



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**Diseño del carenado de un vehículo eléctrico biplaza.**

**Trabajo de graduación previo a la obtención de título de:  
INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ**

**Nombre de los autores:**

**BYRON GONZALO RIVERA VILLA  
CHRISTIAN ISRAEL UYAGUARI PESANTEZ**

**Nombre del Director:**

**ROBERT ROCKWOOD IGLESIAS**

**CUENCA – ECUADOR**

**2021**

**Dedicatoria:**  
A Dios, a mis padres, hermanos,  
a mi familia y amigos  
por su apoyo incondicional en esta etapa.

*Byron*

**Dedicatoria:**

A Dios por ser mi guía y fortaleza espiritual,  
a mis padres por su esfuerzo, entrega y sacrificio, a mis familiares y amigos que de  
una u otra manera siempre me apoyaron.

*Christian*

**Agradecimiento:**

A Dios,

a la Universidad del Azuay por la acogida durante todos  
estos años de estudio, al Ing. Robert Rockwood  
por su acertada guía y apoyo durante el desarrollo de este proyecto.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA .....	ii
DEDICATORIA .....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	v
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT.....	ix
I. INTRODUCCIÓN .....	1
II. MATERIALES Y MÉTODOS.....	3
A. <i>Dimensionamiento del habitáculo</i> .....	3
B. <i>Diseño del carenado</i> .....	5
C. <i>Simulaciones aerodinámicas</i> .....	6
D. <i>Selección de material</i> .....	7
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	8
IV. CONCLUSIONES .....	9
V. REFERENCIAS .....	10

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Proceso para diseño del habitáculo .....	3
Fig. 2 Configuración del vehículo biplaza .....	3
Fig. 3 Configuración de los asientos del vehículo.....	3
Fig. 4 Dimensiones del entorno de los ocupantes .....	3
Fig. 5 Ángulo de visión horizontal.....	4
Fig. 6 Ángulo de visión de los indicadores y panel de instrumentos .....	4
Fig. 7 Inclinación de los asientos para vehículos deportivos .....	4
Fig. 8 Ángulo de piernas del conductor .....	4
Fig. 9 Posición de los cinturones de seguridad .....	4
Fig. 10 Simulación de la posición final de los ocupantes .....	4
Fig. 11 Posición de ocupantes en el chasis.....	5
Fig. 12 Boceto del chasis.....	5
Fig. 13 Modelado de superficies .....	5
Fig. 14 Definición de colores y apariencia.....	5
Fig. 15 Ensamble final .....	6
Fig. 16 Medidas del túnel de viento .....	6
Fig. 17 Mallado del vehículo en 2D.....	6
Fig. 18 Mallado del vehículo en 3D.....	7
Fig. 19 Diseño final.....	8
Fig. 20 Resultados del cd de la geometría en un rango de velocidades de 40 a 180 km/h.....	8
Fig. 21 Contornos de presión total .....	9
Fig. 22 Contornos de velocidad.....	9
Fig. 23 Líneas de contorno de velocidad.....	9

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dimensiones establecidas por la SAE.....	3
Tabla 2. Etapas a seguir para el análisis CFD .....	6
Tabla 3. Condiciones de frontera del túnel de viento.....	6
Tabla 4. Condiciones de operación .....	7
Tabla 5. Especificaciones de la fibra de vidrio .....	7
Tabla 6. Propiedades de los tipos de fibra de carbono .....	7
Tabla 7. Matriz de decisión.....	8
Tabla 8. Resultados del $c_l$ de la geometría en un rango de velocidades de 40 a 180 km/h.....	8

## DISEÑO DEL CARENADO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO BIPLAZA

### RESUMEN

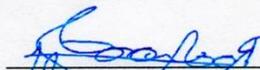
El presente estudio es parte del proyecto de diseño y manufactura de un vehículo eléctrico biplaza impulsado por la escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad del Azuay, el objetivo de este componente es diseñar su carenado, para ello en primer lugar se realizó una revisión bibliográfica en la que se identificó la normativa aplicable, así como aspectos prácticos relacionados con su diseño y manufactura, posteriormente se presentan aspectos de interés que fueron considerados dentro de la fase de diseño, como son: ergonomía, solicitudes de seguridad, maniobrabilidad, y comodidad para los ocupantes, con ello se procedió a esbozar cinco propuestas preliminares, el modelo seleccionado fue escogido por la coordinación académica de la escuela de Ingeniería Automotriz. Posteriormente se presenta el proceso de modelación e integración CAD de los elementos que forman parte del habitáculo y carenado de este vehículo, y finalmente se presenta el estudio de desempeño aerodinámico del vehículo, el mismo que se realizó en un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD). La propuesta de diseño presentada en este documento satisface los criterios de diseño y desempeño estipulados dentro del proyecto, y garantiza altas prestaciones de seguridad y comodidad.

**Palabras Claves**— Carenado, vehículo, eléctrico, biplaza, ergonomía, aerodinámica, manufactura.



Ing. Robert Rockwood Iglesias

**Director del trabajo de titulación**



Ing. Robert Rockwood Iglesias

**Coordinador de Escuela**



Byron Gonzalo Rivera Villa

**Autor**



Christian Israel Uyaguari Pesantez

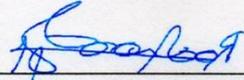
**Autor**

## TWO-SEATER ELECTRIC VEHICLE FAIRING DESIGN

### ABSTRACT

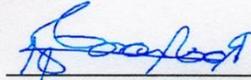
The present study is part of the design and manufacturing project of a two-seater electric vehicle promoted by the school of Automotive Engineering of the Universidad del Azuay. The objective of this component was to design its fairing. Because of that a firstly literature review was conducted in which the applicable regulations were identified as well as practical aspects related to its design and manufacture. Subsequently, aspects of interest that were considered within the design phase were presented, such as: ergonomics, safety requests, maneuverability, and comfort for the occupants. With all of this we proceeded to outline five preliminary proposals. The selected model was chosen by the academic coordination of the School of Automotive Engineering. Afterwards, the CAD modeling and integration process of the elements that are part of the passenger compartment and fairing of this vehicle was presented, and finally the aerodynamic performance study of the vehicle was also presented. It was carried out in a computational fluid dynamics (CFD) program. The design proposal presented in this document satisfies the design and performance criteria stipulated in the project, and guarantees high safety and comfort features.

**Keywords**— fairing, two-seater electric propulsion vehicle, ergonomics, aerodynamic, manufacturing.



Ing. Robert Rockwood Iglesias

**Thesis Director**



Ing. Robert Rockwood Iglesias

**Faculty Director**



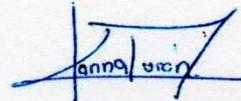
Byron Gonzalo Rivera Villa

**Author**



Christian Israel Uyaguari Pesantez

**Author**



# Diseño del carenado de un vehículo eléctrico biplaza

**Byron Rivera Villa**

Universidad del Azuay  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Ingeniería Mecánica Automotriz  
Cuenca, Ecuador  
byron\_rivera@es.uazuay.edu.ec

**Christian Uyaguari Pesantez**

Universidad del Azuay  
Facultad de Ciencia y Tecnología  
Ingeniería Mecánica Automotriz  
Cuenca, Ecuador  
cuyaguari98@es.uazuay.edu.ec

**Robert Rockwood Iglesias**

Centro de Investigación de Desarrollo  
en Ingeniería Automotriz (ERGON).  
Ingeniería Mecánica Automotriz  
Cuenca, Ecuador  
rockwood@uazuay.edu.ec

**Francisco Torres Moscoso**

Centro de Investigación y Desarrollo en  
Ingeniería Automotriz (ERGON).  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
ftorres@uazuay.edu.ec

**Mateo Coello Salcedo**

Centro de Investigación y Desarrollo en  
Ingeniería Automotriz (ERGON).  
Universidad del Azuay  
Cuenca, Ecuador  
mfcoello@uazuay.edu.ec

**Resumen**— El presente estudio es parte del proyecto de diseño y manufactura de un vehículo eléctrico biplaza impulsado por la escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad del Azuay, el objetivo de este componente es diseñar su carenado, para ello en primer lugar se realizó una revisión bibliográfica en la que se identificó la normativa aplicable, así como aspectos prácticos relacionados con su diseño y manufactura, posteriormente se presentan aspectos de interés que fueron considerados dentro de la fase de diseño, como son: ergonomía, solicitudes de seguridad, maniobrabilidad, y comodidad para los ocupantes, con ello se procedió a esbozar cinco propuestas preliminares, el modelo seleccionado fue escogido por la coordinación académica de la escuela de Ingeniería Automotriz. Posteriormente se presenta el proceso de modelación e integración CAD de los elementos que forman parte del habitáculo y carenado de este vehículo, y finalmente se presenta el estudio de desempeño aerodinámico del vehículo, el mismo que se realizó en un programa de dinámica de fluidos computacional (CFD). La propuesta de diseño presentada en este documento satisface los criterios de diseño y desempeño estipulados dentro del proyecto, y garantiza altas prestaciones de seguridad y comodidad.

**Palabras Claves**— Carenado, vehículo, eléctrico, biplaza, ergonomía, aerodinámica, manufactura.

**Abstract**— The present study is part of the design and manufacturing project of a two-seater electric vehicle promoted by the school of Automotive Engineering of the Universidad del Azuay. The objective of this component was to design its fairing. Because of that a firstly literature review was conducted in which the applicable regulations were identified as well as practical aspects related to its design and manufacture. Subsequently, aspects of interest that were considered within the design phase were presented, such as: ergonomics, safety requests, maneuverability, and comfort for the occupants. With

all of this we proceeded to outline five preliminary proposals. The selected model was chosen by the academic coordination of the School of Automotive Engineering. Afterwards, the CAD modeling and integration process of the elements that are part of the passenger compartment and fairing of this vehicle was presented, and finally the aerodynamic performance study of the vehicle was also presented. It was carried out in a computational fluid dynamics (CFD) program. The design proposal presented in this document satisfies the design and performance criteria stipulated in the project, and guarantees high safety and comfort features.

**Keywords**— fairing, two-seater electric propulsion vehicle, ergonomics, aerodynamic, manufacturing.

## I. INTRODUCCIÓN

El presente estudio es parte del proyecto de diseño y manufactura de un vehículo eléctrico biplaza, impulsado por la escuela de Ingeniería Automotriz de la Universidad del Azuay, dentro del cual se realizaron diferentes estudios, tanto para la concepción funcional del chasis, como de los elementos de los sistemas de suspensión, tren motriz, dirección, frenos, etc. En particular, este trabajo se enfoca en el diseño del carenado de este vehículo, para ello se tomaron aspectos, como: ergonomía de los ocupantes, estética y funcionalidad del carenado, y desempeño aerodinámico, el mismo que se efectuó en un programa de dinámica de vehículos computacional (CFD).

Este proyecto tiene como objetivo impulsar el desarrollo de los vehículos eléctricos en el país; en este ámbito estos se proyectan como una alternativa para la movilidad sin hacer uso

de combustibles fósiles, reduciendo así las emisiones de gases de efecto invernadero, y otros contaminantes [1]. Actualmente los vehículos eléctricos se diseñan pensando en alcanzar la máxima autonomía, para ello el chasis y el carenado tienen mucha importancia, ya que de ellos depende el peso y la fuerza de arrastre que el vehículo debe vencer para desplazarse.

El carenado automotriz se acopla al contorno del chasis del vehículo, su diseño obedece tanto a aspectos estéticos, como funcionales, la estética de base del vehículo se definió desde el inicio del proyecto, cuando se conceptualizó un vehículo deportivo de dos plazas, de fácil aceleración y conducción, capaz de alcanzar altas velocidades, y brindar la mejor percepción de confort al conducirlo, todo esto tomando como base un chasis tubular de alta rigidez.

Para la estilización del vehículo se definieron contornos regulares, con transiciones leves en sentido longitudinal y transversal, dejando visible parte de la estructura del chasis, esto con el fin de mostrar una apariencia robusta y deportiva, además se integraron alerones (delantero y posterior), con el fin de mejorar la sustentación negativa del vehículo a altas velocidades; además como complemento estético compatible con la estética de base, adicionalmente el modelo propuesto carece de puertas para el ingreso al habitáculo, con ello se logra incrementar considerablemente la rigidez torsional del chasis, y reforzar la zona lateral ante un eventual accidente, por otro lado este aspecto aporta con la estética del vehículo, y no interfiere con su funcionalidad, al tratarse de un vehículo recreativo – deportivo.

En cuanto a la funcionalidad del carenado, se partió de la definición de la postura ergonómica del conductor y acompañante, considerando las dimensiones del conductor promedio ecuatoriano [2], a partir de ello se analizó la visibilidad y el acceso a los mandos del vehículo; por otro lado, el carenado se diseñó para proteger a los ocupantes del vehículo contra agentes externos; finalmente la funcionalidad del contorno definido se enmarca dentro de los requerimientos de desempeño aerodinámico para este segmento de vehículos [3], se seleccionaron con mucho cuidado los ángulos de entrada y salida del vehículo, así como el ángulo del parabrisas, altura y ángulo de ataque de los alerones, entre otros [4].

Bajo las restricciones estéticas y funcionales impuestas para el proyecto, es indispensable llevar a cabo un estudio de desempeño aerodinámico, ya que al tratarse de un vehículo que no cuenta con un carenado cerrado por completo, se prevén flujos de aire recirculante dentro del habitáculo, lo cual incrementará el coeficiente de arrastre, pero además incrementará la sustentación; durante el diseño de los automóviles se busca crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una zona de baja presión por debajo, incrementando la sustentación negativa, garantizando el correcto agarre de los neumáticos en la calzada, a cualquier régimen de velocidad. [5]; bajo esta premisa, es necesario la incorporación de alerones; a costa de incrementar también por esta razón el arrastre; vale la pena acotar que debido al espacio

que requieren las baterías del vehículo, no es posible generar un difusor en los bajos del vehículo, lo cual contribuiría a incrementar la sustentación negativa.

Por otro lado, El estudio aerodinámico de los automóviles permite al diseñador evaluar aspectos, como: estabilidad y seguridad sobre la marcha, funcionamiento de ciertos conjuntos mecánicos, consumo de energía, y confort de los ocupantes [5]. Ciertamente, cuanto menor sea el coeficiente de arrastre, menor será la fuerza de resistencia que ha de vencer el automóvil y, por tanto, menor será la potencia necesaria para vencer dicha fuerza.

Para el diseño del carenado se revisó además literatura especializada, con ello se definió el estado tecnológico de los procesos de diseño y manufactura del carenado automotriz, mismos que se tomaron como línea base de este proyecto; algunos de los estudios consultados son:

Los autores Celi y Jaramillo, (2014) en su estudio “diseño y construcción del chasis y carrocería del vehículo Formula SAE” utilizaron fibra de carbono, fibra de vidrio, y plástico como materiales del carenado, debido a su bajo peso, y adecuadas prestaciones; el diseño incorporó difusores a los costados del vehículo con el fin de direccionar el flujo del aire, hacia el radiador, el mismo se diseñó para evitar un flujo turbulento, el cual produce zonas de alta presión al ingreso, y de baja presión a la salida, incrementando el arrastre y disminuyendo la velocidad del vehículo [6].

Hernández y Velandia, (2017) presentan el diseño estructural y aerodinámico de un monoplaza formula Sena Eco, donde calculan el coeficiente de resistencia aerodinámica de dos alternativas de carrocería, uno con un carenado sobre las ruedas posteriores del vehículo y otra sin el carenado con la finalidad de determinar cual tendrá un mayor rendimiento en pista. Al finalizar el estudio los autores concluyeron que el modelo que no presentaba carenados sobre las ruedas obtuvo una ventaja competitiva de alrededor de 531 m con respecto al modelo que si llevaba dichos carenados. [7].

En el contexto nacional, Echeverría y Suárez, (2014) presentan el diseño y construcción del chasis y carenado de una motocicleta para la competencia “Motostudent”. Los autores toman como punto de partida la determinación de los requerimientos aerodinámicos de una motocicleta de alto desempeño y los criterios de selección de materiales de acuerdo a su disponibilidad en el medio local, así como también el proceso de manufactura en base al control de costos del producto final, optando por manufacturar todo el chasis con fibra de vidrio. [8].

En el contexto local, Cajamarca y Vásquez, (2016) presentan un modelo de carrocería para el prototipo de competencia Shell Eco Marathon, lo destacable de este estudio es que se presentan dos propuestas, la propuesta 1 consiste en una carrocería que cubre los neumáticos delanteros, mientras que la propuesta 2 es un diseño de carrocería lo más apegado al contorno del chasis, además de no cubrir los neumáticos; donde la selección de una

de ellas se basa en criterios de visibilidad, accesibilidad, masa, coeficientes aerodinámicos y el consumo energético. Los autores concluyeron que la propuesta 2 presenta un menor coeficiente de arrastre; además de un menor peso en comparación con la propuesta 1 [9].

A continuación, se presentan aspectos importantes del proceso de diseño del carenado de un vehículo biplaza con propulsión eléctrica, partiendo del dimensionamiento del habitáculo considerando que este espacio debe brindar comodidad a los ocupantes, maniobrabilidad para el conductor, y brindar seguridad a los ocupantes. La investigación está estructurada en cuatro secciones, además de esta parte introductoria, en la sección II se detalla los materiales y métodos utilizados para lograr el correcto modelado del carenado, y posterior a esto realizar el análisis aerodinámico del mismo. En la sección III se analizan los resultados obtenidos, finalizando el artículo en las secciones IV y V con las conclusiones y referencias, respectivamente.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología abordó cuatro fases:

### A. Dimensionamiento del habitáculo

En síntesis, durante el diseño del habitáculo se siguió los siguientes pasos:

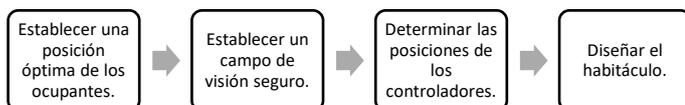


Fig. 1 Proceso para diseño del habitáculo

El diseño del habitáculo deberá estar entre los límites de las características morfológicas que correspondan a la estatura y peso promedio de la población nacional, (1.70 m y 74.2 kg respectivamente) [2], para luego ser distribuidas respetando cotas y dimensiones establecidas por la *Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE, por sus siglas en inglés)*. [10].

Por un lado, la SAE establece dimensiones que configuran el entorno de los ocupantes dependiendo del tipo de vehículo y su uso. La Fig. 2 indica la configuración de un vehículo biplaza con propulsión eléctrica.

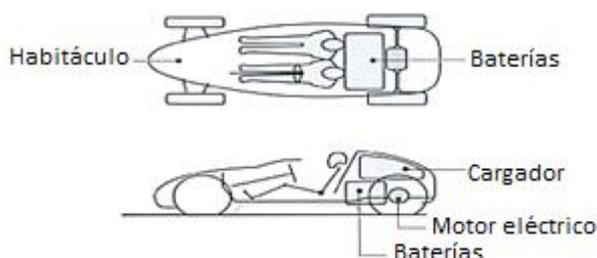


Fig. 2 Configuración del vehículo biplaza [11].

Las normas SAE-J286 “H Point” y SAE-J1100 “Seating Reference Point” recomiendan dimensiones morfológicas que garanticen la comodidad, seguridad, visibilidad y maniobrabilidad tanto del conductor y copiloto. En las Fig. 3 y 4 se indican las cotas que configuran el habitáculo mientras que la Tabla 1 se indica el valor numérico de cada cota.

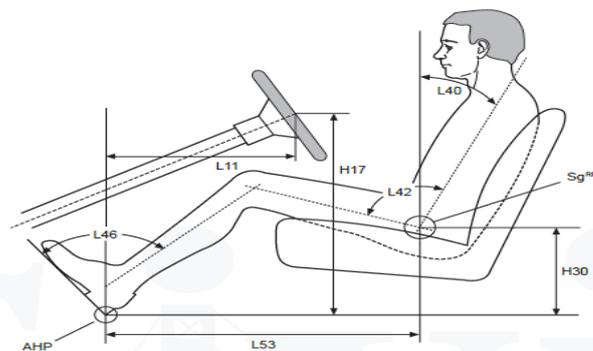


Fig. 3 Configuración de los asientos del vehículo [11].

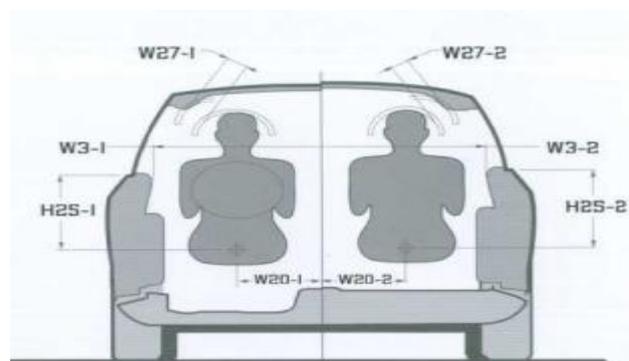


Fig. 4 Dimensiones del entorno de los ocupantes [11].

Tabla 1. Dimensiones establecidas por la SAE

Cota	Dimensión
L11	438 mm
L40	28°
H17	628 mm
L53	738 mm
W20.1-W20.2	700 mm
H30	150 mm

Además:

Ángulo de visión: El conductor deberá tener una adecuada visibilidad con respecto al frente y los costados del vehículo. El ángulo de visión adecuado debe ser mínimo de 180° en ambos sentidos.

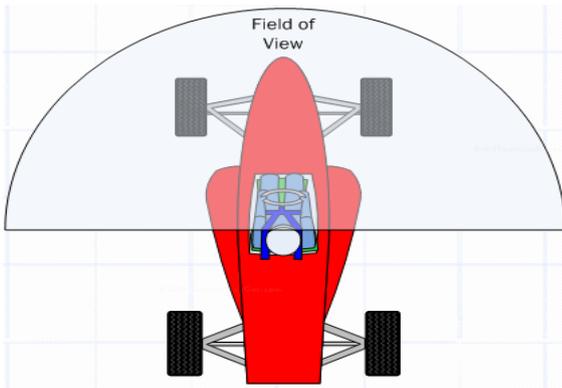


Fig. 5 Ángulo de visión horizontal [12].

Ángulo de visión de los indicadores y panel de instrumentos: generalmente ubicados detrás del volante, con un ángulo no mayor a  $10^\circ$  con respecto a la línea de visión del conductor. Esto garantizará que el conductor pueda observarlos mientras mantiene su vista el mayor tiempo posible en la carretera.

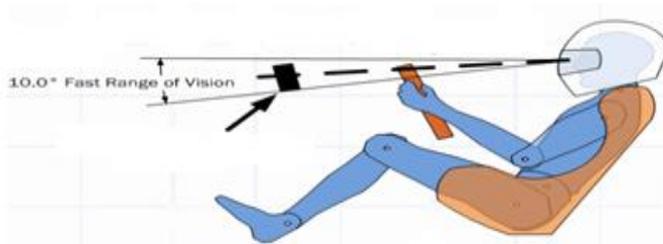


Fig. 6 Ángulo de visión de los indicadores y panel de instrumentos [12].

Ángulo de inclinación del asiento: está siempre de acuerdo a las prestaciones y el tipo de vehículo. En vehículos deportivos el mismo no será mayor a  $30^\circ$  con respecto al eje vertical. Este ángulo generalmente está entre  $25^\circ$  y  $30^\circ$ .

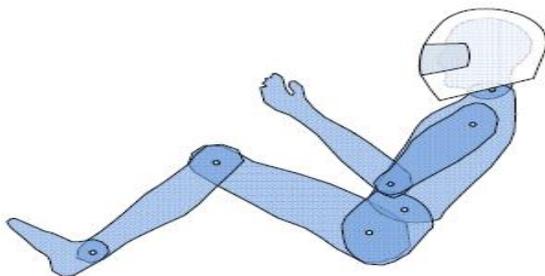


Fig. 7 Inclinación de los asientos para vehículos deportivos [12].

Ángulo de pierna del conductor con respecto a los pedales: no menor a  $90^\circ$  para recorridos largos de los pedales. Para pedales con recorridos cortos y con asientos reclinables el ángulo deberá ser de  $120^\circ$  o más.

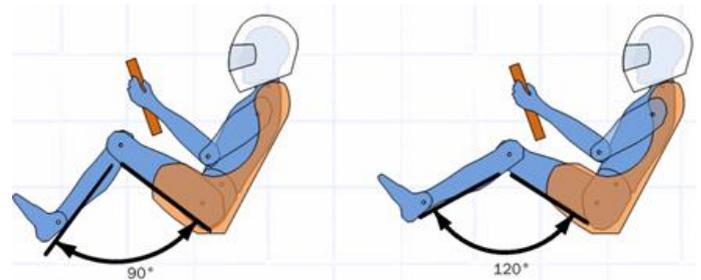


Fig. 8 Ángulo de piernas del conductor [12].

Asientos y cinturones de seguridad: los asientos deberán tener como mínimo 4 puntos de anclaje a la estructura del chasis. Los cinturones de seguridad por su parte tendrán su anclaje en la estructura del chasis y el número de puntos de anclaje dependerá de la competencia y categoría del vehículo.

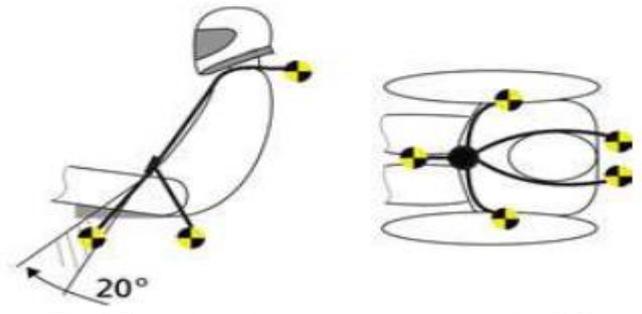


Fig. 9 Posición de los cinturones de seguridad [13].

Una vez consideradas todas estas dimensiones, se realizó un bosquejo inicial 3D que representa el espacio que ocupa el habitáculo en el vehículo y que durante el diseño del chasis no puede ser invadido por componentes ajenos al mismo; para finalmente, mediante el software de diseño CAD "Autodesk Inventor", realizar un ensamblaje de dummies que simulen la posición final del conductor y del copiloto, considerando todos los parámetros mencionados, tal y como muestra la Fig. 10.



Fig. 10 Simulación de la posición final de los ocupantes.

En la Figura 11 se ilustra el ensamble del conjunto chasis-dummies en base a las características morfológicas de la población ecuatoriana, cotas y medidas establecidas por normas SAE, ya antes mencionadas, y el chasis diseñado en un proyecto paralelo al presente.

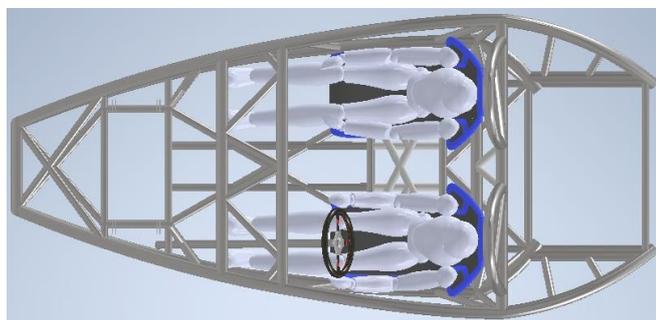


Fig. 11 Posición de ocupantes en el chasis.

### B. Diseño del carenado

Durante el proceso de modelado es necesario contar con un ensamble del chasis y los sistemas complementarios, además de contar con una representación geométrica del cuerpo humano, a la cual de ahora en adelante se la denominará “dummy” que simule la posición de conducción del piloto. Las condiciones de diseño se enfocan en cumplir aspectos relevantes como son: diseñar carenados lo más livianos posibles, carenados con las mejores prestaciones aerodinámicas, que el parabrisas y retrovisores permitan al piloto tener una buena visibilidad, diseñar accesos cómodos tanto para el ingreso del piloto, así como para la operación de elementos del tren motriz [9]. Se debe tener en cuenta que, en un sentido general, los autos deportivos son el tipo de automóvil donde se da gran valor a la estética.

Para este caso, se optó por el uso del software CAD “Autodesk Inventor®”; el modelado se realizó mediante el uso de superficies. Este proceso consiste en utilizar planos y croquis tanto en 2D como en 3D y teniendo como referencia el chasis previamente diseñado. Cabe mencionar que el modelo deberá corresponder a la línea actual de diseño caso contrario el resultado final no será satisfactorio.

#### 1) Escala del boceto.

A partir de imágenes en escala real del chasis, obtenemos la geometría principal que servirán de referencia para el diseño. Esto permite que el modelado del carenado este lo más apegado posible al chasis del vehículo.

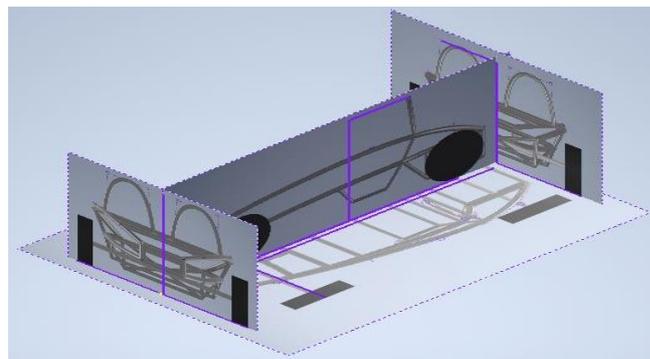


Fig. 12 Boceto del chasis.

#### 2) Modelado de superficies

Las diferentes herramientas del software CAD “Autodesk Inventor®” permiten realizar el modelado de las principales superficies que componen el carenado del vehículo.

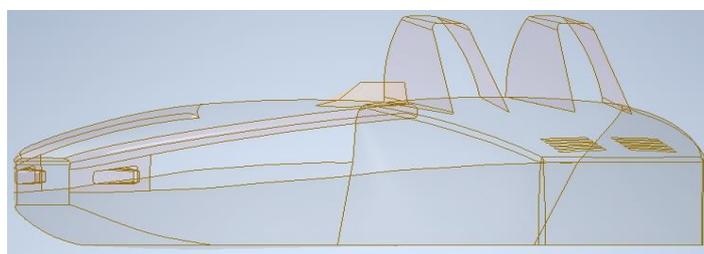


Fig. 13 Modelado de superficies.

#### 3) Espesor y Apariencia

Concluido el modelado de las superficies primarias, se brinda al modelo la apariencia estética (colores, tomas de aire, espesores, etc.).

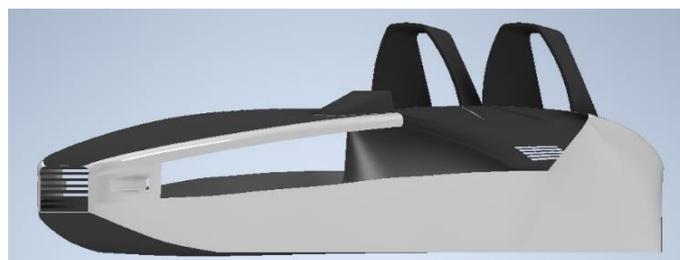


Fig. 14 Definición de colores y apariencia.

#### 4) Ensamble chasis- carenado-accesorios

Una vez finalizado el modelado del carenado, se concluye con el ensamble de todos los componentes anexos al mismo, obteniendo la apariencia final del modelo.



Fig. 15 Ensamble final.

### C. Simulaciones aerodinámicas

Posterior al modelado CAD y una vez obtenido el diseño final, se realizó un análisis CFD para evaluar los comportamientos aerodinámicos del mismo. Con la finalidad de llegar a los resultados, se siguió una secuencia de pasos que se pueden agrupar en diferentes etapas, como son:

Tabla 2. Etapas a seguir para el análisis CFD.

Etapas o Procesos	Actividades
Pre proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Correcciones y simplificación de la geometría CAD.</li> <li>✓ Mallado de superficies.</li> <li>✓ Análisis y corrección del mallado.</li> <li>✓ Exportación del archivo en extensión CFD.</li> </ul>
Proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Importación del modelo.</li> <li>✓ Simulación del túnel de viento.</li> <li>✓ Establecer condiciones de operación.</li> <li>✓ Establecer condiciones de frontera.</li> </ul>
Post proceso	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Obtención de resultados.</li> <li>✓ Post análisis de resultados.</li> </ul>

El túnel de viento debe poseer las dimensiones adecuadas de tal manera que el flujo de aire alrededor del vehículo sea el idóneo. Más concretamente, el túnel del viento será lo suficientemente largo para garantizar que las regiones de flujo de aire que se separan al pasar por el carenado se “cierren” o “unan” antes de encontrar el final del túnel [14]. El túnel de viento a su vez está constituido por las condiciones de contorno que se muestran en la Tabla 3.

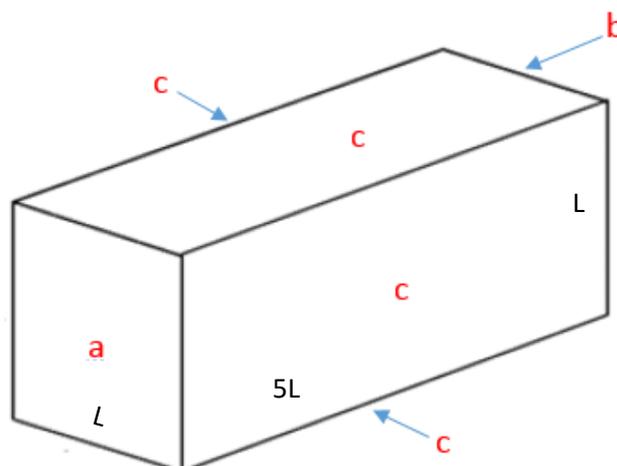


Fig. 16 Medidas del túnel de viento

(L = longitud del vehículo)

Tabla 3. Condiciones de frontera del túnel de viento.

Lado del túnel	Condición de frontera
a	Entrada del túnel (input)
b	Salida del túnel (output)
c	Paredes del túnel (wall)

Un mallado con una calidad adecuada, asegura un correcto análisis y por lo tanto un resultado satisfactorio. Para evaluar el mallado se debe tener en cuenta principalmente la distorsión, calidad ortogonal y la relación de aspectos [9].

El mallado de las geometrías 2D se lo realizó con elementos triangulares de tamaño 30mm con un refinamiento en las zonas más pequeñas de 10 mm para el cual, el porcentaje de error de resultados es el que se muestra en la Fig. 17.

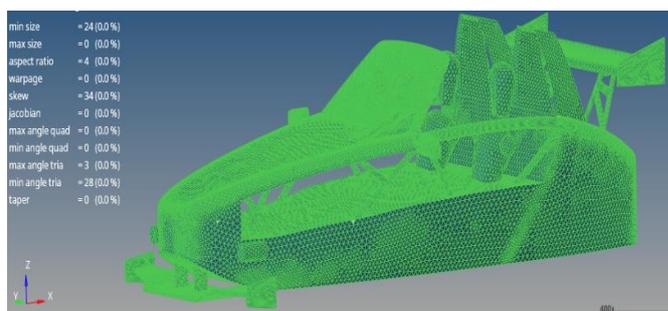


Fig. 17 Mallado del vehículo en 2D.

Posteriormente se generó el mallado CFD 3D que duró aproximadamente 15 minutos con un ordenador con las siguientes prestaciones: procesador AMD E1-2100 APU with Radeon (TM) HD Graphics @ 1.00 GHz, sistema operativo Windows 10 Pro y memoria RAM de 4 GB para posteriormente ser exportada a software CFD.

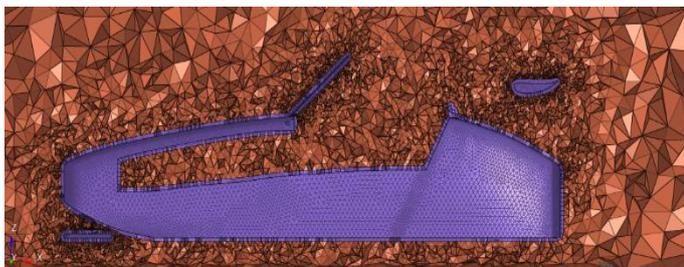


Fig. 18 Mallado del vehículo en 3D.

Para el análisis CFD, las propiedades del fluido (aire) como son la densidad, viscosidad, presión, se muestran en la Tabla 4, donde además se incluye el área frontal del vehículo obtenido en el mismo software CFD. Todos los parámetros son establecidos por la *ISO (Organización Internacional de Normalización, por sus siglas en inglés)* [15].

Tabla 4. Condiciones de operación.

Variable	Valor	Unidad
Presión atmosférica	101325	Pa
Densidad	1.225	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidad	$1.7894 \times 10^{-5}$	kg/m-s
Área frontal	1.668	m <sup>2</sup>
Velocidad	11.11 a 50	m/s

#### D. Selección de material

Para la selección de material se realizó una matriz de decisión considerando características de los materiales opcionales, como son propiedades físicas y mecánicas, costos, disponibilidad en el medio local, facilidad de manejo, etc.

En prototipos vehiculares diseñados para competencias estudiantiles como son Shell Eco Marathon, Fórmula SAE, vehículos de alta gama y en vehículos de competencia en categorías como es la Fórmula 1, los principales materiales utilizados son la fibra de vidrio y fibra de carbono.

##### A) Fibra de vidrio

Es uno de los materiales que actualmente se utiliza mucho en el campo automotriz, ya que cuenta con ciertas características como son su fácil manejo, buena resistencia mecánica y menor peso, además de no necesitar una infraestructura especializada para su proceso de manufactura. Es frecuentemente utilizado por varios equipos participantes en competencias estudiantiles principalmente por su bajo costo [16].

Las propiedades de la fibra de vidrio dependen mucho de su composición y clase, sin embargo y generalizando, las propiedades son las que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones de la fibra de vidrio [16].

Propiedad	Valor	Unidad
Tenacidad	1.30	N/Tex
Fuerza a la tracción	3400	MPa
Elongación hasta la ruptura	4.5	%
Módulo de Young	70-73	GPa

##### B) Fibra de carbono

Es un material que cada vez se encuentra integrado al sector automovilístico, también se lo conoce como Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP), desde hace unos años se lo ve en autos deportivos. Se trata de un material compuesto por átomos de carbono que forman fibras muy delgadas (de 5 a 10 micrones). Trenzando las fibras entre sí se crean hilos de gran resistencia. Uniendo cientos de estos hilos se crean las telas de fibra de carbono que serán la base para crear luego las piezas que se requieran [16]. Aunque fue primero utilizado en el mundo de la aviación, lo cierto es que la fibra de carbono o CFRP se hizo muy popular en la competición de Fórmula 1 debido a sus propiedades, es más fuerte que el acero y más resistente que el aluminio, además de que no presenta la corrosión de los metales y por lo tanto su durabilidad es mayor. La Tabla 6 muestra las propiedades de los diferentes tipos de fibra de carbono.

Tabla 6. Propiedades de los tipos de fibra de carbono [17].

Tipo de fibra de carbono	Fibra		Compuesto	
	Módulo de Young [GPa]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Módulo de Young [GPa]	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
T300	230	1.76	140	1.82
T400H	250	1.80	145	2.25
M50J	475	1.88	295	2.01
M55J	540	1.91	338	2.02

Otra de sus principales ventajas es la ligereza. Con una resistencia tan alta permite utilizar menor cantidad del material para conseguir la misma resistencia que una pieza metálica. El resultado será un ahorro de peso significativo, además de una elasticidad superior a la de los metales. La parte negativa es la complejidad de su proceso de elaboración, esto hace que su precio sea elevado y es el principal motivo de que la fibra de carbono esté más orientada en vehículos deportivos de alta gama. Al utilizar resinas termoestables también se complica su reciclaje [18].

##### C) Matriz de decisión

En la siguiente matriz de decisión se evalúan las principales características de los materiales con la finalidad de determinar la opción más fiable para su manufactura. Para el proceso de manufactura se deben considerar parámetros como son: métodos de construcción, disponibilidad de materiales y costos.

Tabla 7. Matriz de decisión.

Característica	Fibra de Vidrio	Fibra de Carbono
Resistencia a la corrosión	4	5
Resistencia mecánica	3	5
Facilidad de manufactura	5	4
Costo	5	1
Rugosidad	4	4
Peso	4	5
<b>Total</b>	<b>25</b>	<b>24</b>

Las características son factores que se asignan de acuerdo a la importancia relativa para su decisión. El valor más alto en el total de la Tabla 7 es 25 que corresponde a la fibra de vidrio, por lo tanto, será el material a utilizar.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este apartado se ilustrarán los resultados correspondientes al modelo final del carenado, resultados del análisis CFD: coeficiente de arrastre (cd), presión máxima ejercida sobre el vehículo, velocidad del flujo de aire y fuerza aerodinámica. Esta última (fuerza aerodinámica) servirá para un post análisis de los esfuerzos a los que está sometido el chasis del vehículo. En algunos casos, la fuerza aerodinámica puede ser la que tenga mayor incidencia sobre la estructura del chasis [19].

En la Fig. 19 se presenta el modelo final del carenado renderizado.



Fig. 19 Diseño final.

La Fig. 20 muestra los resultados cd en un rango de velocidad de 40 a 180 km/h (11.11 m/s a 50 m/s). La geometría presentó el menor cd a una velocidad de 100 km/h (27.77 m/s) de entre las 4 iteraciones analizadas con un valor de 0.955.

Velocidad- coeficiente de arrastre

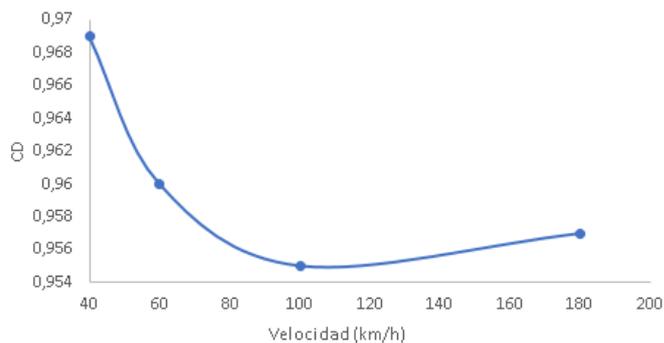


Fig. 20 Resultados del cd de la geometría en un rango de velocidades de 40 a 180 km/h.

Obteniendo un cd promedio de  $0.960 \pm 0.0061$ .

La Tabla 8 indica los resultados del coeficiente de sustentación (cl) obtenidos en el mismo rango de velocidad de 40 a 180 km/h (11.11 a 50 m/s).

Tabla 8. Resultados del cl de la geometría en un rango de velocidades de 40 a 180 km/h.

Velocidad (km/h)	cl
40	-0.0104
60	-0.0085
100	-0.0069
180	-0.0040

Los resultados del análisis CFD se muestran gráficamente a continuación:

#### 1) Presión

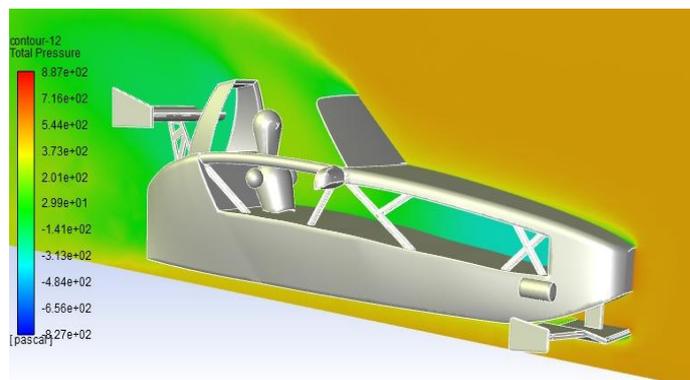


Fig. 21 Contornos de presión total.

Presión máxima 887 Pa.

## 2) Velocidad del flujo de aire

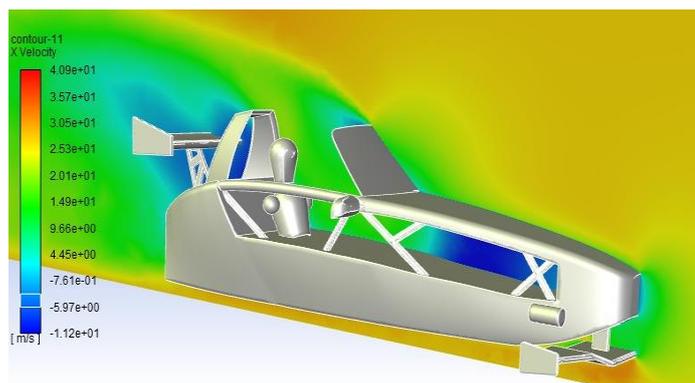


Fig. 22 Contornos de velocidad.

Velocidad máxima 40.9 m/s.

## 3) Líneas de corriente, matizadas en función de la velocidad

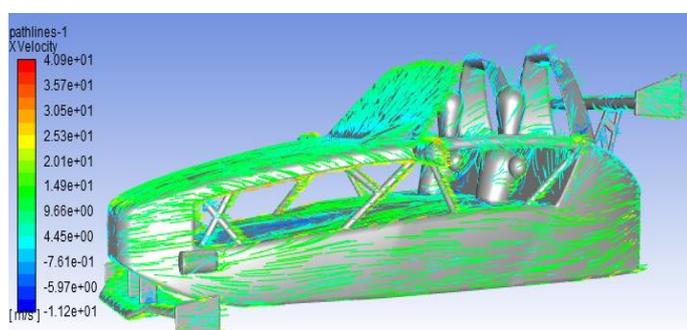


Fig. 23 Líneas de contorno de velocidad.

## 4) Fuerza aerodinámica

La fuerza está en función de los siguientes parámetros [20]:

$$F_A = 0.5 * \rho * v^2 * C_d * A \quad [20]$$

Donde:

$\rho$  = densidad del fluido

$v$  = velocidad del fluido

$C_d$  = coeficiente de arrastre

$A$  = área frontal del vehículo

La fuerza obtenida a través de la simulación da como resultado 752.78 N.

## IV. CONCLUSIONES

- El habitáculo del vehículo eléctrico biplaza, diseñado en este estudio cumple con las normas SAE, respecto a la posición ergonómica, y funcional del conductor y pasajero. De esta manera se garantiza la maniobrabilidad del vehículo, y por ello seguridad para su entretenimiento. Al considerar las dimensiones morfológicas de la población

ecuatoriana, el vehículo resultará cómodo para la mayor parte de la población objetivo.

- Para lograr un adecuado desempeño aerodinámico se siguieron las prácticas de diseño que se contemplan en la literatura especializada respecto a las cotas funcionales más importantes del carenado. La resistencia al avance se ve afectada por factores geométricos asociados al diseño del carenado; estos ayudan a minimizar o aumentar el impacto final del avance del vehículo. El diseño de la parte frontal del vehículo tiene mucha importancia en el comportamiento aerodinámico del fluido, es conveniente que las aristas sean redondeadas o suavizadas.
- Respecto al coeficiente aerodinámico de arrastre referencial obtenido para la propuesta de carenado en este estudio, en primera instancia parecería que el valor obtenido de  $0.960 \pm 0.0061$  es elevado; no obstante es importante considerar que el vehículo no cuenta con un carenado cerrado, y deja visible parte de la estructura tubular (restricciones del modelo impuestas dentro del proyecto general), esta característica dificulta lograr un bajo coeficiente de arrastre, y además afecta la sustentación negativa del vehículo (zona de alta presión relativa en la zona del habitáculo, ver figura 21), esta característica obliga además la incorporación de alerones que permitan mejorar la sustentación negativa del vehículo; para referencia, un vehículo de competición fórmula 1, generalmente tiene un coeficiente de arrastre mayor a 1.
- Al analizar los materiales a utilizar en el carenado del vehículo, es evidente que el nivel tecnológico de los procesos de manufactura de materiales ligeros y de alta resistencia, es bajo en el país, se denota la necesidad de fomentar la industria automotriz nacional, e inclusive estudiar la posibilidad de desarrollar e implementar nuevos materiales de origen local como son las fibras naturales de cabuya, totora, abacá, entre otras, estudios preliminares muestran la obtención de propiedades físicas similares a un menor costo. Su desarrollo traería beneficios y la generación de una industria plenamente articulada.
- Aumentar el ángulo de inclinación del capot con respecto a la horizontal mejora el desempeño aerodinámico del vehículo en cuanto al coeficiente de arrastre se refiere. Por otra parte, el diseño de parabrisas delantero, con ángulos pronunciados con respecto a la vertical disminuyen el coeficiente de arrastre.

- Se recomienda utilizar diferentes softwares de simulación CFD para analizar la incidencia de las llantas con el suelo, con la finalidad de conocer la variación del coeficiente de arrastre debido a estas.

## V. REFERENCIAS

- [1] B. D. OSCAR y R. M. ANTONI JOAN, *Vehículos eléctricos e híbridos*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2017.
- [2] «▷ Estatura Promedio en Ecuador ¿Cuánto miden Hombres y Mujeres?», *ecuador.ec*. <https://ecuadorec.com/estatura-promedio-en-ecuador-cuanto-miden-hombres-y-mujeres/> (accedido abr. 07, 2021).
- [3] M. Sanchez y J. Pauta, «Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo Formula SAE», p. 210.
- [4] W.-H. Hucho y S. R. Ahmed, Eds., *Aerodynamics of road vehicles: from fluid mechanics to vehicle engineering*, 1. engl. Aufl. London: Butterworths, 1987.
- [5] R. Rockwood y E. Cumbe, «Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional-CFD-», p. 218, 2009.
- [6] J. Celi y E. Jaramillo, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL CHASIS Y CARROCERÍA DEL VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE 2012», Latacunga: Tesis ESPE, 2013.
- [7] J. C. Hernández Martín y J. C. Velandia Bautista, «Diseño estructural y aerodinámico de un monoplaza formula Sena Eco», Los Liberadores, Bogotá, 2017.
- [8] A. Echeverría y J. Suárez, «DISEÑO ANÁLISIS Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHASÍS Y CARENADO DE UN PROTOTIPO DE MOTOCICLETA PARA LA COMPETENCIA MOTOSTUDENT 2013-2014», p. 10.
- [9] D. Cajamarca y C. Vásquez, «Diseño y construcción de la carrocería para el prototipo de competencia Shell Eco Marathon», p. 137.
- [10] «SAE International». <https://www.sae.org/> (accedido abr. 07, 2021).
- [11] S. Macey y G. Wardle, *H-Point: the fundamentals of car design & packaging*. Art Center College of Design, 2009.
- [12] S. Wand, «Human Factors.», *tufts.edu*, 2018. <https://sites.tufts.edu/humanfactorshiyuwang/2018/04/24/building-a-race-car/>.
- [13] I. SAE, «FORMULA SAE. Rules 2020». ene. 02, 2020, [En línea]. Disponible en: <http://fsaeonline.com/cdsweb/gen/DownloadDocument.aspx?DocumentID=1b6bda52-48d0-4286-931d-c9418165fd3e>.
- [14] J. B. Barlow, W. H. Rae, A. Pope, y A. Pope, *Low-speed wind tunnel testing*, 3rd ed. New York: Wiley, 1999.
- [15] ISO, «Standard Atmosphere», *ISO*, 1975. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/00/74/7472.html> (accedido abr. 03, 2021).
- [16] P. Chinchilima y H. Rodríguez, «REDISEÑO DEL CHASIS Y LA CARROCERÍA DE UN PROTOTIPO PARA LA COMPETENCIA ECO SHELL MARATHON», p. 98.
- [17] «Toray Composite Materials America, Inc.» <https://www.toraycma.com/page.php?id=661> (accedido abr. 03, 2021).
- [18] «Fibra de carbono y su aplicación en el automóvil», *Todas las noticias de coches en un solo portal: Pruebas, fotos, vídeos, informes...*, oct. 24, 2017. <https://noticias.coches.com/noticias-motor/fibra-de-carbono-aplicacion-en-automovil/267594> (accedido abr. 03, 2021).
- [19] W. Cunalata, J. Téran, E. Santillán, y W. Bonilla, «Diseño y construcción del bastidor y carrocería, de un vehículo eléctrico biplaza plagable, usando software CAD-CAE y manufactura ecuatoriana», 2014, [En línea]. Disponible en: <http://www.academia.edu/download/62381954/AC-ESPEL-MAI-047920200316-83598-1wgockc.pdf>.
- [20] M. Olsson, «Designing and Optimizing Side-View Mirrors», p. 97.

