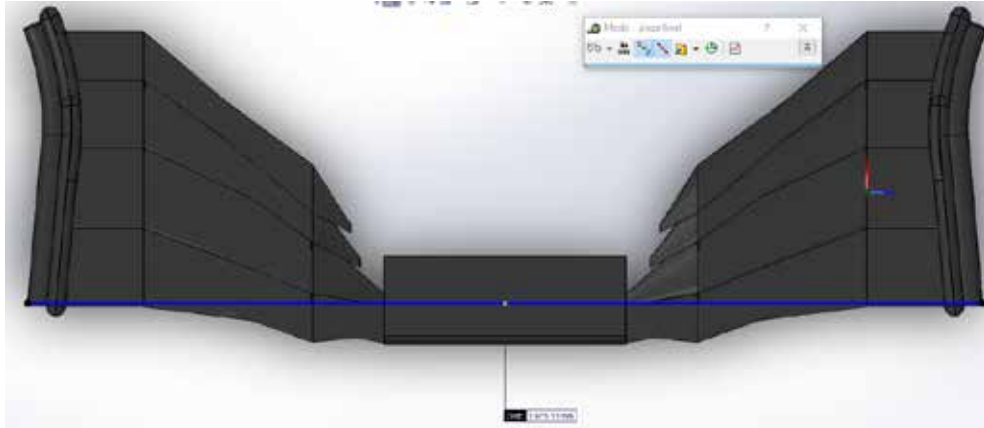


Figura 64. Comprobación ancho máximo del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

4.3 Simulación bajo condiciones aerodinámicas del alerón delantero en estudio usando dinámica de fluidos computacional.

Encapsulado del elemento en estudio: Una vez terminado el modelado 3D del alerón delantero en estudio, es necesario establecer el volumen de control de estudio, un volumen que simule las dimensiones del túnel de viento en la posterior simulación aerodinámica, para ello se deben establecer las medidas de dicho volumen que contendrá al alerón delantero, las cuales se muestran en la figura 65.

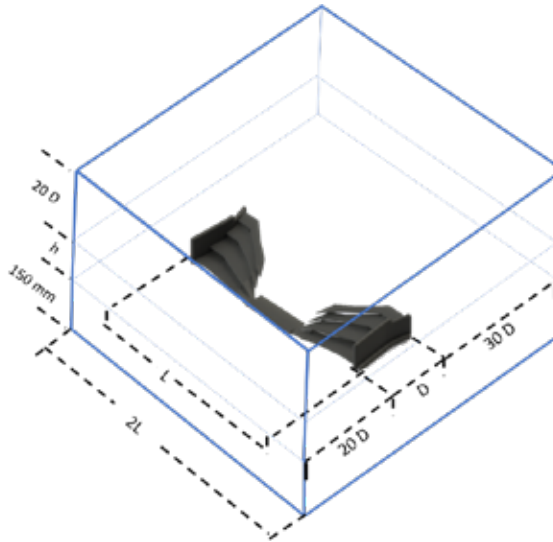


Figura 65. Cápsulas volumen de cápsula del volumen de control de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019).

A continuación, se presenta la cápsula del alerón delantero en estudio (ver figura 66). Para una mejor visualización del como el alerón delantero está contenido en la geometría generada, se emplea la opción de vista tipo arista (ver figura 67).

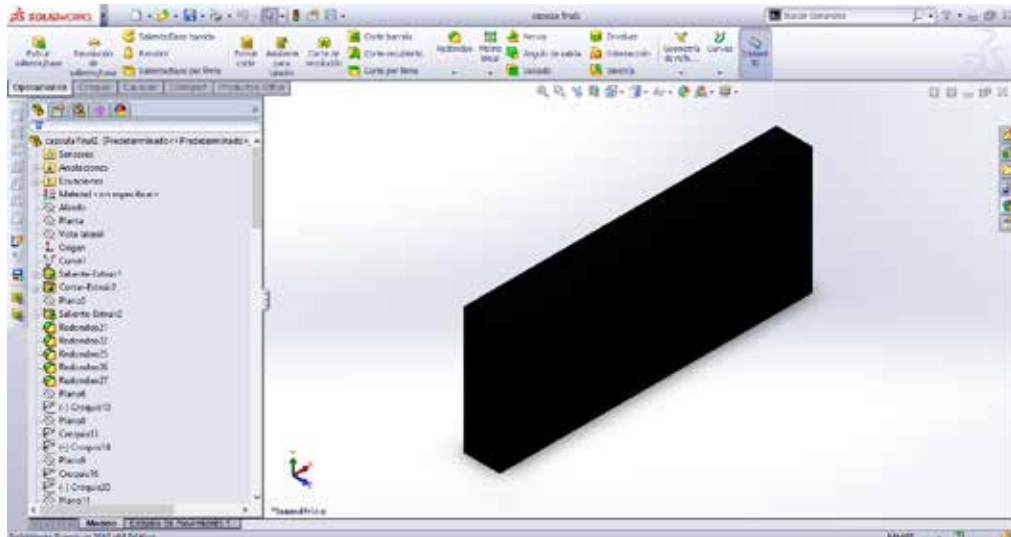


Figura 66. Modelado de la cápsula que contiene al alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019)

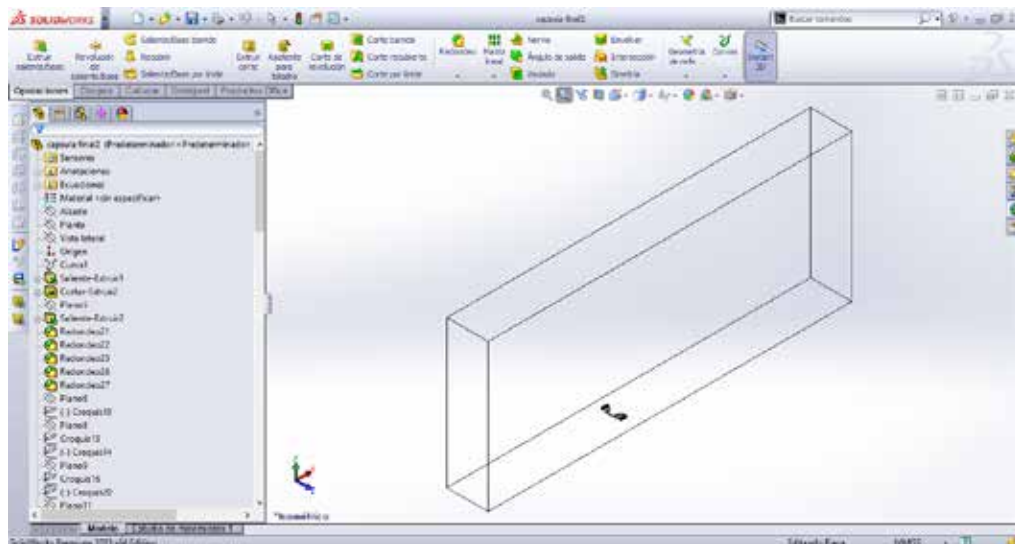


Figura 67. Volumen de control del alerón delantero con vista solo aristas.

Fuente: Abruscato (2019)

Para continuar con el objetivo de la presente fase, se deben combinar los sólidos, debido a que, para la simulación, el software requiere que la geometría en estudio sea un solo cuerpo. Por ende, se emplea la herramienta de Solidworks de combinar sólidos (ver figura 68), en donde se escoge como sólido principal la cápsula que contiene al alerón delantero modelado y este último sólido secundario (ver figura 69).

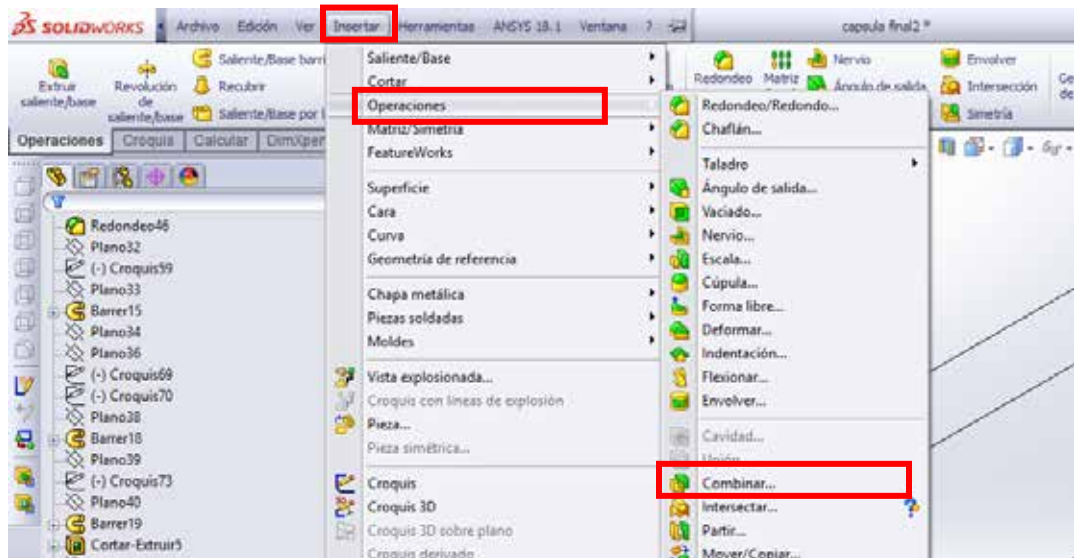


Figura 68. Operación de combinación de sólidos.

Fuente: Abruscato (2019)

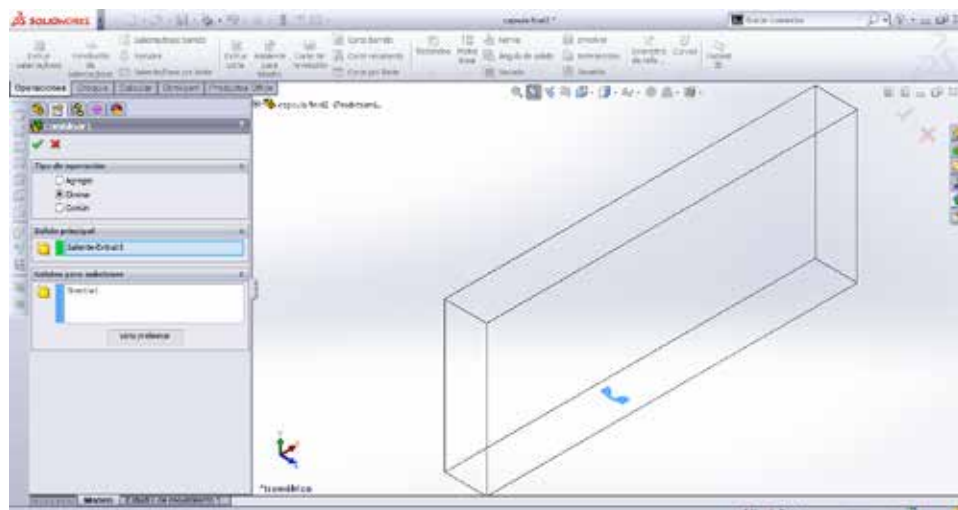


Figura 69. Selección de sólido principal en la combinación de sólidos.

Fuente: Abruscato (2019)

Una vez que se tiene una sola pieza gracias a la operación de combinar sólidos, se debe guardar el documento en formato STEP (.stp) para conservar un mayor conjunto de características de la pieza sin alterar su geometría en el proceso de exportación del modelo diseñado al software de simulación CFD SimScale Workbench (ver figura 71), en el cual se especificará el mallado a emplear y las condiciones a tratar en la simulación. Se destaca mediante la figura 70 la finalidad de este procedimiento.

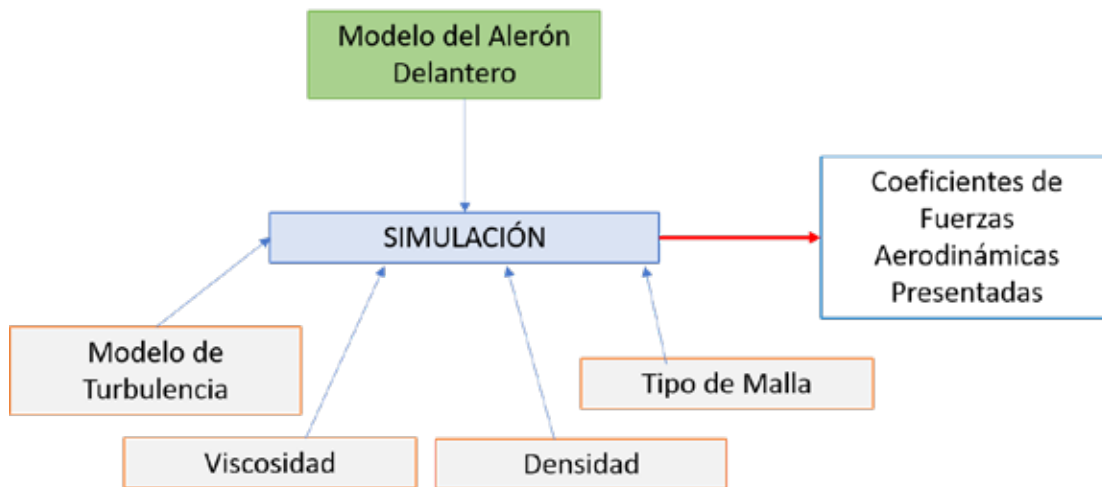


Figura 70. Esquema del proceso simplificado de simulación.

Fuente: Abruscato (2019)

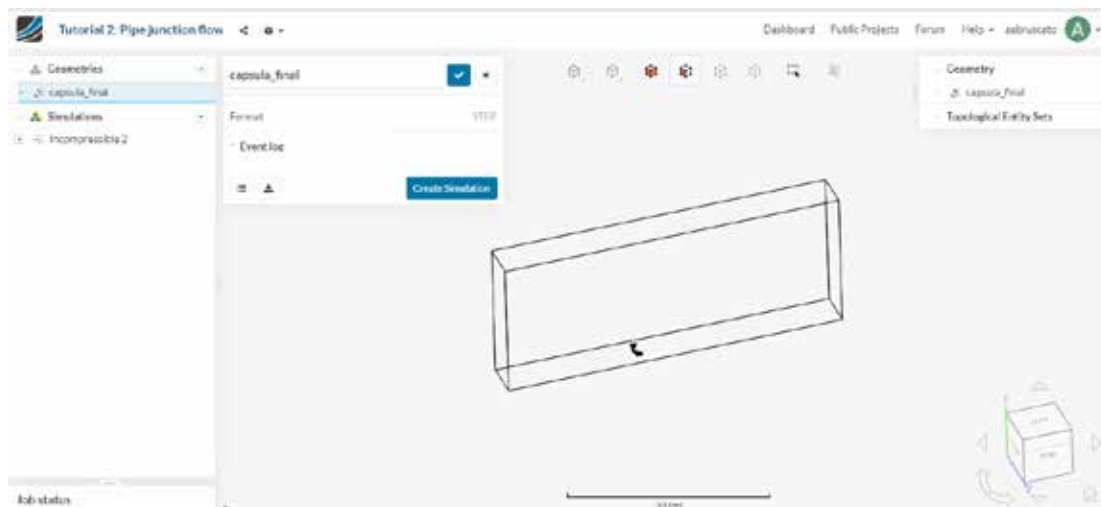


Figura 71. Exportación del modelado hecho a SimScale Workbench.

Fuente: Abruscato (2019)

Posteriormente, se selecciona el botón que permite los pasos posteriores, siendo este “créate simulation”, de esta manera se selecciona primeramente el tipo de flujo, que este estudio se considera un flujo incompresible con la característica principal de un modelo de turbulencia k-epsilon y otras características como el tiempo de dependencia (ver figura 72).

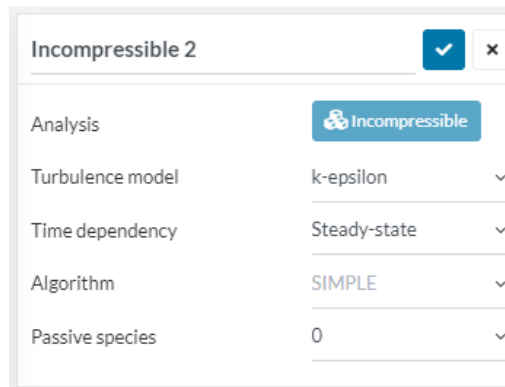


Figura 72. Características del tipo de fluido de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019)

El modelo K-Epsilon es uno de los modelos de turbulencia más implantado a nivel industrial. Es un modelo con dos ecuaciones de transporte para representar las propiedades turbulentas del flujo. La primera variable de este modelo es la energía cinética turbulenta (K), dicha variable determina la intensidad turbulenta, mientras que la segunda variable representa la disipación turbulenta (Epsilon).

Para continuar con el proceso, se debe seleccionar el dominio de la geometría en la simulación (ver figura 73) donde se especifica la cantidad de nodos, bordes, caras y volumen de dicha geometría.

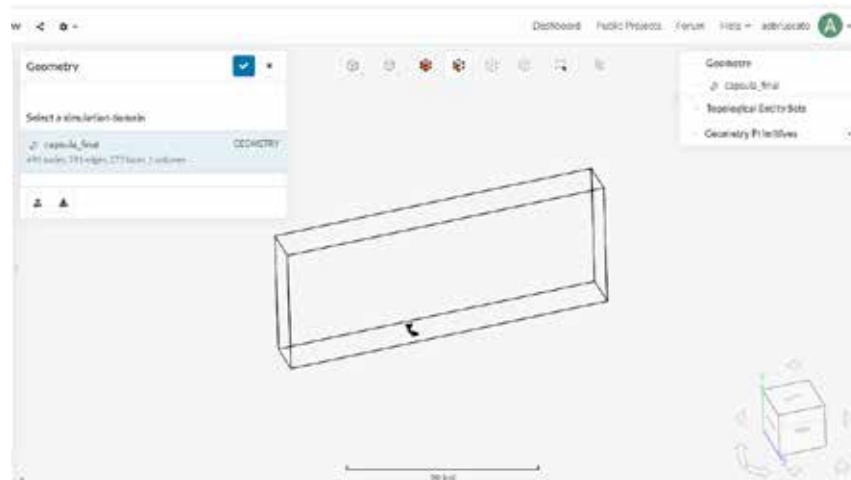


Figura 73. Fijación del dominio de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019)

Una vez seleccionado el dominio, se establece el tipo de mallado y sus características necesarias para el estudio en curso, lo cual se representa en la figura 74. El tipo de algoritmo de mallado seleccionado es de hexagonal dominante, el cual recomienda el software de simulación CFD para simulaciones de fluidos. El tipo de mallado es interno con un tamaño de malla automático generado por el software con una finura gruesa (inicialmente).

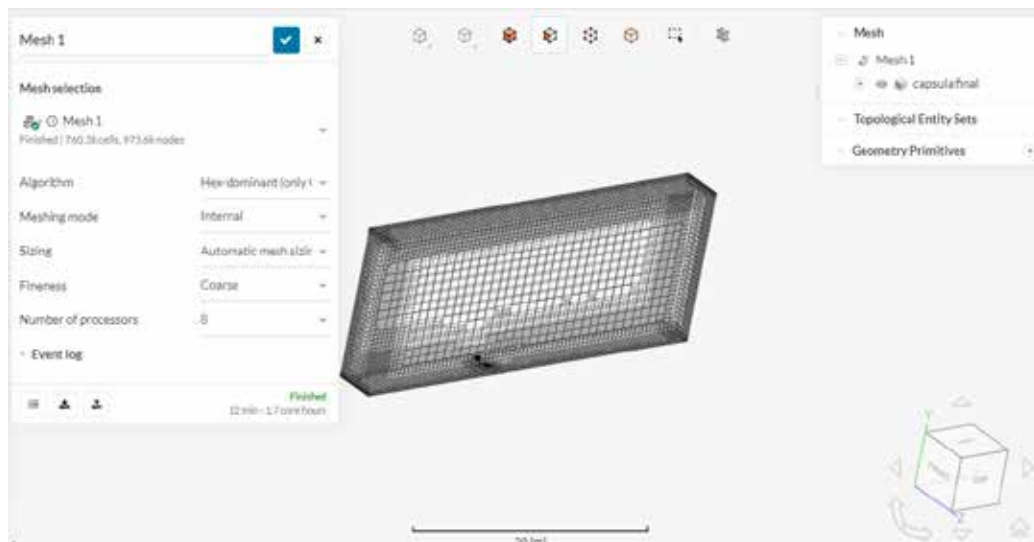


Figura 74. Mallado del volumen de control de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019)

Sin embargo, se ha seleccionado el volumen correspondiente al alerón delantero para indicar un mallado refinado sobre el mismo, con la finalidad de hacer énfasis a los fenómenos ocurridos en el mismo y sus proximidades. Dichas características se presentan en la figura 75.

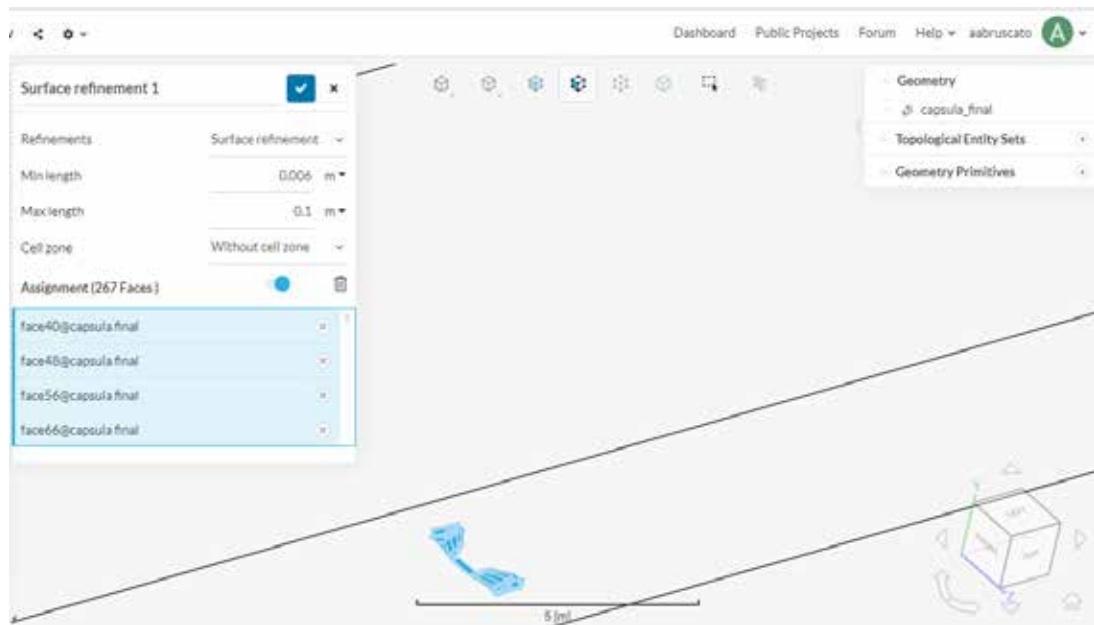


Figura 75. Refinado del mallado en el volumen correspondiente al alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019)

El refinado del mallado tiene una longitud mínima de 0,006 m y una longitud máxima de 0,1 m.

El paso siguiente es especificar el fluido y sus propiedades, que en este caso es el aire a 24°C, las características presentadas en el cuadro 3 y la figura 76.

Aire a 24°C	
Viscosidad Cinemática	1,546 [—]
Densidad	1,188 [—]

Cuadro 3. Propiedades del aire a 24°C.

Fuente: Abruscato (2019).

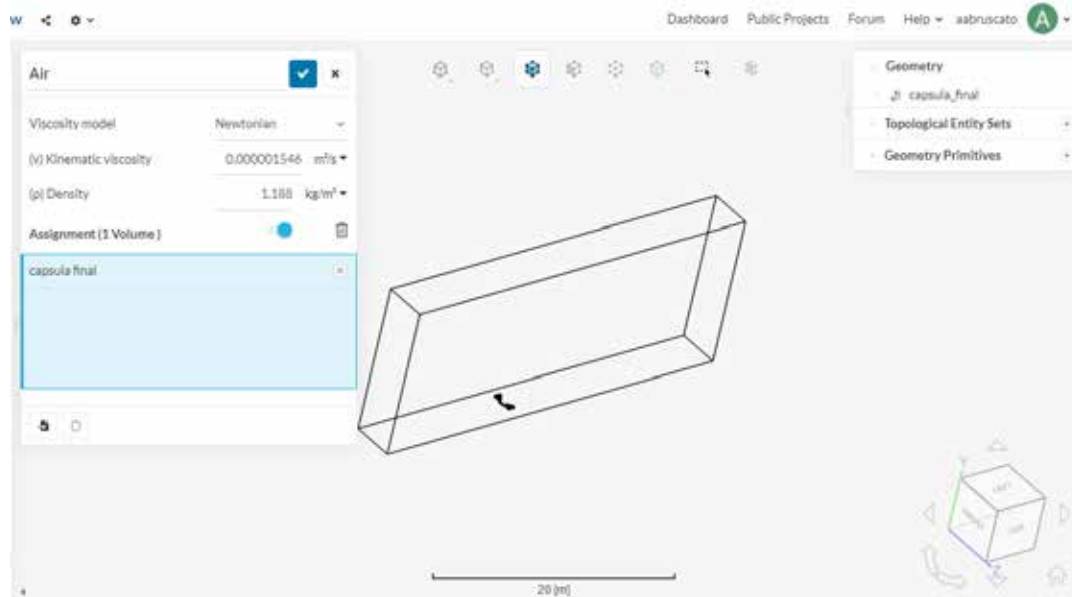


Figura 76. Características del aire presentado en el caso de estudio.

Fuente: Abruscato (2019)

Una vez establecido el fluido y sus características, se procede a ingresar al software las condiciones iniciales que se manejan durante la simulación (ver cuadro 4). Donde se establece la presión trabajada, la velocidad en los tres ejes, la energía cinética de turbulencia y la tasa de disipación de dicha energía.

Condiciones Iniciales	
Presión	101.700 []
Velocidad	Componente X= 108 [] Componente Y= 0 [] Componente Z= 0 []
Energía Cinética de Turbulencia	3,75 [—]
Tasa de Disipación de Energía Cinética de Turbulencia	1,25 [—]

Cuadro 4. Condiciones iniciales de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019).

En cuanto a las condiciones de borde, se especifican 5 elementos (ver figura 77).

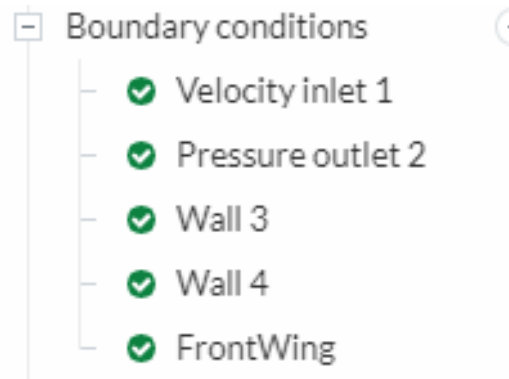


Figura 77. Elementos de las condiciones de borde.

Fuente: Abruscato (2019)

Para el primer elemento, de Velocidad de Entrada, se seleccionó la cara correspondiente (ver figura 78) y se estableció un valor de flujo másico, cuyo cálculo se muestra a continuación;

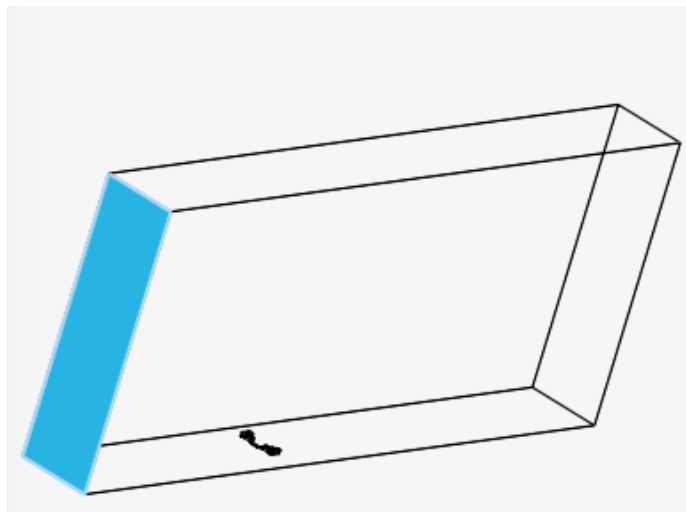


Figura 78. Cara representativa de la velocidad de entrada.

Fuente: Abruscato (2019)

Presentando la ecuación de flujo másico para la condición de entrada del fluido en dicha simulación, se tiene en cuenta la densidad del aire, la velocidad con la que se establece la entrada y el área correspondiente a la cara de la cápsula seleccionada.

Tras haber calculado el flujo másico de entrada, se muestra por medio de la figura 79 las condiciones de este.

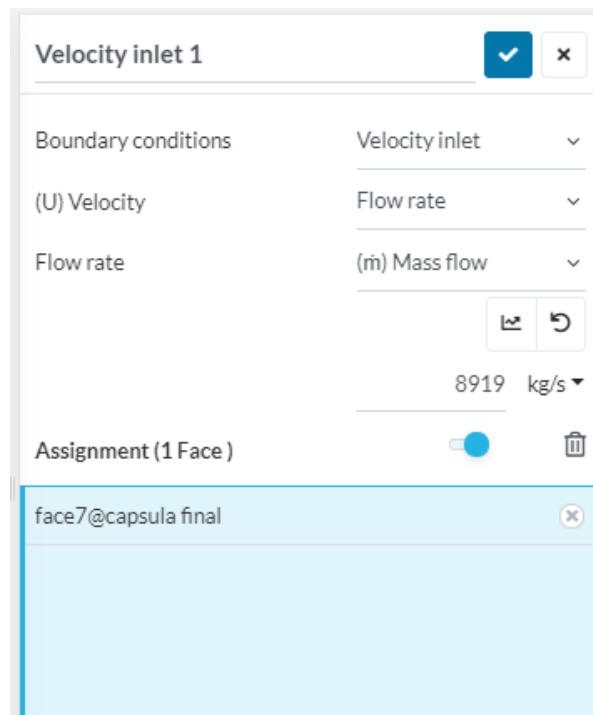


Figura 79. Condiciones de flujo másico de entrada.

Fuente: Abruscato (2019)

De igual manera se establece la condición de borde de salida indicando la presión en dicha cara (ver figura 80).

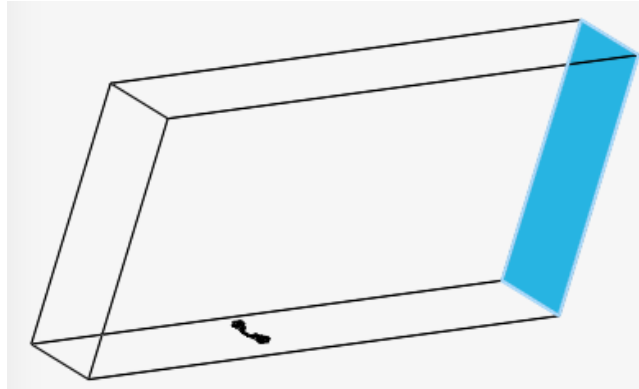


Figura 80. Cara representativa de la presión de salida.

Fuente: Abruscato (2019)

Por las dimensiones del volumen que contiene al alerón delantero, se establece que la presión de salida no posee cambios con respecto al valor fijado (ver figura 81).

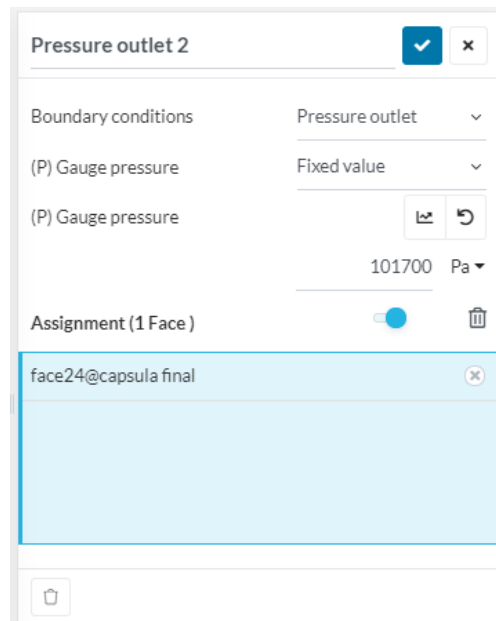


Figura 81. Condición de presión de salida.

Fuente: Abruscato (2019)

Se establecen como paredes las caras laterales del volumen que contiene al alerón delantero, de igual manera las caras superior, inferior y la superficie correspondiente al alerón delantero. Cabe destacar que la simulación se lleva a cabo bajo el control expresado en la figura 82.

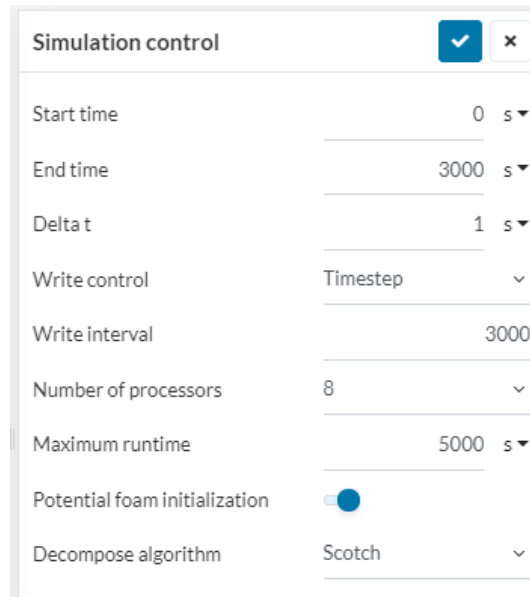


Figura 82. Condiciones del control de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019)

Posterior a haber ingresado los datos anteriormente expuestos, se ejecuta la simulación para evaluar mediante gráficas el rendimiento del alerón delantero en diseño y su respectiva comparación con los datos de competición.

4.4 Evaluación de los resultados en función de las características funcionales registradas para las condiciones de operación.

A continuación, se presentan los resultados de la simulación, expresando el comportamiento del alerón delantero en estudio mediante gráficos que representan las variables en juego. Mediante el uso de un procesador de ecuaciones incluido en el software SimScale Workbench, se procede a la resolución de las ecuaciones. Se fija un valor de 0,0001 (1×10^{-4}) como criterio de convergencia, el cual es un valor conservador para las recomendaciones del fabricante del software de CFD para problemas relacionados de ingeniería lo sugiere. Como se expresa en el gráfico2, el modelo diseñado cumple con el requisito de convergencia con las curvas que representan las velocidades en los ejes X, Y y Z, la presión manejada, la energía cinética de turbulencia y la tasa de disipación de dicha energía, lo que expresa un buen funcionamiento del diseño en estudio bajo las condiciones impuestas.

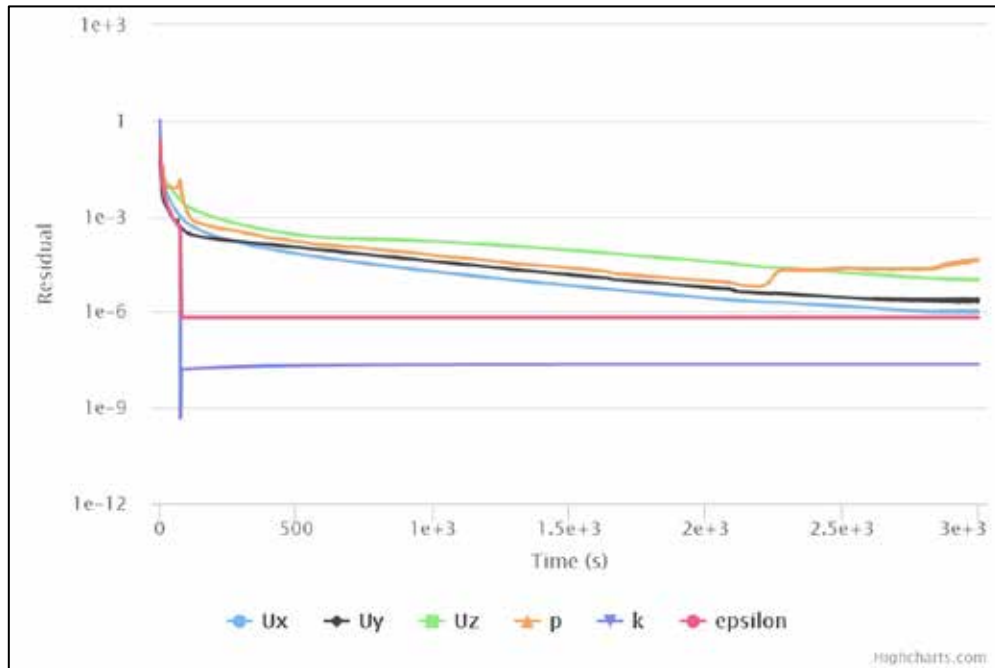


Gráfico 2. Gráfico de convergencia de variables de la simulación.

Fuente: Abruscato (2019)

El comportamiento detallado de cada una de las variables hasta alcanzar la fase de convergencia, se presentan en los gráficos 3, 4, 5 y 6.

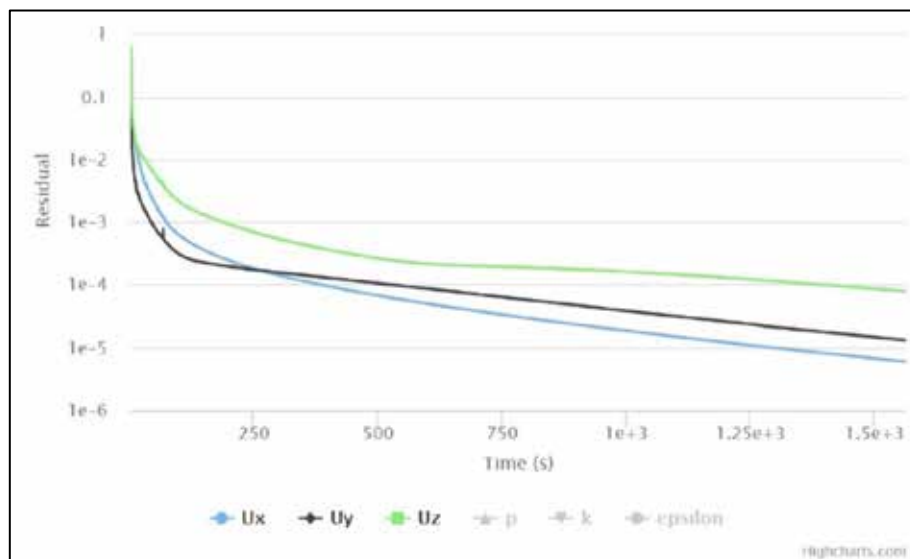


Gráfico 3. Convergencia de las curvas relacionadas a velocidades en la simulación.

Fuente: Abruscato (2019).

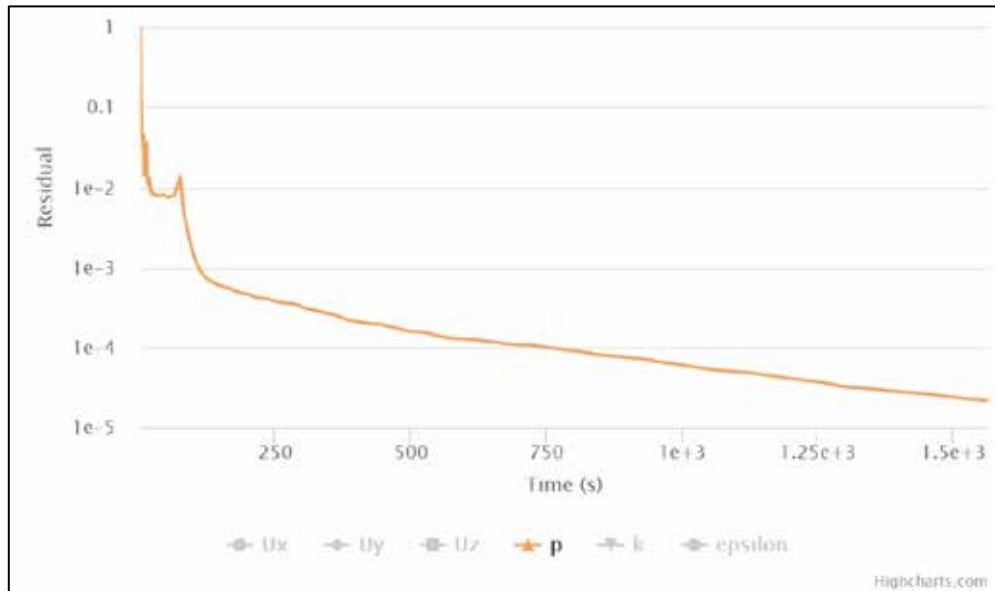


Gráfico 4. Convergencia de la curva relacionada a la presión en la simulación.

Fuente: Abruscato (2019).

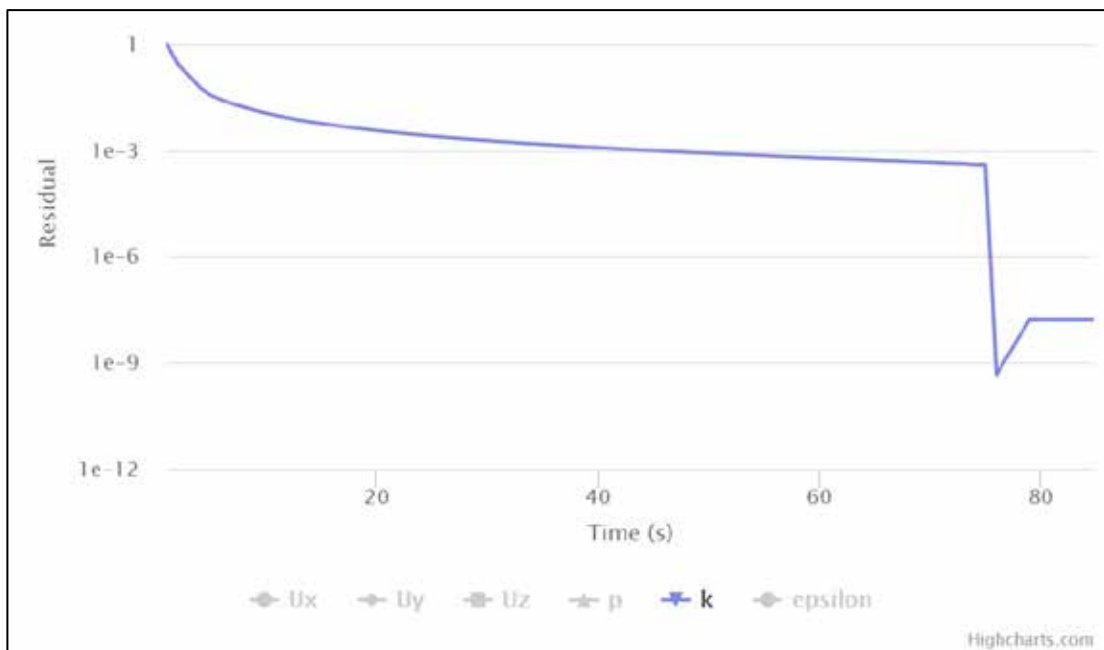


Gráfico 5. Convergencia de la curva relacionada a la energía cinética de turbulencia.

Fuente: Abruscato (2019).

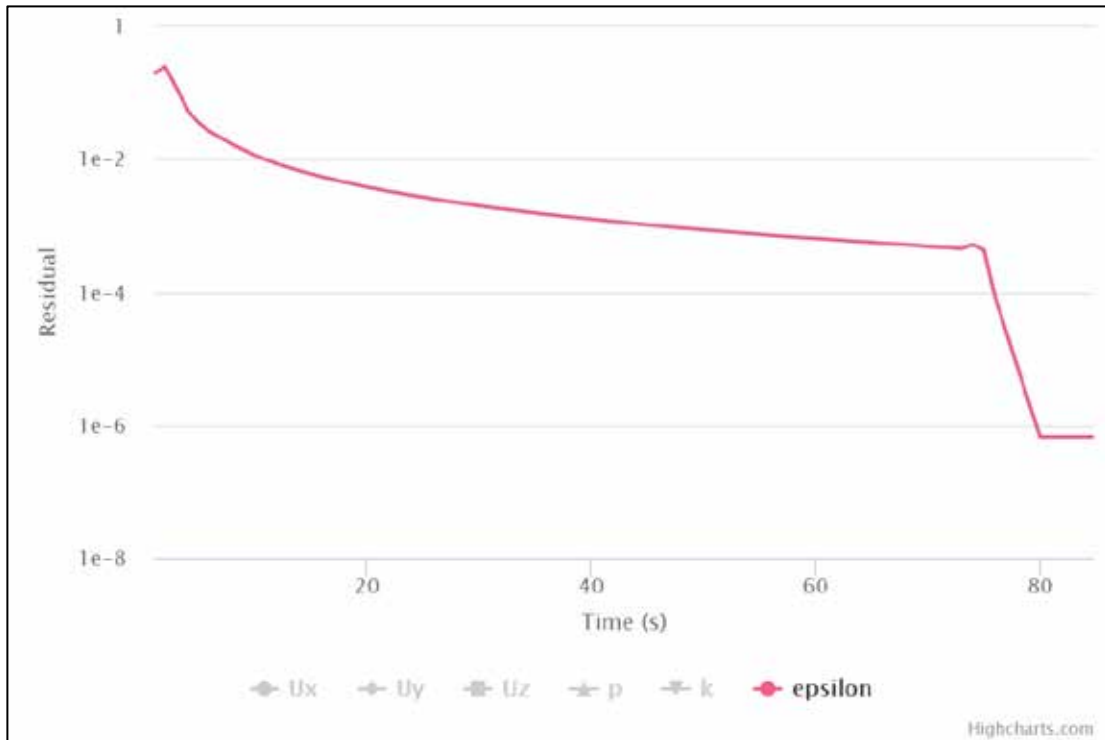


Gráfico 6. Convergencia de la curva relacionada a la tasa de dispersión de energía cinética de turbulencia.

Fuente: Abruscato (2019).

Con estos valores y las gráficas, se asegura la convergencia de la simulación y por lo tanto la fiabilidad de los resultados obtenidos, esto con la finalidad de obtener mejores resultados a la hora del análisis de este fenómeno presente en el alerón delantero de un monoplaza de fórmula 1. A continuación, se presenta en la figura 83 las velocidades promedio en los flaps el alerón delantero en diseño basándose en los resultados aportados por parte del software de simulación SimScale Workbench.

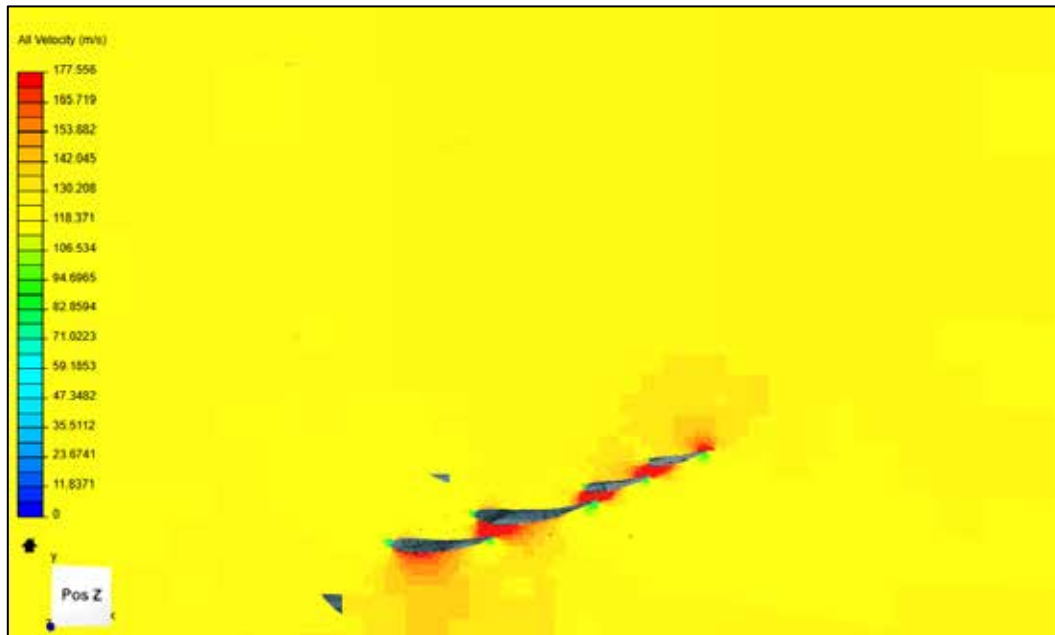


Figura 83. Cambio de velocidades del aire sobre la sección transversal del perfil de los flaps del alerón delantero en estudio.

Fuente: SimScale Workbench

Como se logra apreciar en la figura 83, se evidencia el resultado de la geometría del perfil aerodinámico, presentando una mayor velocidad en la parte inferior del mismo (en la disposición mostrada), con lo cual, al relacionarlo con la ecuación de Bernoulli, se interpreta que la mayor presión sobre el perfil aerodinámico se ejerce en su cara superior, lo que genera un downforce. Se visualiza además que en la parte más alejada de cada perfil se presentan zonas de velocidades bajas, que representan pequeños vórtices que resultan de la convergencia de la velocidad del fluido que va por la parte inferior del perfil y la velocidad del fluido que va por la parte superior.

Para estudiar el comportamiento del flujo que maneja el alerón delantero en diseño, se emplea el software Autodesk Flow Design, que permitirá estudiar dicho comportamiento en las 4 diferentes zonas de direccionamiento de flujo del alerón delantero (ver figura 84).

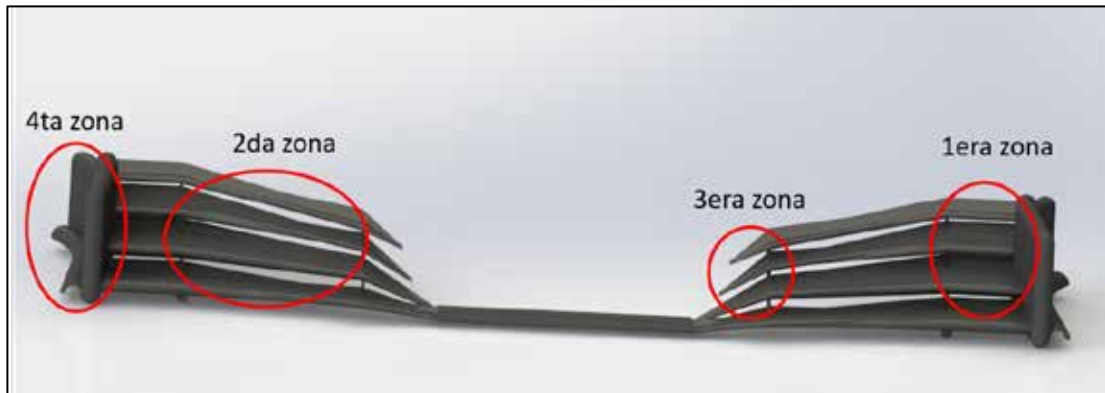


Figura 84. Zonas de comportamiento de flujo del alerón delantero.

Fuente: Abruscato (2019).

Se presenta a continuación el comportamiento del flujo en la 1era zona referida (ver figura 85 y 86).

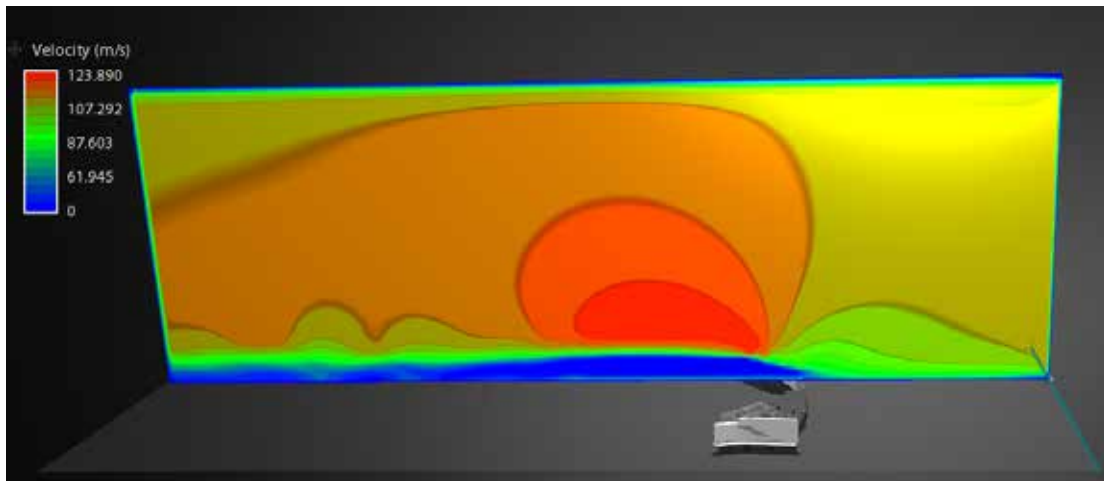


Figura 85. Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.

Fuente: Abruscato (2019).

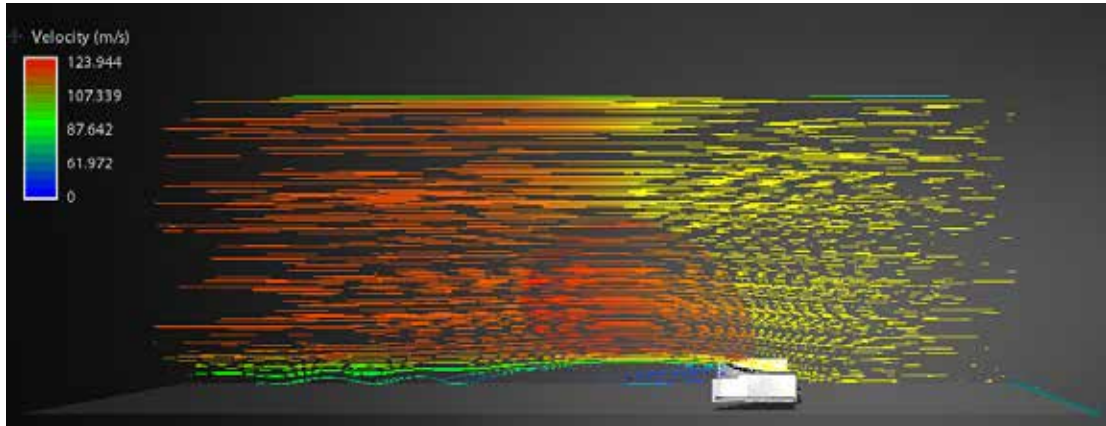


Figura 86. Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.

Fuente: Abruscato (2019)

Esta primera zona estudiada, como se hace referencia en el estudio de velocidad por plano cortante de sombras y de estelas del fluido. Esta 1era zona fue diseñada con la finalidad de dirigir el aire en su salida hacia la parte externa más cercana para seguir la alteración flujo creado por la superficie correspondiente al mainplane, además, eleva dicho flujo con un ángulo tal que permita que no interfiera con otros elementos del monoplaza en su parte posterior. Las figuras 87 y 88 hacen referencia al comportamiento del flujo en la zona 2.

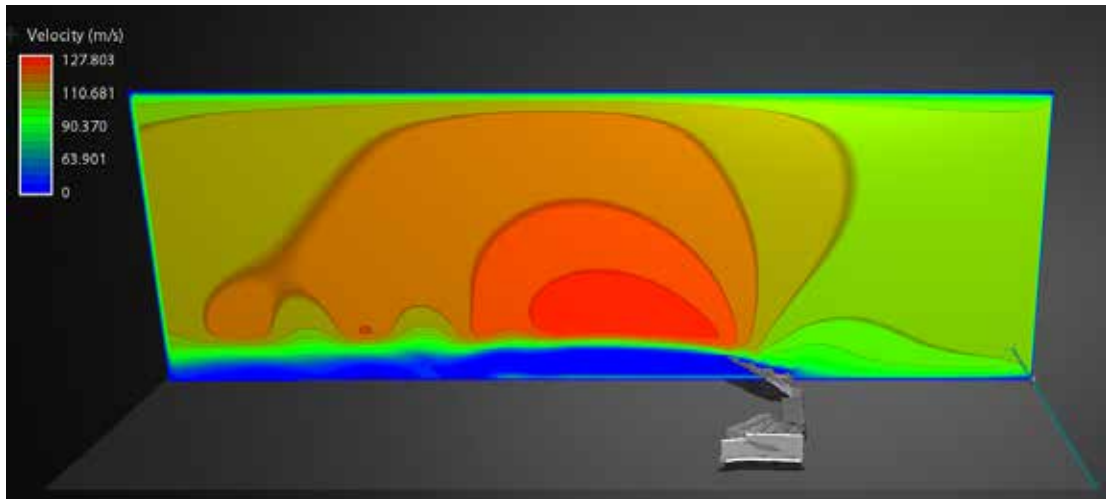


Figura 87. Comportamiento del flujo a través de la segunda zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.

Fuente: Abruscato (2019).

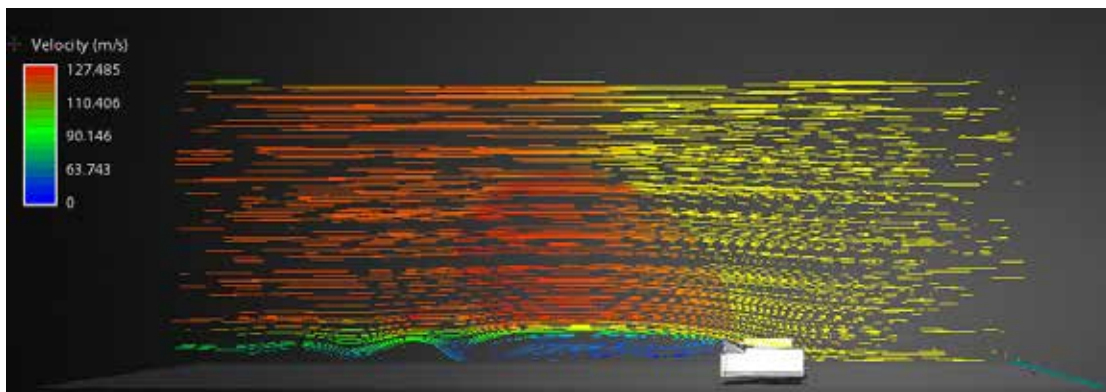


Figura 88. Comportamiento del flujo a través de la segunda zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.

Fuente: Abruscato (2019)

La zona 2 de estudio registra una diferencia notable con la zona 1, esta es la región de alta velocidad que dicha zona genera, sucede debido a que la función principal es la de dirigir el flujo de manera vertical, es la zona que debido a su función genera la mayor cantidad de downforce en comparación con las otras zonas, cabe resaltar como indican las figuras, una zona de baja velocidad posterior a la misma, mayor a la de la zona 1, esto tiene una función específica que rigen las características

de un alerón delantero, que es la función de evitar los neumáticos y de esta manera no provocar un choque brusco del fluido con estos. A continuación, se presenta el comportamiento del flujo en la zona 3 (ver figuras 88 y 89).

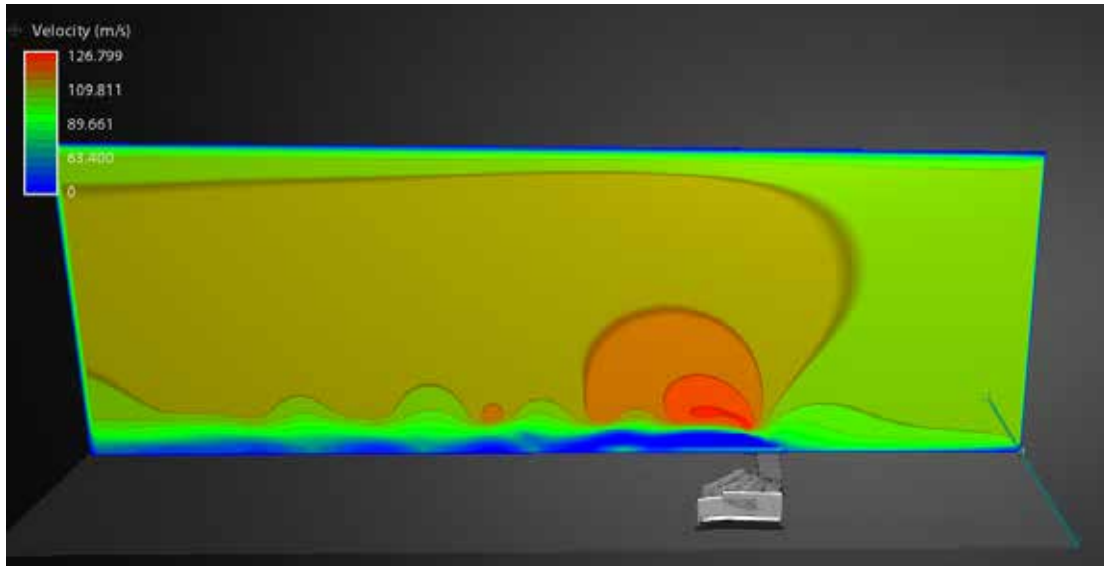


Figura 89. Comportamiento del flujo a través de la tercera zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.

Fuente: Abruscato (2019).

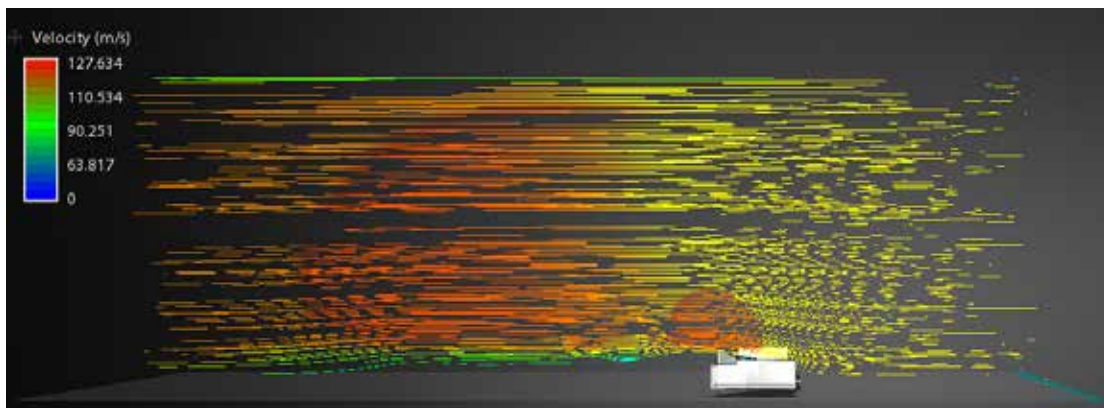


Figura 90. Comportamiento del flujo a través de la tercera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.

Fuente: Abruscato (2019)

Mediante las figuras presentadas, se aprecia cómo en esta tercera zona existe una región menor de alta velocidad e igualmente una región menor de baja velocidad, esto

sucede debido a que por la naturaleza de su configuración, cumple que el fluido sea dirigido a la superficie externa de la parte interior del monoplaza para ser aprovechado por otros elementos con fines aerodinámicos, además de evitar la formación de vórtices en la parte de salida del fluido que pueda afectar a los neumáticos delanteros.

Dicha función también se ve reflejada en una vista de planta que servirá para el análisis en conjunto con la zona 4 (ver figuras 90 y 91).

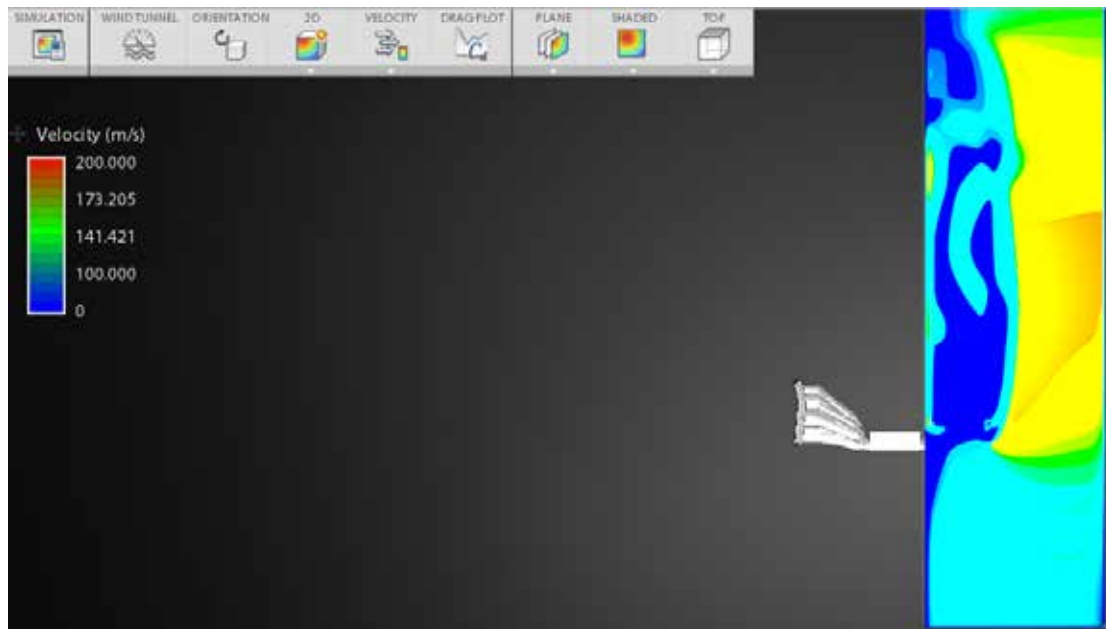


Figura 91. Comportamiento del flujo a través de la cuarta zona de estudio del alerón delantero por medio de sombras de velocidades.

Fuente: Abruscato (2019).

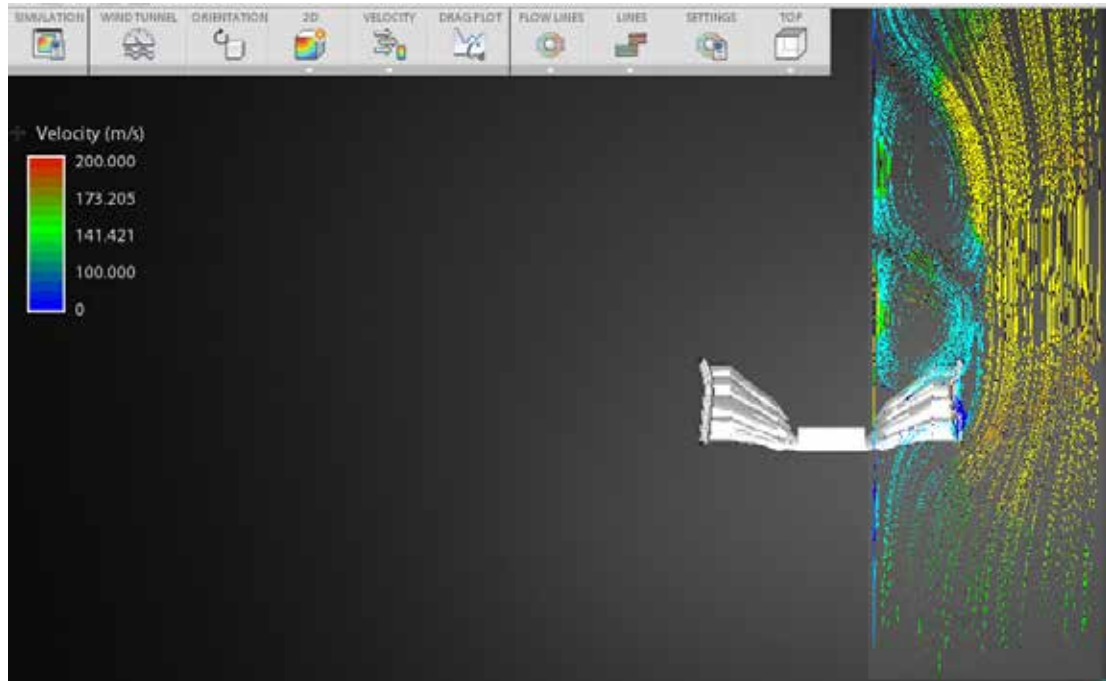


Figura 92. Comportamiento del flujo a través de la primera zona de estudio del alerón delantero por medio de Lineflows.

Fuente: Abruscato (2019)

Se expresa de manera clara en las figuras anteriormente expuestas de como el fluido es afectado por la zona comprendida por el mainplane creando un espacio a los laterales del alerón delantero, permitiendo mantener un margen de velocidades en el área comprendida por el monoplaza. De igual manera, se refleja mediante esta vista, de como el flujo del aire va desde la parte central del alerón y es redireccionado al extremo externo, de igual manera, pero en menor proporción, surge dicho efecto en el extremo interno de los flaps del alerón, expresando las funciones de la zona 1 y 3, además se señala como la zona 2 cumple su función evitando en lo mayor posible el contacto del neumático con el fluido a grandes velocidades.

Como punto final, se comprueba el valor de carga aerodinámica de manera tal que tenga un comportamiento aceptable en comparación con dicho valor en la curva más crítica (2da curva de Lesmo) calculado en el presente capítulo del tiempo de vuelta más rápido registrado en Monza. Esto se logra debido al plot que ofrece el software

Autodesk Flow Design sobre el drag force o fuerza de arrastre (ver figura 92), para ello, al momento de la simulación, se ingresa el valor de velocidad correspondiente registrado en el mejor tiempo de vuelta del autódromo, cuyo valor es 185 Km/h, equivalentes a 51,38 m/s .

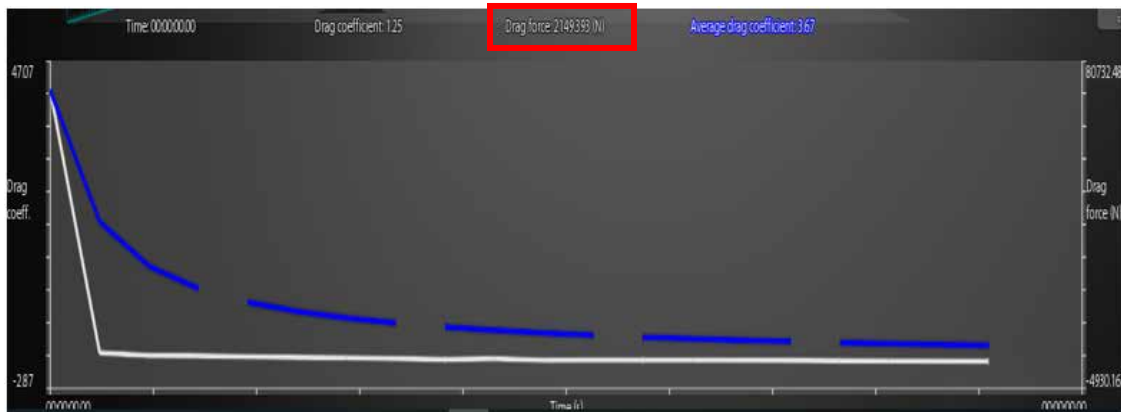


Figura 93. Plot del Dragforce del alerón delantero en estudio.

Fuente: Autodesk Flow Design.

Se evidencia que el valor de dragforce es de 2.149,398 N, por lo que al aplicar la relación ya calculada entre el downforce y el dragforce (eficiencia aerodinámica) resultante de los valores contenidos en el cuadro 1, se obtiene que:

Obtenido este valor, al compararlo con el valor de la carga aerodinámica necesaria para lograr el mejor tiempo registrado en Monza al pasar por la segunda curva de Lesmo, se aprecia una diferencia mínima de:

El alerón delantero diseñado presenta una diferencia de carga aerodinámica de 6,6615 % con respecto a la carga aerodinámica determinada necesaria para cumplir el mejor tiempo de vuelta registrado en la competición del Gran Premio de Italia de fórmula 1 llevado a cabo en el Autodromo Nazionale di Monza.

El sector de la pista que contiene las famosas curvas de Lesmo, es el sector número 2, sector en el cual se presenta una situación común en la totalidad de los pilotos, esto se evidencia al ver los tiempos de vuelta promedio de cada piloto durante la competición llevada a cabo el día 8 de septiembre de 2019. (ver figuras 93 y 94).

RITMO DE CARRERA											
POS	PILOTO	S1	S2	S3	RITMO	GAP	LAPS	V. RAPIDA	SALIDA	ESTRATEGIA	
1	LECLERC	27,804	28,342	28,030	1:24,176		53	1:23,009	1	BU	DN
2	BOTTAS	27,986	28,345	27,889	1:24,220	0,043	53	1:22,859	3	BU	MN
3	HAMILTON	28,025	28,399	27,916	1:24,340	0,164	53	1:21,779	2	BU	MN BU
4	VETTEL	27,875	28,525	28,304	1:24,703	0,527	52	1:22,799	4	BU	DN MN
5	VERSTAPPEN	28,029	28,674	28,054	1:24,757	0,581	53	1:23,143	20	BN	MU
6	ALBON	28,094	28,699	28,127	1:24,920	0,743	53	1:23,364	6	BU	MN
7	HULKENBERG	28,069	28,717	28,417	1:25,203	1,027	53	1:23,641	7	BU	MN
8	RICCIARDO	28,060	28,708	28,441	1:25,209	1,033	53	1:23,466	5	BU	MN
9	PEREZ	27,939	29,039	28,360	1:25,338	1,162	53	1:23,770	17	MN	BN
10	STROLL	27,923	28,971	28,464	1:25,358	1,182	52	1:24,165	9	BU	MN
11	NORRIS	28,137	29,097	28,313	1:25,547	1,371	52	1:24,044	15	MN	DN
12	GASLY	28,268	28,959	28,389	1:25,616	1,439	52	1:23,885	10	MN	BN
13	GIOVINAZZI	28,320	28,922	28,394	1:25,636	1,460	52	1:24,503	12	BN	MN
14	MAGNUSSEN	28,420	29,033	28,542	1:25,995	1,819	43	1:24,443	13	BN	MN BU
15	SAINZ	28,284	29,241	28,608	1:26,133	1,956	27	1:25,637	8	BU	
16	KVYAT	28,480	29,199	28,546	1:26,226	2,049	29	1:25,772	14	MN	
17	RAIKKONEN	28,388	29,056	28,790	1:26,234	2,057	52	1:24,419	11	MN	BN
18	RUSSELL	28,576	29,054	28,734	1:26,365	2,188	52	1:24,842	18	MN	DN
19	GROSJEAN	28,409	29,080	28,979	1:26,469	2,293	52	1:24,985	16	BN	MN BN
20	KUBICA	28,709	29,457	29,157	1:27,323	3,147	51	1:24,989	19	MN	BN MN

Figura 94. Tiempo por sector de la pista de cada piloto de la competencia.

Fuente: soymotor.com

RITMO SECTORIAL											
SECTOR 1				SECTOR 2				SECTOR 3			
P	PILOTO	SEG	V. MEDIA	P	PILOTO	SEG	V. MEDIA	P	PILOTO	SEG	V. MEDIA
1	LECLERC	27,804	241,1	1	LECLERC	28,342	245,8	1	BOTTAS	27,889	254,0
2	VETTEL	27,875	240,5	2	BOTTAS	28,345	245,8	2	HAMILTON	27,916	253,8
3	STROLL	27,923	240,1	3	HAMILTON	28,399	245,3	3	LECLERC	28,030	252,8
4	PEREZ	27,939	239,9	4	VETTEL	28,525	244,2	4	VERSTAPPEN	28,054	252,5
5	BOTTAS	27,986	239,5	5	VERSTAPPEN	28,674	242,9	5	ALBON	28,127	251,9
6	HAMILTON	28,025	239,2	6	ALBON	28,699	242,7	6	VETTEL	28,304	250,3
7	VERSTAPPEN	28,029	239,2	7	RICCIARDO	28,708	242,7	7	NORRIS	28,313	250,2
8	RICCIARDO	28,060	238,9	8	HULKENBERG	28,717	242,6	8	PEREZ	28,360	249,8
9	HULKENBERG	28,069	238,8	9	GIOVINAZZI	28,922	240,9	9	GASLY	28,389	249,6
10	ALBON	28,094	238,6	10	GASLY	28,959	240,5	10	GIOVINAZZI	28,394	249,5
11	NORRIS	28,137	238,2	11	STROLL	28,971	240,4	11	HULKENBERG	28,417	249,3
12	GASLY	28,268	237,1	12	MAGNUSSEN	29,033	239,9	12	RICCIARDO	28,441	249,1
13	SAINZ	28,284	237,0	13	PEREZ	29,039	239,9	13	STROLL	28,464	248,9
14	GIOVINAZZI	28,320	236,7	14	RUSSELL	29,054	239,8	14	MAGNUSSEN	28,542	248,2
15	RAIKKONEN	28,388	236,1	15	RAIKKONEN	29,056	239,7	15	KVYAT	28,546	248,2
16	GROSJEAN	28,409	235,9	16	GROSJEAN	29,080	239,5	16	SAINZ	28,608	247,7
17	MAGNUSSEN	28,420	235,9	17	NORRIS	29,097	239,4	17	RUSSELL	28,734	246,6
18	KVYAT	28,480	235,4	18	KVYAT	29,199	238,6	18	RAIKKONEN	28,790	246,1
19	RUSSELL	28,576	234,6	19	SAINZ	29,241	238,2	19	GROSJEAN	28,979	244,5
20	KUBICA	28,709	233,5	20	KUBICA	29,457	236,5	20	KUBICA	29,157	243,0
TASA CRITICA			0,8899	TASA CRITICA			1,0786	TASA CRITICA			1,1692

Figura 95. Ritmo sectorial por piloto en menor tiempo.

Fuente: soymotor.com

CONCLUSIONES

La simulación aerodinámica llevada a cabo al alerón delantero de un monoplaza de Fórmula 1 permitió identificar la capacidad que posee dicho elemento para desempeñarse en las condiciones establecidas. Determinando las variables ambientales que influyen en el diseño aerodinámico del componente del monoplaza con datos reales del día de competición del Gran Premio de Italia de la Fórmula 1 llevado a cabo en el autódromo Nazionale di Monza, tales como la temperatura, la presión atmosférica, la viscosidad cinemática del aire en Monza, entre otras variables. Seleccionando un perfil aerodinámico de baja resistencia, con características específicas como la de la poca variación de sus coeficientes de sustentación y arrastre a diferentes valores de número de Reynolds sometido; basándose en esta premisa, se optó por un perfil aerodinámico GOE 431. Modelado dicho diseño con las dimensiones y elementos referidos en el reglamento del ente rector de la competición, permitiendo de esta manera lograr evidenciar por medio de herramientas de aproximación numérica CFD el buen comportamiento del diseño creado, considerado confiable por la convergencia expresada de sus variables más relevantes como resultado de la simulación.

Además se logró clasificar la superficie del alerón delantero en diferentes zonas, relacionando la función específica de cada una de ellas y su aporte en el desempeño principal del monoplaza, evaluando el diseño a una velocidad máxima de 108 m/s, equivalentes a 389 Km/h que considera la velocidad máxima de un monoplaza en el circuito, cuyo valor es 365 Km/h (101,389 m/s), y una posible y teórica presencia de velocidad en el viento, aumentando la velocidad relativa en el alerón delantero.

La utilización de softwares de diseño y análisis SimScale Workbench, Autodesk Flow Design y Solidworks, facilita la realización del modelo 3D basado en los parámetros de trabajo de del cuerpo que se desea modelar y someter a estudio que

implica una herramienta de aproximación numérica CFD. Esto también disminuye la posibilidad de errores.

Se determinó no solo el sector crítico del circuito en el que se requiere una exacta fuerza descendente o downforce para recorrer el sector en el menor tiempo posible, sino que también se determinó la curva y el valor de la carga descendente necesaria para igualar el mejor tiempo registrado de la categoría Fórmula 1 en dicho autódromo. Siendo el valor de carga necesario de 185 km/h , equivalentes a $51,38 \text{ m/s}$; el alerón delantero diseñado genera una fuerza descendente $6,6615 \%$ inferior a la anteriormente referida, que viene dado por el valor de 185 km/h , por lo que se considera un diseño de buen rendimiento para el punto crítico estudiado debido a la mínima diferencia en las magnitudes determinadas.

RECOMENDACIONES

En el diseño del componente aerodinámico se considera prudente la recomendación de realizar el estudio con diferentes perfiles aerodinámicos de baja resistencia y comparar los resultados finales para tener la posibilidad de evaluar distintos comportamientos y profundizar en las variables que intervienen y determinan el rendimiento la pista del autódromo en estudio.

Cabe destacar que para un estudio más preciso que induce la evaluación del comportamiento aerodinámico de un monoplaza de Fórmula 1, es necesario incluir la mayor cantidad de elementos constituyentes del monoplaza debido a que trabajan en sinergia, por lo que un elemento puede dar buenos resultados pero si no existe una sinergia con los demás componentes no se reflejará el comportamiento adecuado.

Las recomendaciones mencionadas permiten incrementar competitividad en pista al diseño planteado, otorgándole mayor precisión al recorrer las curvas y disminuir la potencia necesaria para vencer la resistencia ejercida por el aire, aumentando la eficiencia aerodinámica frontal general.

REFERENCIAS

ANSYS-CFX. **Release 17 ANSYS CFX-Solver Theory Guide.** (2016).

Alvarado (2013) **GP de Italia, Monza 2013.**

Fuente.digital: <https://www.motor.es/formula-1/gp-italia-en-directo-f1-monza.php>

AS. (2019) **Nuevos coches para la temporada 2019 de la fórmula 1.**

Fuente.digital:https://as.com/motor/2019/02/17/formula_1/1550437301_577781.html

Arias, F. (2012): El **proyecto de investigación**, Caracas: Episteme.

Burnedsap. (2013) **F1 Monza track guide.**

Fuente.digital:<https://burnedsap.blogspot.com/2013/01/f1-monza-track-guide.html>

Cengel, Y. (2007): **Fundamentos de Mecanica de Fluidos.** (2ª ed.). Mexico D.F: McGraw Hill Education.

es.weatherspark.com (2019)

Fuente digital: <https://es.weatherspark.com/d/62532/9/8/Tiempo-promedio-el-8-de-septiembre-en-Monza-Italia#Sections-ColorTemperature>

FIA (2018). Formula one technical regulations 2019.

Fuente digital: formula_one_-_technical_regulations_-_2019%20.pdf

Gutiérrez. (2018) **Alerones delanteros para la temporada de 2019.**

Fuente.digital:<http://co.marca.com/claro/motor/formula1/2018/07/31/5b608b6ce5fdea61038b45bb.html>

Hernández, Fernández y Baptista (1998): **Metodología de la investigación.** México: Mc Graw Hill.

- Hurtado I. y Toro G. (2001): **Paradigmas y métodos de investigación en tiempos de cambio**. (4ta ed) Venezuela: Valencia.
- Marca. (2018) **GP Italia 2018: la vuelta más rápida de la historia**
Fuente digital: <https://www.marca.com/motor/formula1/gpitalia/2018/09/01/5b8ab4f6ca47414f3f8b45b0.html>
- Márquez. (2016) **Análisis técnico del Autodromo Nazionale di Monza**.
Fuente digital: <https://www.momentogp.com/analisis-tecnico-del-autodromo-nazionale-di-monza/>
- Méndez. (2014) **Partes de un fórmula 1 y sus neumáticos**.
Fuente digital: <https://www.motor.es/formula-1/el-diccionario-de-la-formula-1-las-partes-de-un-f1-y-los-neumaticos-201520437.html>.
- Monzanet (2012) **TRACCIATO**.
Fuente digital: <https://www.monzanet.it/interno.php?id=6>.
- Ramírez. (2018) **Ficha técnica del circuito de Monza**.
Fuente digital: <https://www.formula1atmosphere.com/circuitos/autodromo-nazionale-monza/>.
- Renga (2014). **Circuito de Monza**.
Fuente digital: <https://desdelapelouse.wordpress.com/circuitos/monza/>.
- Sampieri R., Fernandez C., Baptista P., (2006): **Metodología de la Investigación**. McGraw – Hill.
- Simscale Workbench (2019)
Fuente digital: <https://www.simscale.com/>
- Soymotor.com (2019), **Análisis GP Italia F1 2019**.
Fuente digital: <https://soymotor.com/articulos/analisis-gp-italia-f1-2019-cambio-de-ciclo-en-ferrari-968738>
- Tamayo y Tamayo, Mario. (1997): **El Proceso de la Investigación científica**. Editorial Limusa S.A. México.1997.
- Torres. (2018) **Carga aerodinámica en un coche de fórmula 1**.

Fuente.digital:<https://www.formula1atmosphere.com/aerodinamica/carga-aerodinamica-downforce/>

Totalsim (2018). **Secrets of formula 1 part 3: The role of the front wing.**

Fuente digital: <https://www.totalsimulation.co.uk/secrets-formula-1-part-3-role-front-wing/>

Universidad de Granada y la Universidad de Málaga. (2014), **Estudio aerodinámico en túnel de viento de un alerón frontal de un coche de competición GP2.**

Ortiz, J. Proyecto final del Máster Oficial en Hidráulica Ambiental. España.

Universidad Libre de Colombia. (2017), **Análisis aerodinámico del carrozado frontal de un vehículo de competición prototipo de la categoría FL2.** Barrera, J. Trabajo de pre-grado. Colombia.

Universidad Simón Bolívar. (2007), **Adaptación y análisis de perfiles para su uso como elemento aerodinámico en un Fórmula SAE.** León, L. Trabajo de Pregrado. Caracas, Venezuela.

Universitat Politècnica de València. (2017), **Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas del Porsche 911 GT3 mediante técnicas CFD.** Benedito J. Trabajo de pre-grado. Valencia, España.

Zimmerman. (2019) **F1 British Grand Prix 2019.**

Fuente digital: <https://www.foxsports.com.au/motorsport/formula-one/live-f1-british-gp-daniel-ricciardo-out-to-improve-at-silverstone-on-crappy-race-in-austria/news-story/582005e28c30b124fe02edf9aae71e68>.