



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo integración Curricular previa a la
obtención del título de Ingeniería en Mecánica**

AUTORES:

Juan José Escobar Humaquina

Mateo Nicolas Garcia Frias

TUTOR:

MSc. Gabriela Chávez

Análisis de una estructura aerodinámica para un
vehículo de formula SAE

Agradecimientos

Escobar Juan

En primer lugar, agradezco a mis padres que siempre me brindaron su apoyo incondicional para poder cumplir este sueño que tuve varios tropiezos en el camino pero que todos mis objetivos personales y educativos se alcanzaron. Ellos con el esfuerzo realizado me impulsaron siempre a perseguir cada una de mis metas y nunca rendirme frente a cada una de las adversidades presentadas, además a Gabriela Aguirre que es una persona que se encontró conmigo desde el principio de este camino que jamás me abandono y que compartió cada una de las alegrías que me brindo esta maravillosa carrera con el paso del tiempo, por ultimo le agradezco de todo corazón a mi tutora por su paciencia y dedicación gracias por su guía y todos sus consejos siempre se encontraran presentes en mi futuro.

García Mateo

"Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a tres personas excepcionales que han sido mi mayor apoyo en este camino académico. A mi querida mamá, cuyo amor y sacrificio son la fuerza que impulsa mis sueños; a mi abuelita, por su sabiduría y constante ánimo que me han inspirado a seguir adelante; y a mi tutora, cuya paciencia, orientación y conocimientos han sido fundamentales para la culminación de este proyecto. Sin ustedes, este logro no habría sido posible. Gracias por estar siempre a mi lado, creyendo en mí y alentándome a dar lo mejor de mí."

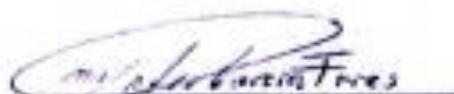
Certificación De Autoría

Nosotros, **Juan José Escobar Humaquina** y **Mateo Nicolas García Frías**, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra propia autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado en la bibliografía detallada.



Juan José Escobar Humaquina

Ci: 1723509574



Mateo Nicolas García Frías

Ci:1750578641

Aprobación Del Tutor

Yo, **Gabriela Chavez**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo los responsables exclusivos tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



Firmado electrónicamente por:
**GABRIELA
FANY CHAVEZ
CHAVEZ**

Firma del Tutor

CI:0502486376

Contenido

Agradecimientos	2
Resumen	9
Abstract	10
1. Introducción	12
2. Marco teórico	14
2.1 Fórmula SAE	14
2.2 Aerodinámica	14
2.3 Resistencia al aire	14
2.4 Importancia de un paquete aerodinámico en un vehículo	15
2.5 Eficiencia aerodinámica	15
2.6 Dinámica de fluido computacional	15
2.7 Perfil aerodinámico	15
3. Marco conceptual científico	16
3.1 Velocidad del vehículo	16
3.2 Resistencia Aerodinámica	16
3.3 Teoría de la carga aerodinámica	16
3.4 Diferencias de presión	17
3.5 Ecuación de sustentación	17
3.6 Ecuación de resistencia	17

3.7 Fuerza de fricción.....	17
3.8 Peso	17
3.9 Numero de Reynolds	18
3.10 Coeficiente de fricción empírico	18
3.11 Esfuerzo cortante en la pared	18
3.12 Velocidad friccional	18
3.13 Eficiencia aerodinámica.....	19
3.14 Potencia Absorbida.....	19
4. Materiales y métodos	20
4.1 Método.....	20
4.1.1 Análisis de elementos finitos	20
4.1.2 Mallado	21
4.1.3 Túnel de viento.....	22
4.1.4 Naca 2408	23
4.1.5 Naca 6409	25
4.1.6 Recopilación de datos iniciales en las simulaciones	27
4.1.7 ANSYS Fluent	28
4.1.8 Autodesk inventor	28
4.2 Carrocería	28
5. Resultados y discusión	29
6. Conclusiones.....	35

7. Bibliografías	37
8. Anexos.....	39
8.1 Diseños realizados en inventor.....	39
8.1.1 Anexo 1.....	39
8.1.2 Anexo 2.....	39
8.1.3 Anexo 3.....	39
8.1.4 Anexo 4.....	40
8.1.5 Anexo 5.....	40
8.1.6 Anexo 6 (Presión en Hyperworks)	40
8.1.7 Anexo 7 (Presión en Ansys).....	41
8.1.8 Anexo 8 (Resultados Ansys).....	41
8.1.9 Anexo 7 (Velocidad prueba 1)	42
8.1.10 Anexo 8 (Presión prueba 2)	42
8.1.11 Anexo 9 (Velocidad prueba 2)	42

ANÁLISIS DE UNA ESTRUCTURA AERODINÁMICA PARA UN VEHÍCULO DE FORMULA SAE.

Ing. Gabriela Chávez . MSc¹, Juan José Escobar², Mateo Garcia Frias³.

¹Docente Escuela de Ingeniería Automotriz – UIDE gachavezta@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

²Estudiante Escuela de Ingeniería Automotriz – UIDE juescobarhu@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

³Estudiante Escuela de Ingeniería Automotriz – UIDE magarciafr@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

Resumen

El estudio realizado analiza la mejor opción entre dos perfiles Naca generando las fuerzas que actúan sobre los diferentes perfiles como: la fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre, fuerza de sustentación y fuerza de resistencia lateral dando como resultado un mayor agarre y desempeño al momento de obtener velocidades punta generando una diferencia con respecto a los demás competidores.

Se realizó la recopilación de datos de los diferentes perfiles aerodinámicos. Se elaboraron dos diseños permitiendo la comparación de resultados por medio del Software seleccionado para valorar el rendimiento del mismo tanto en bajas como en velocidad punta. La simulación del kit aerodinámico demostró ser una solución eficaz para disminuir tiempo y costo de estos representando la pérdida o ganancia de fuerza de arrastre y del coeficiente de rozamiento con el pavimento en velocidades puntas o normales, mejorando significativamente el rendimiento y la eficiencia del automotor en condiciones normales. Este proyecto no solo diseñó, comparó y validó los resultados, sino que también fomentó la búsqueda de nuevos horizontes como lo es el diseño y simulación en programas profesionales capaces de manejar estudiantes de ingeniería automotriz.

Palabras clave: Perfiles aerodinámicos, perfil Naca, fuerzas, rendimiento, aerodinámica, F.E.A, fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre

Abstract

The study focuses on developing an efficient methodology through which an exhaustive analysis was conducted, aiming to determine the best option for the chosen NACA profile by generating all the forces acting on it. This resulted in improved grip and performance when achieving top speeds, creating an advantage over other competitors.

Data collection was conducted for various aerodynamic profiles. Two designs were created to allow comparison of results using the selected software to evaluate performance at both low and high speeds. The simulation of the aerodynamic kit proved to be an effective solution for reducing time and costs, representing the loss or gain of friction forces with the pavement at high or normal speeds, significantly improving the performance and efficiency of the vehicle under normal conditions. This project not only designed and compared the results but also promoted the exploration of new horizons such as the design and simulation in professional programs capable of being handled by automotive engineering students.

Keywords: Aerodynamic profiles, NACA profile, forces, performance, aerodynamics

1. Introducción

La industria automotriz se encuentra actualmente en un proceso de transición hacia formas más sostenibles de transporte, impulsada por la necesidad de reducir la emisión de gases de efecto invernadero y promover un uso más eficiente de los recursos energéticos. En este contexto, los vehículos eléctricos se han convertido en una alternativa viable y cada vez más popular (Agency, 2021).

Sin embargo, el diseño y la fabricación de vehículos eléctricos de alto desempeño, como los utilizados en eventos de carreras universitarias, presentan desafíos técnicos y de ingeniería significativos (SAE International, 2020).

En particular, el diseño y la fabricación de un vehículo Formula SAE eléctrico requiere de un conocimiento profundo de la tecnología eléctrica y mecánica, así como de habilidades avanzadas en diseño, modelado y simulación.

Además, el desarrollo de un vehículo competitivo implica la optimización de múltiples variables, tales como la potencia, el peso, la aerodinámica y la seguridad, entre otros. Estos requisitos técnicos y de desempeño, combinados con el deseo de mantener los costos de fabricación lo más bajos posible, hacen que el diseño y la fabricación de un vehículo Formula SAE eléctrico sean un desafío significativo (Student, 2021).

La razón social que se observe es utilizar de manera adecuada la aerodinámica para que exista menos resistencia posible al aire; generando un vehículo más eficiente con mejores características y mucho más competitivo que tenga presencia generando un producto funcional (Fraija, 2006).

La investigación se encargó de analizar las diferentes opciones de perfiles como 2408 o 6409, cada uno con sus características y diferencias entre estos. Los datos encontrados en la página de NACA(Comité Asesor Nacional de Aeronáutica) nos comentan que el perfil NACA 6409 tiene lo siguiente, un ángulo de ataque de 12° , genera una sustentación 1,55, resistencia 0,16. Por lo que conlleva a la fabricación de alerones delanteros para monoplasas, estilo go-kart con FSB al 15% de aporte de material (National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1933).

Mientras tanto que el perfil NACA 2409 contiene un ángulo de ataque de 12° . Esta investigación nos permite conocer las variables que se pueden generar en nuestro proyecto generalmente permite conocer los grados máximos de ataque que soportaría el vehículo desde

los más comunes a los más graves y la eficiencia que tiene el mismo para circular el aire (National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1933).

Tras la necesidad de la implementación de nuevas tecnologías de energías renovables en vehículos carreras se genera un go-kart híbrido de competencia por lo que se requiere un análisis aerodinámico de su kit de alerones mediante el uso del software de análisis por elementos finitos como lo es Altair Hyperworks CFD y ANSYSFLUENT respectivamente. Esto nos permite generar un ahorro en la creación de este (Student, 2021).

El aporte de esta investigación a nuestro proyecto simplemente los análisis estructurales que generan mediante los diferentes softwares guiándonos el posicionamiento que puede tener sus nuevos elementos o fuerzas que se interactúan con los diferentes perfiles, la resistencia y el coeficiente de arrastre.

El diseño de cada uno de los alerones depende en si de la persona tratando de obtener el mejor agarre al piso y mejorando la resistencia al aire y aprovechando la misma en el momento de la competición además de generando mayores velocidades punto cada uno de los diseños puede tener una amplia variación ya que los perfiles naca son sumamente amplios ya depende de lo que cada uno quiere obtener con la implementación de los mismos (Katz, 2016).

2. Marco teórico

2.1 Fórmula SAE

La fórmula SAE es una categoría de carreras creada en 1982 por la sociedad de ingenieros automotrices (SAE) enfocada en la participación y creación de equipos formados por estudiantes en donde podrán aplicar sus conocimientos previos para la creación de un vehículo de competencia desde cero; realizando el diseño, construcción y funcionamiento de un vehículo de competencia de tipo formula (Erick, A; 2016).

Esta categoría se encuentra regularizada y posee de un reglamento realizado por la SAE en donde se indica todos los detalles que se deben cumplir para la participación en esta competencia (SAE International, 2020).

Dentro de la competencia se realiza trabajos relacionados a varios campos de estudio automotriz entre los más comunes están la mecánica, electrónica y la aerodinámica los mismos que se deberán dominar para poder cumplir con el objetivo general que es construir un vehículo tipo formula competitivo y eficiente (W, 1987).

2.2 Aerodinámica

La aerodinámica es una rama de estudio de la mecánica de fluidos que tiene un enfoque principal en el análisis del movimiento de los gases, colocando énfasis principalmente en el aire y la interacción que tiene esta con el elemento que va a estar en constante contacto (Fraija, 2006).

Dicha rama de estudio tiene una relación directa con el diseño de un vehículo ya sea un vehículo de uso particular o de competencia por la razón de que está ligada con el diseño del automotor en particular y gracias a la aerodinámica es que es posible que un vehículo sea eficiente y útil en el día a día (Fraija, 2006).

2.3 Resistencia al aire

Se puede determinar que la aerodinámica dentro del campo automotriz se enfoca principalmente en el análisis y la optimización de la resistencia del aire y la eficiencia de los vehículos para obtener como resultado mejoras en el rendimiento, estabilidad y la eficiencia del vehículo.

2.4 Importancia de un paquete aerodinámico en un vehículo

La aerodinámica es un factor que en todo momento es de suma importancia para un vehículo ya que si el vehículo tiene demasiada resistencia va a tener varios problemas existentes que van a hacer que la conducción sea imposible.

Los aspectos en donde la aerodinámica juega un papel fundamental en competencia son varios como, por ejemplo: Aceleración, Velocidad máxima, Estabilidad, Adherencia, Toma de curvas.

2.5 Eficiencia aerodinámica

En términos relacionados con el estudio aerodinámico existe un concepto importante el cual es la eficiencia aerodinámica lo cual es un valor cuyo objetivo es representar la cantidad de resistencia que existe entre una superficie u objeto al instante en que se encuentra en movimiento.

Este concepto hace referencia a la capacidad de un vehículo al desplazarse a través del aire en el menor tiempo posible consiguiendo con eso un mejor aprovechamiento del flujo y consiguiendo una estabilidad total del vehículo.

El valor de la eficiencia es medido mediante el coeficiente aerodinámico C_d el cual mientras menor sea representara una mejor eficiencia del componente y se observara en una mejor velocidad y comportamiento del vehículo en pista (Artés, s.f.).

2.6 Dinámica de fluido computacional

La dinámica de fluidos computacional (FEA) conocido también como FINITE ELEMENTS ANALYSIS se ha convertido en una de las principales herramientas de diseño para la aerodinámica externa de los vehículos actuales, debido a la facilidad de obtener hardware y software sofisticados para el manejo de cualquier tipo de geometrías, siendo la geometría de las carrocerías de los automóviles una de las más complejas (Artés, s.f.).

2.7 Perfil aerodinámico

Para poder realizar un elemento perteneciente al paquete aerodinámico es necesario conocer el perfil aerodinámico del cuerpo que viene definida según su forma permitiendo generar una ventaja a partir de las fuerzas que se originan por los distintos cambios de presiones y velocidades del aire.

El perfil aerodinámico es un punto crítico para poder aprovechar el aire ya que por esto se generará una estructura llana, dobleces, entradas y salidas que permitan el flujo de este generando un apoyo y beneficio al circular aire a una velocidad (Artés, s.f.).

3. Marco conceptual científico

3.1 Velocidad del vehículo

Es la rapidez con la que se mueve un cuerpo de un punto A a un punto B en un determinado tiempo.

Debemos tomar en cuenta que es una magnitud vectorial es dependiente del desplazamiento y no de la trayectoria su unidad de medida es el metro por segundo (MCbeath, 2005).

$$v = \frac{\Delta r}{\Delta t} \quad Eq (1)$$

V= Velocidad (m/s)

Δr = Modulo de desplazamiento (m)

Δt = Tiempo (s)

3.2 Resistencia Aerodinámica

En si es la fuerza que sufre un cuerpo al moverse a través del aire además de la dirección de esa fuerza, hay que saber que esta fuerza se presenta en sentido opuesto es decir s una barrera para que la otra fluya (MCbeath, 2005).

3.3 Teoría de la carga aerodinámica

Es la explicación de la relación entre flujo y presión en un contexto general de la dinámica de los fluidos, Bernoulli consiguió su propia ecuación

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = constante \quad Eq (2)$$

ρ = densidad del aire

V = velocidad del flujo

P= presión estática

“Si el flujo alcanza su mayor velocidad. La presión alcanza su mínimo” (MCbeath, 2005).

3.4 Diferencias de presión

Se expresan matemáticamente como el coeficiente de presión multiplicado por la presión dinámica (MCbeath, 2005).

$$p = C_{px} \frac{1}{2} \rho v^2 \quad Eq (3)$$

3.5 Ecuación de sustentación

$$Sustentación = C_L X \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad Eq (4)$$

C_l = coeficiente de sustentación

A= Área frontal

3.6 Ecuación de resistencia

Si colocamos una placa plana puesta perpendicularmente expuesta a la corriente de aire, se genera mas resistencia que un objeto del mismo acho con forma de lagrima.

$$Resistencia = C_x X \frac{1}{2} \rho v^2 A \quad Eq (5)$$

C_x = coeficiente de penetración

A= Área frontal

3.7 Fuerza de fricción

Todo se reduce al rozamiento y el agarre que sucede cuando un objeto esta en contacto con una superficie más si es a velocidad constante.

$$F = \mu R \quad Eq (6)$$

μ = Coeficiente de rozamiento o fricción

R= Fuerza normal

3.8 Peso

Es la fuerza de gravedad que actúa sobre un cuerpo o simplemente la masa es la cantidad de materia que tiene el mismo viene dado en Newtons (N).

$$W = m \times g \quad Eq (7)$$

W= peso dado en N

m= masa dado en kg

g= es la aceleración gravitacional dada en $\frac{m}{s^2}$

En el cálculo de la distancia adimensional de la pared y corresponde a la distancia de la pared en unidades de longitud, y^+ es la distancia normal a la pared y el superíndice "+", denota normalización en base a la unidad viscosa ($\delta v = \mu \zeta / \nu$) (Guerrero at al, 2020).

3.9 Numero de Reynolds

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad Eq (8)$$

P= densidad del aire

μ = viscosidad del aire

v= velocidad

L= longitud del coche o de la cuerda de un ala

3.10 Coeficiente de fricción empírico

$$C_f = 0.058 + Re^{-0.2} \quad Eq (9)$$

3.11 Esfuerzo cortante en la pared

$$T_w = \frac{1}{2} * C_f * \rho * U^2 \quad Eq (10)$$

3.12 Velocidad friccional

$$u_r = \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \quad Eq (11)$$

3.13 Eficiencia aerodinámica

$$\% = \frac{\text{Fuerza carga aerodinamica}}{\text{Fuerza resistencia al avance}} \quad Eq (12)$$

3.14 Potencia Absorbida

$$HP = \frac{C_{p.A.U^3}}{1225} \quad Eq (13)$$

La aerodinámica es crucial en un Formula SAE debido a varios factores. En primer lugar, reduce la resistencia al avance, permitiendo al vehículo alcanzar mayores velocidades y mejorar la eficiencia del combustible. Además, un diseño aerodinámico optimizado mejora la estabilidad y el control, especialmente en curvas y a altas velocidades, al generar fuerza

descendente que aumenta la tracción de los neumáticos. Esto es vital para mantener la competitividad en las pruebas de rendimiento y maniobrabilidad, donde cada segunda cuenta.

Finalmente, una buena aerodinámica puede mejorar la refrigeración del motor y otros componentes críticos, asegurando un rendimiento fiable durante toda la carrera (Student, 2021).

La dinámica computacional de fluidos, o CFD por sus siglas en inglés, es una rama de la mecánica de fluidos que usa métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos. CFD puede simular el movimiento de fluidos y sus interacciones con superficies complejas, así como fenómenos físicos y químicos como la transferencia.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) se emplea como una herramienta eficaz para modelar el comportamiento de sistemas de fluidos en movimiento (Jorge Cepeda, 2024). Proporciona una solución eficiente para evaluar parámetros como velocidades, presiones y masas, los cuales son difíciles de medir por otros medios. Esto se logra a través del uso de software de última generación como Altair Hyperworks CFD y ANSYS Fluent, ambos validados adecuadamente por el laboratorio.

4. Materiales y métodos

4.1 Método

El método por utilizar para cumplir con los objetivos planteados es el inductivo ya que se partió de procedimientos particulares hacia afirmaciones de carácter general para realizar este método se debe seguir cinco pasos como lo es la observación, experimentación, comparación, análisis de resultados; por la razón de que se basa en la experimentación y observación para llegar a una conclusión sobre lo estudiado en específico (Sampieri, 2014).

Es decir, para realizar la estructura aerodinámica se hará mediante una fabricación de prueba y error generando varias figuras de estas que simplemente puede variar el ángulo de inclinación o puede tener diferente aspecto o simplemente es realizado con otro tipo de mallado ya que sabemos que entre más fino es, el resultado obtenido será más preciso. El primer paso por seguir fue el investigar y conocer los diferentes perfiles Naca que se tiene a disposición claramente se escogió dos perfiles distintos de diferentes características tomando en cuenta los grados de ataque esto quiere decir que se seleccionó con el criterio de diseño de algunos equipos de fórmula SAE, segundo paso fue diseñar el kit aerodinámico con los dos perfiles seleccionados, tercer paso fue realizar un análisis aerodinámico en ANSYS Fluent y Hyperworks, cuarto paso fue analizar cada uno de los resultados obtenidos, quinto paso es la comparación de cada resultado para poder proceder con la validación, sexto es reconocer los resultados según la validación. El método matemático y experimental en el proyecto van de la mano para poder alcanzar nuestros objetivos.

4.1.1 Análisis de elementos finitos

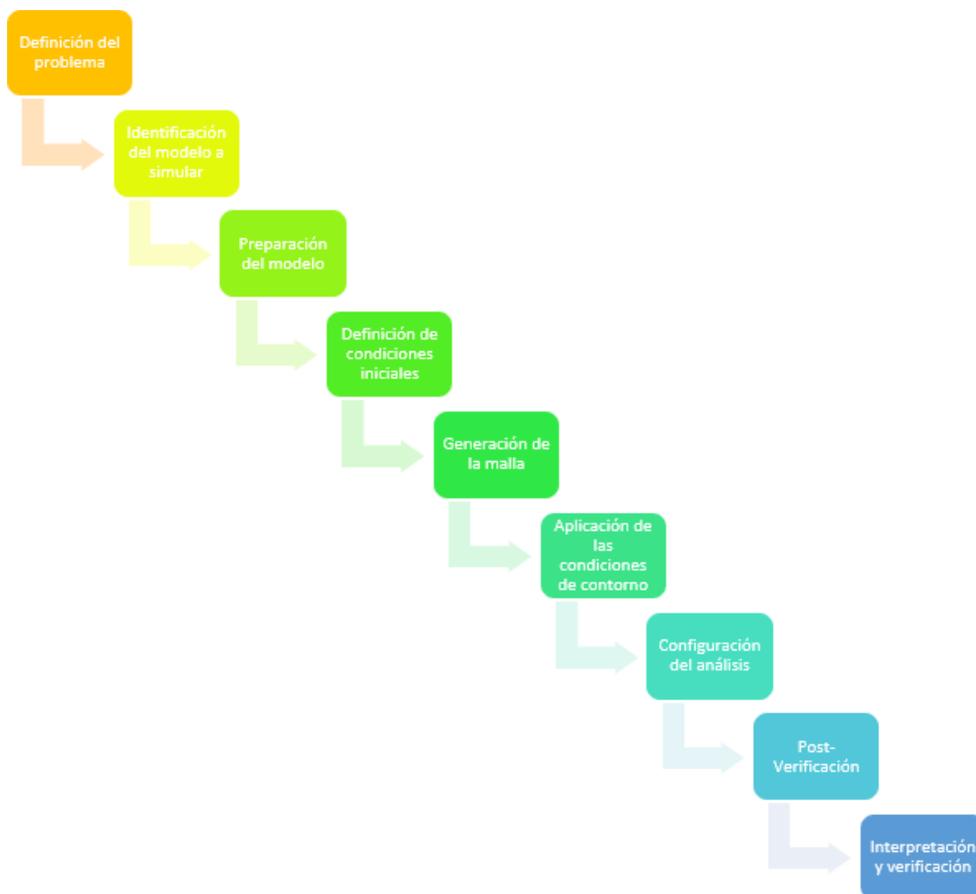
El FEA es una técnica numérica basada en computadora que permite calcular la fuerza y el comportamiento de una estructura de ingeniería, permite valorar la deflexión, el estrés, vibración, diferentes comportamientos entre otros fenómenos en diferentes condiciones es decir existe la posibilidad de colocar cualquier magnitud de las fuerzas que cada uno necesita que interactúen con nuestra pieza de diseño. Esta técnica se basa en la discretización continua de un conjunto de elementos finitos conectados entre sí a través de nodos se debe reconocer que cada elemento finito representa una porción pequeña de la muestra en general al final cada uno tiene un resultado se saca un promedio y este se convierte en la respuesta de la simulación se debe recalcar que cada mallado puede ser de diferentes elementos más grandes y otros más pequeños.

4.1.2 Mallado

La creación de una malla depende del criterio de cada uno dependiendo de la forma de la simulación que cada uno requiere a continuación se presentara en la figura 1. El proceso que debe realizar para poder varios la malla de elementos finitos.

Figura 1

Procedimiento de FEA



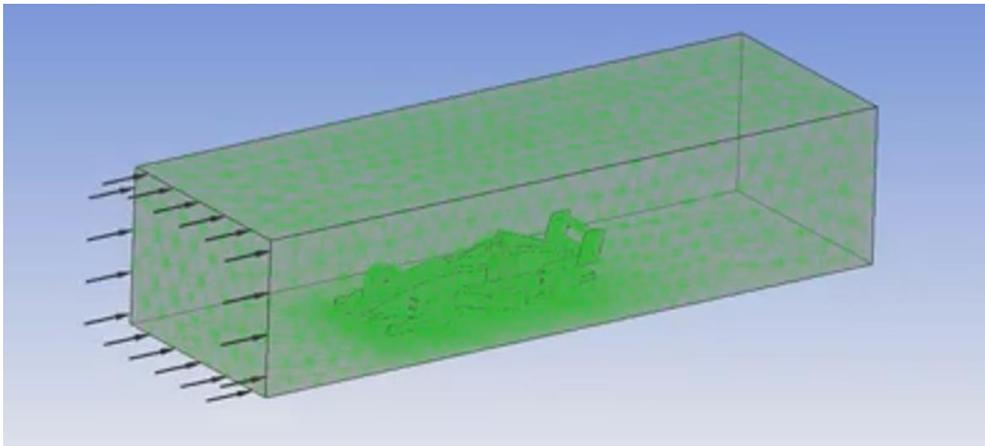
Fuente: Autoría Propia

4.1.3 Túnel de viento

Este elemento permite guiar el aire para que circule por un solo lugar directamente a la figura diseñada siendo un túnel de viento cerrado; la generación de este depende del tamaño de la pieza ya permite variar todas sus dimensiones es decir en los diferentes ejes del plano cartesianos como lo podemos ver en la Figura 2; conocer el estado en el que será simulado la pieza nos permite generar un túnel de viento correcto en donde el aire a una velocidad y aceleración inicial tendrá contacto con la pieza.

Figura 2

Dimensiones del túnel de viento



Fuente: Autoría propia

Las dimensiones del túnel cerrado de viento lo podremos observar en la Tabla 1 tomando en cuenta la dimensión en todos los ejes de nuestros distintos ensamblajes.

Tabla 1

Dimensiones del túnel de viento

Descripción	Magnitud en (m)
Eje +x	1
Eje +y	1,5
Eje +z	3
Eje -x	1
Eje -y	0,60653065
Eje -z	4

Fuente: Autoría propia

El diseño en si del kit aerodinámico permite tener un propio criterio por medio de las configuraciones que permite tener el reglamento de competición sencillamente el ángulo de incidencia o de ataques el que permite tener mayor o menor carga aerodinámica no importa si el alerón no es simétrico, la selección de un kit aerodinámico de múltiples elementos los flaps pueden ser del mismo tamaño o empezar con de manera descendente de mayor a menor lo único que tratamos de conseguir son fuerzas C_L tratando de aumentar la carga aerodinámica de forma más reducida. No todo es positivo depende de la distancia de los mismo la presión baja se ve dispersa y complicada de manejar por lo que su distancia entre flap es importante pero aun genera carga aerodinámica mas que un solo flap.

4.1.4 Naca 2408

Se selecciono este perfil ya que sus características son las mas idóneas y que acoplaban con el diseño es un perfil menos agresivo que puede generar varias ventajas si se armoniza correctamente con el vehículo además compaginaba de manera correcta con el diseño ya que el reglamento de la formula SAE no impide tener múltiples elementos solo deben ser configurados según el reglamento y no saltarse las reglas de longitud del mismo que se ubica en el T.8; estas se puede observar en la tabla 2 para más detalles, además los números de este perfil indica datos importantes el primer número 20% es el porcentaje de la cuerda donde se encuentra la máxima curvatura del perfil, el segundo 4% el valor máximo de la curvatura similar a un porcentaje de la cuerda y los dos últimos 08% nos indican el espesor máximo del perfil . En la Figura 3 se puede observar el ensamblaje del alerón posterior de este perfil se debe recalcar que los parámetros de diseños fueron acatados como los indica el reglamento de la formula SAE.

Tabla 2

Características del perfil aerodinámico NACA 2408

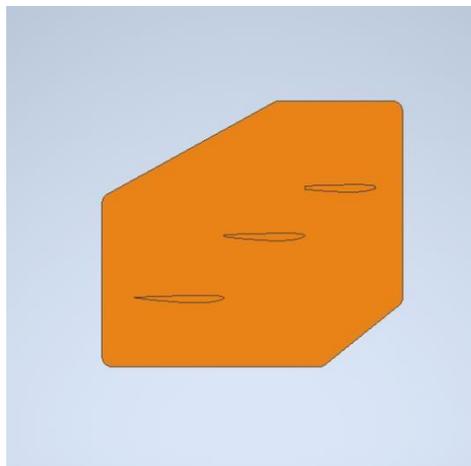
Características del perfil aerodinámico Naca 2408					
Espesor (mm)	Angulo de inclinación (°)	Distancia interna (mm)	Posición de la corriente (su)	Separación por	Ángulos de ataque

				envergadura (m)	aerodinámicos (°)
0,8	12	7	0,4		10-15

Fuente: Autoría propia

Figura 3

Ensamblaje Alerón Posterior Naca 2408

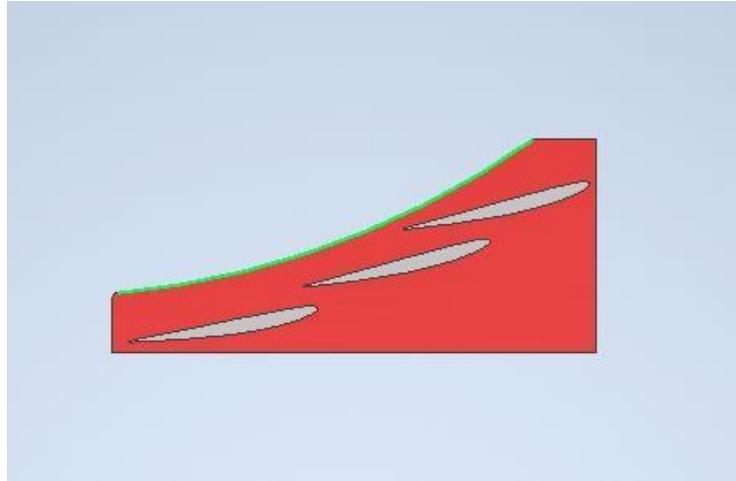


Fuente: Autoría Propia

En la Figura 4 se puede observar el ensamblaje del alerón frontal de este perfil se debe recalcar que cada uno de los parámetros de diseño fueron acatados como lo indica el reglamento de la formula SAE.

Figura 4

Ensamblaje alerón frontal perfil Naca 2408



Fuente: Autoría Propia

En si este perfil permite tener un diseño aerodinámico eficiente brindando un equilibrio en altas velocidades y en bajas no mucho con un ángulo de ataque que puede variar entre el rango de 10° - 15° permitiendo tener una variación del coeficiente de arrastre.

4.1.5 Naca 6409

Se selecciono este perfil ya que sus características se consideran adecuadas principalmente con su ángulo de ataque, distancia interna, ángulo de inclinación y sumamente diferente con el otro perfil tienen una gran brecha en sus características; se acopla con nuestro diseño es un perfil más agresivo que puede generarnos varias ventajas si compagina correctamente con el vehículo. Su primer dígito 60% nos indica el porcentaje de la cuerda donde se encuentra la máxima curvatura del perfil, el segundo 4% representa el valor máximo de la curvatura como un porcentaje de la cuerda y los dos últimos 09% indican el espesor máximo del perfil; sus características se puede observar en la Tabla 3 para más detalles. En la Figura 5 se puede observar el ensamblaje del alerón posterior de este perfil se debe recalcar que los parámetros de diseños fueron acatados como los indica el reglamento de la formula SAE.

Tabla 3

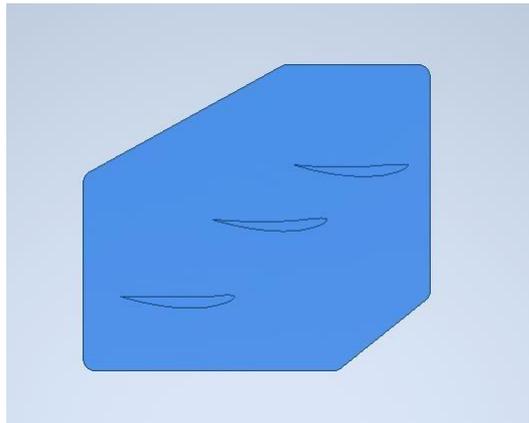
Características aerodinámicas del perfil NACA 6409

Características del perfil aerodinámico Naca 6409					
Espesor (mm)	Angulo de inclinación (°)	Distancia interna (mm)	Posición de la corriente (su)	Separación por envergadura (m)	Ángulos de ataque aerodinámicos (°)
0,8	15	6	0,5	1,5	0-10

Fuente: Autoría propia

Figura 5

Ensamblaje alerón posterior perfil NACA 6409

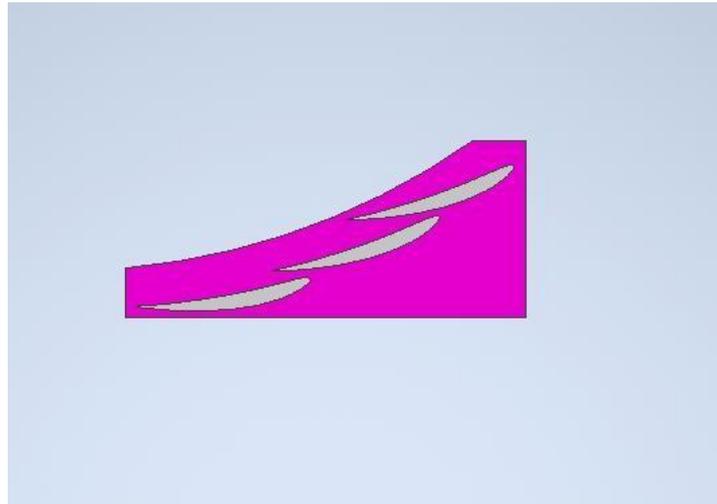


Fuente: Autoría Propia

En la Figura 6 se puede observar el ensamblaje del alerón frontal de este perfil se debe recalcar cada uno de los parámetros de diseño fueron acatados como los indica el reglamento de la formula SAE.

Figura 6

Ensamblaje alerón delantero perfil NACA 6409



Fuente: Autoría Propia

Este perfil permite tener un diseño aerodinámico más agresivo brindándonos un equilibrio en bajas velocidades y en altas un poco, un ángulo de ataque que puede variar entre el rango de 0°-10° permitiéndonos tener una variación del coeficiente de arrastre.

4.1.6 Recopilación de datos iniciales en las simulaciones

Las condiciones iniciales de las diferentes simulaciones se las puede ver en la Tabla 4, estos datos son necesarios para poder generar la validación de los dos programas y que no exista variaciones significativas en los mismo, claramente tendremos variaciones, pero mínimas aplicando las mismas condiciones de simulación.

Tabla 4

Condiciones iniciales de las diferentes simulaciones

Mallado	Velocidad min	Velocidad máx.	Densidad del aire	Viscosidad del aire	Temperatura
30mm	60 km/h	100 km/h	$1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$1,781\text{E}-5 \text{ N}^* \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$	20°C

Fuente: Autoría propia

4.1.7 ANSYS Fluent

Es una herramienta potente de CFD es decir dinámica de fluidos computacional que nos permite optimizar el rendimiento de los productos sin necesidad de construirlos y de realizar una cantidad de pruebas infinitas; la ventaja de este software es las herramientas de fluidodinámica que tenemos a disposición para nuestras simulaciones además de las características del mallado siendo nuestro primer software de simulación asemejándonos lo más posible a la realidad (Anderson, 1995).

4.1.8 Autodesk inventor

Autodesk Inventor es un software de diseño asistido por ordenador (CAD) desarrollado por Autodesk. Es empleado para el modelado 3D, de piezas y ensamblajes con precisión. lo que significa que los cambios realizados en un componente se propagan es decir en nuestro caso en los ensamblajes podemos hacer correcciones pieza a pieza y se trasladan al conjunto final. Además del modelado, Inventor incluye funciones para simulación, renderización y creación de planos técnicos en 3D; por lo que el diseño y el ensamblaje se produjo en el mismo con la ayuda de todas sus herramientas de diseño (Tu, 2018).

4.1.9 Hyperworks

Es un programa de diseño por medio de análisis y simulación CAE para ingeniería que nos permite realizar el análisis aerodinámico por medio de elementos finitos tratando de generar pruebas los más parecidos a la realidad, es un software que se especializa en simulaciones aerodinámicas como ANSYS FLUENT, pero con muchos menos componentes de ayuda o desarrollo que en nuestras simulaciones nos brindó resultados únicos con un mallado casi similar al otro programa.

4.2 Carrocería

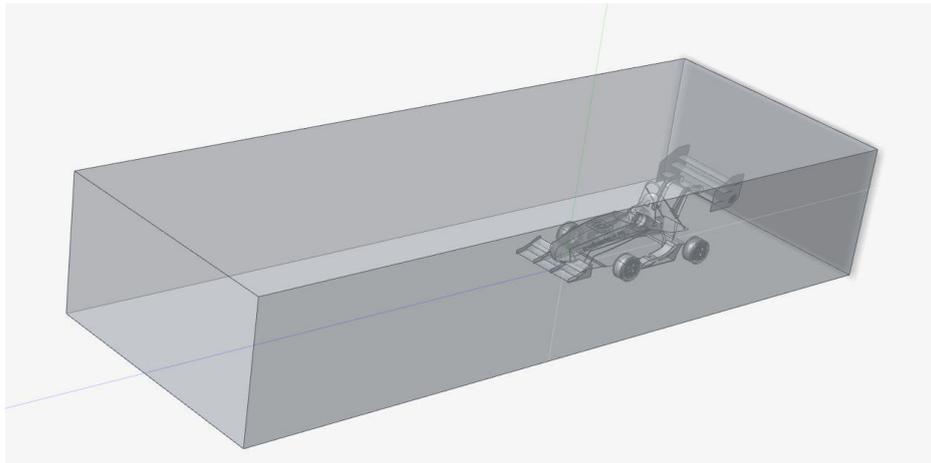
La carrocería empleada en el diseño fue tomada de un artículo similar que trata de verificar los puntos de contacto mas fuertes y el soporte que esta tendría por medio de los esfuerzos; el link de la misma es las características de diseño de esta son muy buenas ya que cumple con todo el reglamento de la competencia en cuestión y permite generar una disminución en las fuerzas de sustentación e incremento en la fuerza de resistencia, el análisis aerodinámico se enfoca en el kit de los alerones delanteros y posteriores que pueden llevar un libre diseño cumpliendo normalmente las medidas reglamentarias tal como lo indica la formula SAE en su lineamiento T.7, V1.1 y V1.4.1

5. Resultados y discusión

A continuación, en la Figura 7, se muestra los modelos de vehículo con el perfil Naca 6409 correspondiente en el túnel de viento virtual.

Figura 7

Túnel de viento virtual Naca 6409

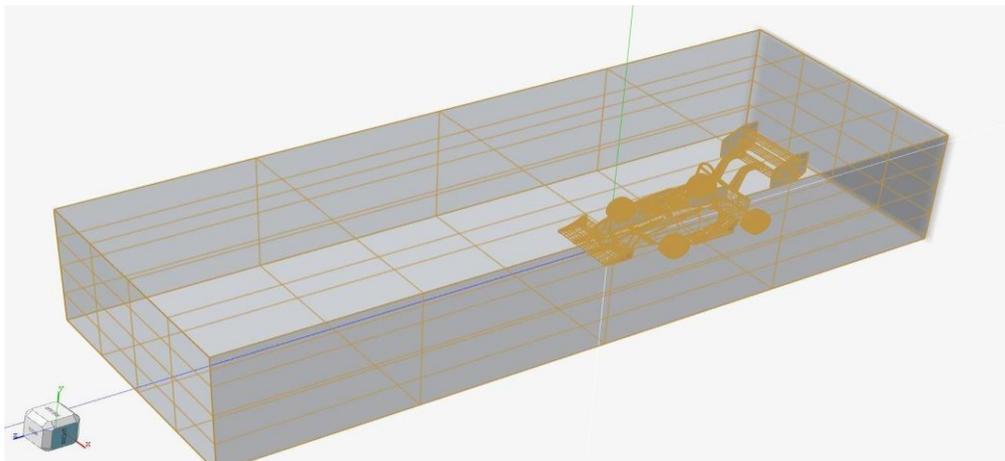


Fuente: Autoría propia

A continuación, en la Figura 8, se muestra los modelos de vehículo con el perfil Naca 2408 correspondiente en el túnel de viento virtual.

Figura 8

Túnel de viento virtual, Naca 2408



Fuente: Autoría Propia

Los programas que se seleccionó nos permiten asemejarnos lo más posible a la vida real con la ayuda de todas sus herramientas de diseño y simulación cada uno dispone de diferente sistema de calculo del mismo pero tenemos los mismos parámetros con algunos más en lo que es ANSYS ya que es un programa de fluidodinámica profesional que es utilizado por los grandes equipos del automovilismo mundial para sus nuevas creaciones, permitiéndonos correr nuestro ensamblaje a los diferentes parámetros de análisis.

Tras varias corridas de los perfiles Naca en los diferentes softwares de trabajo se tiene los resultados que son presentados en la Tabla 6. Generando una tabla comparativa de cada programa con sus diferentes sistemas de cálculo generando una validación entre los resultados para generar más confianza al momento de analizarlos.

Perfil	Hyperworks						Ansys					
	Fuerza de arrastre		Coeficiente de arrastre		Presión Pa		Fuerza de arrastre		Coeficiente de arrastre		Presión	
N	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN
2408	510	15	0,4	0,2	2.400	200	512	13	0,46	0,2	2.600	200
6409	170	12	0,6	0,2	2.500	250	160,40	12	0,6	0,3	2.650	300

Tabla 6. Resultados recopilados de las simulaciones en los diferentes perfiles NACA

Fuente: Autoría propia

Para obtener un resultado general se realizó una suma de los datos de resultados de los dos programas y generamos el cálculo del promedio de la fuerza de arrastre, coeficiente de arrastre y resistencia; el promedio es una medida que se puede acercarse más a la realidad esto se lo puede observar en la Tabla 7. Se debe recalcar que los datos iniciales de las simulaciones son iguales en los dos programas.

Tabla 7

Promedio de los resultados de las simulaciones en los diferentes perfiles

Perfil	Sumatoria	Promedio	Sumatoria de	Promedio	Presión	Promedio
Naca	de fuerza		coeficiente de			
	de		arrastre			
	arrastre					
2408	1022	511	0,86	0,43	5000	2500
6409	330,40	165,2	1,2	0,6	5150	2575

Fuente: Autoría propia

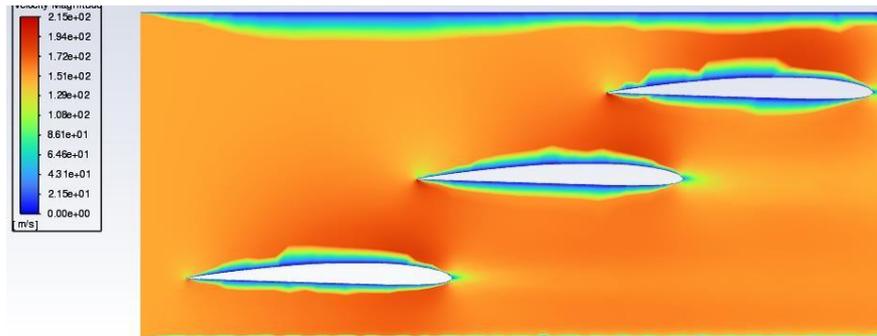
El mejor resultado luego de analizar y comparar los resultados obtenidos es del perfil Naca 6409 por que este tipo permite tener una menor fuerza de arrastre es decir menos resistencia al aire que lo frene al vehículo obteniendo varias ventajas como es facilidad de alcanzar la velocidad punta en menor tiempo, ahorro de combustible, mayor rendimiento y las contaminaciones son menores ya que el esfuerzo que debe realizar el mismo es menor para combatir esta fuerza que se opone al recorrido de este, claramente en las diferentes tablas presentadas la fuerza de arrastre es de 330,40 N en velocidades altas y en velocidades bajas es de 12N.

La presión es la fuerza que más resalta aquí claramente se puede ver en la Figura 9 la del perfil Naca 2408 que indica en diferentes colores los puntos de contacto que cada uno de los alabes del alerón posterior, el ángulo de ataque se ve claramente es el que más soporta a la mitad de la figura a pesar del inicio y al final que los colores están entre azul y verde, es decir se

encuentra entre valores de 500 Pa o 2500 Pa además que esto varia dependiendo de la velocidad en la que se encuentre el formula.

Figura 9.

Valores de presión en el perfil Naca 2408

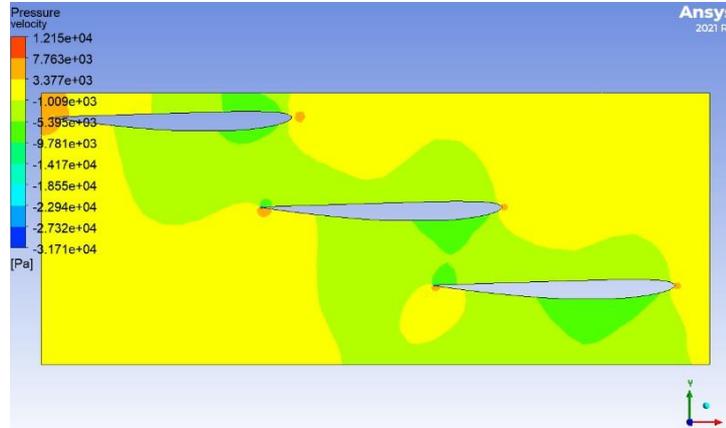


Fuente: Autoría Propia

Sin embargo, el perfil que después de las simulaciones basado en un criterio personal es el que mas produce contacto con el pavimento generando mayor tracción es el perfil Naca 6409 en la Figura 10 podemos observar claramente la presión que se genera en el mismo con los diferentes colores los mas claros son los que menos contacto reciben con el aire además el color naranja presenta la presión máxima que recibe el alerón en altas velocidades si se realiza la verificación de la información de un programa con el otro se obtiene valores similares con diferencia de 250 Pa promedio por tal motivo la diferencia existente se da por medio de las ecuaciones que implementa cada uno de los software.

Figura 10

Valores de presión en el perfil Naca 6409

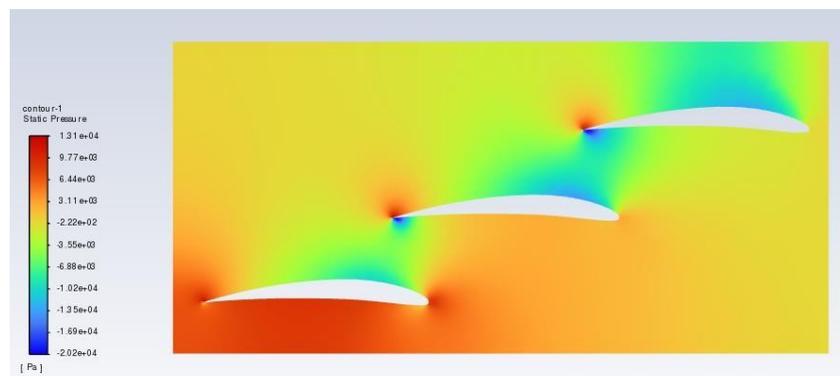


Fuente: Autoría propia

En la figura 11 se observa la presión que recibe el alerón posterior cuando el vehículo se encuentra estático los colores que nos presenta esta imagen claramente se observa que no son similares a los anteriores y los valores de la presión son sumamente bajos ya que el contacto con el aire existe, pero los valores son mínimos ya que no están con flujo constante de aire.

Figura 11

Presión en estática sobre la figura de los perfiles.

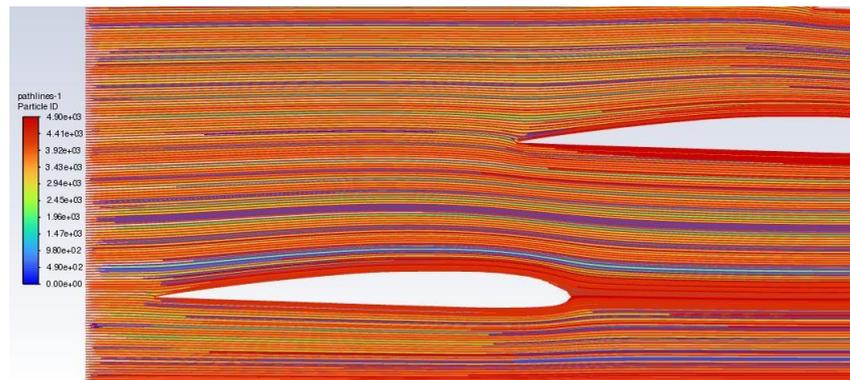


Fuente: Autoría propia

El software permite tener variedad de resultados tras las simulaciones como las líneas de flujo en cada una de las formas de nuestros perfiles en la figura 12 y figura 13.

Figura 12

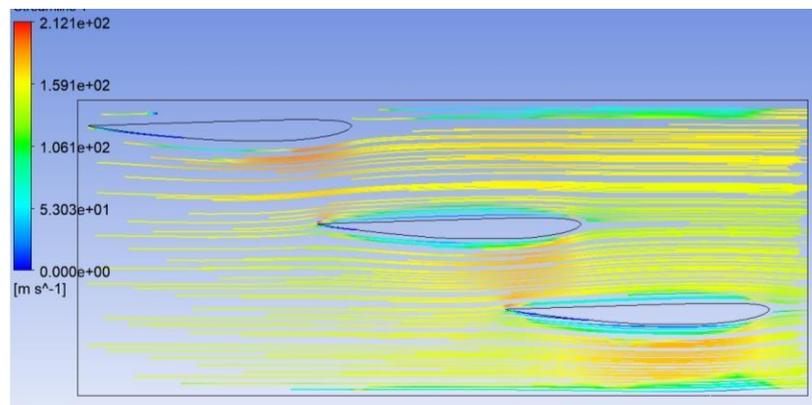
Lineas de flujo perfil Naca 2408



Fuente: Autoría propia

Figura 13

Lineas de viento perfil Naca 6409



Fuente: Autoría propia

Claramente existe una diferencia con respecto al otro perfil sin embargo es algo mínimo; el enfoque del equipo, la distribución de peso y la armonía que genere con el vehículo en si es el que permite escoger el perfil que se ocupara es una estrategia donde y cuando se requiere tener mayor o menor resistencia con el aire.

6. Conclusiones

En el presente estudio se concluye que el kit aerodinámico que existen todos tienen una diferencia no todos son iguales ya que están conformados de diferentes perfiles Naca que permite variar las fuerzas que interactúan con el mismo como la fuerza de arrastre, presión, velocidad, líneas de flujo, coeficiente de arrastre, siendo más positivas o negativas esto solo depende del objetivo que se tiene con el vehículo y el complemento que realiza con los demás componentes del vehículo.

En el estudio aerodinámico luego de la simulación de los diferentes perfiles con el modelo matemático CFD (dinámica de fluidos computacional) del sistema ha sido posible simular y evaluar el comportamiento del aire al interior del sistema por medio del análisis de elementos finitos, así como evaluar posibles cambios en el diseño y recomendar condiciones que puedan mejorar su funcionamiento.

Estas fuerzas son las que permiten generar una diferencia de un perfil con el otro en caso de ser fabricados y puesto a prueba, con el uso del software ANSYS y Hyperworks permite generar un ahorro de tiempo y de inversión generando una simulación con respecto a la realidad generando datos de análisis confiables en distintos escenarios como altas y bajas velocidades, sin embargo unos de los resultados que sorprendió es conocer la presión que ejerce el aire sobre nuestros perfiles cuando nuestro formula SAE se encuentra en reposo es decir estático con valores mínimos; en los anexos podemos ver respaldo de la simulación que demuestra los diferentes puntos de contacto que tiene el kit con el aire en cada uno de nuestros programas utilizados.

Este estudio se enfocó en la simulación aerodinámica ya que se debe verificar el perfil que más genere una ayuda al momento de competir actuando de forma positiva y equilibrada

con el contacto del aire. El coeficiente de arrates es un valor que indica la resistencia al aire que tiene cada uno de nuestros perfiles es decir tras la validación cada uno presento un valor de 0,6 y 0,46 generando que el perfil que más resistencia presenta y la fuerza de arrastre en el eje y es del perfil Naca 6409 demostrando que sería el adecuado para poder obtener el mejor desempeño con una presión en el alerón de 2575 Pa con una interpretación de permite tener un coeficiente de fricción que permite estar en mayor contacto con el suelo ya que la presión es de 5150 PA, esto permite que el SAE se encuentre más pegado al piso con mayor adherencia. Se recomienda seguir analizando los diferentes perfiles en las entradas de aire del vehículo que pueden generar efectos Venturi que pueden ser aprovechados de forma positiva y generando un distintivo al momento de una competición.

7. Bibliografías

Camacho Juan, L. M. (21 de septiembre de 2018). Metodología de diseño aerodinámico para un vehículo tipo Fórmula SAE. Obtenido de http://somim.org.mx/memorias/memorias2018/articulos/A5_65.pdf

Erick, A. (6 de julio de 2016). Rediseño de la carrocería y chasis de un go-kart híbrido. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/handle/123456789/34448>

Fernandez, J. (2018). Concepto de Velocidad. Obtenido de <https://www.fisicalab.com/apartado/velocidad>

Fraija, I. (diciembre de 2006). Estudio de la aerodinámica en los vehiculos. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4962/496251108011.pdf>

Garceta. (2013). Fundamentos de los métodos numéricos en aerodinámica. Obtenido de <https://editorial.tirant.com/es/libro/fundamentos-de-los-metodos-numericos-en-aerodinamica-9788415452478>

HELLOAUTO. (febrero de 2023). Aerodinamica. Obtenido de <https://helloauto.com/glosario/aerodinamica#:~:text=Y%20por%20%C3%BAltimo%2C%20el%20factor%20que>

IAD. (20 de abril de 2020). Coeficiente de resistencia aerodinámica...¿Qué es? Obtenido de <https://iad.la/blogs/que-es-el-coeficiente-de-resistencia-aerodinamica/>

Julio, G. (septiembre de 2016). Modelo matemático para el diseño aerodinámico de los álabes de una turbina eólica de eje horizontal (TEEH). Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/3291/329145581008.pdf>

Laffar, L. (09 de marzo de 2017). Método de Multhopp. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/341347925/Metodo-de-Multhopp#>

Pauta Juan, M. S. (Noviembre de 2014). "Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo fórmula SAE". Recuperado el 11 de 05 de 2023, de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7183/1/UPS-CT004048.pdf>

Samaniego, G. (2021). Análisis del diseño aerodinámico de un alerón preparado para competencia utilizando simulaciones numéricas de dinámica de fluidos computacional (DFC). Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642021000200019

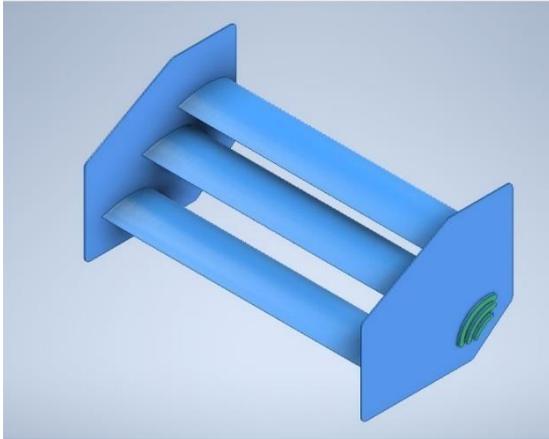
Savez, E., Álvarez Rivera A. B. ., Vera Puebla, E. G. ., Morales Neira, D. J. ., Ramos Rivero, V. L. ., Chele Sancán D. G. ., Tellez Gómez W. B. ., & Noroña Merchán M. V. . (s.f.). Análisis Comparativo de Molduras que Influyen en la Eficiencia Aerodinámica Sobre un Chasis de Karting por Medio de Simulación Computacional. Obtenido de Análisis Comparativo de Molduras que Influyen en la Eficiencia Aerodinámica Sobre un Chasis de Karting por Medio de Simulación Computacional

Uyuguari, B. R. (2021). Diseño del carenado de un vehículo eléctrico biplaza. Obtenido de <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/10841/1/16383.pdf>

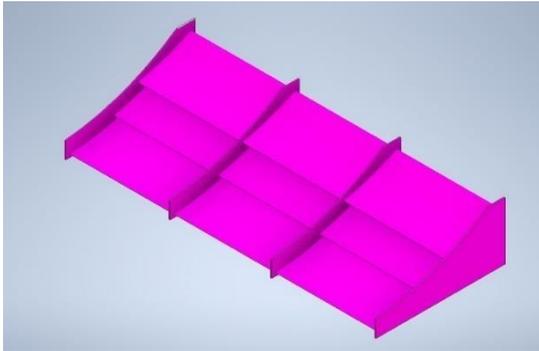
8. Anexos

8.1 Diseños realizados en inventor

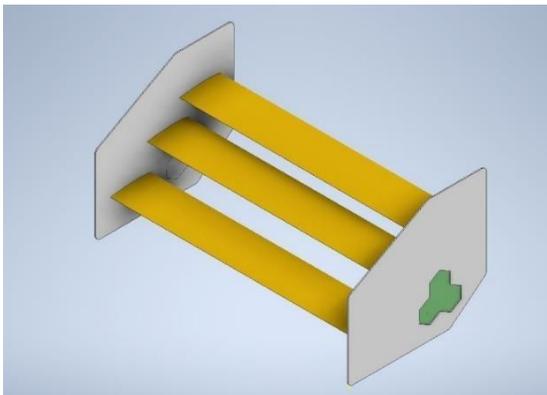
8.1.1 Anexo 1



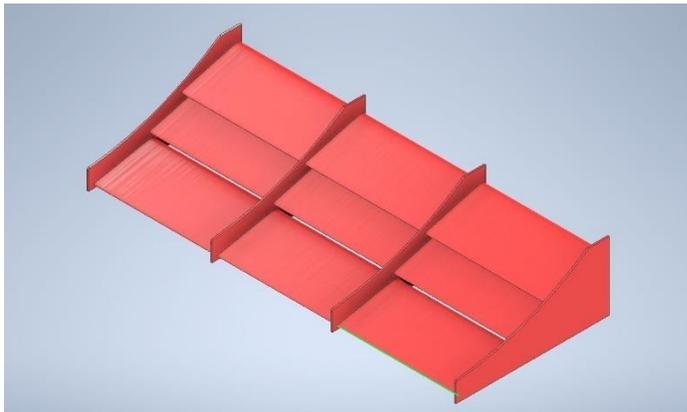
8.1.2 Anexo 2



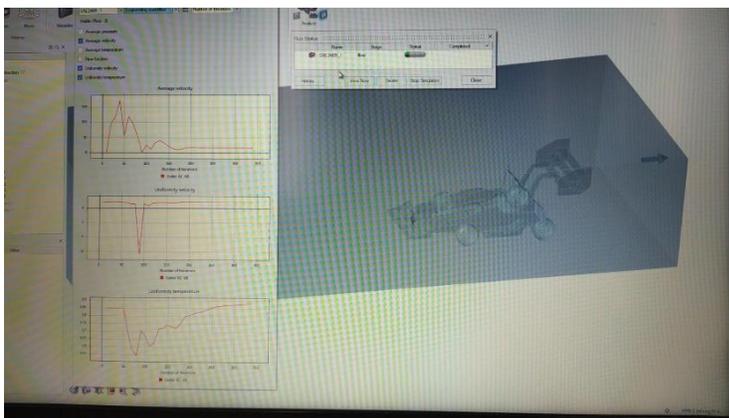
8.1.3 Anexo 3



8.1.4 Anexo 4



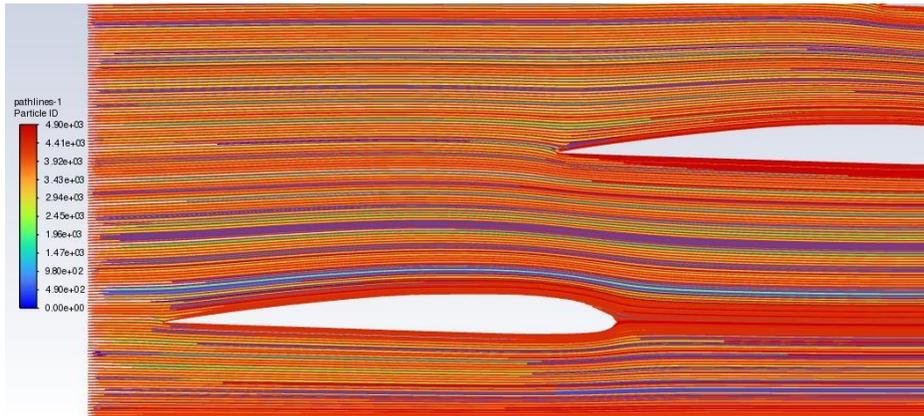
8.1.5 Anexo 5



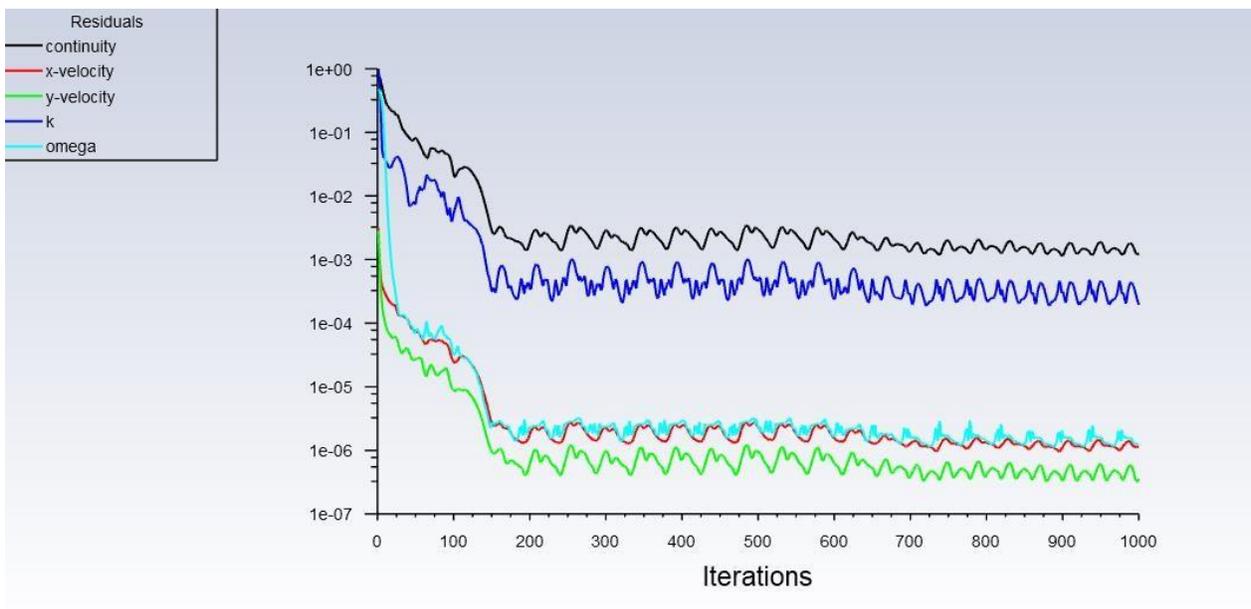
8.1.6 Anexo 6 (Presión en Hyperworks)



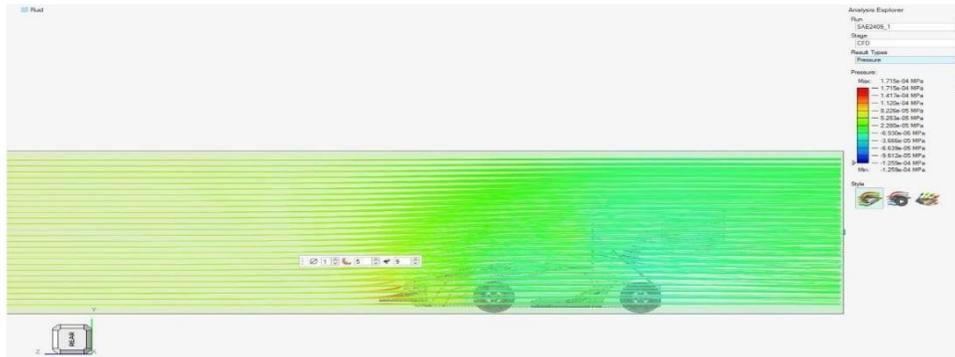
8.1.7 Anexo 7 (Presión en Ansys)



8.1.8 Anexo 8 (Resultados Ansys)



8.1.9 Anexo 7 (Velocidad prueba 1)



8.1.10 Anexo 8 (Presión prueba 2)



8.1.11 Anexo 9 (Velocidad prueba 2)

