



| POSGRADOS |

MAESTRÍA EN MÉTODOS MATEMÁTICOS Y SIMULACIÓN NUMÉRICA EN INGENIERÍA

RPC-SO-42-NO.769-2019

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

ARTÍCULOS PROFESIONALES DE ALTO NIVEL

TEMA:

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA
GENERACIÓN DE CARGA AERODINÁMICA
EN UN MONOPLAZA FORMULA STUDENT
CONSIDERANDO VARIACIONES EN LOS
PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL DISEÑO

AUTOR:

CARLOS AYRTON JARAMILLO ANDRADE

DIRECTOR:

RAFAEL WILMER CONTRERAS URGILES

CUENCA – ECUADOR

2023

Autor:**Carlos Ayrton Jaramillo Andrade**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Candidato a Magíster en Métodos Matemáticos y Simulación Numérica en Ingeniería por la Universidad Politécnica Salesiana –Sede Cuenca.

ayrton.j.4@gmail.com

Dirigido por:**Rafael Wilmer Contreras Urgiles**

Ingeniero Mecánico Automotriz.

Magíster en Sistemas Automotrices.

rcontreras@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2023 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA - ECUADOR- SUDAMERICA

CARLOS AYRTON JARAMILLO ANDRADE

Simulación numérica de la generación de carga aerodinámica en un monoplaza formula student considerando variaciones en los parámetros geométricos del diseño

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia por todo el apoyo recibido durante estos años de formación académica y personal. Sin su constante motivación, este logro no habría sido posible.

AGRADECIMIENTO

Al Ing. Wilmer Contreras por el apoyo presentado en la recolección de información y por todas las sugerencias recibidas a lo largo de este trabajo.

SIMULACIÓN
NUMÉRICA DE LA
GENERACIÓN DE
CARGA AERODINÁMICA
EN UN MONOPLAZA
FORMULA STUDENT
CONSIDERANDO
VARIACIONES EN LOS
PARÁMETROS
GEOMÉTRICOS DEL
DISEÑO

AUTOR (ES):

CARLOS AYRTON JARAMILLO ANDRADE

DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En 2014 y 2017 el equipo de la UPS compitió en Silverstone Inglaterra; en la primera participación y con respecto a la aerodinámica el monoplaza constaba de un fondo plano el cual mejora el agarre del vehículo debido al efecto Bernoulli en el segundo monoplaza EB17 se realizó un estudio en el cual se incluían un alerón frontal y posterior, en este estudio se llegó a la conclusión que su implementación no era conveniente debido al aumento de peso.

En el estudio de factibilidad realizado en el monoplaza EB17 es un primer contacto con el análisis mediante CFD (computer fluid dynamics), pero tiene varios problemas con el dominio computacional utilizado, así como también el software utilizado. Dicho software es principalmente un programa CAD, pero insuficiente en FEA (finite element analysis), a pesar de tener la posibilidad de hacer simulaciones, sus resultados tienen baja consistencia, debido principalmente a que las opciones de mallado son básicas, lo que impide hacer un refinamiento de malla.

Los estudios previos realizados en los monoplazas Bosco1 y EB17 no abarcan el panorama completo en la implementación de mejoras aerodinámicas. Es así que la problemática que abarca esta propuesta, se basa en mejorar el rendimiento del monoplaza mediante la generación de carga aerodinámica. En monoplazas la carga aerodinámica permite aumentar la velocidad de paso por curva, lo que se traduce en reducción en el tiempo que le toma acabar una prueba dinámica, de igual manera, la distancia de frenado se ve reducida por el arrastre que el aire genera en estos alerones.

Con este proyecto se plantea establecer una metodología que permita obtener resultados de CFD confiables, aplicando de manera correcta estas herramientas computacionales lo que permite obtener unos resultados más cercanos a la realidad.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA GENERACIÓN DE CARGA AERODINÁMICA EN UN MONOPLAZA FORMULA STUDENT CONSIDERANDO VARIACIONES EN LOS PARÁMETROS GEOMÉTRICOS DEL DISEÑO

NUMERICAL SIMULATION OF THE GENERATION OF DOWNFORCE IN A FORMULA STUDENT VEHICLE CONSIDERING VARIATIONS IN THE GEOMETRIC PARAMETERS OF DESIGN

Carlos Ayrton Jaramillo Andrade¹, Rafael Wilmer Contreras Urgilés²

Resumen

En este artículo se presenta una propuesta metodológica de diseño de un paquete aerodinámico para un vehículo Formula Student. Se han aplicado herramientas de computational fluid dynamics (CFD) con especial atención en la generación de sustentación aerodinámica y análisis del rendimiento de dinámico de manera numérica. La metodología para el desarrollo de este concepto, inicia con establecer límites que respeten las restricciones geométricas del vehículo y cumplan con las reglas de FSAE 2022/23. Dentro de estos límites, diferentes geometrías de los accesorios aerodinámicos y diversas configuraciones han sido modeladas. El modelo inicial es seleccionado y analizado en CFD para generar una línea base de comparación. Este proceso se ha aplicado con diversos perfiles aerodinámicos en los alerones y difusor. Se han aplicado simplificaciones al modelo computer aided design (CAD) y el dominio es discretizado en elementos poli-hexagonales y celdas ortogonales prismáticas próximas a las superficies del modelo. Una vez completado el análisis CFD y el modelo final definido, se realiza un análisis del rendimiento con y sin accesorios aerodinámicos. El modelo seleccionado tiene un coeficiente $cl/cd=2.65$ mientras que el modelo base tiene un $cl/cd=0.4$. Con esto se ha demostrado que existe una mejora considerable respecto al modelo inicial.

Palabras Clave: CFD, CAD, AoA, sustentación.

Abstract

This article presents the design process of an aerodynamic kit for a Formula SAE vehicle. Computational fluid dynamics (CFD) tools have been applied with special emphasis on generating aerodynamic lift and numerically analyzing performance. The methodology for developing this concept begins with establishing limits that respect the vehicle's geometric constraints and comply with FSAE 2022/23 rules. Within these limits, different geometries of aerodynamic accessories and various configurations have been modeled. The initial model is selected and analyzed in CFD to generate a baseline for comparison. This process has been applied with various aerodynamic profiles on the wings and diffuser. Simplifications have been applied to the computer-aided design (CAD) model, and the domain is discretized into poly-hexagonal elements and prismatic orthogonal cells close to the model's surfaces. Once the CFD analysis and the final model are defined, a performance analysis is conducted with and without aerodynamic accessories. The selected model has a cl/cd coefficient of 2.4, while the base model has a cl/cd of 0.4. This demonstrates a significant improvement compared to the initial model.

Keywords: CFD, CAD, AoA, lift

¹ Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

1. Introducción

El efecto aerodinámico aumenta la carga sobre el neumático, mejorando la fricción máxima, sin aumentar el peso del vehículo [1, 2]. Este efecto contribuye a la reducción del coeficiente de arrastre (C_x) del vehículo e influye en la disminución del consumo de combustible [3].

En los inicios de la industria automotriz el efecto aerodinámico tuvo sus primeros estudios de manera empírica con belga Camille Jenatton en 1889, quien construyó un vehículo perfilado para superar los 100km/h [4]. Posteriormente en 1921 se construyó el Rumpler-Tropfenwagen, un vehículo en forma de gota [5], el cual tiene un excelente coeficiente de arrastre (0.28), medido en 1979 en un túnel de viento de Volkswagen [6]. En los siguientes años las innovaciones en formula 1 serían las más destacadas. A mediados de los 1960 el Lotus 49B introdujo alerones por primera vez [7], estas mejoras aerodinámicas le darían una ventaja de 17.3 segundos con respecto al segundo clasificado [8]. Desde entonces la aerodinámica se expandió prácticamente a todas las competiciones. En la década siguiente, la aerodinámica en formula 1 evolucionó para que los vehículos tomen forma de cuña [9], se ha estudiado que esta geometría aumenta la generación de carga aerodinámica y consecuente a esta la resistencia aerodinámica [2, 10], esta resistencia se genera cuando existe un desprendimiento brusco de la capa límite [11]. En la década de 1980 aparecieron vehículos con fuerte influencia del efecto suelo, el mismo que tiene como principio aerodinámico el efecto Venturi [12], aunque fue prohibido poco después de su implementación por temas de seguridad [13]. En la década de 2010 las nuevas regulaciones en la fórmula 1, motivaron a una evolución más notoria en el suelo de los monoplazas la cual empezó con el difusor doble de Brawn GP, siendo este el inicio en innovaciones posteriores como el ducto F y los difusores soplados [13].

La Fórmula 1 ha sido un referente en términos de tecnología, innovación y rendimiento en el mundo del automovilismo. Es por esto que los equipos de Fórmula Student (FSAE) han buscado aprovechar los avances tecnológicos y los enfoques de diseño

utilizados en la Fórmula 1 para mejorar sus propios vehículos. Los prototipos de FSAE han incluido estudios como la aerodinámica avanzada, que mejora la maniobrabilidad, estabilidad, fricción entre el neumático y circuito. Otra de las innovaciones más notables en la aerodinámica de FSAE es el desarrollo de paquetes aerodinámicos ajustables. Estos paquetes constan de alerones y difusores que permiten la variación de la carga aerodinámica en función de la decisión del piloto a lo largo de todo el circuito [14]. Como por ejemplo cerrar los alerones al ingresar a una curva. Los resultados de estos paquetes aerodinámicos mejoran la maniobrabilidad. En la literatura [15, 16], se han reportado resultados de estudios en prototipos FSAE que muestran una mejora de dos segundos en el tiempo por vuelta al aplicar una carga de 600N a una velocidad de 60 km/h. En la búsqueda de mejorar el coeficiente de fricción entre el neumático y el circuito, los alerones delgados evolucionaron a alerones de mayor espesor [17]. Estos alerones grandes generan más carga y arrastre aerodinámico.

Como lo estudiado, los equipos de la FSAE han utilizado diversos paquetes aerodinámicos y han aprovechado tanto los túneles de viento como las herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) [18]. Estos recursos han permitido optimizar el diseño de alerones y difusores [19].

Las herramientas CFD, en particular, relacionan las ecuaciones de conservación de masa, la segunda ley de Newton y la primera ley de la termodinámica [13]. Esto proporciona una base sólida para el análisis y la predicción de los flujos alrededor de los vehículos FSAE sin la necesidad de realizar ensayos físicos.

En el contexto de FSAE, comprender el comportamiento del flujo turbulento a altos números de Reynolds [20] es fundamental para optimizar el diseño y el rendimiento aerodinámico. Esta naturaleza aleatoria del fluido implica un cambio constante de la velocidad y la presión en función del tiempo [18]. Este comportamiento del flujo, que complica el estudio experimental, se puede cuantificar mediante diferentes modelos de

turbulencia. El modelo $k - \omega$ tiene una buena capacidad de describir adecuadamente la turbulencia cerca de paredes [18]. Por su parte el modelo $k - \varepsilon$ tiene una alta eficiencia computacional, sin embargo, tiene dificultades con flujos separados, recirculación y regiones de flujo altamente no lineales [18]. El modelo $k - \omega$ SST es una combinación efectiva de los modelos mencionados. Este logra una mejora significativa en la predicción de la capa límite, especialmente en casos de flujo separado y transición a turbulencia. Además, este modelo es capaz de manejar de manera más precisa los gradientes de presión adversos [21]. No existe un modelo de turbulencia definido, sin embargo, el modelo $k - \omega$ SST se usa para análisis de modelos completos [15]. El modelo completo presenta complejidades en su análisis, lo cual obliga a la aplicación de software con el fin de una reducción significativa de costos.

Con el fin de estudiar el rendimiento del vehículo y predecir el comportamiento bajo diferentes condiciones de carga, se aplican las ecuaciones de dinámica del vehículo [22]. Las expresiones de velocidad en curva, esfuerzo tractor, distancia de frenado, velocidad máxima y aceleración, son las principales para este estudio.

En investigaciones como [23, 24, 25], presentan estudios limitados de aerodinámica. No presentan una opción de optimización de un vehículo construido a través de paquetes aerodinámicos. Estos trabajos no son concluyentes en la simulación CFD del vehículo completo. Continuando con las investigaciones citadas, este trabajo presenta una metodología para mejorar la carga y arrastre aerodinámicos, de un monoplaza construido. Las opciones iniciales de paquetes aerodinámicos presentan una aproximación en la generación de carga aerodinámica. Se presentan las configuraciones del paquete aerodinámico. Posterior el análisis CFD y finalmente se predicen las ganancias debidas al paquete aerodinámico y el comportamiento del monoplaza.

2. Materiales y métodos

En esta sección se desarrollan los temas relacionados con: la selección de perfiles alares y modelo inicial con el método de análisis

multicriterio. El software utilizado en el desarrollo del análisis CFD. Se emplean expresiones de dinámica vehicular establecidas previamente, para predecir el comportamiento del vehículo.

2.1. Metodología

Para el desarrollo de este trabajo se establece un orden y actividades que conciernen a la selección del modelo base, perfiles alares, diseño del paquete aerodinámico, modelado del dominio computacional, discretización de malla, determinación de condiciones de frontera, análisis tanto CFD y numérico del rendimiento del monoplaza. En la Figura 1 se muestra el flujograma de estas actividades. En la primera etapa o preprocesamiento se seleccionan el modelo base y perfiles alares. A continuación, se extraen del reglamento FSAE [26] los parámetros más influyentes sobre el diseño de elementos aerodinámicos. Se modelan las diferentes configuraciones del paquete aerodinámico. En la etapa de análisis se emplea la herramienta de CFD para simular las configuraciones aerodinámicas. En El post procesamiento, se visualizan los resultados obtenidos prosiguiendo con los análisis de independencia de malla, rendimiento con y sin alerones, y predicción del comportamiento en pista.

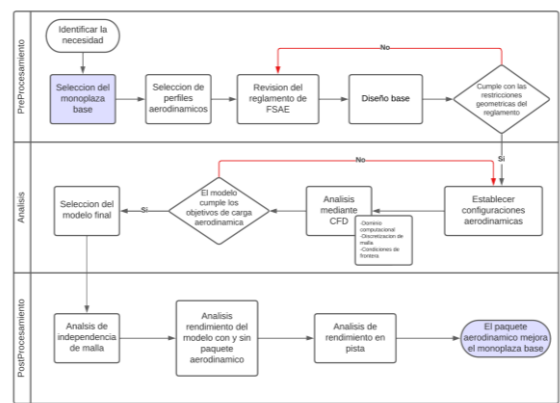


Figura 1: Proceso de diseño.

En relación con el análisis de resultados se detalla en la sección 3, el correspondiente desarrollo de la metodología.

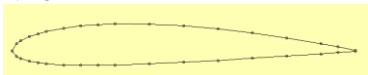
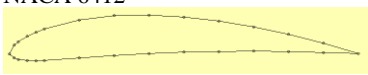

2.2. Materiales

El material a utilizar es el Bosco 1 de la Universidad Politécnica Salesiana. Tomando este

monoplaza como la base del desarrollo aerodinámico [27]. El monoplaza se selecciona ya que ha tenido constante mantenimiento y mejoras a través de los años. En el trabajo [28] se evidencian características de las mejoras realizadas.

Con relación a la selección de perfiles alares, los perfiles comúnmente utilizados son de baja relación de aspecto. En el trabajo [29], esta baja relación de aspecto se aplicó a la selección de diferentes perfiles para alerones frontales, además de su alto interés en vehículos de competencia. Los detalles de estos perfiles se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Perfiles del alerón frontal.

| Perfil | Sp | fm |
|--|--------|----|
| NACA 2412 | 12% | 2% |
|  | | |
| NACA 6412 | 12.03% | 6% |
|  | | |
| Bogart (Bo 930-310) | 10% | 9% |
|  | | |

La selección de estos perfiles se basa en el valor de fm , por ejemplo, el valor del perfil NACA 2412 ayuda a la generación del efecto suelo. El perfil Bo 930-310 aporta una mayor carga aerodinámica. Y el perfil NACA 6412 es un punto medio entre los perfiles mencionados anteriormente.

En el alerón posterior es preferible valores alrededor de $fm=21\%$. Estos se consideran alerones de carga especial. Estos perfiles se presentan en el estudio [29], para el alerón posterior se utiliza el perfil Be 112-205 de uno o dos flaps, que se presentan en la Figura 2 y Figura 3 respectivamente.

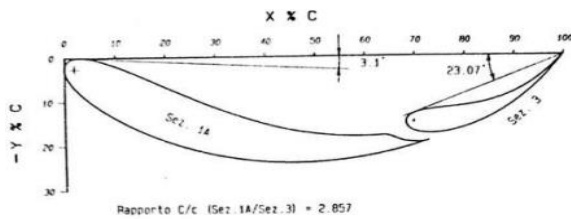


Figura 2: Distancia de los flaps alerón tres elementos

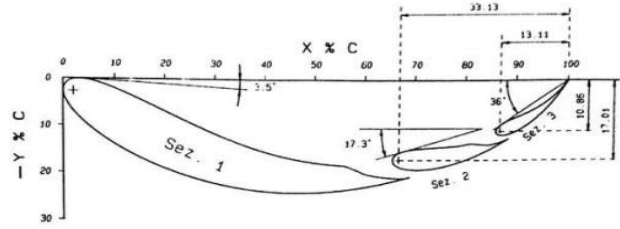


Figura 3: Distancia de flap alerón dos elementos

Con respecto al uso de flaps, estos permiten el incremento de la energía cinética. Este efecto debido a los ductos entre el elemento principal y los flaps. Los ductos ayudan a que el flujo se mantenga adherido a los elementos [29].

En el desarrollo del análisis numérico, se emplean las expresiones de la tabla 2 para predecir el comportamiento del vehículo bajo diferentes condiciones de carga.

Tabla 2: Expresiones para análisis numérico

| Expresión | Descripción |
|---|--|
| $Ra = \frac{1}{2} \rho V^2 A f C d$ (1) | Resistencia aerodinámica |
| $C = \frac{1}{2} \rho V^2 A f C l$ (2) | Carga aerodinámica |
| $F_c = m \frac{v_c^2}{r}$ (3) | Fuerza centrípeta |
| $F_y = \mu (W + (\frac{\rho A f C l}{2}))$ (4) | Fuerza longitudinal |
| $c = \sqrt{\frac{\mu W}{\frac{m}{r} \frac{\mu \rho C l A}{2}}}$ (5) | Velocidad en curva |
| $t = \frac{4d\pi}{v_c}$ (6) | Tiempo Skidpad |
| $Ftm = \frac{\mu W (X_{cg1} - Y_{cg} f r)}{W b - \mu Y_{cg}}$ (7) | Esfuerzo tractor máximo |
| $Fb = W \mu$ (8) | Fuerza de rozamiento |
| $Fb = \frac{C d v_0^2 - C d v f^2}{e^{\frac{2 e C d}{m}} - 1}$ (9) | Fuerza de frenado dependiente del coeficiente de resistencia |
| $e = \frac{m}{2 C d} \ln \left[\frac{C d (v_0^2 - v f^2)}{W \mu} + 1 \right]$ (10) | Distancia de frenado |
| $H = (Rr + Ra + Rg) V m$ (11) | Potencia máxima |
| $Rt = Rr + Ra + Rg$ (12) | Resistencia total |
| $Rg = W \text{sen}(\theta)$ (13) | Resistencia gravitatoria |
| $Rr = (f_s + f_0 V m^2) W$ (14) | Resistencia a la rodadura |
| $Ftn = \frac{M m \cdot \xi + \eta}{r R}$ (15) | Esfuerzo tractor en el neumático |

| | |
|--|---|
| $Rt = Ra + Rr + Rg + \gamma m \frac{W}{g} a$ (16) | Resistencia total considerando las masas giratorias |
| $Rr = fr * W \cos(\theta)$ (17) | Otra forma de escribir la resistencia a la rodadura |
| $fr = [0.015 + 0.01(\frac{v}{100})^{2.5}]$ (18) | Coefficiente de resistencia a la rodadura |
| $t = \frac{vf}{a}$ (19) | Tiempo en recorrer la distancia de la prueba de aceleración |
| $\rho = \frac{M}{V}$ (20) | Densidad |
| $a_l = \frac{\sum F_{Li}}{m}$ (20) | Aceleración lateral Optimum Lap |
| $\sum F_{Li} = F_{LF} + F_{LR}$ (21) | Suma de las fuerzas laterales en las ruedas |

En relación al software para el desarrollo del análisis CFD se ha utilizado ANSYS. Este software ofrece varias características diseñadas para realizar simulaciones CFD. Proporciona varios modelos de turbulencia, opciones avanzadas de malla, interacción fluido-estructura, superando las limitaciones indicadas en [23, 24, 25]. Esto permite realizar análisis detallados y precisos como en [18, 21, 30].

3. Resultados y discusión

En el desarrollo del proyecto se plantean objetivos de mejorar la carga y arrastre aerodinámico, para obtener una base sobre la cual realizar el análisis de rendimiento del monoplaza.

Para el desarrollo de la metodología se utiliza el flujograma planteado en la sección 2.1.

3.1. CAD del modelo inicial

El modelo CAD está desarrollado con limitantes en los detalles. Esta característica con el fin de representar las particularidades principales que afectan al flujo. Es de destacar que, el exceso de detalles, a pesar de ser una representación más precisa del vehículo, aumentan significativamente el número de Reynolds, lo que dificulta la convergencia de los cálculos.

Los detalles como tornillos, tubos de suspensión, radios de las ruedas y los detalles del piloto pueden ser removidos sin comprometer la precisión de resultados y reduciendo la complejidad del modelo [31, 32].

Con respecto a las zonas donde existen elementos aerodinámicos (ver Figura 4), estas se delimitan con base en las reglas FSAE [26].

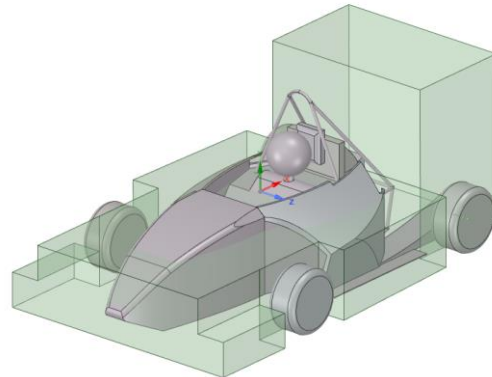


Figura 4: Volúmenes de control para dispositivos aerodinámicos.

Los elementos principales que se mantienen y similar a [15, 33], son los siguientes: las ruedas, carrocería, el reposacabezas y casco del piloto. Se conserva la presencia de la barra antivuelco en el diseño, ya que su posición expuesta al flujo de aire conlleva interacciones considerables con el alerón posterior. En la Figura 5 se observa un ejemplo del modelo CAD.



Figura 5: Ejemplo de modelo CAD.

3.1.1. Rendimiento de los perfiles alares

En los perfiles alares el ángulo de ataque (AoA) determina cuando el alerón entra en pérdida, es decir, genera más arrastre que carga aerodinámica. Para encontrar dicho ángulo varios autores [23, 33, 34], se valen del software Javafoil, el cual ofrece opciones de personalización sobre los diferentes perfiles. Los valores de configuración en el eje X corresponden a la cuerda y el eje Y, indican la superficie ventral y dorsal, se indican como Y_v y Y_d respectivamente. En la Figura 6 se indica el diagrama y nomenclatura de los alerones.

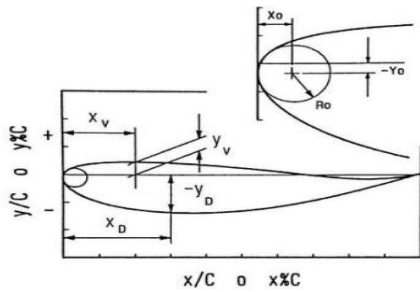


Figura 6: Diagrama y nomenclatura. [29]

Los valores presentes en la Tabla 3, se han aplicado para el diseño de los elementos principales de los alerones.

Tabla 3: Rendimiento de perfiles alares

| Perfil | AoA | Lift | Drag | Eficiencia |
|---------------------|-----|------|-------|------------|
| NACA 2412 | 15 | 1.6 | 0.025 | 64% |
| NACA 6412 | 14 | 2.1 | 0.026 | 80.77% |
| Bogart (Bo 930-310) | 11 | 2.2 | 0.021 | 104.76% |
| Be 112-205 (1) | 11 | 3.5 | 0.055 | 63.64% |
| Be 112-205 (2) | 10 | 3.6 | 0.05 | 72% |

Con el objetivo de validar el modelo, se lleva a cabo una comparación entre el modelo $k - \omega SST$ y los datos experimentales del perfil NACA 6412 [35]. Se utiliza este método por limitaciones debido a la falta del material necesario. Este método posibilita una validación aproximada de los datos, esto no implica una superioridad a métodos experimentales como túneles de viento. En la Tabla 4, se muestra el error existente entre los datos experimentales y el modelo de turbulencia.

Tabla 4: Error entre el modelo experimental y el modelo $k-\omega SST$

| AoA | Exp | $k-\omega SST$ | Error % |
|-----|------|----------------|---------|
| 0 | 0,76 | 0,69 | 10,88 |
| 3 | 1,14 | 1,03 | 10,71 |
| 5 | 1,37 | 1,27 | 7,97 |
| 8 | 1,70 | 1,58 | 7,36 |
| 10 | 1,89 | 1,79 | 5,46 |
| 14 | 2,11 | 2,11 | -0,42 |
| 17 | 1,91 | 2,00 | -4,50 |

*El error se calcula como: $error\% = 100 * (\text{valor experimental} - \text{valor aproximado}) / \text{valor experimental}$

3.1.2. End plates

Son estructuras verticales de los alerones que ayudan a controlar y dirigir el flujo de aire. El aire tiende a viajar desde el campo de alta presión al de baja presión. Este desplazamiento del aire causa vórtices que resultan en arrastre, también reduce el gradiente de presiones y la generación de carga. Este efecto negativo, se atenúa con los end plates [36]. En la Figura 7 se observan los componentes del alerón frontal y end plates ensamblados.

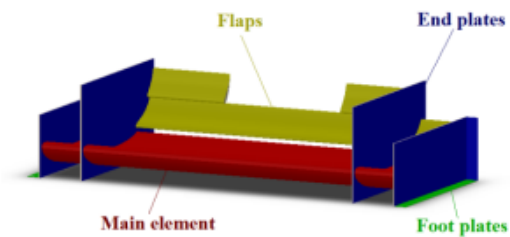


Figura 7: Componentes alerón frontal. [15]

3.1.3. Difusor

Este componente aprovecha el flujo de aire debajo del automóvil. Genera un efecto de succión que aumenta la carga aerodinámica. Este elemento basa su funcionamiento en el efecto Venturi. Reduce el arrastre aerodinámico disminuyendo la estela que genera el vehículo, entre menor sea la estela, menos energía es utilizada para mover el vehículo [37]. En el presente trabajo se usan dos configuraciones de este accesorio. La primera configuración usa la forma ventral del perfil NACA 6412. En la segunda configuración se tienen tres parámetros que son parte del difusor como la boquilla, garganta y ángulo del difusor.

Para determinar el punto crítico de inicio del desprendimiento del flujo, se realiza un análisis CFD [36] con el objetivo de identificar el momento en el que ocurre.

3.2. Configuración del software

El software ANSYS para el análisis CFD, permite simular el dominio computacional, establecer la malla de superficie y volumétrica, consideraciones para el desprendimiento del flujo en la capa límite y la configuración del solver. Con el fin de garantizar la repetitividad en la resolución de los modelos, se aplican idénticos parámetros para todos los modelos.

3.2.1 Dominio computacional

El dominio computacional es una región espacial definida para simular fenómenos físicos. En aerodinámica una relación de bloqueo menor o igual a 0.2%, es necesaria para evitar la influencia del flujo de los muros sobre el monoplaza. Esta se calcula utilizando la relación entre el área frontal proyectada y el área de la sección transversal del túnel de viento [38, 39].

Con el fin de mantener el ahorro computacional, se debe evitar el sobredimensionamiento en este dominio como en [19, 40]. Además, se realizan simulaciones con la mitad de la geometría del vehículo, debido a las limitaciones computacionales (ver Figura 8) [15, 19, 39].

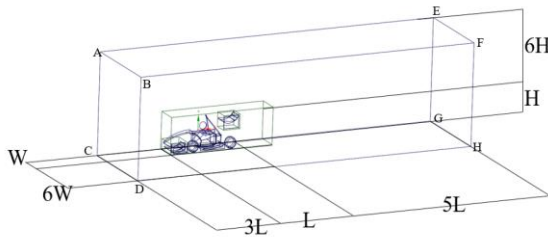


Figura 8: Dominio computacional basado en las dimensiones del vehículo

3.2.2. Discretización de la malla

En la discretización de esta simulación se utilizan dos tipos de mallas, de superficie y volumétrica. La de superficie se utiliza para discretizar las áreas del objeto tridimensional. Por otro parte, la malla volumétrica se utiliza para discretizar el espacio tridimensional dentro o alrededor de un objeto.

Para discretizar el dominio, se usa la herramienta de mallado por partes. Esta herramienta permite crear una o más operaciones para la malla local. En la Figura 9 se observa la aplicación de la malla de superficie.

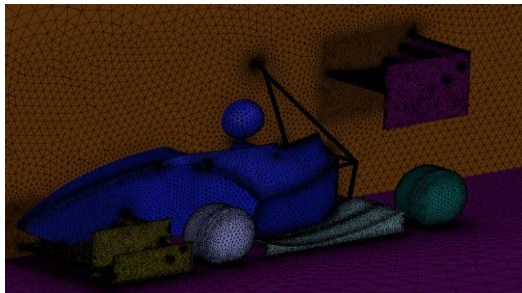


Figura 9: Mallado de superficie

La malla volumétrica, vista en la Figura 10, utiliza una plantilla que se construye con celdas poli-hexagonales. La plantilla de la malla contiene refinamientos basados en el tamaño de malla de la superficie local y los controles de refinamiento locales [21].

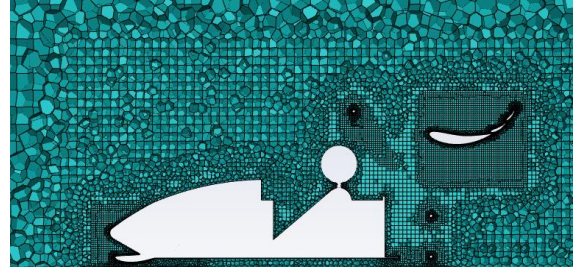


Figura 10: Malla volumétrica

Para resolver el desprendimiento de la capa limite se han creado celdas prismáticas ortogonales, vistos en la Figura 11, a lo largo de la superficie del monoplaza. Esto con el fin de mejorar la precisión del modelo cerca de los muros.

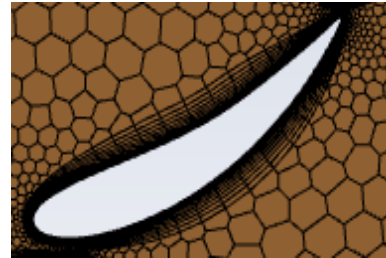


Figura 11: Capa de desprendimiento de la capa limite

Las características de la discretización de la malla proporcionan una secuencia flexible y repetible de operaciones en la malla. Para ejecutar una geometría diferente se requiere proveer al software de un modelo CAD y remallar.

Estas características como tamaño, tipo de ajuste y su refinamiento, asegura la uniformidad en la malla para todos los modelos.

3.2.3. Condiciones de frontera y solver.

Dentro de los modelos de turbulencia previamente establecidos, el modelo $k-\omega$ SST destaca como el comúnmente utilizado en la investigación de vehículos completos (mitad de la geometría), gracias a su eficaz desempeño en el análisis de geometrías tridimensionales complejas [15, 41].

Para la inicialización del modelo se cambian los valores por defecto del software, en función del área frontal del modelo y la velocidad del fluido.

Las condiciones de frontera principales se resumen en la Tabla 5. Las regiones se observan en las aristas de la Figura 8

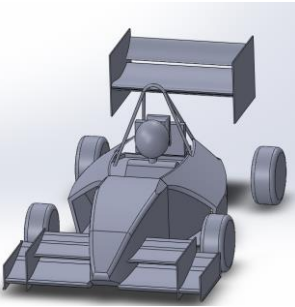
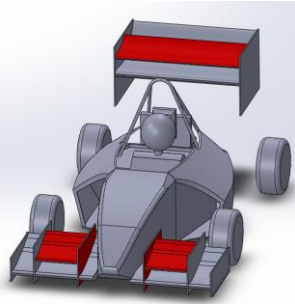
Tabla 5: Condiciones de contorno

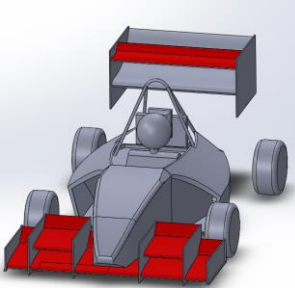
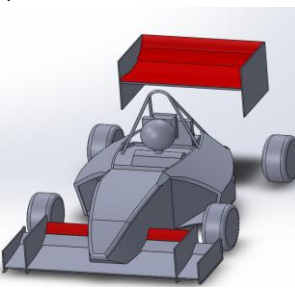
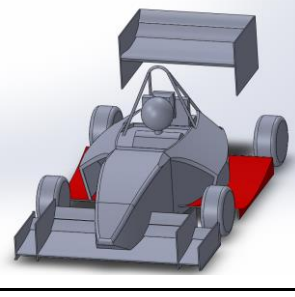
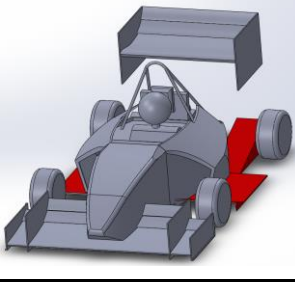
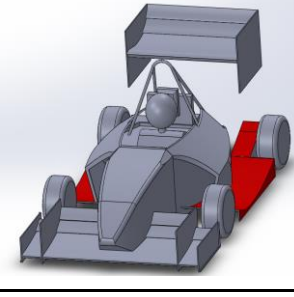
| Región | Condición de contorno | Aristas Figura 8 |
|-------------------|--|------------------|
| Entrada | Velocidad de entrada=20m/s | ABCD |
| Salida | Salida de presión=0Pa (APS) | EFGH |
| Suelo | Muro en movimiento=20m/s | CDGH |
| Superficie modelo | Muro sin deslizamiento | |
| Plano de simetría | Plano de simetría | AECG |
| Muros del túnel | Muro esfuerzo cortante X=0Pa, Y=0Pa, Z=0Pa | ABEF, BFDH |
| Ruedas | Muro en movimiento rotacional= 89.09rad/s | |

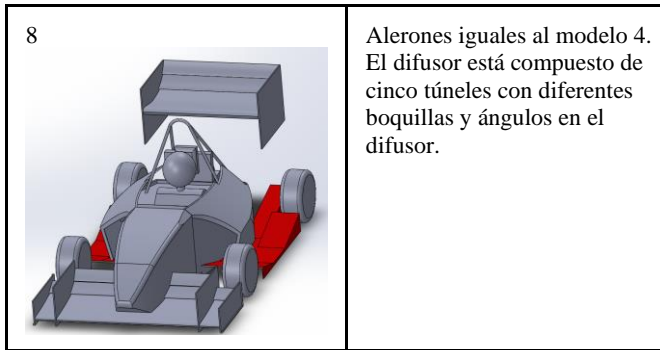
3.3. Resultados de CFD

Aplicados los resultados de las secciones 3.1. y 3.2., se han obtenido las configuraciones aerodinámicas de cada modelo. En la tabla 6 se presentan las características aerodinámicas principales, además de los perfiles alares utilizados en cada configuración. Los cambios se evidencian en color rojo en relación al modelo mencionado

Tabla 6: Configuraciones del monoplaza

| Modelo | Características principales |
|--|---|
| 1  | FW usa perfil Bo 930-310, el elemento principal está dividido en la zona central además cuenta con un flap adicional con el mismo perfil. El flap del alerón delantero está colocado en el área interna al neumático (restricción del reglamento), no difusores, cuatro end plates RW tiene un perfil Be 112-2015 de dos elementos |
| 2  | FW igual que el modelo 1, el flap del alerón delantero tiene más AoA y está más adelantado, tiene 6 end plates. RW igual que el modelo 1, un elemento extra grande con más AoA. |

| | |
|---|---|
| 3  | FW perfil NACA 2412, los perfiles que van de extremo a extremo del alerón constan de un elemento principal y de un flap, este perfil tiene menos camber lo que ayuda al efecto suelo, seis end plates, el elemento adicional ahora tiene un flap y se usa el mismo perfil NACA 2412. RW tiene un perfil alar Be 112-205 tiene dos flaps, además de un elemento adicional con un flap. |
| 4  | FW perfil NACA 6412, tiene un elemento principal y un flap, además tiene un segundo flap en la zona interna al neumático y solo cuatro end plates. RW tiene un perfil Be 112-205 con dos flaps |
| 5  | FW y RW son iguales al modelo 4. El difusor consta de un perfil ventral que trabaja con efecto suelo, el perfil ventral que se usa es el NACA 6412 |
| 6  | Los alerones son iguales al modelo 4. El difusor consta de boquilla, es decir una garganta plana y un difusor |
| 7  | Alerones iguales al modelo 4. El difusor tiene un perfil ventral de dos túneles, uno alargado hacia la parte trasera del monoplaza. |



8
 Alerones iguales al modelo 4. El difusor está compuesto de cinco túneles con diferentes boquillas y ángulos en el difusor.

Como se establece en la sección 3.2.1, los resultados del análisis se realizaron sobre la mitad de toda la geometría, así que, para un análisis completo y balance de la distribución de las cargas aerodinámicas, estos valores se duplican.

Tabla 7: Resultados de la simulación

| Modelo | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Detalle | | | | | | | | |
| *Difusor lift | 0 | 0 | 0 | 0 | 53.7 | 13 | 50 | 20 |
| *Difusor drag | 0 | 0 | 0 | 0 | 5,8 | 3,7 | 5,1 | 2,6 |
| *fw lift | 120 | 75 | 206 | 178 | 179 | 178 | 154 | 184 |
| *fw drag | 24 | 22 | 54 | 41 | 40 | 39 | 39 | 41 |
| *rw lift | 135 | 152 | 166 | 182 | 192 | 176 | 172 | 180 |
| *rw drag | 30 | 39 | 43 | 44,5 | 48.8 | 45 | 44 | 43 |
| *total lift | 255 | 227 | 372 | 360 | 425 | 367 | 376 | 384 |
| *total drag | 55 | 62 | 97 | 86 | 94 | 87 | 88 | 87 |
| car CL | 1,7 | 1,52 | 2,28 | 1,96 | 2,15 | 1,9 | 2 | 2,1 |
| car CD | 0,76 | 0,82 | 0,9 | 0,92 | 0,81 | 0,9 | 0,92 | 0,9 |
| %frontal | 57,3 | 54,4 | 60 | 58 | 57,4 | 57,8 | 57,1 | 58,1 |

*Las unidades están en Newtons (N)

En la Figura 12, se muestra la diferencia en escala de colores, entre las velocidades bajo el alerón delantero de los modelos 1 al 4. En estos modelos la separación con el suelo es la misma y la diferencia de velocidad se basa en el perfil del alerón. En el modelo 2, el elemento adicional es más pequeño y con menos AoA que en el modelo 1, este cambio empeora el funcionamiento del modelo 2. El modelo 3 tiene dos elementos adicionales en el alerón delantero, estos elementos favorecen la generación de carga aerodinámica con 206 N. En el modelo 4 se tienen dos flaps, el pequeño que va desde el interior del neumático hacia la nariz y el otro abarca toda la longitud del

alerón. Los flaps permiten una mejor incidencia del aire sobre el elemento principal del alerón, que permite un mejor desprendimiento del flujo. Esto genera 178 N de carga aerodinámica en relación al modelo base.

El alerón frontal del modelo 3 genera la mayor carga aerodinámica con 206 N, sin embargo, produce una sobrecarga en el eje delantero pudiendo incrementar el efecto de sobre viraje. Por esta condición se descarta este modelo.

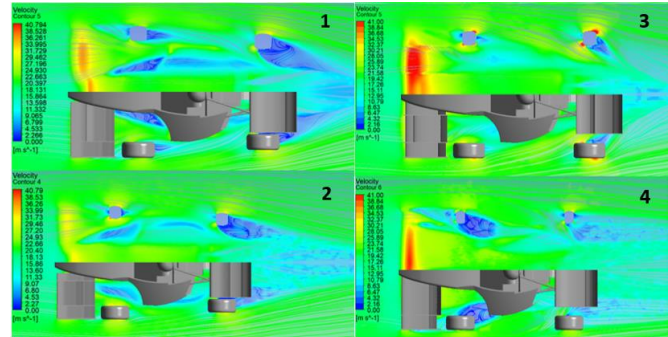


Figura 12: Modelos 1, 2, 3, 4 en vista de planta

En la Figura 13, se muestra la diferencia entre los flujos de modelos con difusor. El modelo 5 y 7 tienen una configuración de difusor basado en el perfil ventral NACA 6412. Estos modelos difieren en que el difusor del modelo 5 llega hasta el inicio del neumático posterior y el modelo 7 se extiende hasta detrás del neumático posterior. En el modelo 5, se tiene una mejor recolección del flujo, desde el exterior e interior del neumático, lo que separa de manera eficiente las turbulencias generadas por el neumático. El modelo 7 por su parte tiene una ineficiencia significativa. Esta ineficiencia se debe a que genera un efecto de succión sobre el alerón frontal, donde desprende el flujo y empeora su funcionamiento. El modelo 6 y 8, tienen un difusor con boquilla y garganta. Ambos modelos muestran un comportamiento similar al 7. Con respecto al modelo 8, se diferencia del modelo 6 en que la garganta del mismo tiene una menor separación al piso (30mm), esta condición mejora la carga aerodinámica y consigue menos interferencias en el alerón frontal.

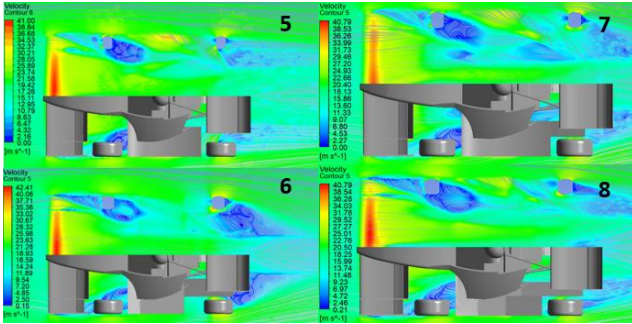


Figura 13: Modelos 5, 6, 7, 8 en vista de planta

En la Figura 14 se muestra el flujo sobre los diferentes alerones posteriores. Los elementos adicionales incrementan el área de incidencia del flujo y consecuente carga aerodinámica. En el modelo 1, se observa que el casco del piloto interfiere de manera negativa con la incidencia del flujo sobre este alerón. Esta condición prevé una disminución en la carga del alerón. Por lo mencionado anteriormente, es preferible reducir el tamaño del alerón posterior y colocarlo, más atrás y más alto. Con la consideración anterior se aumenta la carga aerodinámica del modelo 2 en 17 N en relación al modelo 1. Se observa que el elemento adicional causa una aceleración del flujo en el campo de baja velocidad del elemento principal, lo que disminuye el gradiente de presión en el elemento principal, reduciendo la carga aerodinámica. Para el modelo 3 que tiene dos elementos adicionales más pequeños, aceleran menos el campo de baja velocidad del elemento principal. Con esto aumenta la carga en el modelo 3 a 166 N. En el modelo 4, se retiran elementos adicionales, lo que mejora la incidencia del aire sobre estos elementos. Este modelo es el que mayor carga aerodinámica genera con 182 N.

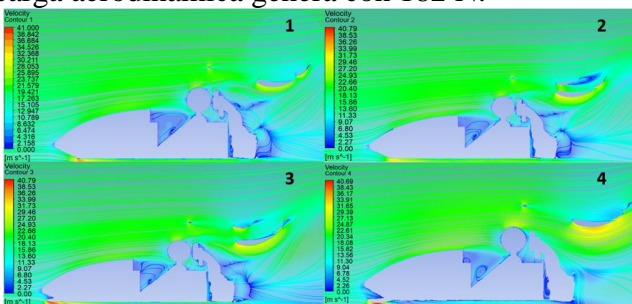


Figura 14: Modelo 1, 2, 3, 4 en plano de simetría

Tras evaluar los resultados obtenidos, se ha seleccionado el modelo 5 como el más adecuado para continuar con el análisis.

3.4. Estudio de independencia de malla

En esta investigación se utiliza la técnica de independencia de malla para verificar que los resultados son consistentes y no dependen de la resolución o el tipo de elemento utilizado en la simulación. Para ello se aplican tamaños base de 32 mm a 64 mm y dos tipos de malla. Las combinaciones se realizan de manera empírica y se observan en la Tabla 8. Los tipos de malla corresponden a las opciones que presenta el software.

Tabla 8: Independencia de malla

| Tamaño base (mm) | Tipo de malla | FW lift (N) | FW drag (N) | Difus or lift (N) | RW Lift (N) | RW lift (N) | Car Cl | Car Cd | Err or % |
|------------------|---------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|--------|--------|----------|
| 32 | Pol-H | 180 | 40.38 | 53.7 | 192 | 48.4 | 2.15 | 0.81 | |
| 32 | Tetra | 179 | 42.8 | 49.8 | 191 | 51.1 | 2.14 | 0.8 | 0.54 |
| 50 | Poli | 181 | 45.87 | 50.3 | 193 | 49.7 | 2.15 | 0.83 | 1 |
| 64 | tetra | 183 | 40.76 | 55.48 | 189 | 50.2 | 2.1 | 0.78 | 0.53 |

*El error se calcula como: $error\% = 100 * (\text{valor de referencia} - \text{valor aproximado}) / \text{valor de referencia}$

La primera configuración de malla de la Tabla 8, fue aplicada a la resolución de los modelos, estos valores se toman como referencia para el cálculo del error. En la Tabla 8 se observa que existen variaciones con errores menores al 1% que son tolerables para este estudio.

3.5. Comparativa del modelo con y sin paquete aerodinámico

En las Figura 15 y Figura 16, se presentan el comportamiento del flujo aerodinámico alrededor del vehículo con y sin paquete aerodinámico.

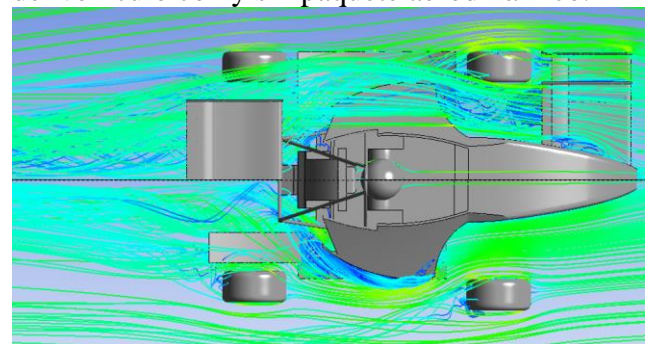


Figura 15: Líneas de corriente del diseño con alerones y sin alerones en vista de planta.

En vista de planta se observa que el flujo pasa de mejor manera por encima del sidepod generando menos arrastre con 32.78 N. Este comportamiento

del alerón delantero, mejora la incidencia del flujo de aire sobre el alerón posterior. Debido a la desaparición de flujos de baja presión que se desplazan hacia el alerón posterior. Por otro lado, en el modelo sin alerones, se observa que el flujo sobre el sidepod presenta un desprendimiento del aire, que resulta en una cantidad de arrastre aerodinámico negativo de 53.48 N.

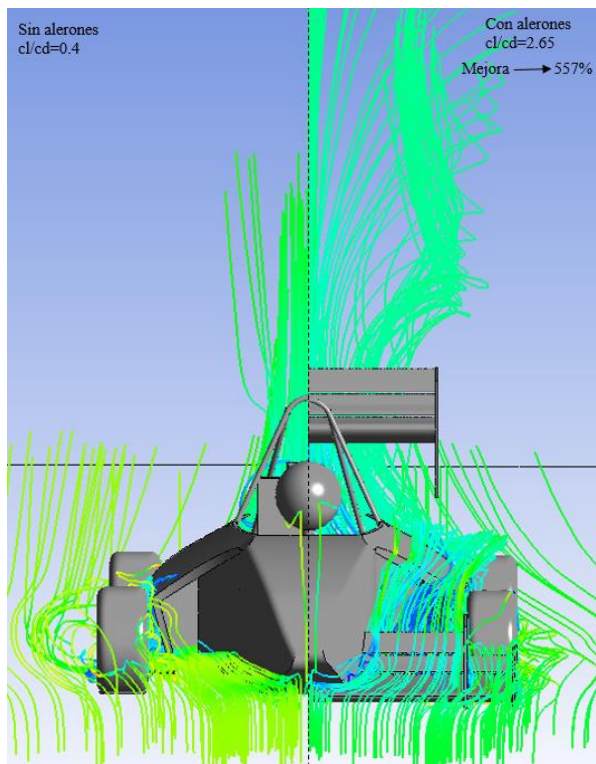


Figura 16: Líneas de corriente para el modelo con alerones y sin alerones en vista frontal.

En vista frontal, el flujo en el vehículo sin paquete aerodinámico genera una gran cantidad de turbulencia en la rueda delantera debido a la rotación del neumático (ver Figura 16). Es por esto que, el flujo tiende a frenar contra el neumático y cambiar bruscamente la trayectoria. Esta condición conduce a un estancamiento del flujo muy elevado generando resistencia al avance de 11.47 N. Es por esto se coloca un flap delante del neumático, para desviar el flujo que incide directamente, y direccionar que el flujo pase por encima del neumático reduciendo la resistencia a 7 N.

El paquete aerodinámico produce una columna de aire ascendente desde el pavimento, desviando el flujo aerodinámico hacia arriba. Esta deflexión es una demostración de carga, de acuerdo con la

segunda ley de Newton. Cuando se eleva una corriente de aire, el efecto resultante es una fuerza que empuja el monoplaza hacia el pavimento.

En la Tabla 9, se presentan resultados de simulación de este efecto con y sin paquete aerodinámico.

Tabla 9: Comparativa del modelo con alerones y sin alerones

| | Sin alerones | | Con alerones | |
|-----------------|----------------------------|---------|----------------------------|---------|
| Área frontal | 0.5365m ² (Afn) | | 0.6926m ² (Afc) | |
| Superficie alar | 1.3716 m ² (Sa) | | 0.9275m ² (Sa) | |
| Cl | 0.23 | | 2.15 | |
| Cd | 0.58 | | 0.81 | |
| | Drag(N) | Lift(N) | Drag(N) | Lift(N) |
| Chasis | 53.48 | 5.77 | 32.78 | 15.94 |
| Tubos | 3.04 | 1.29 | 4.1 | 1.34 |
| Difusor | 0.91 | 48.14 | 5.75 | 53.7 |
| Rueda frontal | 11.47 | 6.16 | 7 | 11.63 |
| Rueda trasera | 9.87 | 6.63 | 6.52 | 8.49 |
| Alerón frontal | 0 | 0 | 40.38 | 179.8 |
| Alerón trasero | 0 | 0 | 48.84 | 192.5 |
| Total | 78.77 | 67.99 | 145.97 | 463.45 |

A continuación, con las expresiones 1 y 2 de la Tabla 2, se calcula la variación de arrastre y sustentación en relación a la velocidad, hasta llegar a la velocidad de 20m/s. Para calcular la sustentación en el modelo se usa la superficie alar. La superficie alar se refiere a las zonas que generan sustentación, en aviones la misma se limita a las alas. En el caso del modelo sin alerones la superficie alar corresponde al chasis y difusor. En el modelo 5 la superficie alar corresponde a los alerones y difusor. En la Figura 17 se muestra la sustentación generada por ambos monoplazas al aumentar la velocidad.

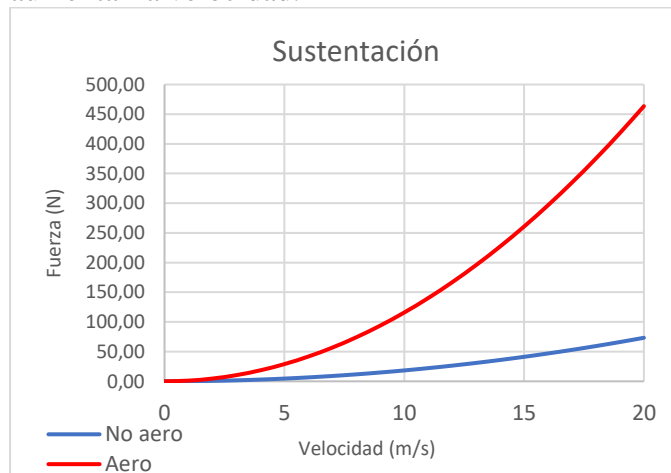


Figura 17: Sustentación-Velocidad

La sustentación en el modelo base corresponde al 15.82% de la sustentación del modelo con alerones.

En la Figura 18, se observan los valores de arrastre generados por ambos monoplazas

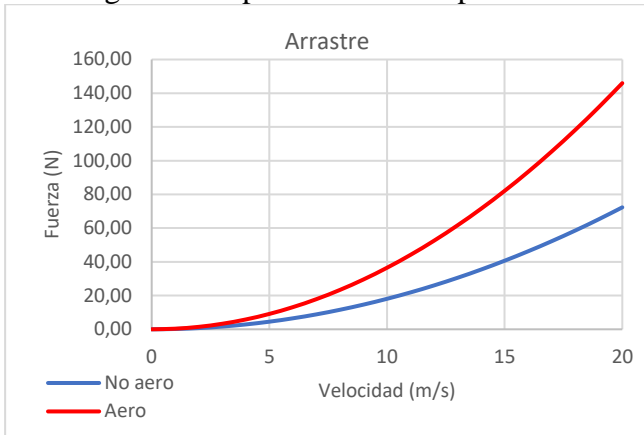


Figura 18: Arrastre-Velocidad

El arrastre aerodinámico del modelo base es el 49.54% del arrastre que genera el modelo con alerones.

3.6. Estimación de peso de las mejoras aerodinámicas

Para realizar los cálculos siguientes, se considera el peso de los elementos aerodinámicos. Para estimar el peso de estos elementos, se utiliza como materiales fibra de carbono y espuma de poliuretano. La fibra de carbono tiene un peso de 200gr/m² [42] y la espuma de poliuretano tiene una densidad de 25kg/m³ [43]. El núcleo de los alerones es de espuma de poliuretano, este núcleo se refuerza con fibra de carbono para garantizar su rigidez. En la Tabla 10 se muestran los volúmenes y áreas aproximadas de los alerones.

Tabla 10: Volúmenes y áreas de los alerones

| | Volumen | Área |
|------------------|-----------------------|----------------------|
| Alerón frontal | 0.03456m ³ | 3.7466m ² |
| Alerón posterior | 0.04112m ³ | 3.1633m ² |

A continuación, con la expresión 20 de la tabla 2 se calcula la masa aproximada de los alerones. El núcleo del alerón frontal tiene una masa de 0.87kg y el alerón trasero tiene una masa de 1.02kg. Se adiciona el peso de la fibra de carbono para cada elemento, se utilizan tres capas para este acabado.

El peso para el alerón frontal es 3.12kg y para el alerón posterior es 2.92kg.

3.7. Análisis de rendimiento dinámico

En esta sección se presenta la estimación de distribución de cargas, velocidad en curva, esfuerzo tractor, distancia de frenado, velocidad máxima aceleración y predicción del comportamiento en pista a través de Optimum Lap. Para los cálculos se usa la carga aerodinámica total, es decir el valor de la Tabla 7 duplicado. Además, se analiza el rendimiento del modelo 5 frente al modelo base.

La distribución de cargas aerodinámicas se evalúa cuando el vehículo circula a 72 km/h. Cuando existe una mayor carga en el eje trasero, se reduce el sobre viraje [36]. Una carga mayor en el eje delantero provoca una descarga en el eje posterior. Cuando sucede esta descarga el comportamiento del vehículo es sobre virador. Este comportamiento es preferible ya que permite a un piloto experimentado aumentar su velocidad en curva [44].

Un problema presente en el comportamiento del alerón frontal es que, la generación de carga aerodinámica se ve afectada por el efecto suelo. Este problema aumenta la sensibilidad del alerón frontal al balanceo en el chasis. Por lo que es conveniente generar una mayor carga en el eje delantero. La Figura 19 muestra el diagrama de momentos, y la ubicación de estas cargas.

La carga aerodinámica generada por el difusor se agregó a la carga del vehículo, debido a que el centro de gravedad del difusor está muy cerca al centro de gravedad del monoplaza.

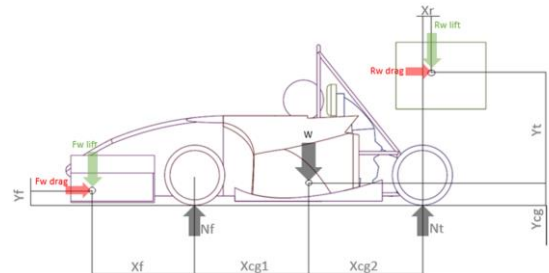


Figura 19: Diagrama de cuerpo libre del monoplaza.

Como resultado del diagrama de momentos se obtiene que la distribución de cargas es de 57.57% en el eje delantero y 42,43% en el eje posterior.

Para evaluar la velocidad máxima en curva, se toma como referencia la prueba Skidpad (Figura 20) de la competencia FSAE [23, 26].

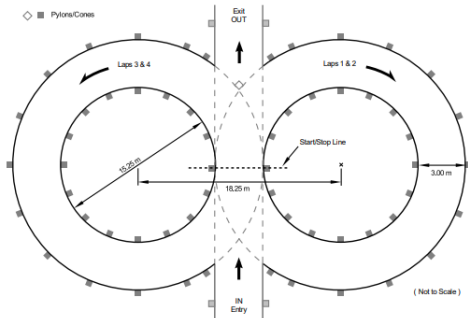


Figura 20: Diagrama de la prueba Skidpad [26].

Como condición para el cálculo se aplica un radio de curva constante de 10 m. Se utilizan las ecuaciones 3 y 4 presentadas en la Tabla 2 y se obtienen las velocidades: con alerones = 12.65 m/s, sin alerones = 11.03 m/s.

Esta prueba consiste en realizar dos vueltas en cada círculo en el menor tiempo posible. El tiempo aproximado para completar la prueba se calcula con la ecuación 19 de la Tabla 2, obteniéndose tiempos: con alerones 19.89 s, sin alerones 22.79 s.

Con respecto al esfuerzo tractor es necesario conocer el coeficiente f_r , que de la Figura 21 se obtiene el valor 0.03.

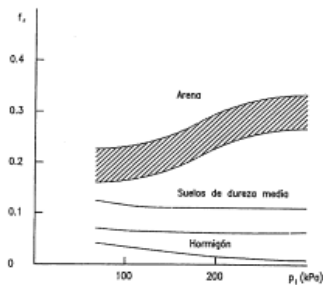


Figura 21: Efecto de la presión de inflado del neumático, en el coeficiente de resistencia a la rodadura sobre diferentes superficies.

El esfuerzo tractor máximo se calcula con la ecuación 7 de la Tabla 2, se resuelve para ambos casos y se obtiene: con alerones 2109.17N, sin alerones 2070.69N.

Para el análisis de la distancia de frenado se toman dos casos. El primer caso consiste en reducir la velocidad de 72 km/h a 44 km/h. Estas velocidades

aproximadas simulan la reducción de velocidad al entrar a una curva. En el segundo caso el vehículo se detiene desde una velocidad de circulación de 44 km/h. Se usan las expresiones 8, 9 y 10 de la Tabla 2. Para el caso 1 la distancia de frenado: con alerones 7.95 m, sin alerones 10.13 m. Para el caso 2, se obtiene la distancia de frenado: con alerones 12.54 m, sin alerones 15.99 m.

Otro parámetro de la dinámica vehicular es la velocidad máxima. Para esto se conoce el valor de potencia proporcionado por el motor que es $H = 25.1 \text{ kW}$ [28]. Se aplica la resistencia gravitatoria igual a 0 y el valor f_v de $6e-6$ [22] de la Figura 22.

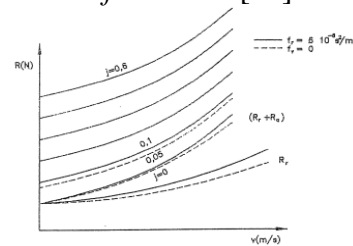


Figura 22: Resistencia al movimiento de un vehículo, sobre rampas de diferentes valores, en función de la velocidad

El valor de f_o , se obtiene a partir de tablas del efecto de presión de los neumáticos sobre dicho coeficiente (Figura 23). Conociendo la presión de inflado de neumáticos se obtiene este valor. Se toma como referencia un inflado de 16 psi, y el valor de f_o será 0.019.

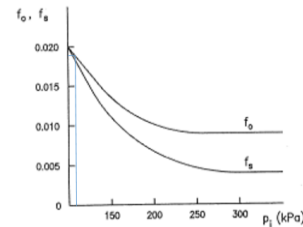


Figura 23: Efecto de la presión de los neumáticos sobre los coeficientes f_o y f_s

Se emplean las expresiones 1, 13 y 14 de la Tabla 2 para calcular la resistencia total. Luego, se iguala este valor a la ecuación 11 para obtener los valores de velocidad máxima correspondientes, siendo: con alerones 39.15 m/s o 141 km/h, y sin alerones 47.33 m/s o 170 km/h. Estas velocidades son referenciales para las pruebas dinámicas de FSAE.

La prueba de aceleración en Formula Student consiste en recorrer 75 m en el menor tiempo





posible. Comúnmente la prueba se completa de 4 a 5 segundos [45]. Para ello se tomarán las siguientes consideraciones. Al partir desde el reposo la resistencia aerodinámica cambia constantemente. En función a este cambio se promedian sus valores en el rango de 0-100 km/h. El par en la rueda es $M_r = 294.37 \text{ Nm}$ [28], se usa una eficiencia de la transmisión del 85 % y la relación de transmisión $\xi = 1.709$ [28], este valor de relación de transmisión se obtiene a partir de un promedio de las tres primeras relaciones de transmisión. Se asume un valor de $\gamma_m = 1$ y se procede a resolver las ecuaciones 16, 17 y 18. Luego, se iguala la ecuación 16 con la 15 de la Tabla 2, y se obtienen los valores de aceleración: con alerones 6.37 m/s^2 sin alerones 6.56 m/s^2 . El tiempo para completar este tramo se calcula con la ecuación 19 de la Tabla 2, y se obtienen los tiempos: con alerones 4.36 s, sin alerones 4.23 s.

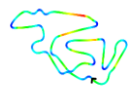
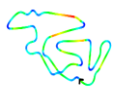
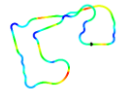
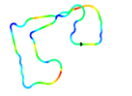
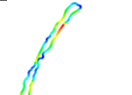
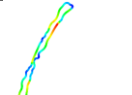
3.7.1. Optimum Lap

Un análisis final es aplicar el software Optimum Lap. Este simula el rendimiento de vehículos en un circuito. Este software usa un modelo de estado cuasi estable para representar el vehículo. Sin embargo, los resultados tienen una alta correlación con los datos experimentales [46].

En la Tabla 11 se presentan los resultados de Skidpad y Endurance Esta última consiste en varias vueltas en un circuito hasta un total de 22km [26].

Tabla 11: Resumen de resultados Optimum lap

| Pista | Sin alerones | Con alerones |
|-----------------------------|---|---|
| Skidpad |  Tiempo total: 22.05s Velocidad media: 43.21km/h Aceleración lateral máxima: 14.77 m/s ² |  Tiempo total: 19.23s Velocidad media: 44.29km/h Aceleración lateral máxima: 15.36 m/s ² |
| FSAE Endurance Austria 2012 |  Tiempo por vuelta: 57.10s Velocidad media: 64.63km/h |  Tiempo por vuelta: 54.87s Velocidad media: 66.13km/h |

| | Aceleración lateral máxima: 14.87 m/s ² | Aceleración lateral máxima: 16.84 m/s ² |
|------------------------------|---|--|
| FSAE Endurance Alemania 2012 |  Tiempo por vuelta: 92.84s Velocidad media: 59.58km/h Aceleración lateral máxima: 14.86 m/s ² |  Tiempo por vuelta: 90.83s Velocidad media: 60.13km/h Aceleración lateral máxima: 16.67 m/s ² |
| FSAE Endurance Nebraska 2012 |  Tiempo por vuelta: 71.19s Velocidad media: 65.54km/h Aceleración lateral máxima: 14.85 m/s ² |  Tiempo por vuelta: 68.53s Velocidad media: 64.11km/h Aceleración lateral máxima: 16.87 m/s ² |
| FSAE Endurance Michigan 2014 |  Tiempo por vuelta: 65.70s Velocidad media: 62.87km/h Aceleración lateral máxima: 14.90 m/s ² |  Tiempo por vuelta: 64.69s Velocidad media: 63.73km/h Aceleración lateral máxima: 16.89 m/s ² |

3.7.2. Resumen de resultados

En la Tabla 12 se presentan los tiempos de simulación de la sección 3.2.1, estos valores son necesarios para determinar el puntaje de las pruebas dinámicas de FSAE [26].

Tabla 12: Tiempos simulados.

| | Aero | No Aero |
|---------------------------|---------|---------|
| Aceleración (s) | 4.36 | 4.23 |
| Skidpad (s) | 4.98 | 5.69 |
| Autocross (s) | 79.23 | 81.66 |
| Endurance (s) | 1581.58 | 1640.02 |
| Consumo combustible (lts) | 4.45 | 3.78 |

El puntaje en pruebas estáticas se obtiene de los resultados obtenidos por el monoplaza en FSAE UK 2014 [47]. Los valores referenciales para el cálculo del puntaje se toman de [45]. La prueba de Endurance consta de 18 vueltas. Dado que el software calcula únicamente una vuelta, no sería apropiado extrapolar. Por lo tanto, se considera una variación de tiempo de más, menos 10 segundos

por vuelta, basándonos en los resultados de [45]. Este análisis se parte de un enfoque conservador, ya que es difícil no mejorar el puntaje estático con un estudio más exhaustivo. Los resultados del puntaje se presentan en la Tabla 13, mostrando el desempeño obtenido en las diferentes pruebas dinámicas del vehículo.

Tabla 13: Puntajes de pruebas dinámicas

| Sin paquete aerodinámico | | Con paquete aerodinámico | |
|--------------------------|--------|--------------------------|--------|
| Puntaje aceleración | 85.98 | Puntaje aceleración | 77.86 |
| Puntaje Skidpad | 28.71 | Puntaje Skidpad | 39.94 |
| Puntaje Autocross | 106.67 | Puntaje Autocross | 123.15 |
| Puntaje Endurance | 198.4 | Puntaje Endurance | 225.34 |
| Puntaje Eficiencia | 68 | Puntaje Eficiencia | 66.4 |
| Puntaje Estático | 144.9 | Puntaje Estático | 144.9 |
| Puntaje dinámico total | 487.76 | Puntaje dinámico total | 532.69 |
| Puntaje total | 632.66 | Puntaje total | 677.59 |

4. Conclusiones

- La metodología propuesta permite optimizar la carga aerodinámica en una carrocería ya diseñada, la combinación de alerones y difusores, han permitido obtener valores de carga mejorados de 850 N y 188 N de arrastre aerodinámico a 72 km/h, esto ha definido que el modelo 5 es el más óptimo.
- El problema físico debe ser comprendido por el analista y este pueda tomar las decisiones en temas de software como, tamaño de malla, tipos de elemento, condiciones de contorno, que se ajusten al problema planteado para obtener resultados consistentes en CFD.
- Las simulaciones del rendimiento del monoplaza concuerdan con las predicciones y estudios presentados en el análisis del rendimiento dinámico.
- La aplicación del método ha permitido estudiar la optimización de un vehículo construido, a través de un paquete aerodinámico. Además de presentar una alta relación con los resultados de las referencias. Sin embargo, para generalizar esta aplicación se propone la aplicación de

esta metodología a vehículos de otras categorías.

5. Referencias

- [1] J. Katz, *Aerodynamics of Race Cars*, California: San Diego State University, 2006.
- [2] D. Wragg, *A dictionary of aviation*, Oxford: Osprey Publishing Ltd, 1973.
- [3] B. W. McCormick, *Aerodynamics, Aeronautics, and Flight Mechanics*, 2nd Edition, Wiley, 1995.
- [4] L. i. d. F. Est, «Caractéristiques de La Jamais Contente,» Le Bourget, 2010.
- [5] S. Viehmann, «Focus online,» 24 05 2016. [En línea]. Available: https://www.focus.de/auto/gebrauchtwagen/oldtimer/der-legendaere-rumpler-tropfen-wagen-dieses-skurrile-auto-ist-die-mutter-der-aerodynamik_id_2717268.html. [Último acceso: 20 3 2023].
- [6] P. Lyons, *10 Best Ahead-of-Their-Time Machines*, Car and Driver.
- [7] A. Pritchard, *Directory of formula one cars 1966-1986*, Aston Publications , 1986.
- [8] F1, «formula1,» 18 05 1969. [En línea]. Available: <https://www.formula1.com/en/results.html/1969/races/269/monaco/race-result.html>. [Último acceso: 20 5 2023].
- [9] Z. t. Edgar, «Motorsportlandia,» Motorsportlandia, 07 08 2013. [En línea]. Available: <https://motorsportlandia.wordpress.com/2013/08/07/aerodinamica-en-la-formula-1-1950-1977/>. [Último acceso: 20 05 2023].
- [10] Goodyear, «Goodyear.eu,» 14 10 2021. [En línea]. Available: <https://kilometrosquecountan.goodyea>

- r.eu/downforce-carga-aerodinamica/. [Último acceso: 10 04 2023].
- [11] U. d. Oviedo, «Capa Limite,» Universidad de Oviedo, Oviedo, 2009.
- [12] S. S. Martin, «Epidor,» 28 04 2022. [En línea]. Available: <https://epidor.com/blog/efecto-venturi-y-sus-caracteristicas/>. [Último acceso: 05 03 2023].
- [13] M. Somerfield, «Motorsport.com,» 21 02 2017. [En línea]. Available: <https://au.motorsport.com/f1/news/retr-o-f1-tech-the-big-shake-ups-of-the-2000s-874524/3015215/>. [Último acceso: 22 4 2023].
- [14] M. Ahsan, «Numerical Study on Aerodynamic,» KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY, STOCKHOLM, 2021.
- [15] A. S. M. M. Paulo Soliman, *Formula SAE Aerodynamics: Design process with focus on drivability*, Santa Maria: Federal University of Santa Maria, 2015.
- [16] T. S. Tetsuya Fujimoto, *Aerodynamic Design for SR11 (Formula SAE Racing Car)*, Japan: Society of automotive engineers of Japan, 2013.
- [17] U. Racing, «UTA Rancing,» [En línea]. Available: <https://fsae.uta.edu/legacy/>. [Último acceso: 19 5 2023].
- [18] H. a. M. W. Versteeg, *An introduction to computational fluid dynamics*, Harlow: Pearson, 1995.
- [19] N. Pfeiffer, «Simscale,» 24 06 2021. [En línea]. Available: <https://www.simscale.com/blog/formula-student-aerodynamics/>. [Último acceso: 20 4 2023].
- [20] I. I. E. M. Vera Coello, *ingenieria Fluidomecanica*, Madrid: Ediciones Paraninfo, 2012.
- [21] ANSYS, *ANSYS Fluent Theory Guide*, Canonsburg: Ansys, 2013.
- [22] C. V. A. V. D. L. Francisco Aparicio Izquierdo, *Teoria de los vehiculos automoviles*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2001.
- [23] J. G. Carlos Anddrade, *Estudio de factibilidad de la colocacion de un aleron frontal y posterior mediante analisis CFD para el vehiculo monoplaaza electrico tipo formula sae*, Cuenca, 2017.
- [24] M. S. Juan Pauta, *Diseño y construccion de la carroceria de un vehiculo de competencia tipo Formula Sae*, Cuenca, 2014.
- [25] R. W. Contreras Urgilés y C. A. y. P. B. E. J. Jaramillo Andrade, «Propuesta metodológica para el diseño y análisis de un monocasco Formula Student,» *Ingenius, revista de ciencia y tecnologia*, vol. 30, pp. 9-18, 2023.
- [26] F. SAE, «Fsaonline,» Fsaonline, 09 09 2022. [En línea]. Available: <https://www.fsaonline.com/cdsweb/app/NewsItem.aspx?NewsItemID=b9717688-97c4-41f5-b386-74493aad0de6>. [Último acceso: 10 03 2023].
- [27] M. S. Juan Pauta, *Diseño y construccion de la carroceria de un vehiculo de competencia tipo Formula Sae*, Cuenca, 2014.
- [28] B. M. M. G. Adrian Esteban Cordova Rodas, *Rediseño del chasis tubular del fsae Bosco1 a través de CAD/CAE para el acople de un motor Yamaha fz 600i*, Cuenca: Universidad Politecnica Salesiana, 2020.
- [29] E. Benzing, *Ali wings Studio per tecnici e piloti di auto da corsa*, Giorgio Nada Editore, 2012.
- [30] M. L. Y. G. M. e. a. Bouzidi, «CFD Analysis of an Automotive Fuel Tank Sloshing Using ANSYS FLUENT: Validation with Experimental Data,»

- Procedia Engineering*, vol. 157, n° pp, pp. 60-67, 2016.
- [31] X. Lu, *Research on the Flow Field around a Formula SAE Car*, SAE Technical Paper 2015-26-0208, 2015, 2015.
- [32] C. a. P. M. Craig, «Methodology for the Design of an Aerodynamic Package for a Formula SAE Vehicle,» de *SAE 2014 World Congress & Exhibition*, 2014.
- [33] K. S. Sahil Gupta, *Aerodynamics analysis of a formula sae car*, Chennai, 2017.
- [34] M. Torres, *Diseño, desarrollo y fabricación de Maqueta de un alerón delantero de Fórmula Student*, Sevilla, 2016.
- [35] A. Tools, «AirfoilTools,» [En línea]. Available: <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca6412-il>. [Último acceso: 05 03 2023].
- [36] S. Mcbeath, *Competition Car Aerodynamics*, Veloce Publishing Ltd, 2017.
- [37] F. F. D. O. D. A. S. F. B. Buscariolo, «Comparative CFD Study of Undertray Designs over an Open Wheel Prototype Race Car,» *SAE Technical Paper*, 2012.
- [38] CD-adapco, «The Steve Portal,» [En línea]. Available: <https://steve.cd-adapco.com>. [Último acceso: 20 03 2023].
- [39] S. International, *Guidelines for Aerodynamic Assessment of Medium and Heavy Commercial Ground Vehicles Using Computational Fluid Dynamics*, SAE international, 2021.
- [40] Idealsimulations, «Idealsimulations,» [En línea]. Available: <https://www.idealsimulations.com/resources/cfd-computational-domain/#:~:text=Therefore%2C%20it%20is%20recommended%20to,imposed%20at%20the%20domain%20outlet..> [Último acceso: 10 03 2023].
- [41] O. M. Y. Z. S. C. F. S. L. T. Dastan Igalı, «A comparative analysis of turbulence models for automotive aerodynamics simulation and desing,» *International Journal of Automotive Technology*, 05 04 2019. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/332221365_Comparative_Analysis_of_Turbulence_Models_for_Automotive_Aerodynamic_Simulation_and_Design. [Último acceso: 13 04 2023].
- [42] ClipCarbono, «ClipCarbono,» [En línea]. Available: [https://www.clipcarbono.com/es/telas-refuerzos-para-resinas-y-prepregs/266-tejido-de-fibra-de-carbono-sarga-2x2-3k-peso-200grm2-ancho-1200-mm.html#:~:text=Peso%3A%20200gr%2Fm%20\(Tolerancia%20±20gr.\)](https://www.clipcarbono.com/es/telas-refuerzos-para-resinas-y-prepregs/266-tejido-de-fibra-de-carbono-sarga-2x2-3k-peso-200grm2-ancho-1200-mm.html#:~:text=Peso%3A%20200gr%2Fm%20(Tolerancia%20±20gr.)). [Último acceso: 2023 02 08].
- [43] Trocellen, «Trocellen,» 2022 02 17. [En línea]. Available: [https://trocellen.com/es/densidad-peso-firmeza-y-utilidad-de-la-espuma/#:~:text=La%20densidad%20de%20la%20espuma%20de%20polietileno%20y%20poliuretano%20\(goma%20espuma,m3%20hasta%20300%20kg%2Fm3..](https://trocellen.com/es/densidad-peso-firmeza-y-utilidad-de-la-espuma/#:~:text=La%20densidad%20de%20la%20espuma%20de%20polietileno%20y%20poliuretano%20(goma%20espuma,m3%20hasta%20300%20kg%2Fm3..) [Último acceso: 2023 02 08].
- [44] F. 1. dictionary, «formula1-dictionary,» formula1-dictionary, [En línea]. Available: <https://www.formula1-dictionary.net/understeer.html#:~:text=But%20an%20%27oversteery%27%20chassis%20helps,up%20with%20an%20oversteer%20characteristic..> [Último acceso: 10 06 2023].
- [45] FSAE, «formulastudent,» 22 08 2022. [En línea]. Available: <https://www.formulastudent.de/fsg/res>

ults/2022/. [Último acceso: 20 05 2023].

[46] OptimumG, «OptimumG,» [En línea]. Available:

<https://optimumg.com/product/optimumlap/>. [Último acceso: 20 05 2023].

[47] Imech, «Institution of mechanical engineers,» Imech, [En línea]. Available:

<https://www.imeche.org/events/formula-student/previous-events>. [Último acceso: 10 06 2023].

Anexos

Anexo 1: Definiciones/Abreviaciones.

CFD- Computational fluid dynamics (Dinámica computacional de fluidos)

CAD- Computer-aided design (Diseño asistido por computadora)

AoA- Angle of attack (Angulo de ataque)

Sp- Espesor máximo de la sección como fracción de cuerda

fm- Inclinación máxima relativa

cl- Coeficiente de sustentación

cd- Coeficiente de arrastre

FW- Alerón frontal

RW- Alerón trasero

Yv- Punto de coordenadas en la superficie superior

Yd- Punto de coordenadas en la superficie inferior

Anexo 2: Glosario

| Glosario | | |
|----------|-----------------------------|----------|
| | Descripción | Unidad |
| ρ | Densidad del fluido | kg/m^3 |
| T | Tiempo | s |
| U | Velocidad en la dirección x | m/s |
| V | Velocidad en la dirección y | m/s |
| W | Velocidad en la dirección z | m/s |
| P | Presión | Pa |
| Af | Área frontal | m^2 |
| Afc | Área frontal con alerones | m^2 |
| Afn | Área frontal sin alerones | m^2 |
| V | Velocidad del fluido | m/s |

| | | |
|---------|---|--------------|
| Ca | Carga aerodinámica | N |
| Re | Numero de Reynolds | ... |
| L | Longitud característica | m |
| μf | Viscosidad del fluido | $Pa \cdot s$ |
| M | Numero de Mach | ... |
| c | Velocidad de la propagación del sonido en el fluido | m/s |
| Wb | Distancia entre ejes | m |
| $Xcgl$ | Distancia x del centro de masas al eje delantero | m |
| $Xcg2$ | Distancia x del centro de masas al eje trasero | m |
| Xf | Distancia x del eje delantero al centro de masas de FW | m |
| Xr | Distancia x del eje trasero al centro de masas de RW | |
| Ycg | Distancia y del suelo al centro de masas | m |
| Yt | Distancia y del centro de masas del vehículo al centro de masas de RW | m |
| Yf | Distancia y del suelo al centro de masas de FW | m |
| Nf | Normal en el eje delantero | N |
| Nt | Normal en el eje trasero | N |
| Fc | Fuerza centrípeta | N |
| Fy | Fuerza longitudinal | N |
| Vc | Velocidad de paso por curva | m/s |
| W | Peso | N |
| m | Masa | kg |
| r | Radio de curva | m |
| d | Diámetro de curva | m |
| e | Distancia de frenado | m |
| μ | Resistencia a la rodadura | ... |
| fr | Coeficiente de rodadura | ... |
| Ftm | Esfuerzo tractor máximo | N |
| Fb | Fuerza de frenado | N |
| Vo | Velocidad inicial | m/s |
| Vf | Velocidad final | m/s |
| Ra | Resistencia aerodinámica | N |
| Rr | Resistencia a la rodadura | N |
| Rg | Resistencia gravitatoria | N |
| H | Potencia del motor | kW |
| Rt | Resistencia total a la rodadura | N |
| Vm | Velocidad máxima | m/s |
| f_o | Valor de coeficiente a la rodadura a velocidad próxima a cero | m/s |
| fs | Factor de variación de f_o con la velocidad | ... |
| fv | Resistencia al movimiento de un vehículo sobre rampas | ... |
| Mr | Par de la rueda | Nm |
| η | Eficiencia de la transmisión | % |
| ξ | Relación de transmisión | ... |
| Mm | Par del motor | Nm |
| rR | Radio de la rueda | m |
| Ym | Coeficiente de masas rotativas | ... |
| a | Aceleración | m/s^2 |

Anexo 3: Reglas de FSAE

Elementos aerodinámicos (T7)

T.7.2 Carrocería

T.7.2.3. La carrocería no debe contener ninguna apertura hacia el cockpit desde la parte frontal del vehículo hasta la barra antivuelco o firewall. La apertura del cockpit y mínimas aperturas alrededor de los componentes frontales de la suspensión están permitidos.

T.7.3 Medición

T.7.3.1. Todas las limitaciones de los elementos aerodinámicos están medidas:

- Con todas las ruedas apuntando en línea recta
- Sin el piloto en el vehículo

T.7.3.2. Cualquier parte de cualquier elemento aerodinámico o de carrocería debe cumplir con V.1.1.

V.1.1. Ruedas descubiertas

a. Los 180° de la parte superior deben estar sin obstrucciones cuando son vistas de la parte vertical sobre las ruedas

b. Las ruedas deben estar sin obstrucción vistas desde el lateral

c. Ninguna parte del vehículo debe ingresar en la zona definida por dos líneas que se extienden verticalmente desde 75mm delante y 75mm detrás, el diámetro exterior de las ruedas frontales y posteriores en el alzado de la vista lateral del vehículo, con las ruedas colocadas rectas delante. Esta zona se extiende lateralmente desde el plano exterior de la rueda hasta el plano interior de la rueda

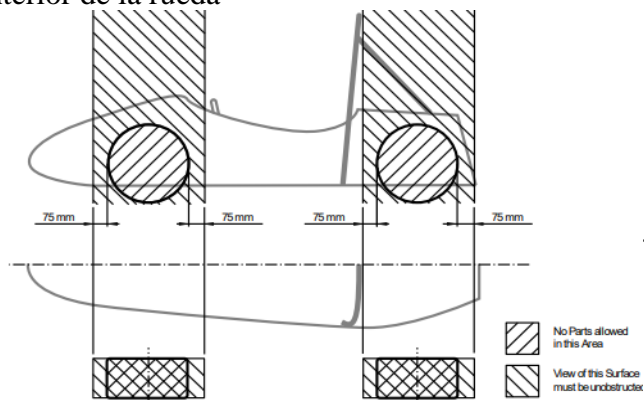


Figura 24: Representación de la zona en la que no pueden ir dispositivos aerodinámicos. Fuente: Fsaerules2022

T.7.4. Longitud

En vista en planta cualquier dispositivo aerodinámico debe ser:

- No más de 700mm delante de la parte frontal de las ruedas frontales
- No más de 250mm detrás de la parte trasera de las ruedas traseras

T.7.5. Ancho

En vista en planta cualquier dispositivo aerodinámico debe ser:

T.7.5.1 Cuando delante de la línea central de los ejes de las ruedas delanteras:

Interior de dos planos verticales paralelos a la línea central del chasis que tocan el exterior de los neumáticos delanteros a la altura de los bujes.

T.7.5.2 Cuando entre las líneas centrales de los ejes de las ruedas delantera y trasera:

Hacia el interior de una línea dibujada que conecta las superficies exteriores de los neumáticos delanteros y traseros a la altura de los centros de rueda

T.7.6. Alto

T.7.6.1 Cualquier parte de cualquier dispositivo aerodinámico que se encuentre:

- La parte trasera del plano del reposacabezas no debe estar por encima de los 1200mm sobre el suelo
- La parte delantera del plano del reposacabezas no debe estar a más de 500mm del suelo.
- Delante de la línea central de los ejes de las ruedas delanteras y fuera del borde de los dos planos verticales paralelos a la línea central del chasis que tocan el interior de las ruedas frontales a la altura de los bujes no debe ser superior a 250mm sobre el suelo

T.7.6.2 La altura de la carrocería no está restringida cuando la carrocería se encuentra:

- Entre los planos transversos verticales ubicados en las líneas centrales del eje delantero y trasero.
- Dentro de dos planos verticales delantero y trasero 400mm fuera desde la línea central del vehículo.

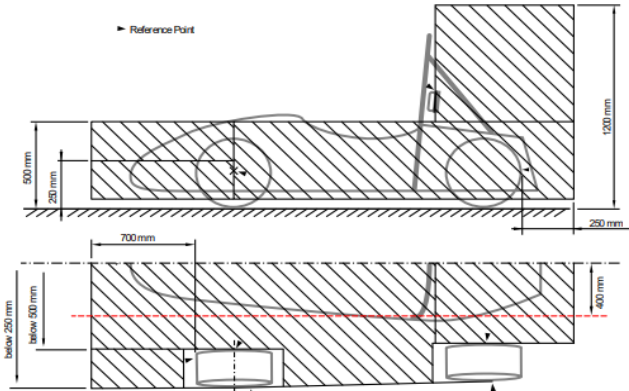


Figura 25: Imagen de referencia para dispositivos aerodinámicos. Fuente: FSaeRules2022

Anexo 4: Preparación de la geometría

A continuación, se presentan paso a paso los criterios utilizados en ANSYS para la solución de los modelos.

1. Preparar los cuerpos de influencia
2. Establecer el dominio computacional
3. Nombrar la entrada del fluido
4. Nombrar las paredes del dominio
5. Nombrar el suelo del dominio
6. Nombrar la salida del dominio
7. Nombrar el plano de simetría
8. Nombrar las ruedas
9. Nombrar alerón frontal
10. Nombrar alerón trasero
11. Nombrar los tubos del chasis
12. Nombrar el difusor
13. Nombrar el chasis

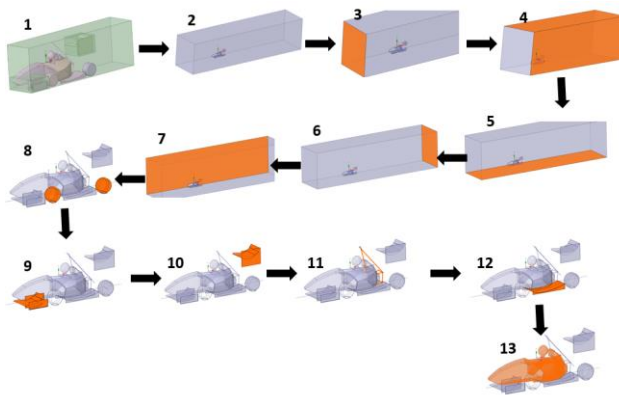


Figura 26: Pasos de la preparación de la geometría

Anexo 5: Mallado local de la geometría

En este anexo se presentan los pasos para el mallado de este modelo en la tabla 16 se muestran los tamaños en la malla locales para cada zona de la geometría.

Tabla 14: Mallado local

| Tamaño local de malla | | | |
|------------------------------|----------------------|-----|-----|
| Geometría | Tipo | Min | Max |
| Cuerpo de influencia lejos | Cuerpo de influencia | 0 | 64 |
| Cuerpo de influencia cercano | Cuerpo de influencia | 0 | 16 |
| Alerones | Curvatura | 0.5 | 12 |
| Chasis | Curvatura | 8 | 32 |
| Tubos | Curvatura | 4 | 16 |
| Ruedas | Curvatura | 16 | 32 |



Figura 27: Malla de superficie



Figura 28: Capas de la frontera, en las superficies del modelo

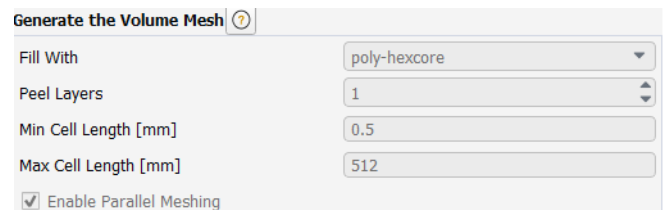


Figura 29: Malla volumétrica