

# Estudio aerodinámico de un vehículo eléctrico de competición Formula Sena Eco

## Aerodynamics study of an electric vehicle competition Formula Sena Eco

Álvaro Uribe Agudelo<sup>1</sup>, Carlos Andrés Sáenz Cortez<sup>2</sup>, Hollman Danilo Guevara Romero<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ingeniero Aeronáutico, Fundación Universitaria Los Libertadores, [aaribea@libertadores.edu.co](mailto:aaribea@libertadores.edu.co)

<sup>2</sup> Instructor de Automatización y Mecatrónica CMM, Servicio Nacional de Aprendizaje Sena, [c.saenz@misena.edu.co](mailto:c.saenz@misena.edu.co)

<sup>3</sup> Estudiante Ingeniería Aeronáutica, Fundación Universitaria Los Libertadores, [hdguezarar@libertadores.edu.co](mailto:hdguezarar@libertadores.edu.co)

Fecha de recepción: 04/08/2015 Fecha de aceptación del artículo: 10/11/2015

### Resumen

Formula Sena Eco es un concurso de innovación y desarrollo tecnológico, encargado de consolidar escuderías a nivel Regional para el diseño, construcción y prueba de vehículos de competición tipo formula. El presente trabajo de investigación estudia el comportamiento aerodinámico del vehículo eléctrico de la Escudería DCM de la Regional Bogotá, incorporando un alerón delantero. Por tanto, el propósito final del estudio consiste en mostrar la selección de un alerón delantero con la mejor relación sustentación/arrastre (L/D). Para realizar la selección, se inicia el análisis numérico y computacional de diferentes perfiles aerodinámicos, los cuales serán probados sobre un diseño geométrico de alerón; finalmente se presentan los resultados de coeficientes de arrastre (Cd) y sustentación (Cl), obtenidos sobre los diseños CAD del vehículo.

### Palabras clave

Aerodinámica, vehículo eléctrico de competición, coeficiente de sustentación, coeficiente de arrastre, alerón.

### Abstract

Formula Sena Eco is a competition of innovation and technological development teams in charge of consolidating regional level for the design, construction and testing of racing vehicles type formula. This research studies the aerodynamic behavior of the electric vehicle Scuderia Regional DCM Bogota, incorporating a front wing. Therefore, the ultimate purpose of the study is to show the selection of a front spoiler with the best lift / drag (L / D). To make the selection, the numerical and computational analysis of different airfoils starts, which

will be tested on a geometric design spoiler; finally results drag coefficients (Cd) and lift (Cl) obtained on CAD vehicle designs are presented.

### Keywords

Aerodynamics, electric vehicle competition, coefficient lift, coefficient drag, aileron.

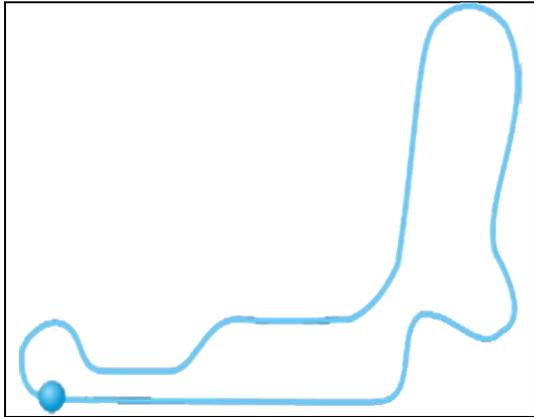
### 1. Introducción

La Formula Sena Eco es un concurso de innovación y desarrollo tecnológico que promueve competencias profesionales; como la creatividad, el trabajo en equipo y el liderazgo de los aprendices, a través de un proyecto que se llevará a cabo en forma colaborativa.

SENA ECO impulsa integralmente las tecnologías y competencias asociadas al diseño y construcción de un vehículo, enfocado en lograr la eficiencia energética, buscando soluciones innovadoras alrededor de autos eléctricos. Así mismo, fortalece las competencias en gestión de proyectos [1].

Uno de los objetivos en el desarrollo de un vehículo Formula Sena Eco es tener el máximo rendimiento en pista, lo cual implica tener un buen desempeño aerodinámico. A menudo se piensa que los resultados más satisfactorios en competencia provienen de vehículos con mayor velocidad de punta, sin embargo, no todos los circuitos poseen las mismas condiciones; contextualizando nuestro estudio de caso, el análisis aerodinámico que se debe realizar, supeditado a las características del circuito donde se realiza la competencia (autódromo de Tocancipá), Figura 1, no

debe enfocarse en conseguir la mayor velocidad en recta sino de obtener la máxima velocidad posible en curvas.



**Figura 1.** Circuito Autódromo de Tocancipá [2].

El fundamento de este trabajo está en el estudio aerodinámico de la carrocería del vehículo eléctrico diseñado y construido por aprendices e instructores de los centros de formación de la Regional Distrito Capital, el estudio fue realizado utilizando técnicas de CFD (Computational Fluid Dynamics). Este estudio abarcó desde el diseño del CAD en software Solidworks y obtención de curvas características de arrastre ( $C_d$ ), Sustentación ( $C_l$ ).

## 2. Metodología

Se realizó una revisión de algunos artículos generados por universidades participantes de la competición Formula SAE International, Aerodynamics for Formula SAE: Initial design and performance prediction [3], Aerodynamic Characteristics of Airfoils with Blunt Trailing Edge [4], lift and drag coefficients behavior at low Reynolds number in an airfoil with miniflaps gurney submitted to a turbulent flow. Part 2 [5], investigando el comportamiento de superficies aerodinámicas para la implementación en el vehículo.

El desarrollo del diseño aerodinámico de la carrocería del vehículo eléctrico Formula Sena, se comienza con el estudio en 2D de perfiles aerodinámicos utilizando el programa interactivo X Foil [6], con el cual se determina cual es el perfil que mejor coeficiente de sustentación posee para ser implementado en el ala delantera.

Luego de obtener el perfil que más se adecue a nuestras

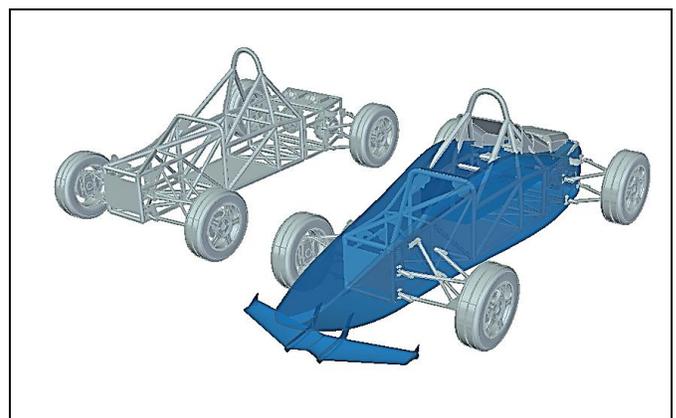
necesidades se procede con el análisis del alerón en 3D, con el fin de obtener el Downforce total que está proporcionando al vehículo.

Además, se planteó el estudio aerodinámico de la geometría óptima de un vehículo y sus superficies a través del modelaje con dinámica de fluidos computacional (CFD) usando el software STAR CCM+ que trabaja para el cálculo de los resultados el método de los elementos finitos.

La herramienta computacional utilizada para el análisis utiliza un método de desratización de dominio el de elementos finitos, donde las ecuaciones de gobierno, conservación de masa, momentum (Navier-Stokes) y energía [7],[9] son resueltas de manera iterativa para cada volumen de control.

El modelo de la carrocería y las superficies aerodinámicas como el ala delantera fue elaborado previamente como se muestra en la figura 2 con una herramienta CAD Solidworks, se importó al CFD donde se siguieron los siguientes procedimientos:

- Preparación de la geometría
- Aplicar condiciones de frontera
- Creación y generación de mallas
- Aplicación de las condiciones físicas
- Simulación computacional
- Visualización de los resultados



**Figura 2.** Diseño CAD Solidworks.

### 3. Resultados y análisis

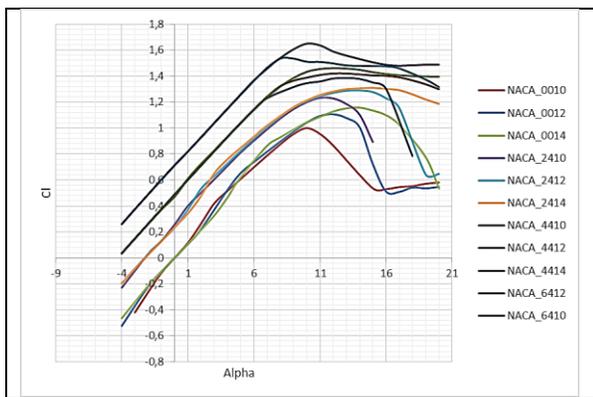
#### 3.1 Resultados análisis perfiles aerodinámicos

En la tabla 1 se muestran los valores utilizados para el análisis de los perfiles aerodinámicos en 2D.

**Tabla 1.** Variables utilizadas para cálculo teórico del perfil.

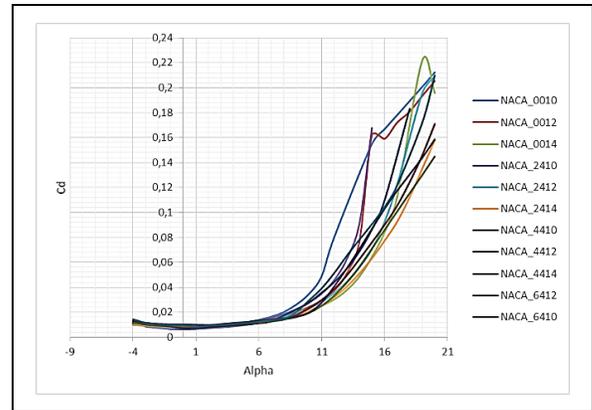
Variable	Valor
Reynolds	380000
V [km/h]	80
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
X[m]	0.25
$\mu$ [Kg/m*s]	0.00001789
Número Mach	0.24

La figura 3 muestra el Coeficiente de Sustentación del Perfil ( $C_l$ ) v/s el ángulo de Ataque (Alpha) en ella muestra que un perfil NACA asimétrico genera más sustentación que un perfil naca simétrico, se observa que el perfil NACA 6410, figura 3, es el que mayor coeficiente de sustentación genera.



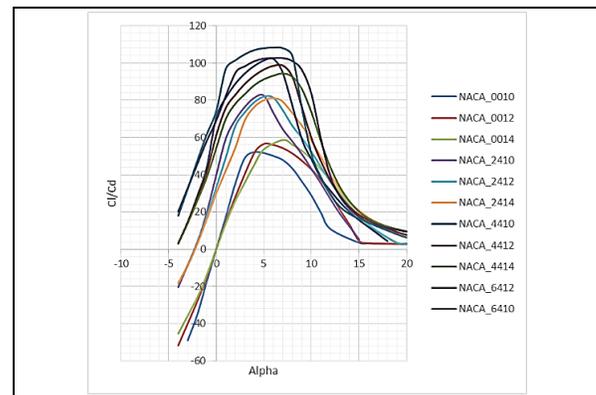
**Figura 3.** Grafica perfil 2D  $C_l$  vs Alpha.

En la Figura 4 muestra el Coeficiente de Arrastre ( $C_d$ ) del perfil v/s el Angulo de Ataque, se puede inferir que para un ángulo de ataque de 0 grados el coeficiente de arrastre es aproximadamente igual para todos los perfiles analizados



**Figura 4.** Grafica perfil 2D  $C_d$  vs Alpha.

En la Figura 5 muestra la Eficiencia Aerodinámica de los perfiles el cual nos muestra que para el perfil NACA 6410 la eficiencia aerodinámica es mayor en comparación a los otros perfiles, de igual forma se aprecia que la mayor eficiencia aerodinámica se logra para ángulos entre 5 y 8 grados.



**Figura 5.** Grafica perfil 2D  $C_l/C_d$  v/s Alpha.

De acuerdo a los resultados obtenidos se optó por seleccionar el perfil NACA 6410 mostrado en la Figura 6 para la construcción del alerón ya que presentaba un alto coeficiente de sustentación y un coeficiente de arrastre bajo para un ángulo de 0 grados, al igual que una alta eficiencia del perfil desde 0° hasta 8° aproximadamente.

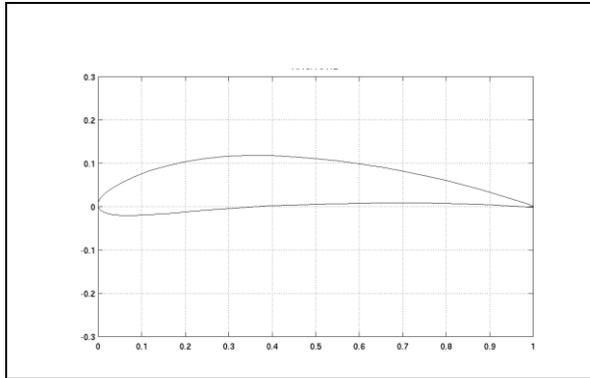


Figura 6. Perfil NACA 6410.

### 3.2 Resultados Análisis del Alerón Delantero

Para el análisis del alerón se utilizaron los valores mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Variables utilizadas para cálculo teórico del alerón.

Variable	Valor
Reynolds	380000
V [km/h]	80
$\rho$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	1.225
Cm[m]	0.25
$\mu$ [Kg/m*s]	0.00001789
Número Mach	0.24
S[m <sup>2</sup> ]	0.33

Los coeficientes adimensionales para la carga aerodinámica ecuación (1) y el arrastre ecuación (2) son valores obtenidos en relación únicamente con la forma del vehículo y la velocidad.

De la ecuación básica de carga aerodinámica (Sustentación o Downforce en inglés), se define como [7],[8]:

$$L = q_{\infty} * S * C_l \quad (1)$$

Donde

$L$ = Carga Aerodinámica

$q_{\infty}$ = Presión Dinámica

$S$ = Área

$C_l$ = Coeficiente de Sustentación

Implementando el software Solidworks se realizó el diseño de la geometría del alerón Figura 7

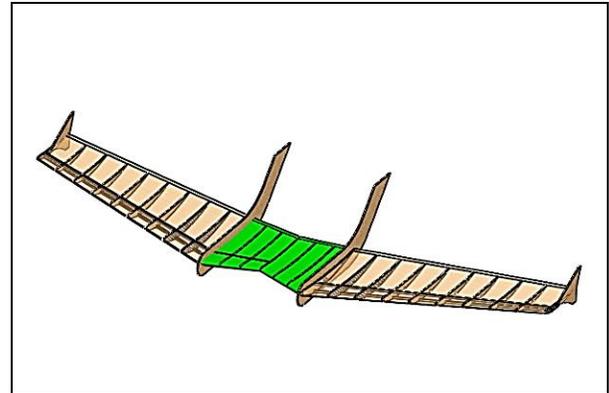


Figura 7. Diseño alerón delantero solidworks.

El resultado Obtenido mediante CFD es mostrado en la figura 8 donde se aprecia las líneas de corriente a lo largo de la envergadura del alerón.

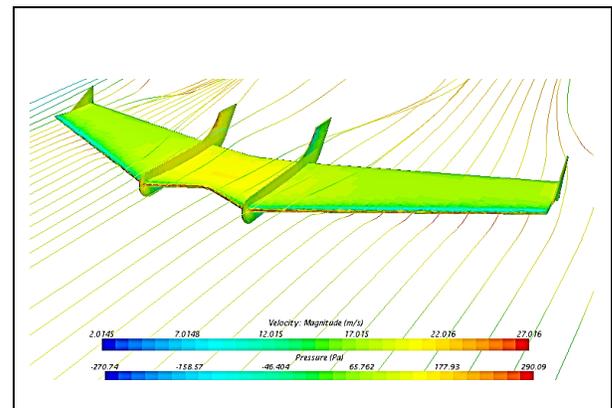


Figura 8. Simulación CFD líneas de flujo sobre el alerón.

Se puede apreciar las líneas de corriente sobre las puntas del alerón, permitiendo observar que debido a la implementación de un dispositivo punta de ala no se generan vórtices lo cual favorece a la disminución del arrastre figura 9.

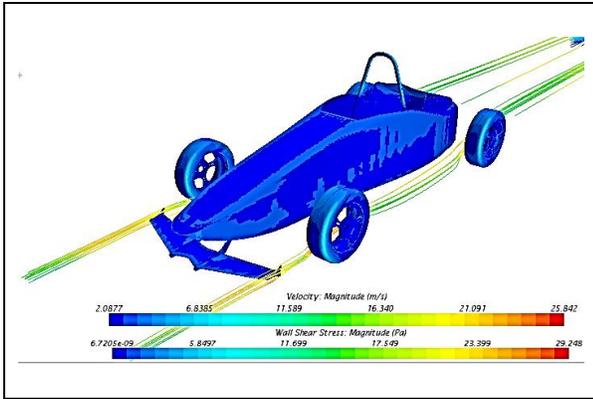


Figura 9. Simulación CFD línea de flujo sobre Wing Tip.

Aplicando la ecuación (1), y con las variables de la tabla 2 se calcula el valor teórico de la sustentación los resultados son mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de valores obtenidos mediante simulaciones CFD y cálculos teóricos para el alerón.

Lift CFD	Drag CFD	Lift Teórico	Drag Teórico
[N]	[N]	[N]	[N]
25.3	1.7	45	4.1

El coeficiente de sustentación teórico es mostrado en la figura 10 en donde se aprecia que para un ángulo de  $0^\circ$  el coeficiente de sustentación es de 0,5 aproximadamente.

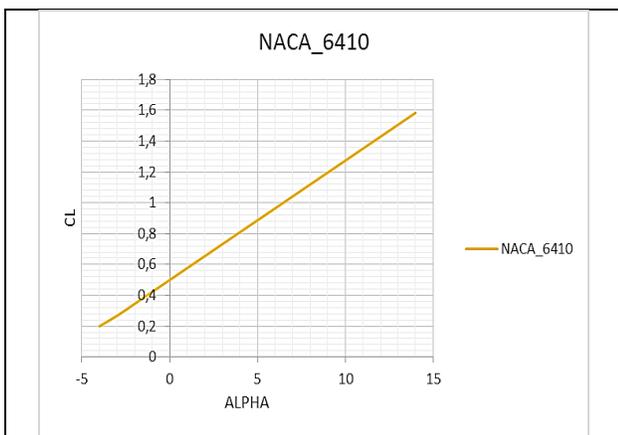


Figura 10. Coeficiente de sustentación CL v/s el ángulo de ataque alpha de el alerón.

En la figura 11 se obtiene para un coeficiente de sustentación de 0,5 un arrastre aproximado de 0,045.

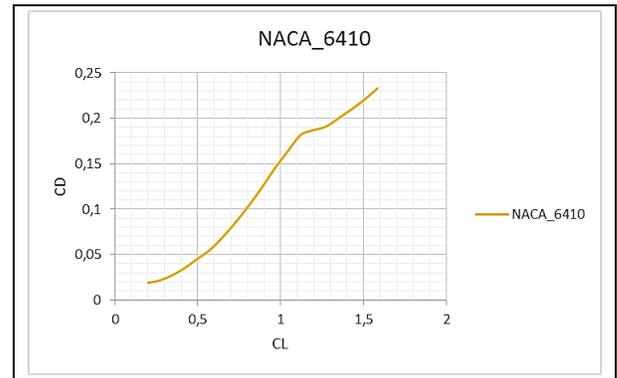


Figura 11. Coeficiente de arrastre CD v/s coeficiente de sustentación CL para el alerón.

Se obtiene la eficiencia del alerón respecto al ángulo figura 12.

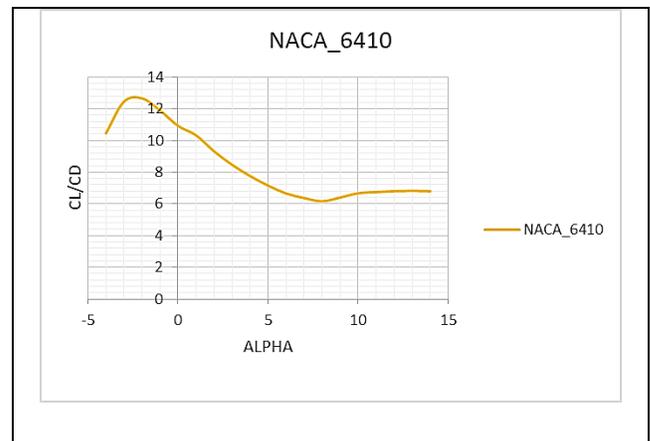


Figura 12. Eficiencia máxima del perfil del alerón.

### 3.3. Resultados Análisis del vehículo

El análisis ha sido lanzado a 22.2 m/s, 80km/h unas de las velocidades medias que alcanza el vehículo, se efectuaron 1500 iteraciones hasta que el cálculo llegase a una condición estable, para las condiciones de velocidad de 80 Km/h.

En la Figura 13 se muestra el contorno de presiones sobre el vehículo en el cual las ruedas son uno de los principales generadores de arrastre del vehículo, además se observa las líneas de flujo a través de la superficie permitiendo conocer el comportamiento

sobre ciertas zonas.

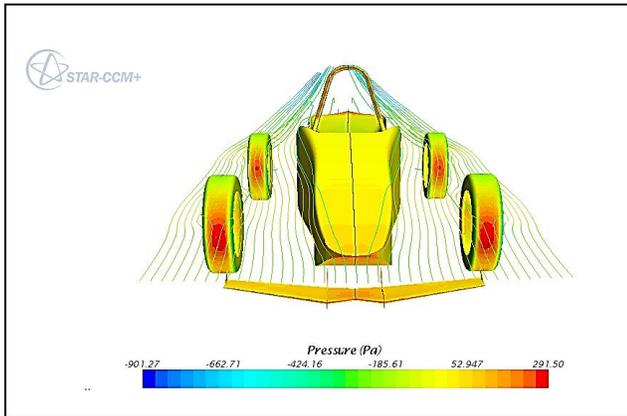


Figura 13. Contorno de presiones sobre el vehículo.

La figura 14 muestra los resultados obtenidos a 1500 iteraciones mediante CFD

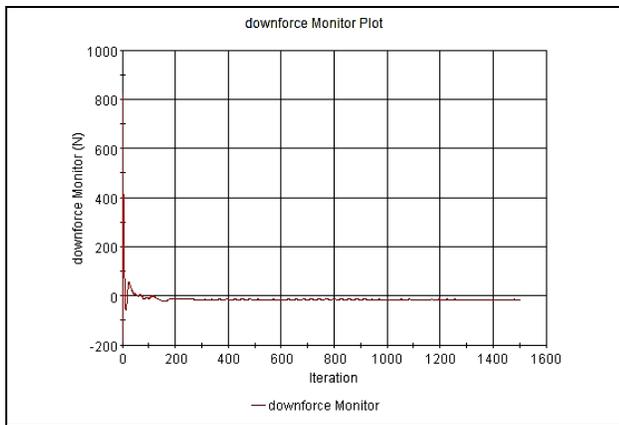


Figura 14. Plot resultados obtenidos de downforce simulación CFD.

A continuación, se muestra el contorno de velocidades en donde se aprecia la zona de bajas velocidades del vehículo.

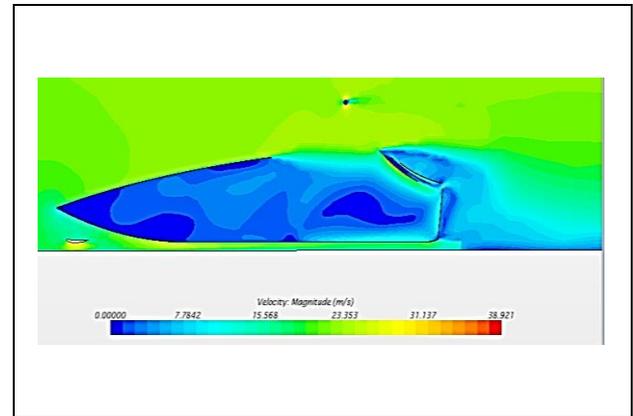


Figura 15. Contorno de velocidades sobre el vehículo.

Se puede apreciar que la zona que más bajas velocidades del vehículo es la zona comprendida entre las entradas de aire y la parte trasera del vehículo figura 15.

El Arrastre obtenido a 80 Km/h es de 68.09 N figura 16.

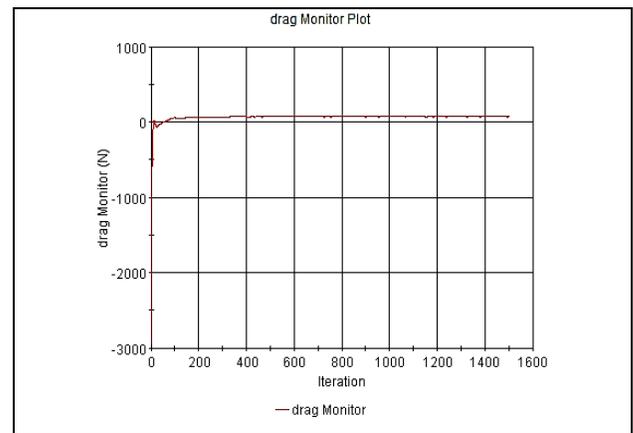


Figura 16. Plot resultados Drag obtenidos simulación CFD.

La resistencia al avance o Drag en ingles se define como [1][2]:

$$D = q_{\infty} * S * Cd \quad (2)$$

Donde:

- $D$ =Arrastre
- $q_{\infty}$ =Presión Dinámica
- $S$ = Área

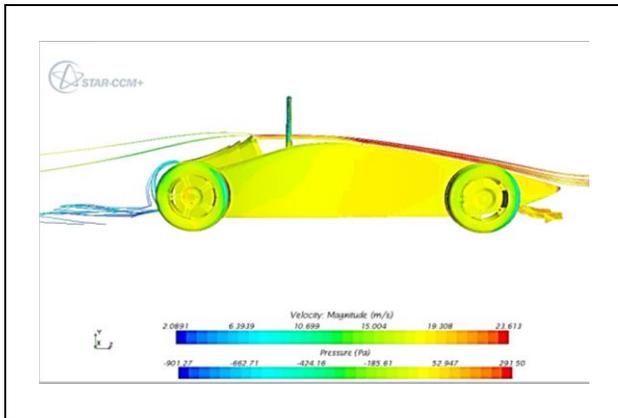
$C_d$ = Coeficiente de Arrastre

Aplicando la ecuación (2) se calcula el arrastre teórico del vehículo, los resultados obtenidos para el vehículo mediante cálculos teóricos y simulaciones CFD son mostrados en la tabla 4.

**Tabla 4.** Comparación de valores obtenidos mediante simulaciones CFD y Cálculos teóricos para el vehículo.

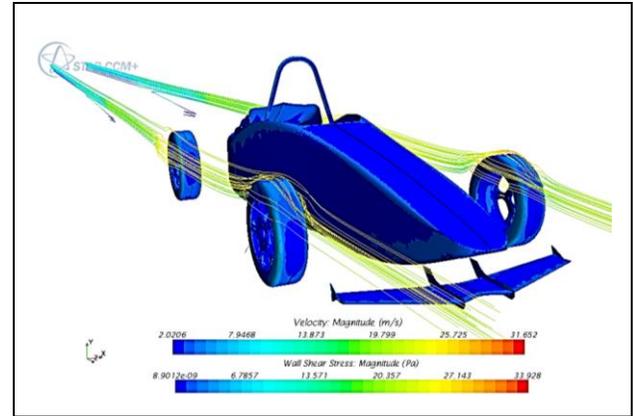
Valor Teórico	Drag CFD	%Error
[N]	[N]	[N]
63	68	7.9

Se muestran las líneas de flujo sobre la superficie del carro en donde se aprecia que el flujo sigue el contorno del vehículo y en la parte de las tomas de aire debido a su posición y geometría algunas líneas de corriente siguen la forma dirigiendo el flujo donde es requerido figura 17



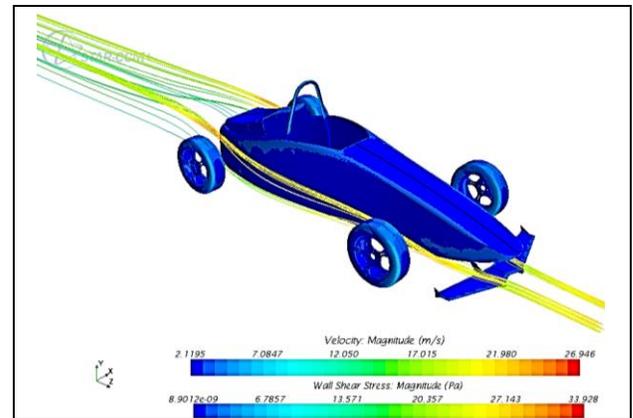
**Figura 17.** Líneas de flujo sobre la carrocería y tomas de aire.

En la Figura 18 se muestra la zona de las ruedas permitiendo observar el comportamiento del fluido sobre estas superficies.



**Figura 18.** Líneas de flujo sobre las ruedas del vehículo.

Se muestra el comportamiento de las líneas de flujo al pasar por la superficie del alerón y posteriormente siguen el contorno de la carrocería del vehículo figura 19.



**Figura 19.** Líneas de flujo sobre el alerón y carrocería.

La figura 20 muestra el vehículo en pruebas de Skidpad en donde se pudo validar los resultados numéricos y computacionales obtenidos.



**Figura 20.** Practicas libres prueba de skidpad.

En la tabla 5 se muestra las especificaciones finales del vehículo construido.

**Tabla 5.** Características generales del vehículo

Variable	Valor
Tipo	Monoplaza Tipo Fórmula
Planta Motriz	Eléctrico (x 2)
Potencia	42 kW (52 HP)
Peso Vacío	480 Kg
Máx. Velocidad	130 Km/h
Velocidad Promedio	80 Km/h
Tipo de Baterías	Litio, hierro, fosfato
Material Chasis	Cromo molibdeno
Material Suspensión	Cromo molibdeno
Material Carrocería	Fibra de Carbono
Peso Carrocería	18 Kg
Área Frontal	1.03
Arrastre	63 N
Ancho de Trocha	1,8 m
Longitud	3,6 m

## Conclusiones

Entre la validación de los resultados de cálculos teóricos y la simulación computacional CFD mostrados en la tabla 4 se puede afirmar que los resultados fueron aproximados ya que se obtiene un error de 7.9%.

De acuerdo con los resultados obtenidos en la figura 3, podemos deducir que el uso de perfiles asimétricos con

mayor curvatura proporciona mayor coeficiente de sustentación en comparación con los perfiles simétricos, lo cual permite generar mayor carga aerodinámica para el aumento del coeficiente de fricción en las ruedas.

La configuración del alerón para el vehículo eléctrico de competición fue de ala en flecha, con un ángulo de ataque de  $0^\circ$  que nos proporciona un Downforce de 25N y un Arrastre de 1.7N

En los resultados obtenidos se puede destacar que las ruedas son un elemento que contribuye mayormente al arrastre como se aprecia en la figura 13; por lo que se hace necesario que en futuros diseños se tenga en cuenta este factor para disminuir ese arrastre y mejorar el rendimiento del vehículo.

Para mejorar la eficiencia del vehículo eléctrico se hace necesario considerar la disminución de peso con el fin de obtener una mejor relación peso potencia, el cual no se tuvo en cuenta en el inicio de la construcción del vehículo, debido a que el reglamento de la competición formula Sena Eco establece un peso mínimo superior a 420 kg.

## Referencias

1. *Formula Sena-consultado* en agosto 2015, En: <http://comunica.sena.edu.co/formulasena/?t=qu-e-es-formula-sena-eco&i=1>
2. *Circuito Autódromo de Tocancipá* -consultado en noviembre de 2015, En: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e3/Aut%C3%B3dromo\\_de\\_Tocancip%C3%A1.svg/250px-Aut%C3%B3dromo\\_de\\_Tocancip%C3%A1.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e3/Aut%C3%B3dromo_de_Tocancip%C3%A1.svg/250px-Aut%C3%B3dromo_de_Tocancip%C3%A1.svg).
3. Wordley, S., Saunders, J. (2006). Aerodynamics for Formula SAE: Initial design and performance. *SAE World Congress & Exhibition*.
4. Gómez, A., Pinilla, A. (2006) Aerodynamic Characteristics of Airfoils with Blunt Trailing Edge. *Revista de Ingeniería*, (24).

5. Colman, J., Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., Martínez, M., Boldes, U., Bacchi, F. (2010). Lift and drag coefficients behavior at low Reynolds number in an airfoil with miniflaps gurney submitted to a turbulent flow. Part 2. *Lat. Am. appl. res. vol. 40, no. 1 Bahía Blanca*.
6. XFRL5 – Tool for airfoils, Consultado en Julio De 2015, En: <http://www.xflr5.com/xflr5.htm>
7. J. Anderson, (2005). *Introduction to Flight*. Sixth Edition., MacGraw Hill/ International Edition.
8. D. P. Raymer, (1989). *Aircraft Design: A Conceptual Approach*. 1st Edition, American Institute of Aeronautics and Astronautics.
9. Milliken William and Douglas, (1995). *Race car Vehicle Dynamics*. Society of automotive engineers, Inc.