

**CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT VELOCISTA DESDE UN  
ESTUDIO AERODINÁMICO**

**MIGUEL ANGEL NIETO SUAREZ**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

**DIRECTOR:**

**WILMAR MARTÍNEZ URRUTIA**

**MSC. INGENIERO ELECTRONICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA MECANICA**

**BOGOTÁ, D.C.**

**2024**

## NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

---

---

---

Nombre  
Firma del Director

---

Nombre  
Presidente del jurado

---

Nombre y firma del Jurado

---

Nombre y firma del Jurado

Bogotá, D.C JULIO del 2024

## **DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ramiro Augusto Forero Corzo

Vicerrectora de Investigaciones y Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Secretario general

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Departamento de Ingeniería Mecánica

Ing. María Angélica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente al autor.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo primeramente a mi Dios y Señor Jesucristo, ya que su promesa para mi vida me ha guiado por caminos que hoy puedo ver convertirse en realidad progresivamente, permitiéndome llegar hasta esta etapa y poder vislumbrar muchas más. A mis padres Angel Fernando y Amanda Beatriz, por su gran amor, apoyo y esfuerzos constantes e incondicionales, a mi hermano Juan Felipe y a su esposa Katherine, por su valioso apoyo en esta última etapa de mi carrera profesional, y a mi hermano mayor Andrés David, quien desde mi niñez me inspiró, motivó, inculco y llenó mi corazón de pasión, amor y conocimiento por los autos y la industria automotriz, es gracias a él y al juramento que hicimos, la razón por la cual nunca he dejado, ni dejaré de perseguir mis objetivos y luchar por mis sueños. A mis profesores y compañeros, por su aporte a mis conocimientos durante toda mi carrera.

Este es tan solo un paso en mi vida que he logrado junto con su apoyo, gracias a Dios y a ustedes puedo hacer posible este, que siempre fue mi sueño, y ahora es realidad.

Miguel Ángel Nieto Suárez

*“Deja en manos de Dios todo lo que haces,  
y tus proyectos se harán realidad”*

**PROVERBIOS 16:3 (NTV)**

*“El temor de Jehová es el principio de la sabiduría,  
y el conocimiento del Santísimo es la inteligencia”*

**PROVERBIOS 9:10 (RVR1960)**

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a Dios y Señor Jesucristo, por todo lo que me ha dado durante toda mi vida, ya que nunca me ha faltado en nada a pesar de las circunstancias, a mis padres y hermanos, por su apoyo y constante esfuerzo, a sus enseñanzas y guía en cada paso del camino, en todas las etapas de mi vida y durante el desarrollo de mi carrera profesional, porque indudablemente todo ello me ha traído hasta aquí, y me llevara aún más lejos. Agradezco también y de manera especial a mi director de proyecto de grado, profesor Wilmar Martínez Urrutia, por cuanto su dirección y sabiduría han sido fundamentales para el desarrollo de este proyecto y su culminación, al profesor Oscar Ochoa, que me colaboro con sus conocimientos en el uso del programa de *Ansys Fluent* y su criterio en el estudio aerodinámico *CFD*, al profesor Edgar Chalá por su ayuda con el uso y manejo de la *CNC* y por su constante apoyo en toda mi carrera profesional como docente. Finalmente, a todos aquellos profesores y directivos de la decanatura de Ingeniería Mecánica de la Universidad de América, quienes me motivaron, apoyaron y se interesaron en mis proyectos, con palabras de aliento y buenos deseos para mi futuro profesional en el campo de la Ingeniería Automotriz, la cual es mi siguiente meta.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
RESUMEN	12
INTRODUCCION	14
OBJETIVOS	16
Objetivo general	16
Objetivos específicos	16
1. CARACTERIZACIÓN DE REFERENTES DE COMPETENCIAS MUNDIALES EN LA CATEGORÍA DE ROBOTS VELOCISTAS	17
1.1 Introducción a los robots velocistas	17
1.2 Competencias a nivel mundial	20
1.3 Referentes de robots velocistas	24
1.4 Aerodinámica	33
1.4.1 Introducción a la aerodinámica aplicada	35
1.5 Consulta de reglas de competencia de Runibot	37
1.5.1 Reglas de la competencia de Runibot para la categoría de robot seguidor de línea velocista turbinado	37
1.6 Planteamiento del problema	38
2. DISEÑO AERODINÁMICO DEL PROTOTIPO DE ROBOT VELOCISTA	41
2.1 Dominio Computacional	42
2.2 Condiciones de frontera	46
2.3 Características del fluido	47
2.4 Parámetros numéricos y algoritmo de solución	47
2.5 Valores Iniciales	48
2.6 Convergencia	48

2.7	Resultados de estudio <i>CFD</i> en <i>Ansys Fluent</i>	50
3.	CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO DE ROBOT VELOCISTA	58
3.1	Proceso de construcción del prototipo de robot velocista	58
3.1.1	Construcción del robot velocista	58
3.1.2	Componentes del robot velocista	61
3.1.3	Construcción de la carrocería del robot velocista	65
3.2	Funcionamiento del programa del robot velocista	72
3.3	Resultados de pruebas prácticas del robot velocista construido	74
4.	CONCLUSIONES	79
5.	RECOMENDACIONES	81
	REFERENCIAS	82
	ANEXOS	84

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Ejemplos de modelos de robots seguidores de línea velocistas.	17
Figura 2 Robot de transporte seguidor de línea inteligente del Grupo BMW.	18
Figura 3 Grafico circular de distribución del uso de robots seguidores de línea por industrias para el año 2023.	19
Figura 4 Crecimiento del mercado de la robótica.	20
Figura 5 Asociación de Red Universitaria Bogotá – RUNIBOT.	21
Figura 6 RUNIBOT categoría Velocistas.	21
Figura 7 RUNIBOT categoría Velocistas segunda ronda.	23
Figura 8 Modelo final del trabajo Diseño E Implementación De Un Robot Seguidor De Línea De Competencia Para La Categoría Velocista.	26
Figura 9 Modelo final del trabajo Diseño E Implementación De Dos Robots Seguidores De Línea Modalidad Velocista Y Destreza Para Participaciones En Concursos De Robótica.	27
Figura 10 Modelo final del trabajo Diseño E Implementación De Dos Robots De Competencia (Seguidor De Línea Especialidad Velocista, Laberinto).	29
Figura 11 Prueba de aerodinámica en un túnel de viento.	35
Figura 12 Porsche 917 y Chaparral 2J de la serie de carreras Can-Am de 1970.	36
Figura 13 Diseño y montaje digital de la PCB.	59
Figura 14 : Diseño digital de la PCB por su cara inferior y superior.	59
Figura 15 Construcción física del robot velocista.	60
Figura 16 Robot velocista ensamblado sin la carrocería aerodinámica.	60
Figura 17 Robot velocista ensamblado sin la carrocería aerodinámica (vista superior).	61
Figura 18 Arduino Nano V3.0.	62
Figura 19 Mini Controlador Puente H L298.	63
Figura 20 Sensor de línea (QTR-8A) – Arreglo análogo de (8).	63
Figura 21 : Motorreductor Pololu 10:1 HP 6V.	63
Figura 22 Turbina QX 1611 EDF 30mm + ESC 20A.	64

Figura 23 Llantas Seguidor de Línea largas (23x40).	64
Figura 24 Batería Lipo 3s 1000mAh 11.1V – 25C ~ 50C.	64
Figura 25 Placa PCB por su cara inferior.	65
Figura 26 Proceso de preparación para modelamiento CNC.	66
Figura 27 Madera montada en la maquina CNC.	66
Figura 28 Bloque de madera en el primer proceso de modelamiento.	67
Figura 29 Bloque de madera en el segundo proceso de modelamiento	68
Figura 30 Molde de madera en proceso final de rectificación y detallado.	69
Figura 31 Molde de madera listo para proceso final.	69
Figura 32 Acrílico termoformable	70
Figura 33 Prototipo final ensamblado.	71
Figura 34 Prototipo final con la carrocería abierta.	71
Figura 35 Diagrama de flujo del programa del robot Velocista MN.	73
Figura 36 Cargador baterías LiPo IMAX B6.	76
Figura 37 Pruebas prácticas del robot velocista en recta.	77
Figura 38 Comparativa visual del recorrido.	77
Figura 39 Pruebas práctica del robot velocista en el ovalo.	78
Figura 40 Planos de la placa PCB.	85
Figura 41 Planos de la carrocería del robot velocista.	86

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Comparativa entre los referentes.	29
Tabla 2 Dominios computacionales establecidos para cada modelo.	42
Tabla 3 Discretización (enmallado) de los dominios computacionales para cada modelo.	45
Tabla 4 Fronteras del dominio computacional.	47
Tabla 5 Comportamiento de la sustentación y el arrastre.	49
Tabla 6 Comportamiento de las fuerzas de sustentación y arrastre.	51
Tabla 7 Energía cinética de turbulencia de los modelos simulados.	53
Tabla 8 Energía estática y energía cinética de turbulencia para cada uno de los modelos.	55

## RESUMEN

Este trabajo de grado se enfoca en la construcción de un prototipo de robot velocista desde un estudio aerodinámico utilizando dichos principios, con el objetivo de mejorar su velocidad y eficiencia energética. El estudio se estructura en tres capítulos que abordan desde la caracterización de referentes de competencias mundiales en la categoría de robots velocistas, pasando por el diseño aerodinámico del vehículo robótico, hasta la construcción y evaluación del prototipo de robot velocista.

En el primer capítulo, se realiza una caracterización detallada de tres robots velocistas destacados en competencias internacionales. Esta descripción permite identificar las variables de diseño más influyentes en el rendimiento de estos robots. Además, se destaca la relevancia de la aerodinámica en el diseño de vehículos y se analizan las reglas específicas de la competencia Runibot, que establecen las restricciones y parámetros que el prototipo debe cumplir.

El segundo capítulo se centra en el diseño aerodinámico del prototipo tras identificar las variables de diseño, se desarrollan simulaciones computacionales *CFD* para estudiar el comportamiento aerodinámico de diferentes modelos y así mismo, se emplea la metodología de diseño aerodinámico para integrar estos resultados y crear un modelo que minimiza el arrastre y mejora la sustentación. Todas estas simulaciones y los análisis de resultados permiten diseñar el modelo final, para asegurar que cumpla con los objetivos establecidos.

El tercer capítulo aborda la construcción y evaluación del prototipo de robot velocista. Aquí se detallan los materiales, componentes y técnicas utilizadas en el proceso de construcción, incluyendo la creación de la *PCB* como chasis y la fabricación de una carrocería aerodinámica. Los resultados obtenidos se comparan con los referentes caracterizados, demostrando las mejoras en el desempeño del robot.

Concluyendo, se destaca la importancia de la aerodinámica en el diseño de robots velocistas y la efectividad del enfoque adoptado, observando así una mejora considerable en la sustentación y el arrastre del prototipo, validando también la hipótesis de la aplicación de principios aerodinámicos que pueden mejorar el rendimiento de estos robots. Finalmente, se presentan recomendaciones para futuras investigaciones que sugieren estudios más avanzados de aerodinámica y la integración de tecnologías especializadas para continuar mejorando el diseño de robots velocistas.

Este trabajo de grado no solo aporta un avance significativo en la construcción de robots velocistas, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones y desarrollos en este campo, inspirando a nuevos enfoques y técnicas que pueden llevar a innovaciones importantes en el diseño y la competencia de estos vehículos robóticos.

**Palabras Clave:** *Aerodinámica, Diseño, Prototipo, Robot velocista, Simulaciones computacionales, Eficiencia energética.*

## INTRODUCCION

Los robots seguidores de línea velocistas son dispositivos robóticos diseñados para seguir de forma autónoma una línea trazada en el suelo y participar en carreras de velocidad. Estos robots son de gran interés en la comunidad debido a su capacidad para combinar aspectos de diseño mecánico, electrónico y de control en un entorno competitivo apasionante y desafiante. A lo largo de las décadas, las competencias de robots velocistas han evolucionado significativamente, incorporando avances tecnológicos que mejoran su rendimiento y eficiencia. Sin embargo, existe una necesidad constante de innovar en el diseño aerodinámico de estos robots para maximizar su velocidad y eficiencia energética, lo cual representa un desafío no completamente resuelto en la actualidad.

El propósito de este trabajo de grado es diseñar y evaluar un prototipo de robot velocista basado en principios aerodinámicos, con el objetivo de superar las limitaciones actuales en el diseño de estos dispositivos. La pregunta central que guía esta investigación es: ¿Cómo construir un prototipo de robot velocista a partir de un estudio aerodinámico? Para responder a esta pregunta, se propone un enfoque innovador que integra principios aerodinámicos en el diseño del robot, buscando mejorar su velocidad y eficiencia energética en comparación con los referentes de competencias mundiales en la categoría.

El documento se estructura en tres capítulos principales. En el primer capítulo, se realiza una caracterización detallada de tres robots velocistas destacados en competencias internacionales, identificando las variables de diseño más influyentes en su rendimiento. También se analiza la relevancia de la aerodinámica en el diseño de vehículos robóticos y se estudian las reglas específicas de la competencia Runibot, que establecen las restricciones y parámetros que el prototipo debe cumplir.

El segundo capítulo se centra en el diseño aerodinámico del prototipo. Tras identificar las variables de diseño, se desarrollan simulaciones computacionales *CFD* para estudiar el comportamiento aerodinámico de diferentes modelos. Este

capítulo incluye la metodología de diseño aerodinámico utilizada para integrar los resultados y crear un modelo que minimice el arrastre y mejore la sustentación. Las simulaciones y los análisis de resultados permiten diseñar el modelo final, asegurando que cumpla con los objetivos establecidos.

El tercer capítulo aborda la construcción y evaluación del prototipo de robot velocista. Aquí se detallan los materiales, componentes y técnicas utilizadas en el proceso de construcción, incluyendo la creación de la *PCB* como chasis y la fabricación de una carrocería aerodinámica. Los resultados obtenidos se comparan con los referentes caracterizados, demostrando las mejoras en el desempeño del robot. Se realizan pruebas prácticas para evaluar la eficiencia en términos de velocidad y consumo energético, y se analizan los resultados para validar la hipótesis planteada.

Este trabajo pretende no solo contribuir al avance tecnológico en el campo de los robots velocistas, sino también inspirar nuevas investigaciones y desarrollos que integren principios aerodinámicos para mejorar el rendimiento y la eficiencia de los vehículos en competiciones futuras.

## OBJETIVOS

### **Objetivo general**

Construir un prototipo de robot velocista desde un estudio aerodinámico que permita determinar la eficiencia alcanzada con relación a referentes de competencias mundiales en la categoría.

### **Objetivos específicos**

- Identificar las variables de diseño para un prototipo de robot velocista mediante la caracterización de tres referentes participantes en competencias mundiales de la categoría.
- Diseñar un modelo aerodinámico para la construcción de un prototipo de robot velocista, utilizando las variables de diseño identificadas, que se ajustan a las mejores características de los referentes consultados.
- Construir un prototipo de robot velocista con base al diseño aerodinámico, que permita evaluar su eficiencia en cuanto a velocidad y consumo energético, comparándolo con los referentes consultados.

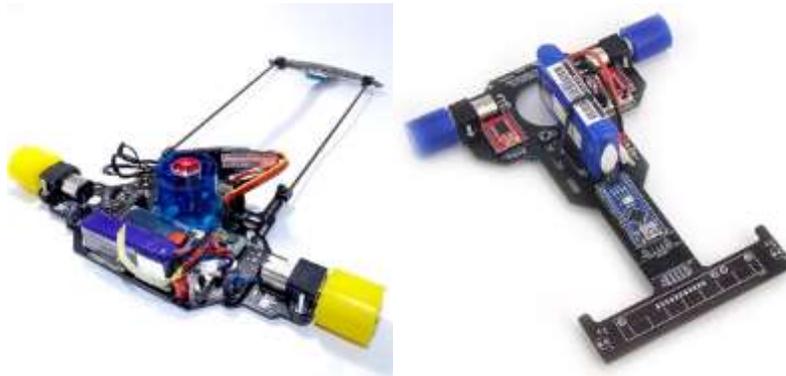
# 1. CARACTERIZACIÓN DE REFERENTES DE COMPETENCIAS MUNDIALES EN LA CATEGORÍA DE ROBOTS VELOCISTAS

## 1.1 Introducción a los robots velocistas

Los robots seguidores de línea velocistas son dispositivos robóticos diseñados para seguir de forma autónoma una línea trazada en el suelo y participar en carreras de velocidad. Estos robots son de gran interés en la comunidad debido a su capacidad para combinar aspectos de diseño mecánico, electrónico y de control en un entorno competitivo apasionante y desafiante, cuentan con sensores que pueden ser de diferentes tipos, como sensores de reflexión infrarroja, sensores de luz visible, o incluso cámaras y sistemas de visión por computadora, la precisión y sensibilidad de estos sensores son fundamentales para el rendimiento del robot, ya que determinan su capacidad para seguir la línea de manera precisa y estable.

### Figura 1

*Ejemplos de modelos de robots seguidores de línea velocistas.*



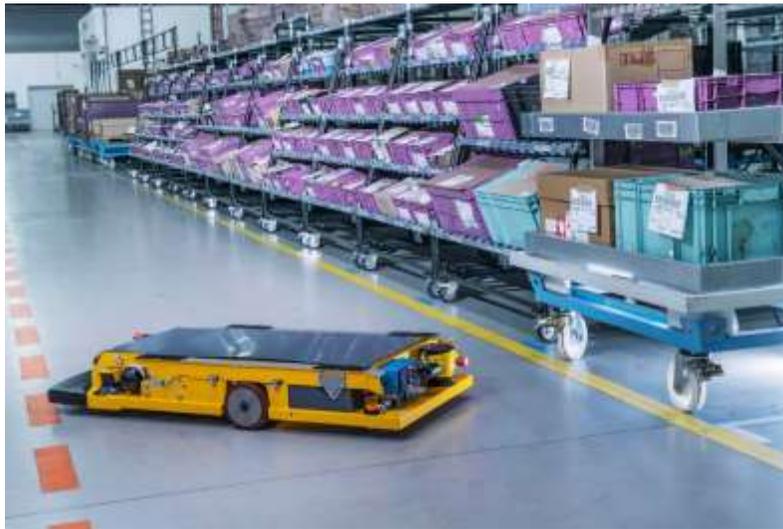
**Nota.** Fotos de diferentes modelos de robots seguidores de línea velocistas. Tomado de: [moviltronics.com/calibracion-robot-velocista-seguidor-de-linea-velotronics/](http://moviltronics.com/calibracion-robot-velocista-seguidor-de-linea-velotronics/)

El interés por los robots seguidores de línea velocistas se remonta a varias décadas, cuando la robótica estaba emergiendo como un campo de investigación y las competiciones ganaban popularidad. Aunque los primeros robots podrían rastrearse hasta la década de 1950, las competiciones formales en las que estos podían participar no surgieron sino hasta la década de 1970. Estas categorías proporcionaron un entorno estructurado para probar y mejorar las capacidades de los robots en tareas de seguimiento de la línea.

Durante las décadas de 1980 y 1990, las competencias de robots seguidores de línea ganaron popularidad en universidades, instituciones educativas y clubs de robótica de todo el mundo. Estas establecieron varias reglas y estándares que facilitaron las comparaciones entre los robots participantes y permitieron un mayor nivel.

**Figura 2**

*Robot de transporte seguidor de línea inteligente del Grupo BMW.*



**Nota.** Robot de transporte seguidor de línea inteligente que transporta carga por las instalaciones de logística de la planta del Grupo BMW en Wackersdorf. Tomado de:

[www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90242722/smart-transport-roboter-transportiert-rollcontainer-durch-logistikhalle-in-bmw-group-werk-wackersdorf](http://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90242722/smart-transport-roboter-transportiert-rollcontainer-durch-logistikhalle-in-bmw-group-werk-wackersdorf)

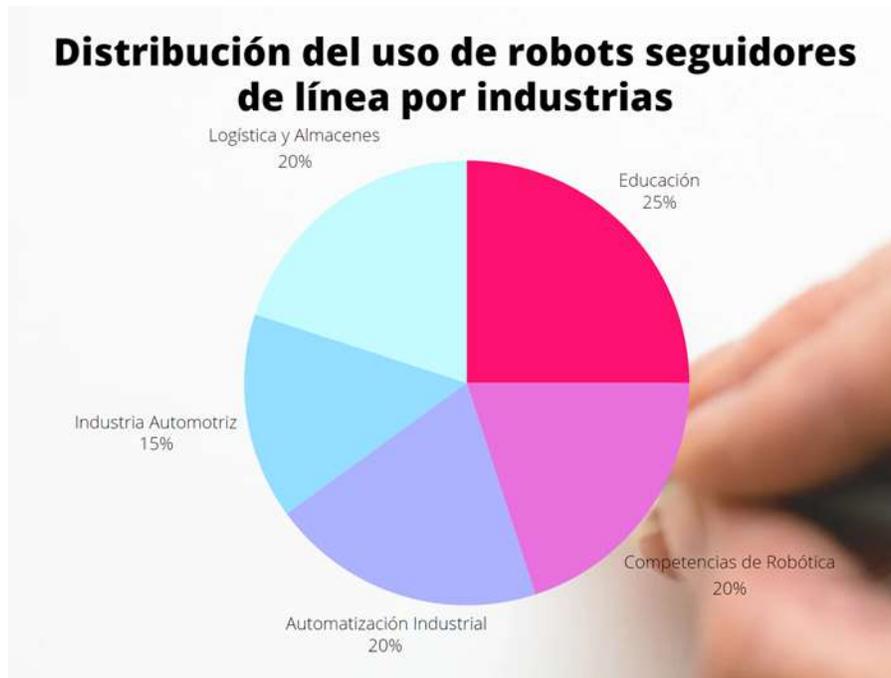
Con los avances tecnológicos, especialmente en electrónica e informática, los robots también se han beneficiado de nuevas funciones y un rendimiento mejorado. El uso de sensores más precisos y sistemas de control más sofisticados han permitido el desarrollo de máquinas mucho más rápidas y eficientes.

En el siglo XXI, las competencias de robots seguidores de línea siguen evolucionando. Equipos de todo el mundo participan en una variedad de eventos regionales, nacionales e internacionales, compitiendo en carreras de velocidad en pistas especialmente diseñadas. Estas competiciones suelen tener reglas y regulaciones específicas que controlan aspectos como el tamaño y peso del robot,

los tipos de sensores permitidos y las características de las rutas y líneas que se deben seguir. Los concursos no son sólo una oportunidad para poner a prueba las habilidades técnicas de los participantes, sino también son un medio para promover el intercambio de conocimientos y experiencias en el campo de la robótica[1].

**Figura 3**

*Grafico del uso de robots seguidores de línea por industrias.*

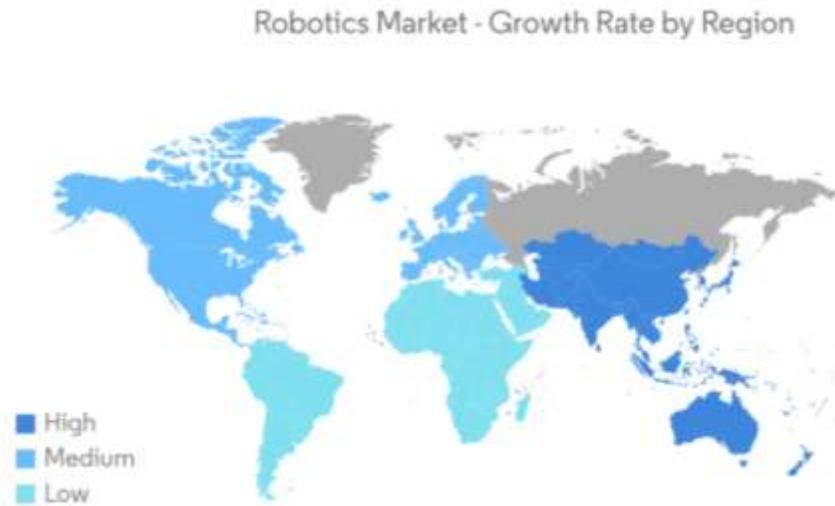


**Nota.** Grafico circular de distribución del uso de robots seguidores de línea por industrias para el año 2023 [2]

Actualmente, la característica más importante de los robots seguidores de línea es su capacidad para moverse rápida y ágilmente a lo largo de líneas dibujadas en el suelo. Esto requiere un diseño mecánico aerodinámico y liviano y un sistema de propulsión eficiente y potente. Los robots deben estar optimizados para maximizar la velocidad y la aceleración, lo que les permite completar la carrera en el menor tiempo posible. Por eso el diseño mecánico es tan importante para el rendimiento en el circuito. Estos incluyen la disposición de los componentes, la forma del chasis, la distribución del peso, etc.

**Figura 4**

*Crecimiento del mercado de la robótica.*



**Nota.** *Crecimiento regional del mercado de la robótica estimado entre los años 2019 -2029.*

*Tomado de: [www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/robotics-market](http://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/robotics-market)[3]*

## **1.2 Competencias a nivel mundial**

Las competencias de robótica a nivel mundial son eventos emocionantes y altamente competitivos donde equipos de todo el mundo se reúnen para poner a prueba sus habilidades en el diseño, construcción y operación de robots. Estos eventos ofrecen un escenario único donde los participantes pueden demostrar la innovación y el ingenio de sus creaciones en desafíos que van desde carreras de velocidad hasta pruebas de destreza y precisión. Entre estas competencias destacadas se encuentra Runibot[4], un referente reglamentario en el trabajo realizado de trabajo de grado.

**Figura 5**

*Asociación de Red Universitaria Bogotá – RUNIBOT.*



**Nota. Logotipo de la Asociación de Red Universitaria Bogotá – RUNIBOT. Tomado de: Fuente:**  
*runibot.com[4]*

**Figura 6**

*RUNIBOT categoría Velocistas.*



**Nota. Competencia de RUNIBOT en la categoría Velocistas. Tomado de:**  
*ucentral.edu.co/noticentral/para-sirve-robot*

Runibot[4] es una competencia de robótica reconocida a nivel internacional, que se enfoca en desafiar a los participantes a diseñar y construir robots, entre ellos la categoría de seguidores de línea velocistas, capaces de completar una pista de carrera en el menor tiempo posible. Organizada por la Asociación Red Universitaria

Bogotá[4], a la cual pertenece la Fundación Universidad de América, esta competencia ofrece un escenario emocionante y altamente competitivo para estudiantes, ingenieros y entusiastas de la robótica de todo el mundo.

La competición establece reglas y especificaciones detalladas para la participación de los equipos, incluyendo aspectos como el tamaño y peso máximo del robot, el tipo y número de sensores permitidos, y las características de la pista y línea a seguir. Estas reglas están diseñadas para garantizar un campo de juego equitativo, promover la innovación, la excelencia en el diseño y construcción de robots seguidores de línea.

Los participantes deberán demostrar su capacidad para seguir la línea trazada en la pista de forma precisa y eficaz. Esto requiere un diseño cuidadoso y una programación que permita al robot detectar y responder a cambios en la línea. Runibot[4] ofrece a los participantes la oportunidad de poner a prueba sus habilidades en áreas clave de la ingeniería robótica, como la mecánica, la electrónica y el control. Además, fomenta el intercambio de conocimientos y experiencias entre los participantes, así como el desarrollo de nuevas ideas y enfoques en este campo.

## Figura 7

*RUNIBOT categoría Velocistas segunda ronda.*



**Nota.** Competencia de RUNIBOT en la categoría Velocistas (segunda ronda).

*Tomado de: Fuente: [concentrika.ucentral.edu.co/acn/runibot-un-evento-que-no-te-puedes-perder/](http://concentrika.ucentral.edu.co/acn/runibot-un-evento-que-no-te-puedes-perder/)*

De igual manera existen muchas más competencias de robótica en todo el mundo, muchas de ellas regionales y nacionales, pero a nivel internacional hay algunas cuantas que tienen un importante protagonismo y son el campo de acción de muchos ingenieros, como por ejemplo la competencia RoboManiacs Contest[5]. Esta es una competencia de robótica que ha ganado reconocimiento por ser uno de los eventos en los que se presentan algunos de los robots seguidores de línea más rápidos del mundo. Organizado por HBFS Robotics, una organización dedicada al desarrollo de robots y tecnologías robóticas, este concurso ofrece a los participantes la oportunidad de demostrar la velocidad, precisión y agilidad de sus robots en pistas especialmente diseñadas. Los robots participantes son sometidos a desafíos de seguimiento de línea que ponen a prueba sus capacidades de detección, control y navegación autónoma. RoboManiacs Contest[5] es un evento emocionante y altamente competitivo que atrae a equipos de todo el mundo en busca de reconocimiento y prestigio en el campo de la robótica.

Technoxian[6] es una competencia de robótica a nivel mundial que abarca diversas categorías, una de las cuales es la de "Fastest Line Follower" (seguidor de línea

más rápido). Este campeonato reúne a estudiantes, profesionales y entusiastas de la robótica de todo el mundo para competir en una variedad de desafíos y pruebas. La categoría de "Fastest Line Follower" desafía a los participantes a diseñar y construir robots seguidores de línea capaces de completar una pista en el menor tiempo posible. Los equipos participantes deben demostrar no solo la velocidad de sus robots, sino también su capacidad para navegar de manera precisa y eficiente a lo largo de la línea trazada en el suelo. Aquí se ofrece una plataforma única para el intercambio de conocimientos, la colaboración y la innovación en el campo de la robótica, y se ha convertido en un evento de referencia a nivel mundial[6].

La IEEE[7] (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) organiza competencias de robots seguidores de línea en diferentes partes del mundo como parte de sus iniciativas para promover la educación y la innovación en el campo de la robótica. Estas competencias ofrecen a estudiantes, académicos, profesionales e investigadores la oportunidad de poner a prueba sus habilidades y conocimientos en el diseño, construcción y control de robots seguidores de línea. Los participantes compiten en desafíos que evalúan la velocidad, precisión y capacidad de navegación autónoma de sus robots a lo largo de una pista trazada con líneas de diferentes formas y complejidades. La IEEE[7] Line Following Robot Competition fomenta la participación activa en la comunidad de robótica y promueve la excelencia en el diseño y desarrollo de robots autónomos.

### **1.3 Referentes de robots velocistas**

En el contexto de la investigación sobre la construcción de un prototipo de robot velocista desde un enfoque aerodinámico, se hace imprescindible analizar y comprender los referentes existentes en el ámbito de la robótica competitiva. Los tres trabajos de tesis seleccionados representan ejemplos destacados de diseño e implementación de robots seguidores de línea velocistas, proporcionan valiosa información sobre aspectos clave como la geometría del chasis, la disposición de componentes y el rendimiento en competencias, fundamentales para el desarrollo y mejora de prototipos innovadores en esta área de la robótica.

El trabajo de tesis titulado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LÍNEA DE COMPETENCIA PARA LA CATEGORÍA VELOCISTA"[8], realizado por Yeison Daniel Tapiero Santa en la Universidad de Ibagué, aborda el diseño, implementación, modelamiento y control de un robot seguidor de línea velocista. Este proyecto se centra en optimizar el rendimiento de los robots seguidores de línea velocistas mediante una metodología de diseño integral.

En cuanto a la geometría y disposición de componentes del robot, se destaca que el diseño del robot incluye un chasis de PCB que utiliza fibra de vidrio debido a su versatilidad y durabilidad, como se ve en la *Figura 8*. El centro de masa del robot está bien definido para garantizar movimientos precisos, con dimensiones específicas para lograr un equilibrio entre los robots seguidores de línea convencionales y modernos. Además, se menciona que el sistema de sensores del robot es crucial para su percepción en la posición relativa a la línea de referencia y la velocidad de los motores. En cuanto al aspecto aerodinámico del vehículo, no se proporcionan muchos datos precisos más que la mención del peso del prototipo y su altura con respecto a la superficie[8].

Este robot participó en varias competencias importantes, incluyendo RoboMatrix, Runibot y Robotic People Fest, obteniendo el primer lugar en la categoría velocista en RoboMatrix 2018 y Robotic People Fest 2018. En Runibot 2018, el robot logró el cuarto puesto en la competencia.

Además, el trabajo de tesis resalta la importancia de la robótica de competencia y cómo los robots seguidores de línea velocistas han evolucionado de un entorno industrial a uno educativo e investigativo. Se menciona también la creciente popularidad de las competencias robóticas a nivel mundial, con eventos destacados como RoboCup, RobotChallenge y All Japan Robot-Sumo.

## Figura 8

*Modelo final del trabajo Diseño E Implementación De Un Robot Seguidor De Línea De Competencia Para La Categoría Velocista.*



***Nota.** Modelo final del trabajo "Diseño E Implementación De Un Robot Seguidor De Línea De Competencia Para La Categoría Velocista" por Yeison Daniel Tapiero Santa en la Universidad de Ibagué.[8]*

El siguiente trabajo de tesis titulado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS ROBOTS SEGUIDORES DE LÍNEA MODALIDAD VELOCISTA Y DESTREZA PARA PARTICIPACIONES EN CONCURSOS DE ROBÓTICA"[9], realizado por Jorge Andrés Vera Arenas y Edward Andrés Alejandro Proaño de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, aborda el diseño y la implementación de dos robots seguidores de línea para participar en competencias de robótica. El proyecto profundiza en la robótica móvil y su ámbito competitivo, explorando aspectos de diseño, hardware y software para la creación de estos robots.

En cuanto a la geometría y disposición de componentes del robot, se destaca la importancia de la disposición de las partes rígidas del robot, como los brazos, muñecas, pinzas de fijación, barras, cámara, manguera y ventosa, dentro del sistema mecánico, como se ve en la *Figura 9*. Además, se menciona la relevancia de los accionadores, que proporcionan movimiento a las articulaciones del robot utilizando diferentes sistemas de transmisión. También se resalta la evolución tecnológica que ha llevado a la inclusión cada vez más común de dispositivos sensoriales en los robots[9].

Aunque no se proporcionan datos específicos relacionados con la aerodinámica del robot, se enfatiza en aspectos como el diseño, hardware, software, sensores, microcontroladores y regulaciones de competición en el campo de la robótica.

Estos robots participaron en el Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER), obteniendo el primer lugar en la modalidad de velocista y el tercer lugar en la modalidad de destreza. El equipo de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil demostró su esfuerzo y conocimiento adquirido en la competición.

Además, se destaca la importancia de la electrónica en la robótica, la selección consciente del microcontrolador ATmega328/P de Atmel y la incorporación de sensores para mejorar el rendimiento de los robots. El trabajo investigativo también incluyó el análisis del reglamento de concursos de robótica a nivel nacional, buscando cumplir con las normativas y fomentar la participación en competencias tanto nacionales como internacionales.

**Figura 9**

*Modelo final del trabajo Diseño E Implementación De Dos Robots Seguidores De Línea Modalidad Velocista Y Destreza Para Participaciones En Concursos De Robótica.*



**Nota.** Modelo final del trabajo "Diseño E Implementación De Dos Robots Seguidores De Línea Modalidad Velocista Y Destreza Para Participaciones En Concursos De Robótica" realizado por Jorge Andrés Vera Arenas y Edward Andrés Alejandro Proaño de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.[9]

Finalmente, el trabajo de tesis titulado "DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS ROBOTS DE COMPETENCIA (SEGUIDOR DE LÍNEA ESPECIALIDAD VELOCISTA, LABERINTO)"[10], realizado por Romo Caicedo Diego Antonio y Toca Trujillo Luis Edison en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, aborda el diseño y construcción de robots de competencia en las categorías de seguidor de línea y

robot laberinto. El objetivo principal del proyecto es fomentar el interés de los estudiantes en la creación de prototipos robóticos.

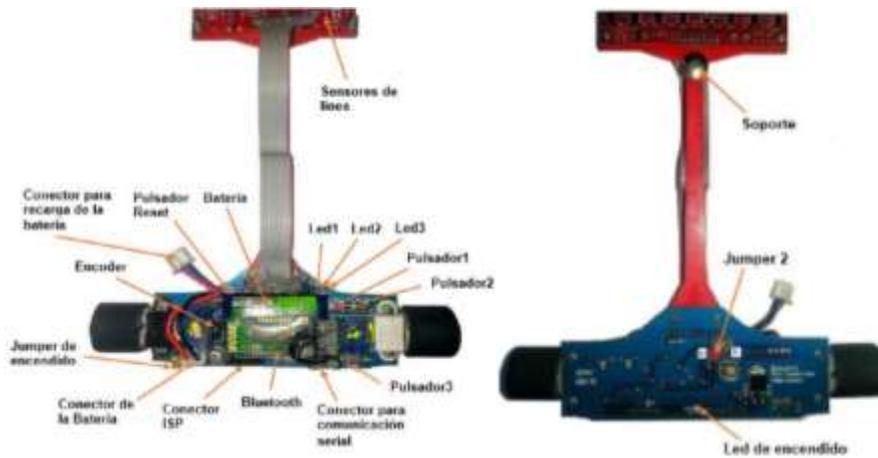
En cuanto a la geometría y disposición de componentes del robot, se destaca la forma del chasis del robot, como se ve en la *Figura 10*, eligiendo una forma que permite giros más libres y menor riesgo de atascarse en paredes en caso de choque. También se resalta la distribución cuidadosa de elementos como sensores, motores y batería en el chasis para garantizar un funcionamiento óptimo del robot. Además, se menciona la disposición de sensores, optando por una configuración con 8 sensores para una detección más precisa de la posición del robot con respecto a la línea a seguir[10].

Aunque no se proporciona información específica sobre la aerodinámica de los robots, se destacan los resultados obtenidos en varias competencias de robótica. Estos incluyen participaciones en el II Torneo de Robótica IEEE Universidad de Nariño, Torneo de robótica UMEBOT X, Concurso Ecuatoriano de Robótica, Torneo Innova Week y Torneo UTNATION, donde los robots obtuvieron lugares destacados, como el primer y segundo lugar.

Además, se menciona la importancia de implementar múltiples prototipos antes de llegar al diseño final, el uso de diferentes controladores y algoritmos para mejorar el rendimiento de los robots, así como la calibración de sensores y la adaptación a las condiciones de luz para un mejor funcionamiento.

**Figura 10**

*Modelo final del trabajo Diseño E Implementación De Dos Robots De Competencia (Seguidor De Línea Especialidad Velocista, Laberinto).*



**Nota.** Modelo final del trabajo "Diseño E Implementación De Dos Robots De Competencia (Seguidor De Línea Especialidad Velocista, Laberinto)" realizado por Romo Caicedo Diego Antonio y Toca Trujillo Luis Edison en la Escuela Politécnica Nacional de Quito.[10]

**Tabla 1**

*Comparativa entre los referentes.*

<b>Característica</b>	<b>Trabajo 1</b>	<b>Trabajo 2</b>	<b>Trabajo 3</b>
<b>Título del trabajo</b>	Diseño e implementación de un robot seguidor de línea de competencia para la categoría velocista[8]	Diseño e implementación de dos robots seguidores de línea modalidad velocista y destreza para participaciones en concursos de robótica[9]	Diseño e implementación de dos robots de competencia (seguidor de línea especialidad velocista, laberinto)[10]
<b>Resumen del contenido</b>	Se centra en el diseño e implementación de un robot seguidor	Aborda el diseño y construcción de dos robots seguidores de línea, enfocándose	Se centra en el diseño e implementación de dos robots de

	<p>de línea para la categoría velocista. Explora aspectos como la geometría y disposición de componentes. Participa en competencias y busca mejorar el rendimiento del robot en términos de velocidad y precisión en el seguimiento de la línea.</p>	<p>en las modalidades velocista y destreza. Destaca la importancia de la disposición de componentes y la elección de sensores para mejorar el desempeño. Participa en competencias donde se enfoca en fomentar el interés de los estudiantes en la robótica competitiva.</p>	<p>competencia en las categorías de seguidor de línea velocista y laberinto. Destaca la forma del chasis, la distribución de elementos y la disposición de sensores para optimizar el funcionamiento del robot. Participa en diversas competencias resaltando la importancia de la implementación de múltiples prototipos y el uso de diferentes controladores y algoritmos para mejorar el rendimiento.</p>
<p><b>Geometría y disposición</b></p>	<p>Destaca la importancia de la disposición de las partes rígidas del robot, los accionadores y la inclusión de dispositivos</p>	<p>Resalta la forma redonda del chasis para permitir giros más libres y una distribución cuidadosa de los elementos como sensores y motores.</p>	<p>Destaca el diseño de robots de competencia de seguidores de línea especializados en velocidad. Se menciona una cuidadosa</p>

	sensoriales para una mayor interacción con el entorno. Se enfoca en la geometría del robot para optimizar su desempeño en competiciones de robótica.	Se menciona la disposición de 8 sensores para una detección precisa y la importancia de la calibración de sensores para adaptarse a las condiciones de luz.	disposición de componentes para un funcionamiento óptimo del robot. Además, se resalta el uso de algoritmos de control implementados y la importancia de la calibración de sensores para un mejor rendimiento.
<b>Competencias y resultados representativos</b>	Participó en la modalidad velocista y destreza. Destacó en el Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER), obteniendo el primer lugar en la modalidad velocista.	Participó en varias competencias incluyendo el Torneo de Robótica IEEE Universidad de Nariño, el Torneo de Robótica UMEBOT X, (CER), el Torneo Innova Week, y el Torneo UTNATION. En el Torneo Innova Week, obtuvieron el primer y segundo lugar.	Participó en (CER), donde uno de los prototipos obtuvo el tercer lugar. También en el II Torneo de Robótica IEEE en la ciudad de San Juan de Pasto, el Torneo de Robótica UMEBOT X y el Torneo UTNATION en la Universidad Técnica de Norte.

**Nota.** En la Tabla 1.1 se hace una comparativa entre los tres referentes seleccionados[8], [9], [10]

La selección de estos tres referentes para el trabajo de grado fue por diversos aspectos ingenieriles generales, pero más que todo y fundamentalmente, por su desempeño en las competencias de robótica donde los robots velocistas demostraron su eficiencia y efectividad, tal y como se resume en la *Tabla 1*.

Cada trabajo representa una aproximación única al diseño y desarrollo de robots seguidores de línea especializados en la modalidad velocista. El trabajo de tesis titulado **"Diseño e implementación de un robot seguidor de línea de competencia para la categoría velocista"**[8], obtuvo el primer lugar en dicha categoría y el tercer puesto en la modalidad de destreza, en el Concurso Ecuatoriano de Robótica (CER). Por otro lado, el trabajo **"Diseño e implementación de dos robots seguidores de línea modalidad velocista y destreza para participaciones en concursos de robótica"**[9] consiguió el primer y segundo lugar, respectivamente, en el Campeonato Innova Week y el primer lugar en el Campeonato UTNATION. Finalmente, el trabajo de tesis titulado **"Diseño e implementación de dos robots de competencia (seguidor de línea especialidad velocista, laberinto)"**[10] logro obtener el segundo lugar en el Campeonato de Robótica UMEBOT X. Estos logros destacados evidencian la creatividad, eficacia, calidad y competitividad de los robots desarrollados en cada trabajo, convirtiéndolos en valiosos referentes de gran importancia para la investigación del presente trabajo de grado.

Así mismo, a pesar de la exhaustiva revisión de los tres referentes consultados, cuyo resumen se sintetizó en la *Tabla 1*, resulta evidente que ninguno de ellos abordó específicamente un estudio aerodinámico de los robots velocistas. Estos aspectos, de gran relevancia en la eficiencia, velocidad y consumo de energía de los vehículos, presentan un campo de innovación que puede ser más íntimamente explorado desde otras perspectivas de la ingeniería, abriendo así una oportunidad de estudios y análisis enfocados en este interesante y decisivo aspecto, permitiendo hacer un planteamiento del problema acerca de ¿Cómo construir un prototipo de robot velocista a partir de un estudio aerodinámico?, lo cual es el propósito esencial de este trabajo de grado.

Los estudios aerodinámicos de estos vehículos emergen como una línea de investigación prometedora, que podría ofrecer nuevas perspectivas y soluciones vanguardistas para optimizar el rendimiento de los robots velocistas en competiciones futuras.

## 1.4 Aerodinámica

La aerodinámica es una disciplina de la física que se ocupa del estudio de las propiedades del aire en movimiento y su interacción con cualquier tipo de objeto en su camino. En la ingeniería mecánica es crucial entender estos principios para aplicarlos en el diseño y la optimización de vehículos, aeronaves y estructuras.

Los fundamentos de la aerodinámica se apoyan en las leyes de la mecánica de fluidos, estas leyes explican el comportamiento y movimiento del aire, que es considerado un fluido. La ley de conservación de la masa[11] afirma que la masa no se crea ni se destruye en un sistema cerrado, lo que significa que la masa de aire que entra en un sistema debe ser igual a la que sale. La ley de conservación del momento[11] sostiene que el momento total de un sistema se mantiene constante a menos que actúen fuerzas externas, lo que ayuda a comprender cómo el flujo de aire puede ejercer fuerza sobre un objeto, y todo ello da paso a dos conceptos que juegan un papel fundamental en los análisis y aplicaciones estudiados en el presente trabajo de grado, *la sustentación*[12] o *“Lift”* y *el arrastre*[12] o *“Drag”*, definidos así también en el idioma inglés. La ley de conservación de la energía[11] indica que la energía de un sistema cerrado se conserva, sin importar las transformaciones entre energía cinética y potencial. En la aerodinámica, esto se observa en cómo la energía del aire en movimiento se convierte en energía de presión y viceversa, afectando tanto la velocidad como la presión del flujo. Finalmente, la ley de Bernoulli[11] establece una relación inversa entre la velocidad y la presión del aire: a mayor velocidad, menor presión.

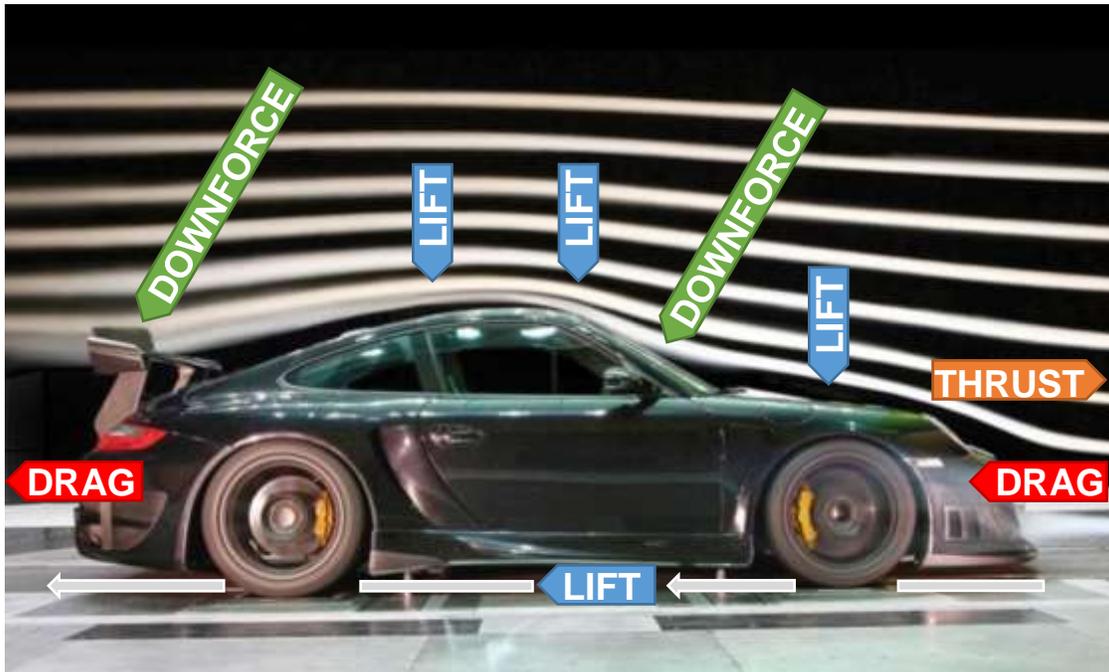
En la ciencia automotriz y la competición de vehículos, la sustentación[12] es una fuerza aerodinámica que actúa perpendicularmente a la dirección del flujo de aire alrededor del vehículo, este principio es fundamental para mejorar la estabilidad y el rendimiento de los automóviles a altas velocidades. El *coeficiente de sustentación (C<sub>L</sub>)*[11] describe la capacidad de una superficie, como el ala de un avión, para generar fuerza de sustentación, que es la fuerza que contrarresta la gravedad y permite que un objeto se mantenga en el aire. Este coeficiente es una medida de cuánta sustentación se genera por unidad de área de la superficie y por unidad de densidad del aire. Bernoulli[11] explica que en un flujo de aire, la presión disminuye a medida que la velocidad del aire aumenta,

creando una diferencia de presión que genera sustentación. El ángulo de ataque[12], que es el ángulo entre la cuerda del perfil aerodinámico (una línea imaginaria entre el borde delantero y el borde trasero del ala) y la dirección del flujo de aire, también juega un papel crucial, ya que un mayor ángulo de ataque puede aumentar la sustentación hasta un punto óptimo, después del cual se puede provocar una pérdida de efectividad debido a la separación de dicho flujo. Así mismo, el diseño y la forma del perfil aerodinámico[12] del vehículo son esenciales para maximizar la diferencia de presión entre las superficies superior e inferior, mejorando así la sustentación y contribuyendo a la estabilidad y el desempeño del vehículo en competición.

El arrastre[12] es una fuerza aerodinámica que actúa en dirección opuesta al movimiento del vehículo a través del aire y los ingenieros automotrices se centran en minimizar este efecto para mejorar la eficiencia y el rendimiento. El arrastre de fricción[11] se debe a la interacción entre la superficie del vehículo y las moléculas de aire, siendo más bajo en superficies suaves y menos rugosas. Por otro lado, el arrastre de forma[11], resulta de la resistencia que la forma del vehículo presenta al flujo del mismo, los diseños aerodinámicos suelen reducir este tipo de arrastre al permitir un flujo más suave. Además, el arrastre inducido[11] se produce por la generación de sustentación, especialmente en las alas de los vehículos, donde la formación de vórtices en las puntas incrementa el arrastre total. El *coeficiente de arrastre (Cd)*[11], [12] es una medida clave que evalúa la resistencia aerodinámica de un vehículo, siendo más bajo en diseños eficientes que experimentan menos resistencia al movimiento a través del aire.

**Figura 11**

*Prueba de aerodinámica en un túnel de viento.*



*Nota. Prueba aerodinámica de un Porsche 911 FIA GT3 en un túnel de viento. Tomado de: [nst.com.my/cbt/2017/12/315299/mr-foreman-impact-aerodynamics](http://nst.com.my/cbt/2017/12/315299/mr-foreman-impact-aerodynamics)*

#### **1.4.1 Introducción a la aerodinámica aplicada**

Se ha abordado la importancia de la aerodinámica en el diseño y rendimiento de los robots velocistas. Aunque no existen estudios específicos en este ámbito, se han aplicado principios aerodinámicos básicos y conocimientos de la industria automotriz para comprender su relevancia y aplicabilidad, como se puede evidenciar en la *Figura 11*, que demuestra como un automóvil es sometido a diferentes fenómenos aerodinámicos a causa del flujo de aire el cual este atraviesa. La aerodinámica[12] influye directamente en la velocidad y el consumo de energía de los robots velocistas y por ello se han analizado elementos aerodinámicos de la industria automotriz, como el diseño de la forma, el área transversal y el flujo de aire alrededor del vehículo. Aunque la investigación específica sobre aerodinámica en robots velocistas es nula, se han revisado estudios automotrices relevantes que proporcionan conocimiento útil para el diseño y desarrollo de estos robots, además de la información y los tres trabajos de referencia[8], [9], [10]. Finalmente, se ha

propuesto un diseño único y efectivo para el prototipo de robot velocista, que se detallará en los siguientes capítulos de este trabajo.

### Figura 12

*Porsche 917 y Chaparral 2J de la serie de carreras Can-Am de 1970.*



**Nota.** Junto a un Porsche 917, considerado uno de los autos de carreras convencionales más avanzados de 1970, el Chaparral 2J era una vista sorprendente. Mediciones realizadas por Chaparral mostraron que era capaz de tomar las curvas al menos un 7% más rápido que los dominantes McLaren de Can-Am.

*Tomado de: [automeia.revsinstitute.org/the-astonishing-chaparral-2j](http://automeia.revsinstitute.org/the-astonishing-chaparral-2j)*

El objetivo es revolucionar el diseño aerodinámico de los robots velocistas, superando sus limitaciones actuales mediante la incorporación de una cubierta diseñada desde cero. Esta carrocería no solo protegerá los componentes electrónicos, mejorando las propiedades aerodinámicas al eliminar la resistencia causada por su exposición, sino que también aprovechará el flujo de aire para mejorar significativamente el rendimiento en competencias como Runibot[4], así como en la historia de las competiciones automovilísticas, desde *Can-Am Series*, *Figura 12*, hasta la *Fórmula 1*, el *Campeonato Mundial de Resistencia (WEC)*, *FIA GT*, *Blancpain GT Series*, *Rally WRC* y el *Rally Dakar*, la aerodinámica ha sido estudiada y aplicada para mejorar el rendimiento de los vehículos, se busca aplicar estos mismos principios a los robots velocistas. Este enfoque

promete expandir las posibilidades de estos vehículos robóticos, impulsando su capacidad y eficiencia. Inicialmente, se enfoca en conceptos fundamentales de sustentación[12] y arrastre[12], entre otros, estableciendo una base sólida que allane el camino para estudios y desarrollos futuros más complejos. Con esta visión, se desea inspirar y abrir nuevas fronteras en la aplicación de la aerodinámica en robots velocistas, marcando un hito en la evolución de estas tecnologías, fomentando un mayor estudio y desarrollo en trabajos posteriores.

## **1.5 Consulta de reglas de competencia de Runibot**

Las bases de la competencia son un fundamento esencial para la construcción y desarrollo del trabajo realizado, ya que las reglas de Runibot[4] para la categoría de robot seguidor de línea velocista con turbinas, la cual es la única competencia que la Fundación Universidad de América ha participado con sus robots, brindan pautas y restricciones para el diseño, fabricación y desempeño de los robots participantes. Al cumplir con estas reglas, los equipos de investigación y desarrollo pueden garantizar que sus robots cumplan con estándares competitivos. Este trabajo de grado se basa en el marco regulatorio fundamental de las reglas de competencia de Runibot.

### **1.5.1 Reglas de la competencia de Runibot para la categoría de robot seguidor de línea velocista turbinado**

#### Descripción

La categoría de robot velocista consiste en una competencia en la cual los robots deberán realizar el recorrido de una pista en el menor tiempo posible, sorteando los puentes, túneles y curvas, esto en la fase clasificatoria. Posteriormente a eso, los robots se medirán en una pista a doble carril, dos robots por pista.

#### Especificaciones del robot

- El robot deberá ser de tipo autónomo.
- Para iniciar la competencia debe tener el módulo de inicio del evento, no se permitirán módulos diferentes.
- El inicio de la carrera es inmediato cuando se acciona el control remoto. No debe poseer tiempo de seguridad.

- El robot puede estar encendido o tener cualquier tipo de dispositivo en movimiento siempre y cuando no se mueva de la ubicación del inicio.
- El robot no debe exceder las siguientes dimensiones: Ancho 20cm, largo 30cm, alto 20cm

#### Características de la pista

- Pista de carril doble en un área máxima aproximada de 8m<sup>2</sup>.
- Cada carril tiene un ancho de 20cm separado por un espacio mínimo de 3cm.
- Color de pista blanco.
- Ancho de la línea 18mm.
- Color de línea negro.
- Radio de curvas mayor a 10cm.
- Existen pendientes de 30° máximo.

### **1.6 Planteamiento del problema**

Como se ha expuesto al inicio de este primer capítulo, los robots seguidores de línea velocistas son dispositivos robóticos diseñados para seguir de forma autónoma una línea trazada en el suelo y participar en carreras de velocidad. Estos robots combinan aspectos de diseño mecánico, electrónico y de control en un entorno competitivo apasionante y desafiante. Las competencias de robots velocistas, como Runibot y RoboManiacs Contest, proporcionan un escenario donde equipos de todo el mundo pueden demostrar innovación y habilidades técnicas en la construcción y operación de estos robots.

A pesar de los avances significativos en el diseño y la tecnología de los robots velocistas, aún existen áreas críticas que requieren mejora. Uno de los desafíos más importantes es la mejora de la velocidad y la eficiencia energética, ya que hasta la fecha no se han realizado estudios de este tipo aplicando soluciones en los principios de la aerodinámica para estos vehículos. Actualmente, muchos diseños se centran en la mejora de los sensores y el sistema de control, pero no abordan de manera integral el impacto de la aerodinámica en el rendimiento del robot. La resistencia al aire y la falta de una carrocería pueden limitar la velocidad máxima y aumentar el consumo de energía, lo cual es crucial en competencias donde cada milisegundo cuenta.

La aerodinámica es un campo ampliamente estudiado en la ingeniería automotriz, con aplicaciones que han demostrado mejoras significativas en velocidad y eficiencia energética. Aplicar principios aerodinámicos en el diseño de robots velocistas promete reducir el arrastre y mejorar la sustentación, impactando la estabilidad del robot, permitiendo velocidades más altas con un menor consumo de energía. Sin embargo, hasta ahora, esta área ha sido poco explorada en el contexto de los robots velocistas, presentando una oportunidad única para innovar y mejorar sus capacidades.

El presente trabajo de grado busca responder a la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo construir un prototipo de robot velocista a partir de un estudio aerodinámico? y para abordar esta pregunta ya se han definido los objetivos específicos que son; identificar las variables de diseño para un prototipo de robot velocista mediante la caracterización de tres referentes participantes en competencias mundiales de la categoría, diseñar un modelo aerodinámico para la construcción de un prototipo de robot velocista, utilizando las variables de diseño identificadas y finalmente, construir y evaluar un prototipo de robot velocista basado en el diseño aerodinámico, comparándolo con los referentes consultados en términos de velocidad y consumo energético.

La integración de principios aerodinámicos en el diseño de robots velocistas no solo tiene el potencial de mejorar significativamente su rendimiento en competencias, sino que también puede sentar las bases para futuras investigaciones y desarrollos en este campo. Este enfoque innovador puede marcar un hito en la evolución de los robots velocistas, impulsando su capacidad y eficiencia, y abriendo nuevas fronteras en la robótica competitiva.

Este capítulo expone la necesidad de responder a dicha pregunta organizándose en varias secciones, comenzando con una introducción a los robots velocistas y su relevancia en competencias a nivel mundial. A continuación, se presenta una caracterización detallada de tres campeones destacados en competencias internacionales, identificando las variables de diseño más influyentes. Se ajustan las métricas del proyecto a las reglas de la competencia Runibot, y se profundiza en las innovaciones técnicas propuestas. Para finalmente, plantear la pregunta de investigación y así establecer los objetivos que guiarán el resto del estudio en los siguientes capítulos.

Con este planteamiento del problema, se establece un marco claro y específico que guía la investigación y desarrollo del prototipo de robot velocista, proporcionando una base sólida para avanzar en este emocionante campo.

## 2. DISEÑO AERODINÁMICO DEL PROTOTIPO DE ROBOT VELOCISTA

En este segundo capítulo se aborda el estudio aerodinámico del prototipo con el fin de dar respuesta al planteamiento del problema referente a cómo construir de un prototipo de robot velocista desde un estudio aerodinámico. En un principio se realiza el análisis detallado de los tres referentes de competencias mundiales de robots presentados en el capítulo anterior[8], [9], [10]. Aquí, el objetivo principal es diseñar un modelo aerodinámico que mejore el comportamiento de dichos vehículos, utilizando las variables físicas estudiadas y de diseño identificadas previamente. Se profundiza en la metodología de diseño aerodinámico, lo cual incluye la integración de estas variables esenciales, sustentación[11] y arrastre[11], y se lleva a cabo un estudio y análisis computacional CFD (*Computational Fluid Dynamics*)[12] en el software *Ansys Fluent* de los tres referentes seleccionados para estudiar su comportamiento.

El desarrollo del modelo aerodinámico se enfoca en minimizar el arrastre[11] y maximizar la fuerza descendente[12], los cuales son aspectos críticos para mejorar el rendimiento del robot velocista. Finalmente, se compara dicho modelo a través de simulaciones computacionales *CFD*, nuevamente con el uso del software *Ansys Fluent*, para así derivar en un análisis detallado de los resultados, asegurando que el diseño cumpla con los estándares que se han propuesto para el trabajo de grado y aquellas métricas definidas para las competencias de Runibot[4].

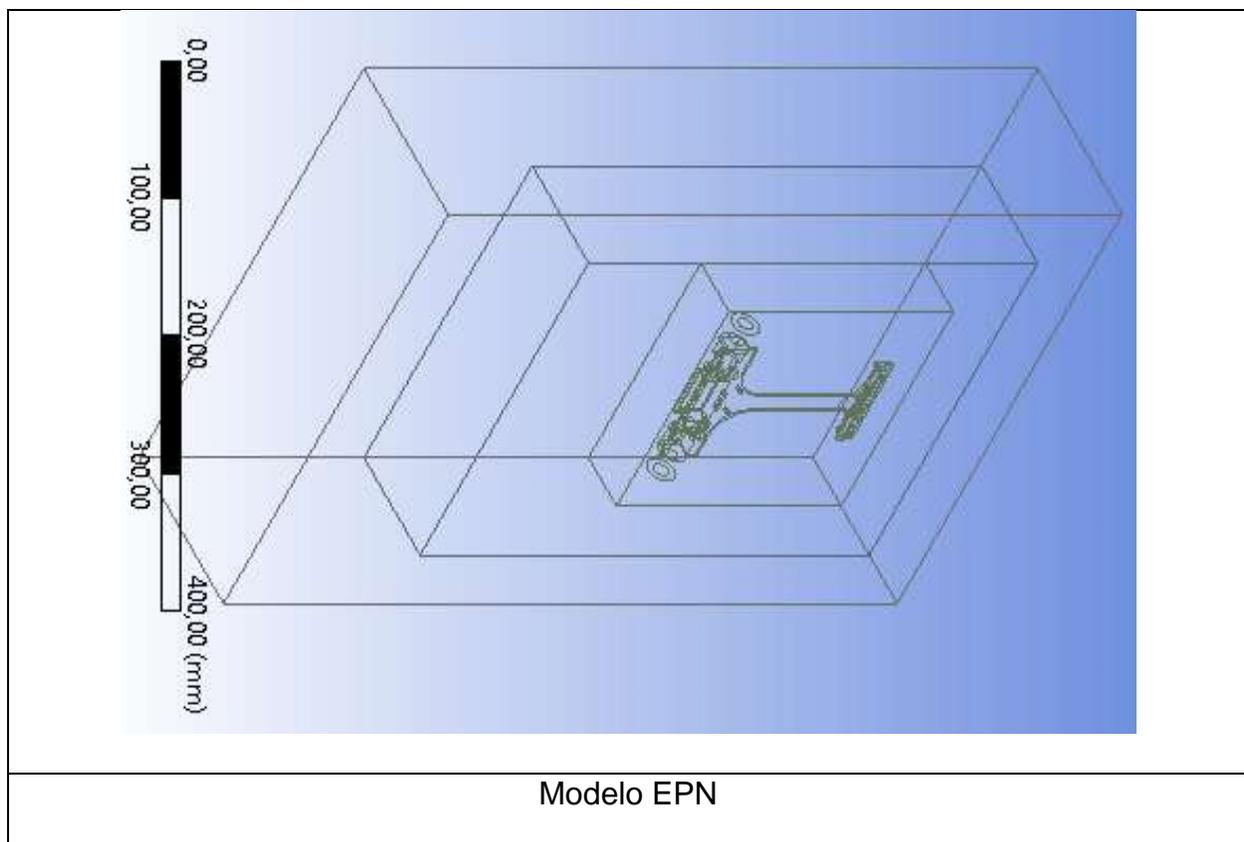
Para la simulación computacional en CFD (siglas en inglés de Dinámica de Fluidos Computacional) del proyecto se realiza primero las simulaciones de los modelos de robot velocista de la ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL (en adelante se nombrará Modelo EPN), la UNIVERSIDAD DE IBAGUE (en adelante se nombrará Modelo UDI) y T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-128 (en adelante se nombrará Modelo UCSG). De estas simulaciones se obtienen los valores de fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación de cada modelo. A continuación, se realizan las simulaciones del modelo diseñado en el presente proyecto (en adelante se nombrará Modelo MN), y se obtienen igualmente los valores de fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación, los cuales se comparan con los mismos valores para los modelos existentes. En las siguientes secciones se explica la generación de los modelos computacionales en *CFD* para las simulaciones planteadas.

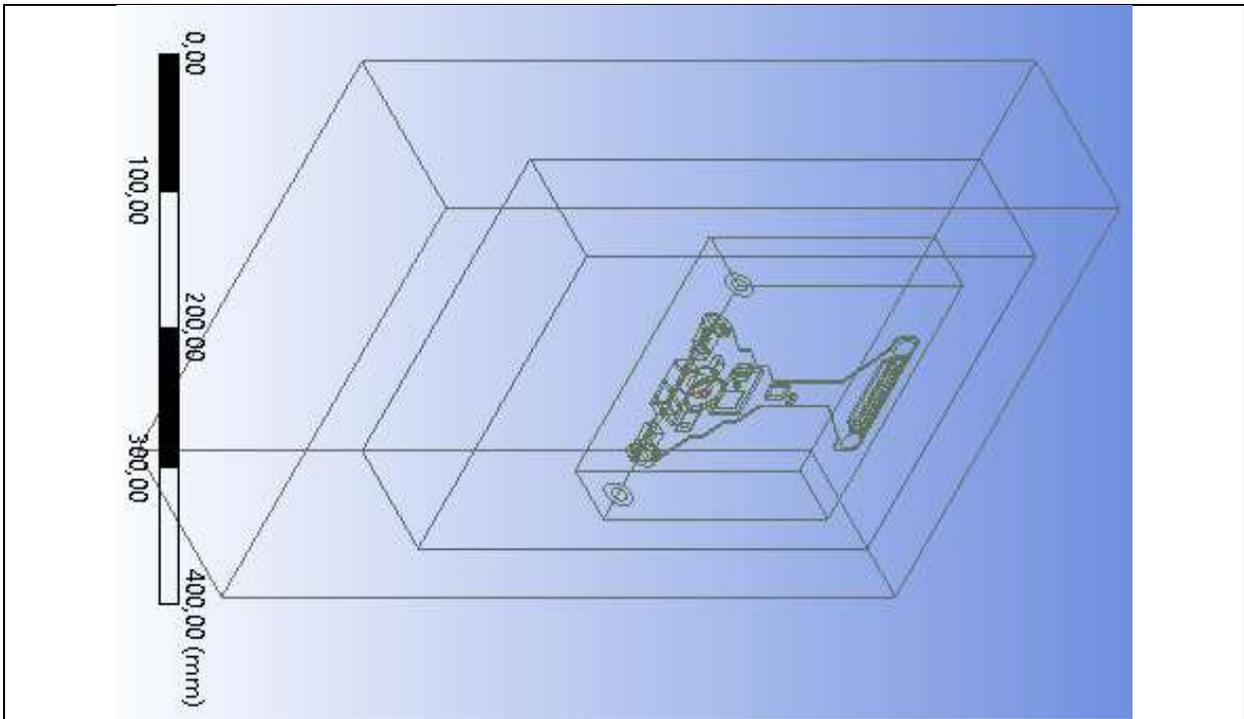
## 2.1 Dominio Computacional

Se establece un dominio computacional rectangular tridimensional, el cual abarque la totalidad de la geometría de cada uno de los modelos. Al ser estos asimétricos en todas las direcciones, no es posible simplificar la modelación a un dominio bidimensional simétrico o axisimétrico. En la *Tabla 2* se observan los dominios computacionales establecidos para cada modelo. Debido a las diferencias de forma y tamaño de cada modelo los dominios son diferentes en tamaño, pero similares en proporción con respecto a las dimensiones de cada modelo. Las tres zonas tridimensionales que se observan en cada dominio se utilizan para realizar una discretización (enmallado) progresivo para lograr refinamiento en las cercanías y superficies de los modelos.

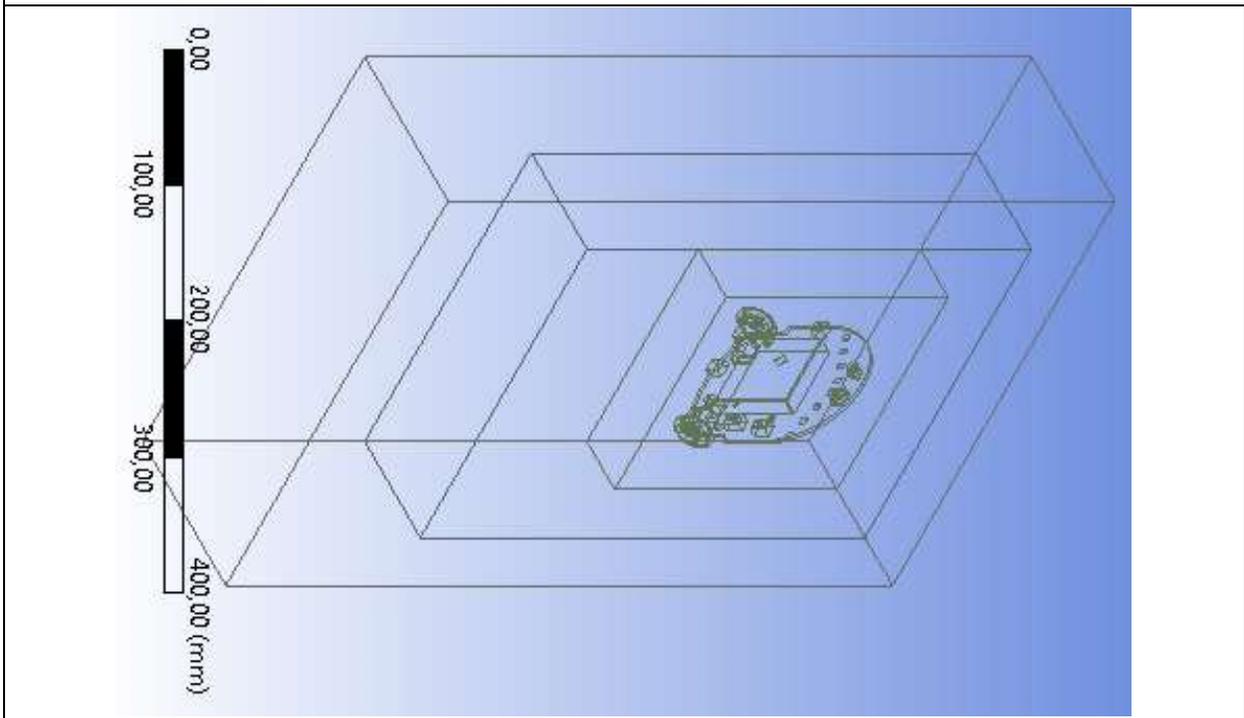
**Tabla 2**

*Dominios computacionales establecidos para cada modelo.*

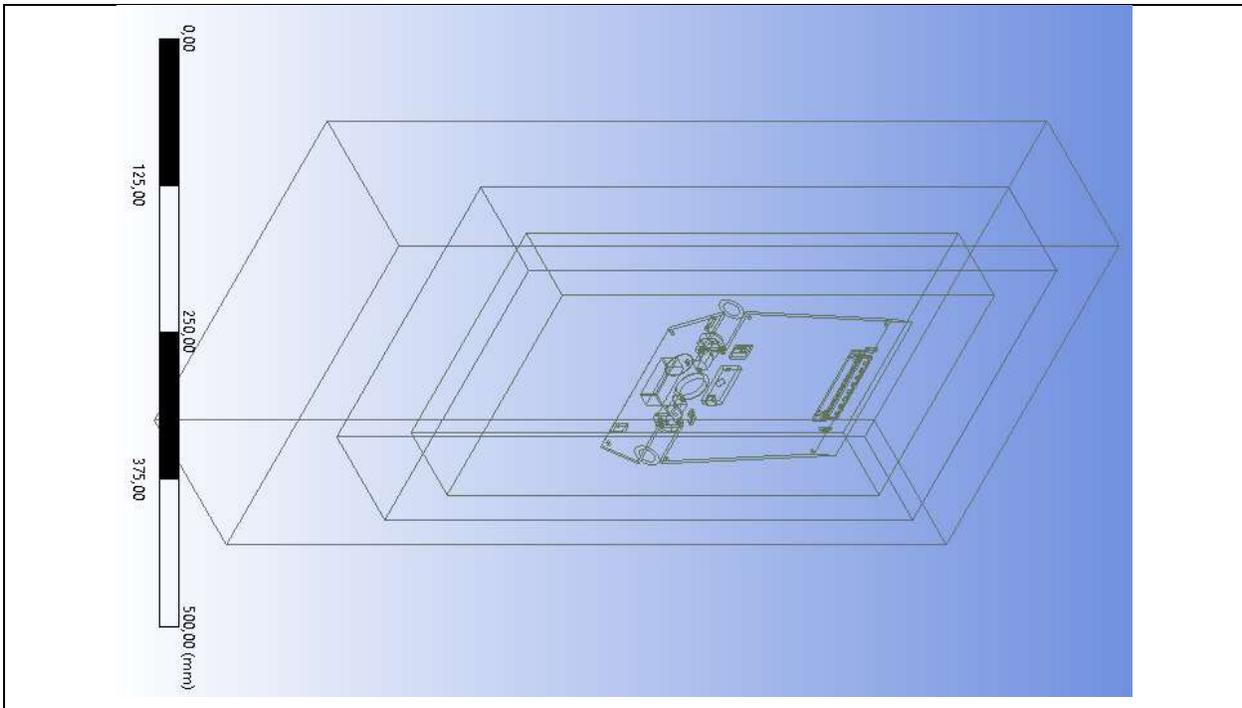




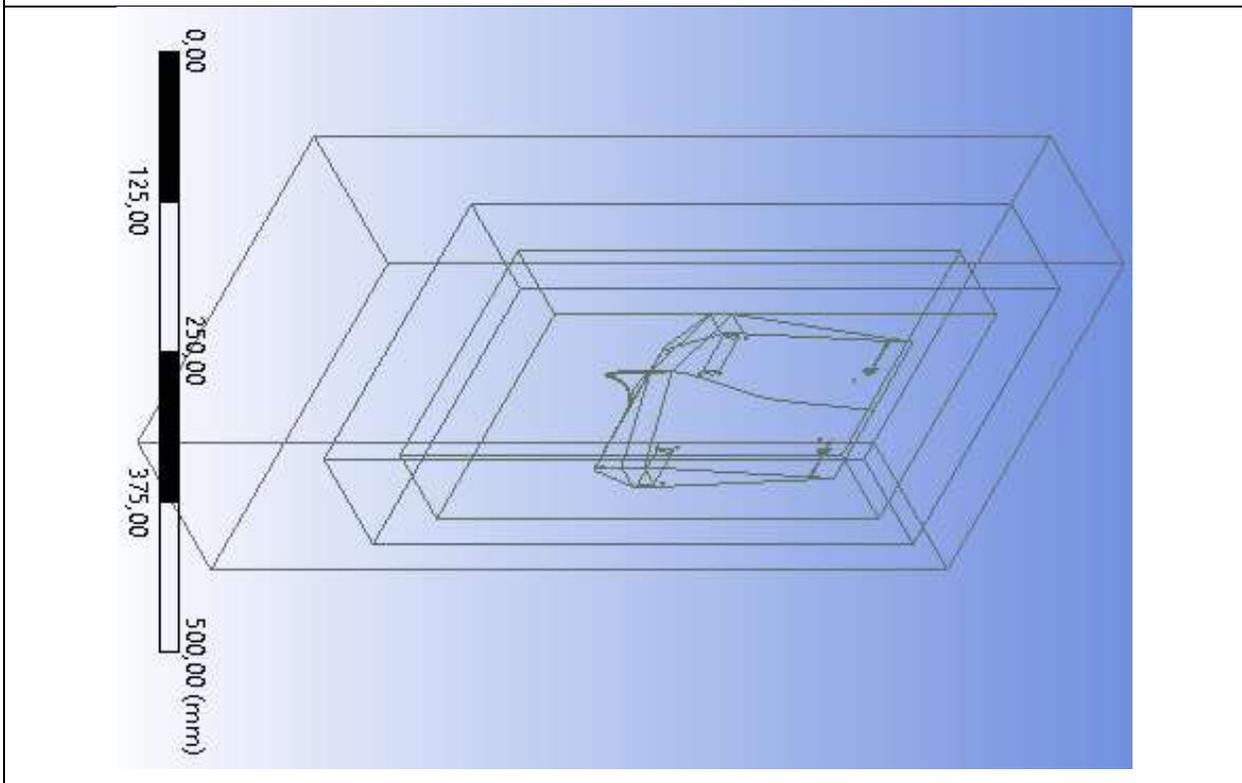
Modelo UDI



Modelo UCSG



Modelo MN sin carrocería



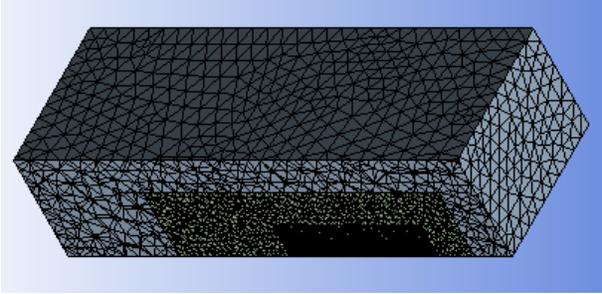
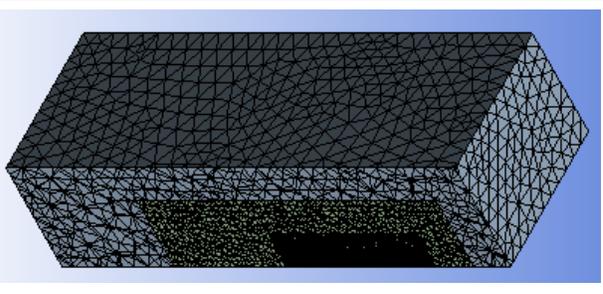
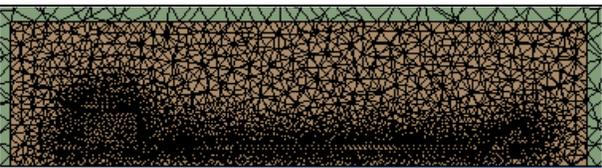
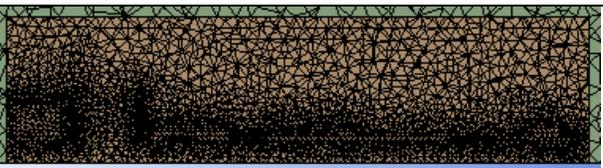
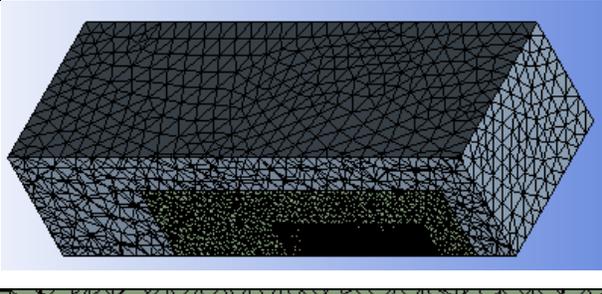
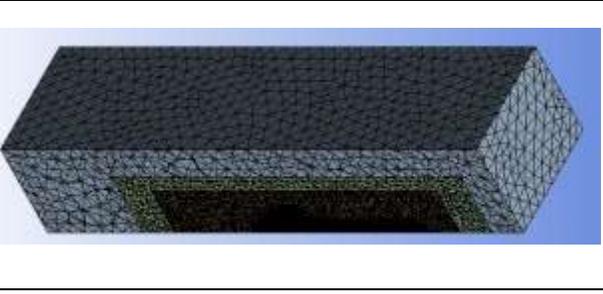
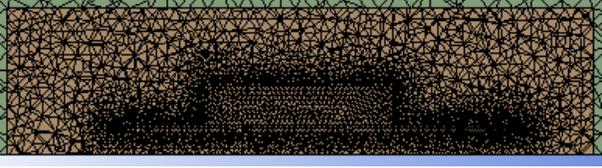
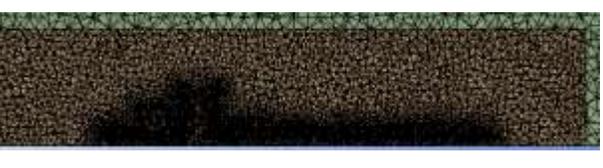
Modelo MN

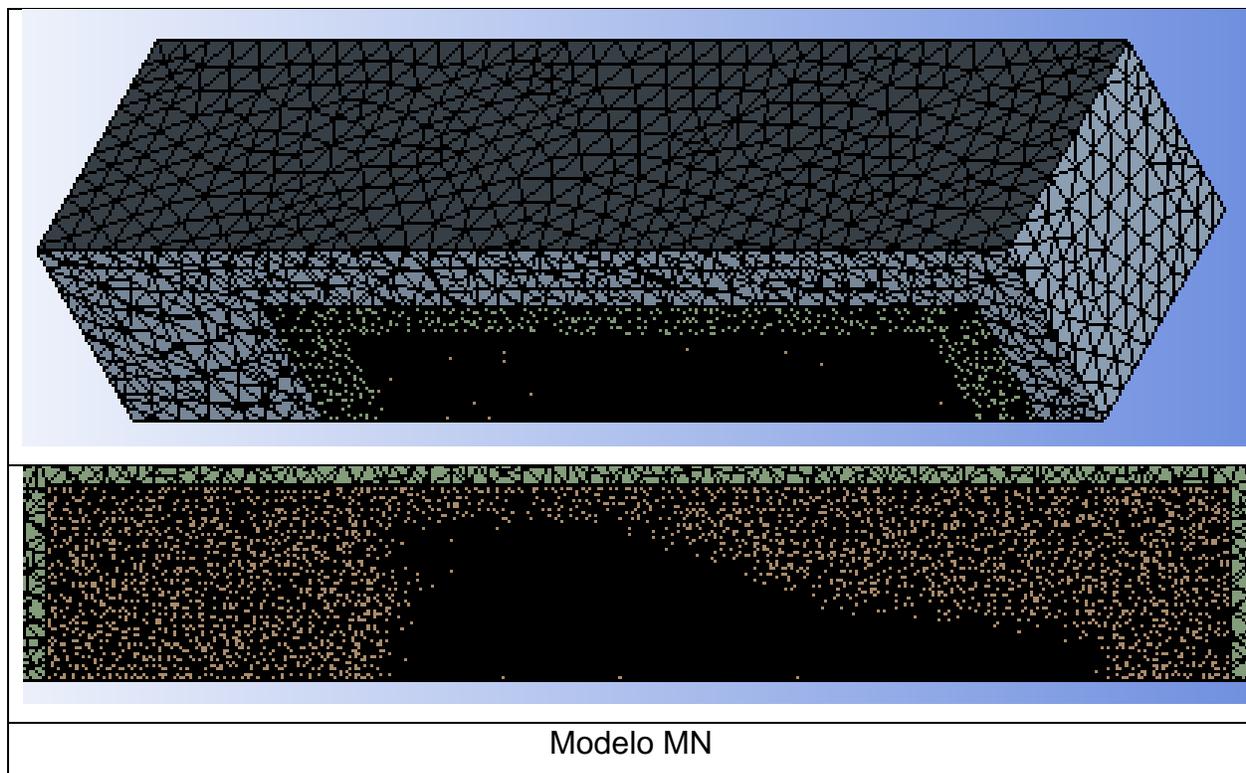
**Nota.** Tabla de los dominios computacionales establecidos para cada uno de los modelos.

En la *Tabla 3* se presenta la discretización (enmallado) de los dominios computacionales para cada modelo. La discretización se realiza con elementos no estructurados iniciando con un tamaño de 20mm en la zona más alejada del modelo, y disminuyendo este progresivamente (10mm y 5mm) en las zonas más cercanas al modelo. A nivel de la superficie de cada modelo se define un tamaño de elemento de 1.5mm.

**Tabla 3**

*Discretización (enmallado) de los dominios computacionales para cada modelo.*

	
	
Modelo EPN	Modelo UDI
	
	
Modelo UCSG	Modelo MN sin carrocería



**Nota.** Tabla de la discretización (enmallado) de los dominios computacionales para cada uno de los modelos.

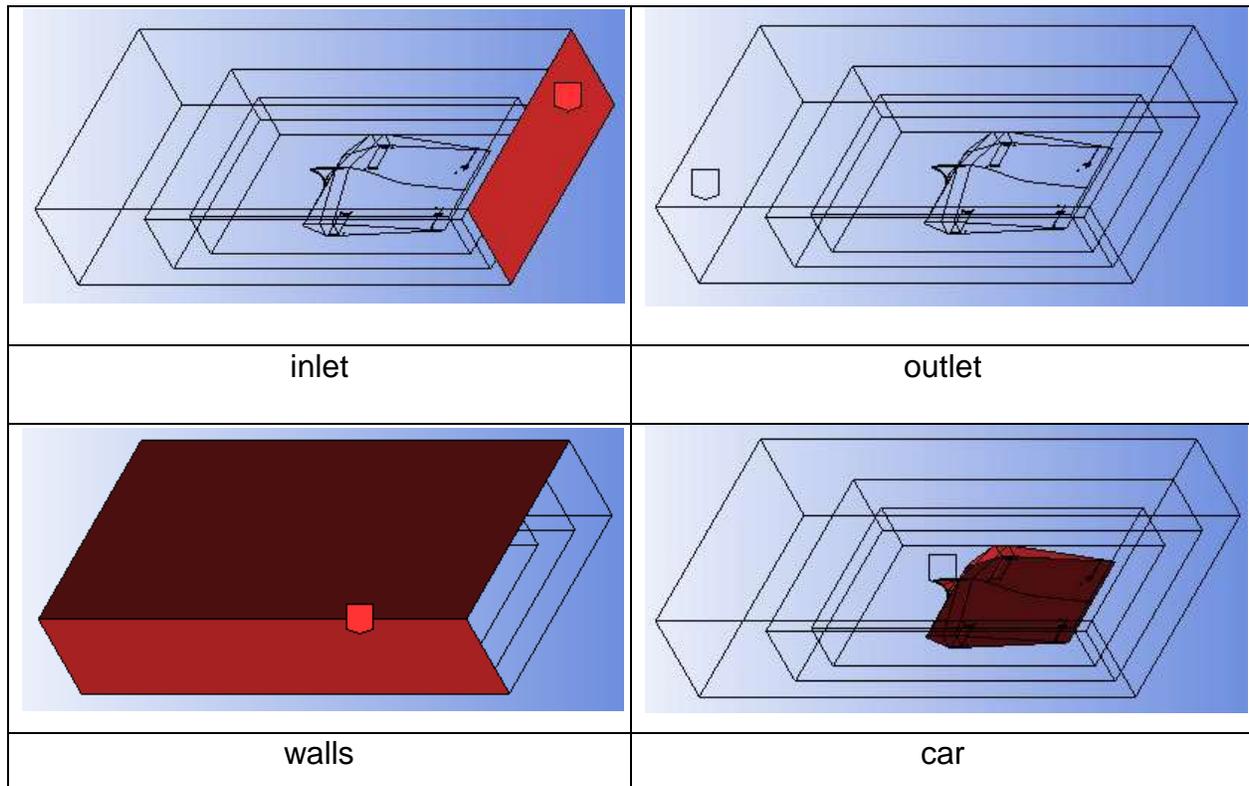
## 2.2 Condiciones de frontera

En la *Tabla 4* se presenta la designación de las fronteras del dominio computacional. Las imágenes muestran el ejemplo para el *Modelo MN*, sin embargo, la designación es similar para todos los modelos.

En la frontera de entrada (*inlet*) se establece una velocidad de flujo de 3.24 m/s en la dirección normal a la superficie. En la frontera de salida (*outlet*) se establece una condición de salida de presión con el valor de la atmósfera estándar (101.325 kPa). En las fronteras alrededor del modelo (*walls*) se establece condición de gradiente cero para la presión y condición de no deslizamiento (0 m/s) para la velocidad. En la superficie del vehículo (*car*) se establecen las mismas condiciones de *walls*. Sobre esta última frontera se miden los valores de fuerzas y coeficientes de arrastre y sustentación.

**Tabla 4**

*Fronteras del dominio computacional.*



*Nota.* Tabla de las fronteras del dominio computacional para cada uno de los modelos.

### 2.3 Características del fluido

El fluido de trabajo tomado es aire modelado como gas ideal bajo condiciones de atmósfera estándar.

### 2.4 Parámetros numéricos y algoritmo de solución

Dada la baja velocidad del fluido se estableció un solucionador basado en presión el cual asume el fluido como incompresible (para velocidades de fluido inferiores al 30 % de la velocidad del sonido local las variaciones de densidad son despreciables). Se desprecia también el efecto de la gravedad sobre el comportamiento del flujo. El solucionador resuelve las ecuaciones de continuidad y de momentum, sin embargo, no se incluye las ecuaciones de energía debido a que los cambios de temperatura y entalpía en el fluido son insignificantes dada la baja velocidad en la simulación.

Para la velocidad establecida y las longitudes de los modelos el número de *Reynolds* en todos los casos está por encima de 30.000 lo cual determina que el comportamiento del

fluido es turbulento. Se configura el modelo de turbulencia  $k-\omega$  el cual es usualmente utilizado en simulaciones de comportamiento aerodinámico a baja velocidad.

Para el desarrollo de la turbulencia en la simulación se establece que esta se realice de forma transiente, hasta que se alcance una estabilidad en los resultados de las fuerzas de arrastre y sustentación.

Se establece un método de solución acoplado entre la presión y la velocidad, con esquemas de discretización espacial y temporal implícitas de segundo orden.

## **2.5 Valores Iniciales**

Se inicializa la simulación con el valor de velocidad de  $3.14 \text{ m/s}$  en todo el dominio.

## **2.6 Convergencia**

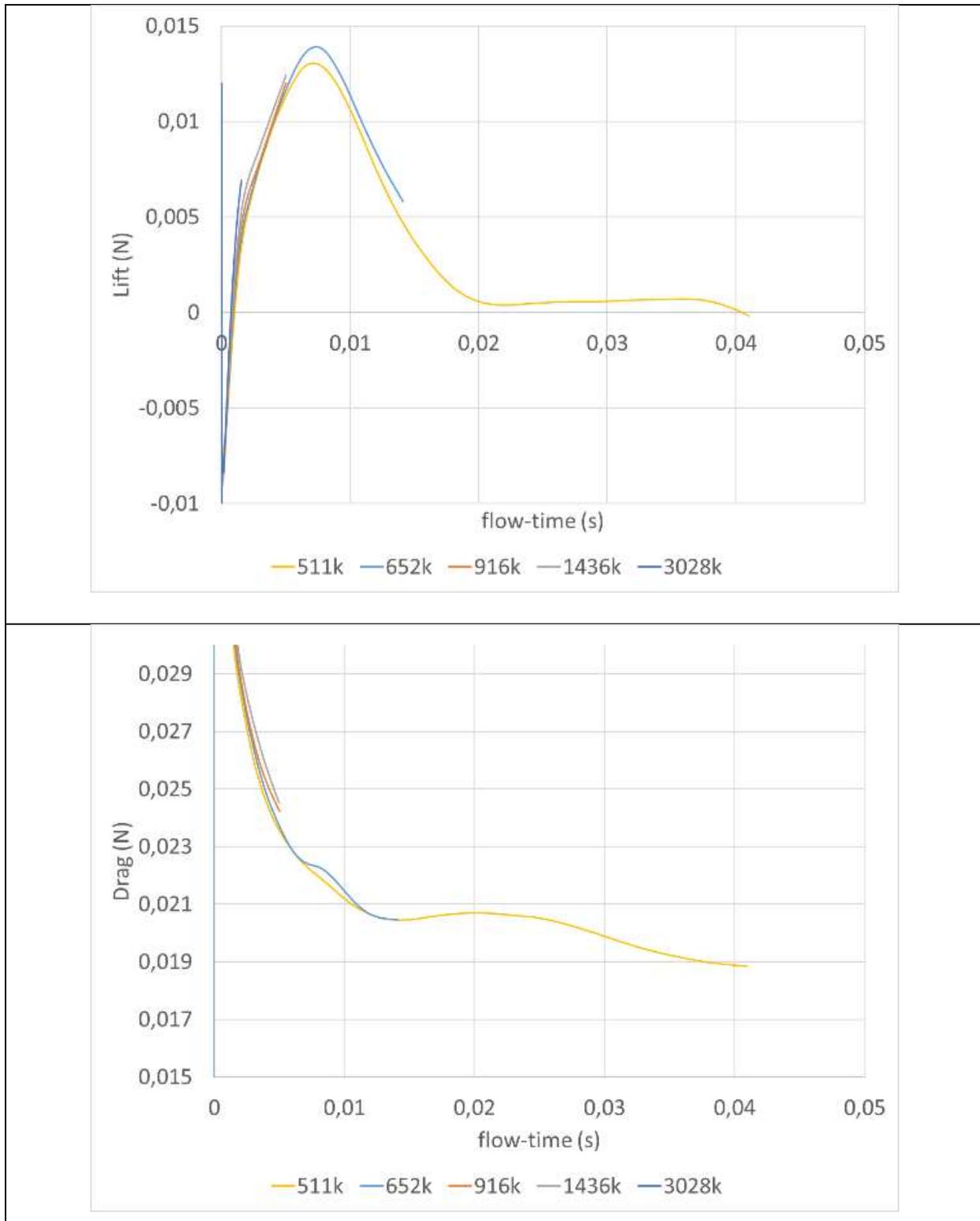
Las simulaciones se realizan en un computador de alto desempeño con un procesador *Intel X99 de 48 hilos y 64 GB de memoria RAM*.

Para mantener el número de *Courant (condición CFL)* inferior a 1 el valor del paso de tiempo oscila entre  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$ . Se utilizan 50 iteraciones por cada paso de tiempo. Con estas condiciones los valores de los residuales están muy por debajo de 1, manteniendo la convergencia de la solución.

Se hace un estudio de independencia de malla para el *Modelo EPN* variando la refinación de la discretización del dominio. En la *Tabla 5* se pueden observar el comportamiento de la sustentación y el arrastre para el modelo mencionado. La leyenda indica la cantidad de elementos en los dominios cada vez más discretizados, siendo  $511k = 511\ 000$  elementos, y similar para los demás valores. El análisis de estos comportamientos muestra que para todos los casos la variación en las fuerzas medidas es inferior al 5 % entre discretizaciones sucesivas.

**Tabla 5**

*Comportamiento de la sustentación y el arrastre.*



**Nota.** Tabla del comportamiento de la sustentación (arriba) y el arrastre (abajo) para el Modelo EPN.

## 2.7 Resultados de estudio CFD en Ansys Fluent

En la *Tabla 6* se presentan las gráficas del comportamiento de las fuerzas de sustentación y arrastre en cada uno de los modelos estudiados. Las simulaciones del *Modelo EPN*, el *Modelo UCSG* y el *Modelo MN sin carrocería* han llegado hasta un tiempo de fluido de entre  $0.08$  s y  $0.1$  s, mostrando una aparente estabilidad en el comportamiento de las fuerzas medidas, he inclusive una sustentación positiva para el caso de los modelos *UCSG* y *MN sin carrocería*, demostrando que el vehículo tiende a despegarse de la superficie de la pista, lo cual afecta su agarre y tracción durante la competencia. La simulación del *Modelo MN* ha llegado hasta un tiempo de fluido de  $0.1$  s, demostrando una fuerza descendente que tiende a una sustentación negativa, tal como se esperaba.

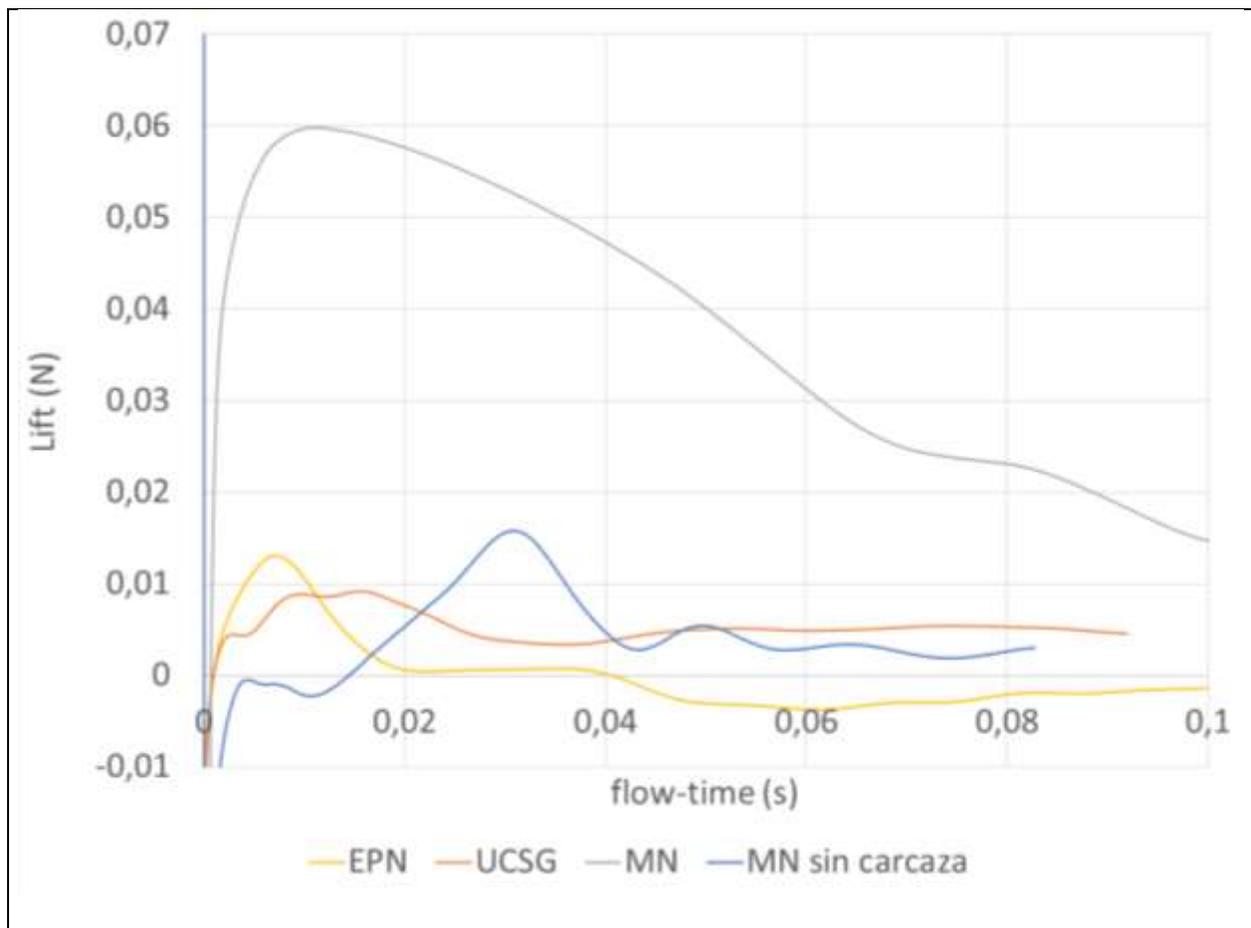
En la misma tabla también se puede ver el comportamiento de los modelos frente al arrastre, dejando ver que para el *Modelo MN* existe un mayor índice en el crecimiento de esta fuerza, ya que esto es evidente frente al aumento de sustentación negativa y por ende, la fuerza descendente, pero aun así no se experimenta un pico desmesurado de esta fuerza de arrastre, lo cual está dentro de los parámetros esperados del comportamiento aerodinámico propuesto, todo esto en conjunto mejora el comportamiento del vehículo en curvas y permite alcanzar una mayor velocidad que también mejora los tiempos de vuelta y en consecuencia, el consumo de energía durante las competencias se ve reducido, todo esto aunque no ha logrado una estabilidad en el comportamiento de dichas fuerzas medidas. Aun así, estos resultados respaldan el diseño mejorando su comportamiento frente a los referentes seleccionados.

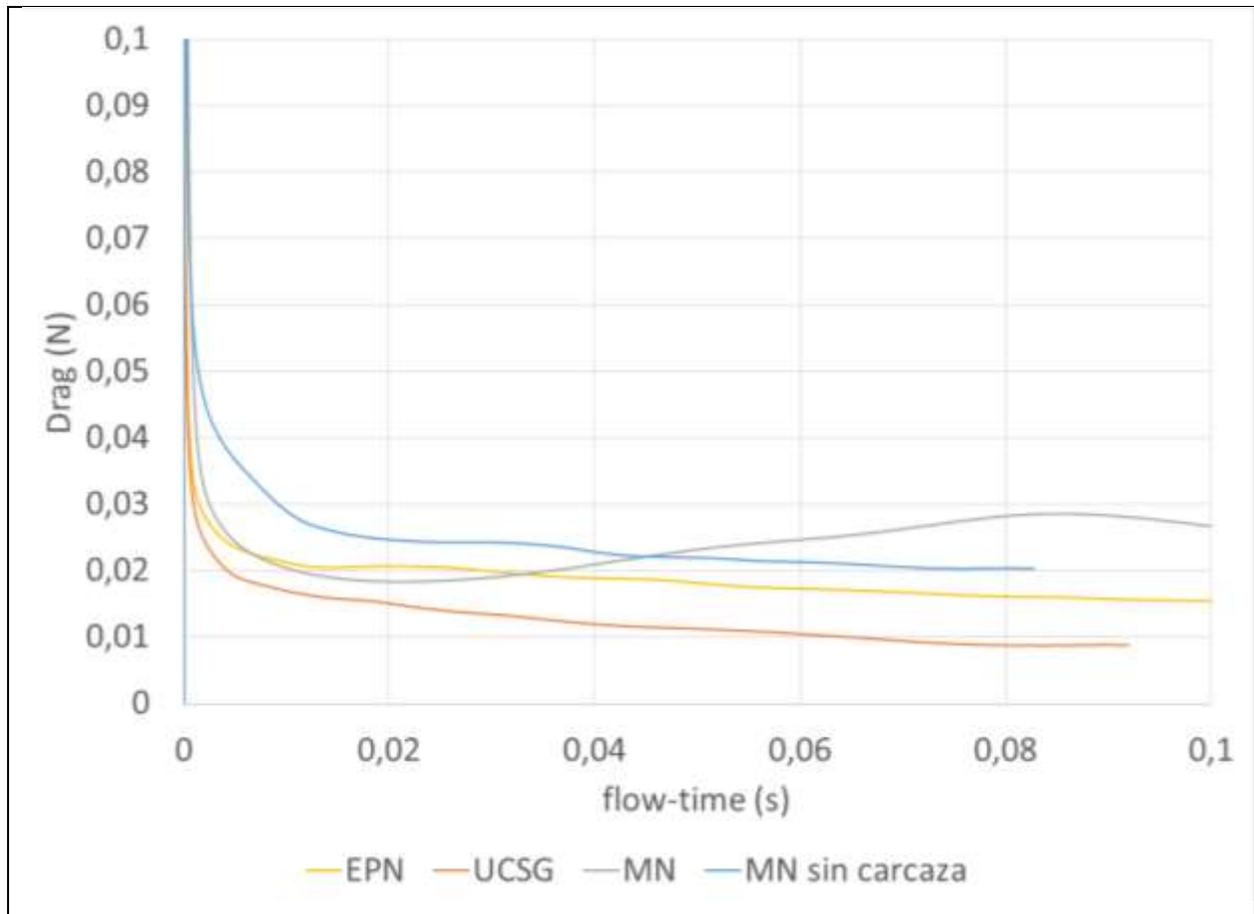
En las imágenes de la *Tabla 7* se muestra la energía cinética de la turbulencia para los tres modelos simulados. El rango de la escala de colores es el mismo para las tres imágenes. Los modelos *EPN*, *UCSG* y *MN sin carrocería* han llegado hasta tiempo de fluido de entre  $0.08$  s y  $0.1$  s, el modelo *MN* hasta un tiempo de fluido de  $0.1$  s. Como es de esperarse en el análisis aerodinámico, los modelos que presentan superficies planas, normales a la dirección del flujo, o ángulos rectos entre superficies, los modelos *EPN*, *UCSG* y *MN sin carrocería* generan estelas de turbulencia mucho más intensas, tal como se puede ver también en la *Tabla 8* que muestra un corte longitudinal de los robots de la energía estática y la energía cinética de turbulencias, lo cual refleja un gran gasto de

energía y una falta de aprovechamiento de la aerodinámica que podría mejorar el rendimiento y la velocidad. Se puede decir también que entre los referentes seleccionados, el *Modelo UCSG* presenta elementos protuberantes más pequeños, lo cual disminuye estas estelas de flujo turbulento. De forma muy diferente, para el *Modelo MN* se observa que la forma diseñada de la superficie aerodinámica mucho más limpia y estilizada permite un paso suave del flujo, reduciendo casi en su totalidad los vórtices turbulentos en la estela, lo cual evidencia que hay una mejoría entre las características de los referentes consultados y el diseño planteado, con una carrocería que mejora los déficits aerodinámicos del robot velocista.

**Tabla 6**

*Comportamiento de las fuerzas de sustentación y arrastre.*

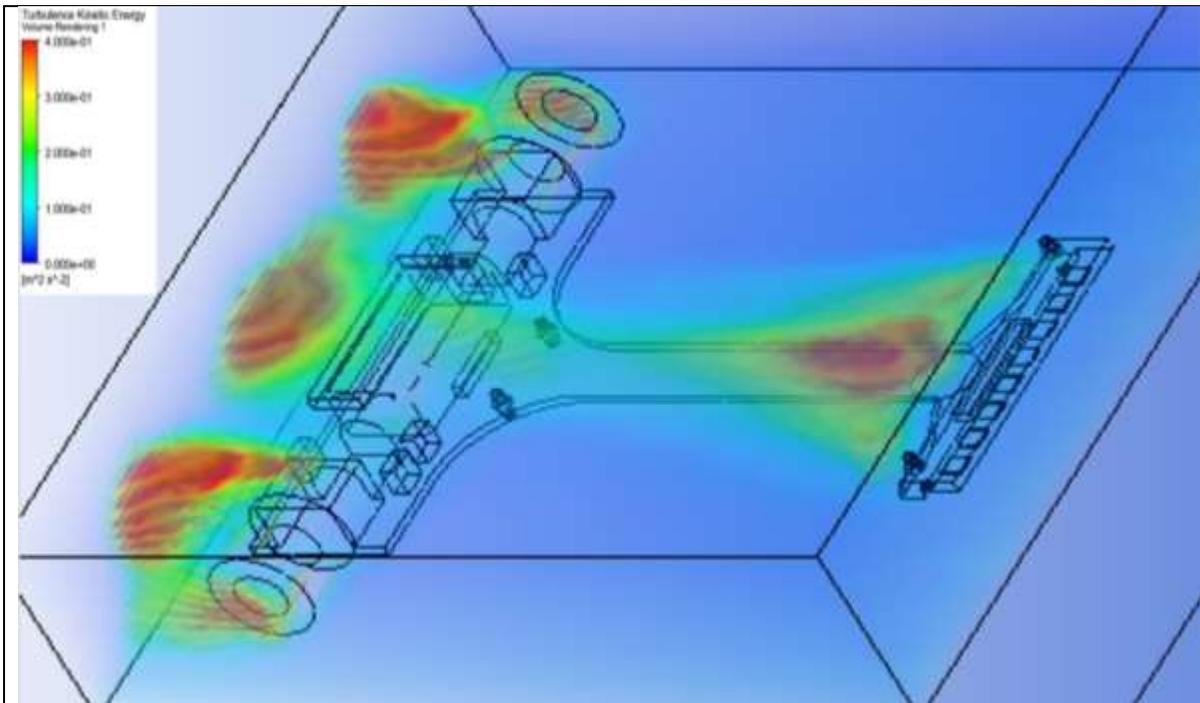




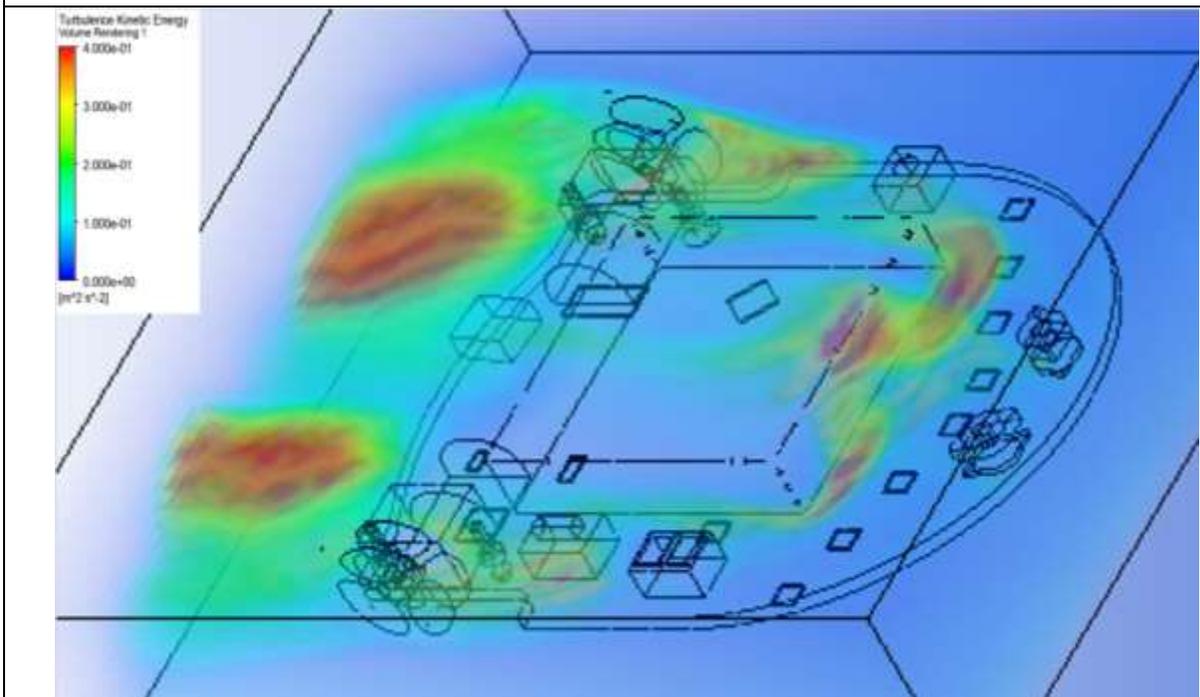
**Nota.** *Tabla del comportamiento de las fuerzas de sustentación (arriba) y arrastre (abajo) para cada uno de los diferentes modelos simulados.*

Tabla 7

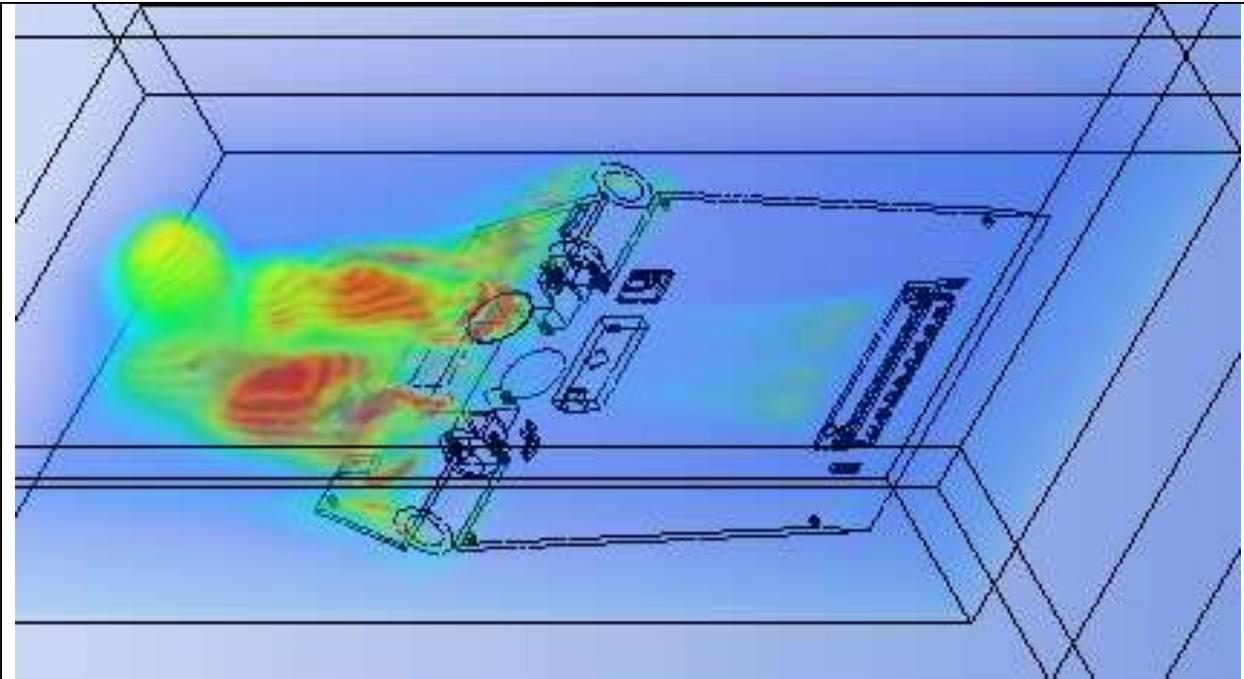
Energía cinética de turbulencia de los modelos simulados.



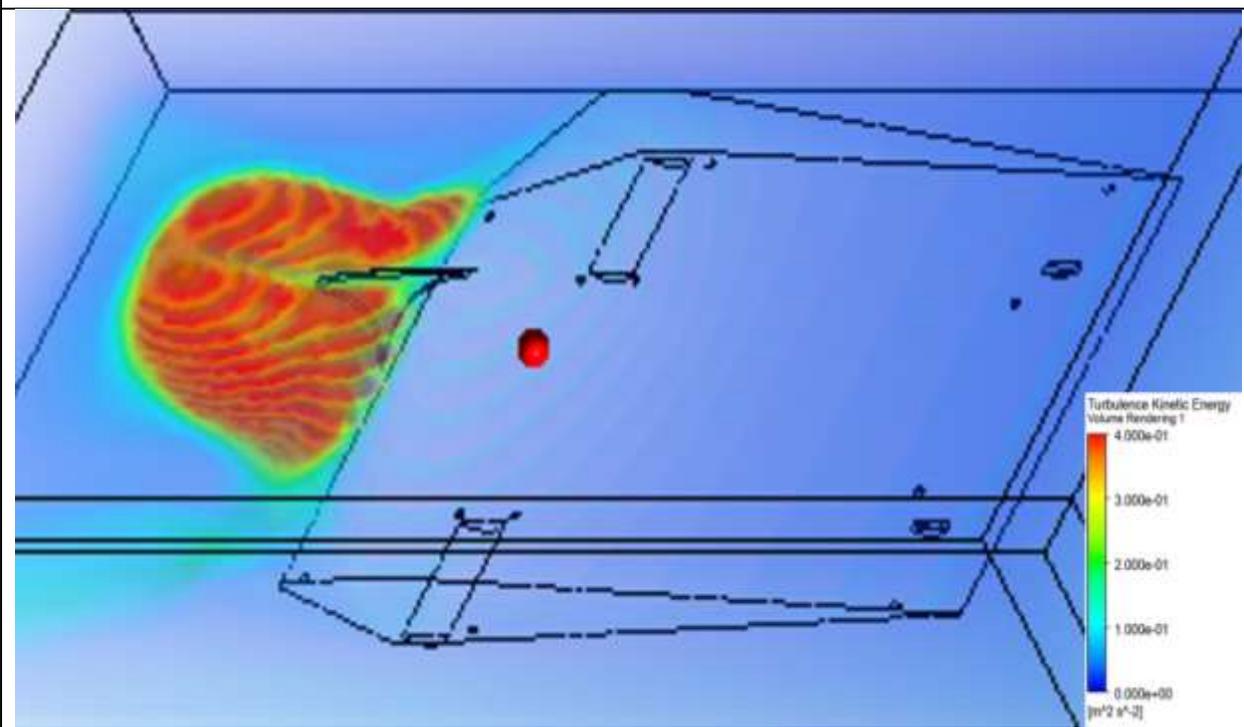
EPN



UCSG



Modelo MN sin carrocería

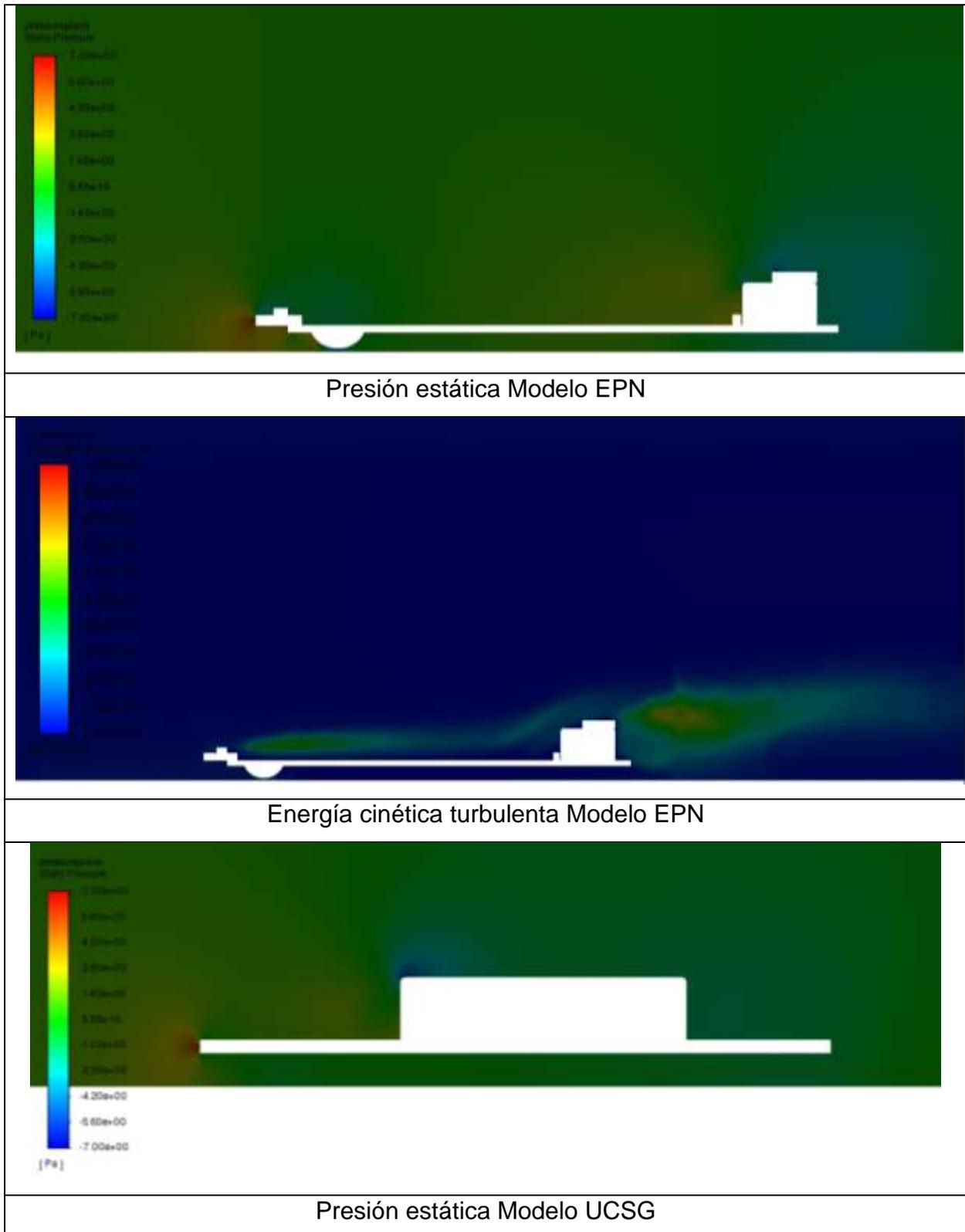


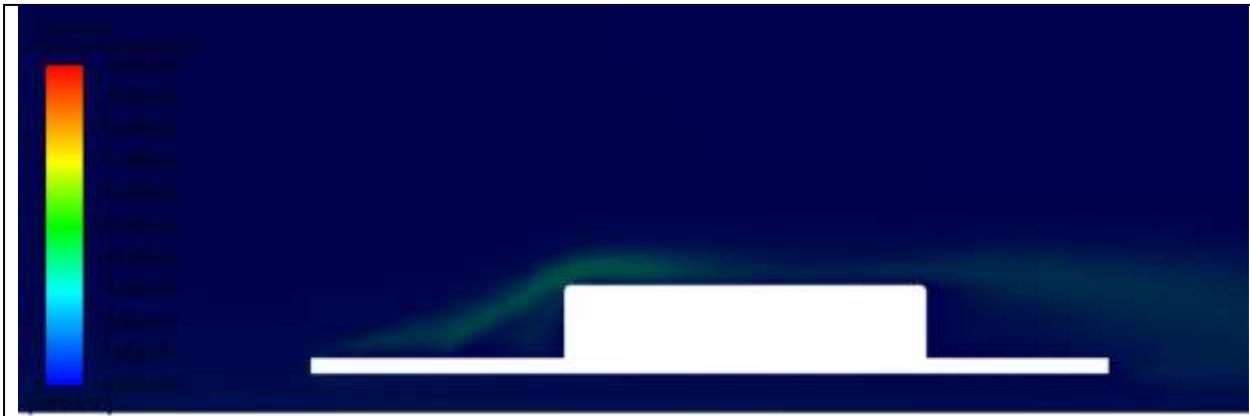
MN

**Nota.** Tabla de la energía cinética de turbulencia para cada uno de los cuatro modelos simulados.

**Tabla 8**

*Energía estática y energía cinética de turbulencia para cada uno de los modelos.*





Energía cinética turbulenta Modelo UCSG



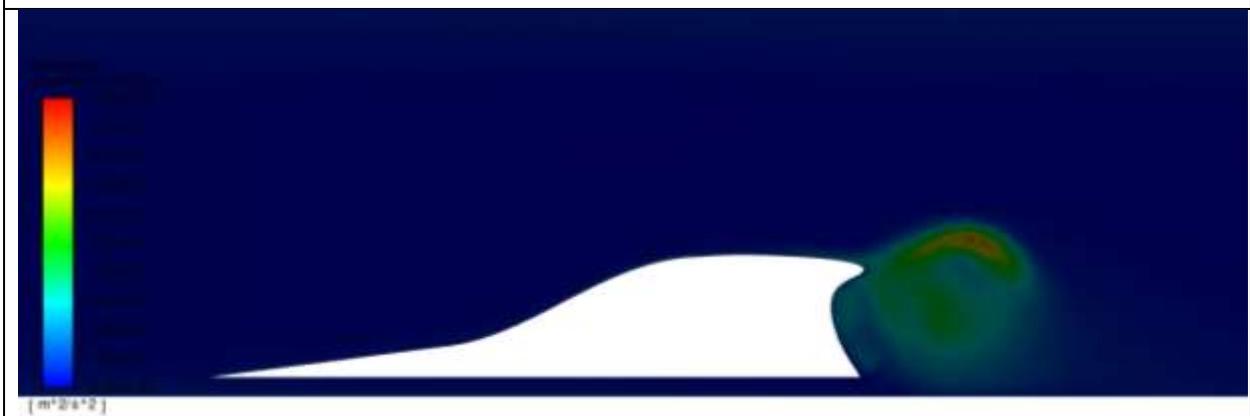
Presión estática Modelo MN sin carrocería



Energía cinética turbulenta Modelo MN sin carrocería



Presión estática Modelo MN



Energía cinética turbulenta Modelo MN

**Nota.** Tabla con imágenes de energía estática y energía cinética de turbulencia para cada uno de los modelos simulados.

### **3. CONSTRUCCIÓN Y EVALUACIÓN DEL PROTOTIPO DE ROBOT VELOCISTA**

En este tercer capítulo, se aborda la construcción y evaluación del prototipo de robot velocista, basado en el diseño aerodinámico desarrollado previamente. El objetivo es construir un prototipo que permita evaluar su eficiencia en términos de velocidad y consumo energético, y para ello se detallará el proceso de construcción del prototipo, incluyendo una descripción detallada de los materiales, componentes y técnicas empleadas. Al final de este documento, se presentarán las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en el ámbito de la construcción de robots velocistas desde una perspectiva aerodinámica, aportando así valiosos conocimientos para el avance de esta tecnología.

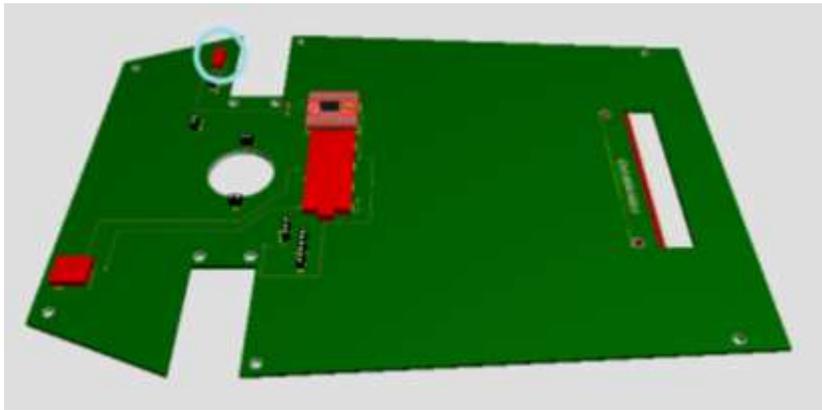
#### **3.1 Proceso de construcción del prototipo de robot velocista**

##### **3.1.1 Construcción del robot velocista**

El primer paso en la construcción del robot velocista es la planificación y definición de todos los componentes electrónicos, así como las medidas y dimensiones que este tendrá, esto incluye seleccionar sensores, motores, controladores y otros elementos necesarios, que se especifican detalladamente en las *Figuras 18 a la 25*. Con esta información, se procede a diseñar la placa de circuito impreso (*PCB*), que es el chasis del propio vehículo, tal como se evidencia en las *Figuras 13 y 14*. El diseño de la *PCB* debe considerar la mejor disposición de todos los componentes electrónicos para garantizar su funcionamiento eficiente y equilibrado. Una vez diseñada, la *PCB* se envía a un fabricante especializado para su producción con las siguientes especificaciones: *PCB* doble faz en fibra de vidrio con agujeros perforados, máscara de componentes y antisolder, considerando el agujero de 25mm de diámetro y también con el espesor más pequeño que sea posible para su fabricación.

### Figura 13

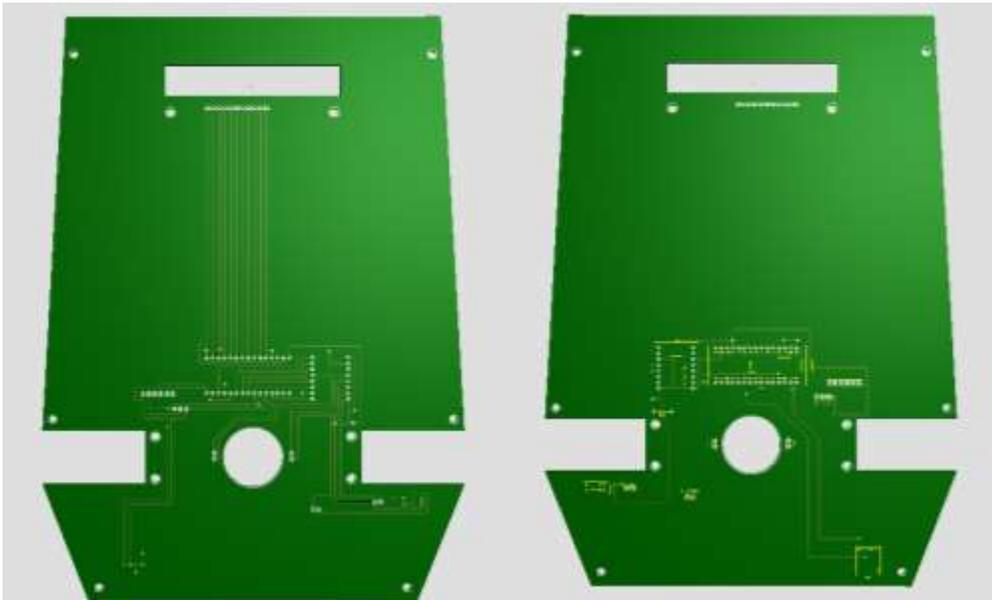
*Diseño y montaje digital de la PCB.*



**Nota.** *Diseño y montaje digital de la PCB.*

### Figura 14

*Diseño digital de la PCB por su cara inferior y superior.*



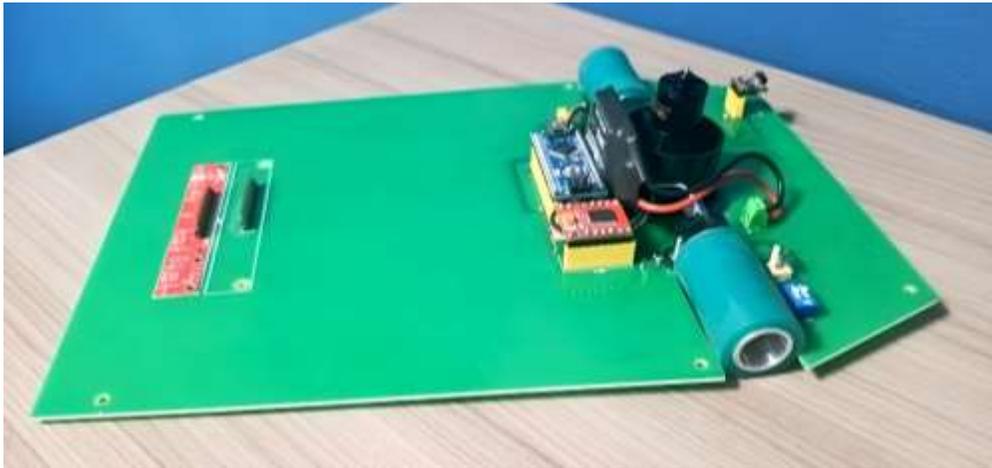
**Nota.** *Diseño digital de la PCB por su cara inferior y superior.*

Paralelamente al diseño y fabricación de la *PCB*, se realiza la programación del robot velocista que debe tener en cuenta los detalles de los componentes y su disposición en la placa. El código se crea considerando cómo cada componente interactúa y funciona en conjunto para controlar el movimiento y las funciones del robot.

Una vez recibida la *PCB* fabricada, se inicia la construcción física del robot. Los componentes electrónicos se sueldan a la *PCB*, asegurando conexiones firmes y confiables, para posteriormente, atornillar componentes adicionales en sus respectivos lugares, Figuras 15 a 17. Este proceso requiere precisión para garantizar que todos los elementos estén correctamente posicionados y conectados.

**Figura 15**

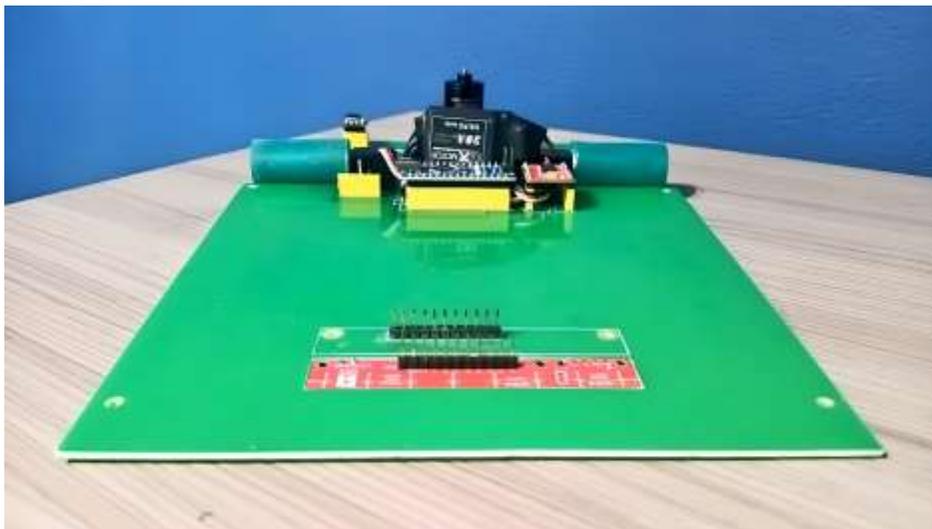
*Construcción física del robot velocista.*



**Nota.** Imagen de la construcción física del robot velocista sin la carrocería aerodinámica.

**Figura 16**

*Robot velocista ensamblado sin la carrocería aerodinámica.*



**Nota.** Imagen de la vista frontal del robot velocista ensamblado sin la carrocería aerodinámica.

**Figura 17**

*Robot velocista ensamblado sin la carrocería aerodinámica (vista superior).*



**Nota.** *Imagen de la vista superior del robot velocista ensamblado sin la carrocería aerodinámica.*

Con el hardware ensamblado, se carga la programación al controlador principal del robot, en este caso, un *Arduino Nano*, *Figura 18*. Se realizan pruebas iniciales para evaluar la correcta energización de cada componente electrónico. Este paso es crucial para identificar y corregir cualquier problema de conexión o configuración antes de proceder con pruebas más extensivas.

Finalmente, se llevan a cabo pruebas de funcionamiento detalladas para asegurarse que todos los sistemas del robot operen correctamente. Estas pruebas incluyen la verificación del movimiento, respuesta de sensores y comportamiento general del robot bajo las condiciones establecidas. En este punto se corrige cualquier problema identificado antes de proceder a la instalación de la carrocería, que se puede desmontaren en cualquier momento que se necesite.

### **3.1.2 Componentes del robot velocista**

Para la selección de cada uno de los componentes utilizados en el prototipo final se siguieron criterios de disponibilidad, eficiencia y compatibilidad, inspirados en los referentes consultados y en experimentaciones previas de la institución. La investigación

preliminar fue realizada junto al tutor del presente trabajo de grado, un experto con amplia experiencia en la construcción de diferentes tipos de robots para las competencias de Runibot en las que la Universidad de América ha participado en diversas ocasiones también como sede oficial, todo ello permitió identificar las especificaciones técnicas más adecuadas. Las diferentes opciones de componentes fueron comparadas y evaluadas a través de pruebas de rendimiento y análisis llevadas a cabo por los docentes de la universidad. Los componentes seleccionados incluyen todos los siguientes presentados desde la *Figura 18* a la *Figura 25*, seleccionados debido a su disponibilidad en la universidad y el excelente rendimiento demostrado en competencias anteriores. Todos estos elementos se probaron extensivamente en las diversas participaciones de la institución en Runibot, lo que influyó decisivamente en la selección final. Adicionalmente, no se enfrentaron desafíos significativos en el proceso de selección y no hubo colaboraciones externas, aparte de la caracterización de los referentes consultados que utilizaban, en algunos casos, los mismos componentes o similares a ellos.

**Figura 18**

*Arduino Nano V3.0.*



**Nota.** *Imagen del Arduino Nano V3.0. Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).*

**Figura 19**

*Mini Controlador Puente H L298.*



**Nota.** Imagen del mini controlador puente H L298. Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

**Figura 20**

*Sensor de línea (QTR-8A) – Arreglo análogo de (8).*



**Nota.** Imagen del sensor de línea (QTR-8A) – Arreglo análogo de (8). Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

**Figura 21**

*Motorreductor Pololu 10:1 HP 6V.*



**Nota.** Imagen del motorreductor Pololu 10:1 HP 6V. Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

**Figura 22**

*Turbina QX 1611 EDF 30mm + ESC 20A.*



**Nota.** Imagen de la turbina QX 1611 EDF 30mm + ESC 20A. Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

**Figura 23**

*Llantas Seguidor de Línea largas (23x40).*



**Nota.** Imagen de las llantas seguidor de línea largas (23x40). Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

**Figura 24**

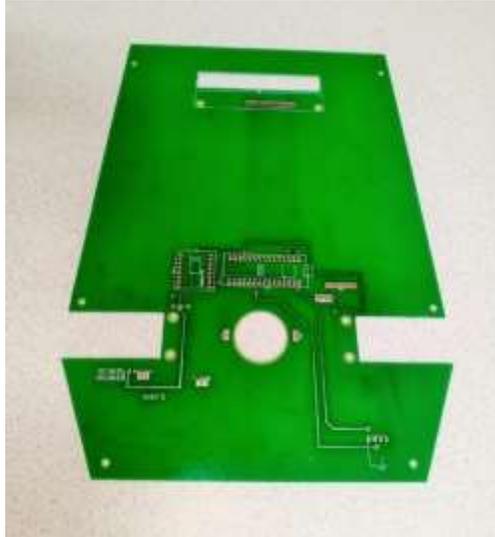
*Batería Lipo 3s 1000mAh 11.1V – 25C ~ 50C.*



**Nota.** Imagen de la batería Lipo 3s 1000mAh 11.1V – 25C ~ 50C. Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

## Figura 25

Placa PCB por su cara inferior.



*Nota.* Imagen del diseño en físico final de la placa PCB por su cara inferior.

### **3.1.3 Construcción de la carrocería del robot velocista**

El diseño de la carrocería se basa en las dimensiones y la disposición de los componentes electrónicos definidos previamente, ajustándose a las métricas de la competencia de *Runibot*[4]. Este diseño se elabora considerando no solo la cobertura y protección de los componentes, sino también la aerodinámica para mejorar el rendimiento del robot. El diseño final de la carrocería es traído del capítulo II del presente trabajo de grado que fue desarrollado y estudiado en el software *CFD Ansys Fluent* para asegurar la eficiencia aerodinámica, se exporta a un formato compatible con la herramienta *CNC* empleando el software de *Mastercam*. En este software se definen las herramientas, etapas de modelado y parámetros necesarios para crear un molde a partir de un bloque de madera, como se ve en las *Figuras 25* a la *30*, y así mismo, se simula virtualmente el proceso para verificar la precisión antes de continuar con la fabricación real.

**Figura 26**

*Proceso de preparación para modelamiento CNC.*



**Nota.** *Imagen del bloque de madera en proceso de preparación para modelamiento CNC.*

**Figura 27**

*Madera montada en la maquina CNC.*



**Nota.** *Imagen del bloque de madera montado en la maquina CNC.*

Una vez creado el molde con la máquina CNC, se realizan ajustes como pulir de forma manual algunas partes del mismo y perfeccionarlo ya que este proceso incluye detalles que la máquina no pudo realizar debido a la minuciosa precisión en los detalles que solo las manos humanas pueden ofrecer, asegurando que el molde esté listo para la siguiente etapa. Con el molde terminado, se prepara una lámina de acrílico termoformable, *Figura 32*, que se calienta controladamente hasta su punto de plastificación y luego se presiona sobre el molde, asegurando que tome su forma detallada. Este proceso requiere igual precisión para evitar deformaciones y garantizar un moldeado exacto. Después del termoformado, se deja enfriar el acrílico en el molde hasta que sea posible desmoldarlo, y una vez esto, se cortan y pulen los sobrantes, dejando la carrocería lista para ser montada como la cubierta en el robot.

**Figura 28**

*Bloque de madera en el primer proceso de modelamiento.*



**Nota.** *Bloque de madera en el primer proceso de modelamiento en el cual se quería retirar la mayoría del material innecesario para la conformación del molde final.*

**Figura 29**

*Bloque de madera en el segundo proceso de modelamiento.*



**Nota.** *Bloque de madera en el segundo proceso de modelamiento en el cual se quería detallar el acabado suave y curvo de la superficie para la conformación del molde final.*

**Figura 30**

*Molde de madera en proceso final de rectificación y detallado.*



**Nota.** Molde de madera listo para el proceso final de rectificación y detallado a mano.

**Figura 31**

*Molde de madera listo para proceso final.*



**Nota.** Otra vista del molde de madera listo para el proceso final.

### Figura 32

*Acrílico termoformable.*



**Nota.** *Acrílico termoformable que se convertirá en la carrocería y cubierta final del robot velocista.*

En este proceso detallado de construcción del prototipo de robot velocista se logró crear el modelo físico del vehículo, *Figuras 33 y 34*, totalmente funcional, y se diseñó el molde que fue empleado en la elaboración de la carrocería, la cual brinda una formidable mejora al rendimiento del robot, como ya se ha podido llegar a evidenciar en el capítulo II. Con todo ello se asegura que cada uno de los aspectos estén cuidadosamente ejecutados, proporcionando una base sólida y confiable para el desarrollo y la mejora continua en futuros proyectos y en la evolución de estas tecnologías en competencias mundiales.

**Figura 33**

*Prototipo final ensamblado.*



**Nota.** Prototipo final completamente ensamblado y funcional del robot velocista.

**Figura 34**

*Prototipo final con la carrocería abierta.*



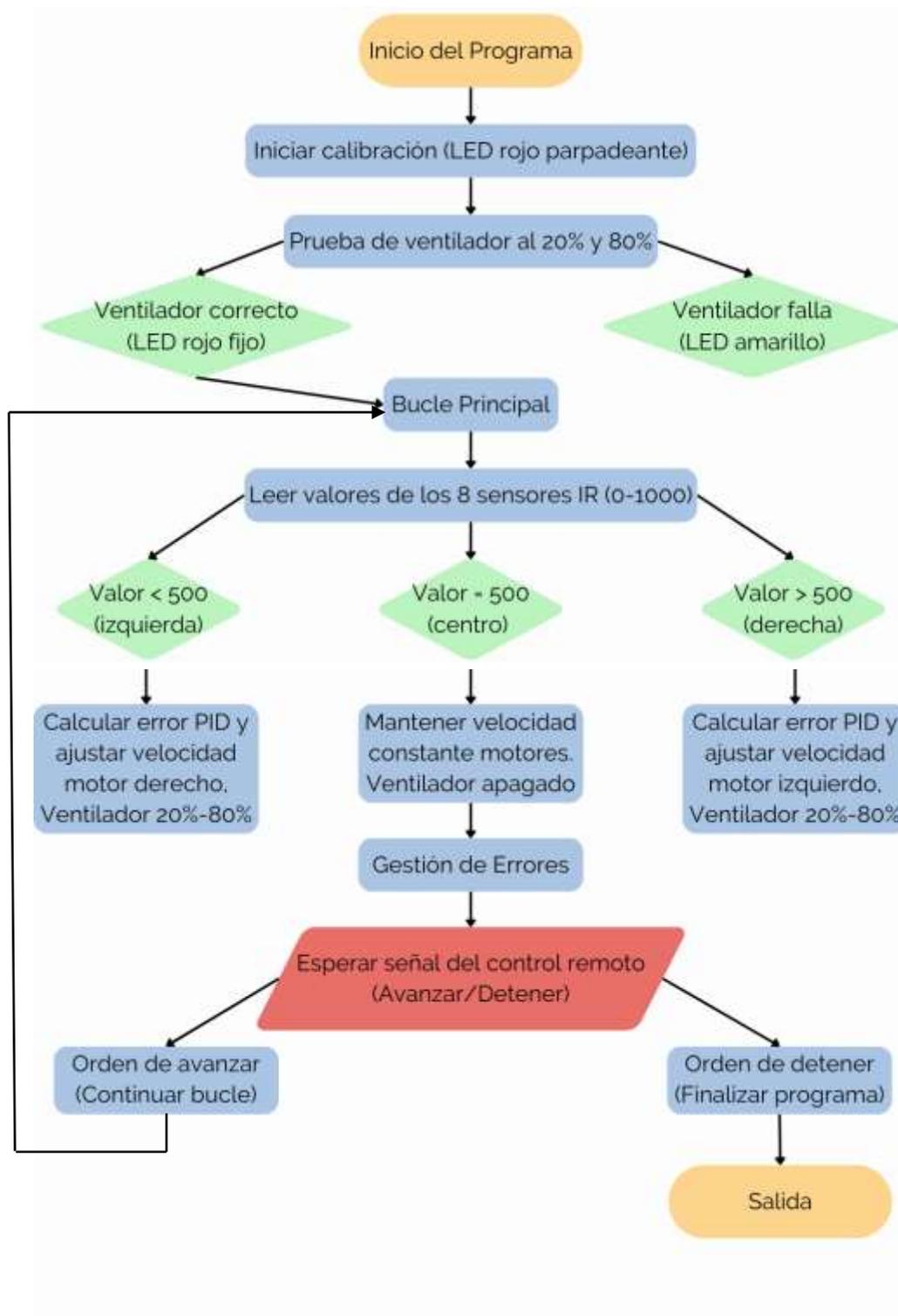
**Nota.** Prototipo final del robot velocista con la carrocería abierta.

### 3.2 Funcionamiento del programa del robot velocista

El programa de funcionamiento del robot velocista seguidor de línea, cuyo diagrama de flujo se puede detallar en la *Figura 35*, comienza con la calibración inicial de los sensores, haciendo una correcta lectura que diferencia entre el color negro de la franja a seguir, y que contrasta con el color blanco de la pista, durante la calibración de los sensores un LED rojo parpadea indicando que ese es el preciso momento para llevar a cabo dicha etapa inicial del robot. De manera simultánea y de forma automática se prueba el ventilador al 20% y 80% de su capacidad, si todo el proceso fue hecho de manera exitosa y el vehículo funciona correctamente, el LED rojo permanece encendido de forma fija, y si falla, se enciende un LED amarillo. En el bucle principal, el programa lee los valores de los 8 sensores IR, que varían de 0 a 1000, si el valor leído es 500, el robot mantendrá una velocidad constante en las ruedas y en ambos motores, mientras el ventilador permanecerá apagado. Si el valor es menor de 500, el robot se estará desviando hacia la izquierda por lo cual se calcula el error con el método de *estrategias de control PID* para ajustar la velocidad de la rueda derecha y el ventilador se activa entre el 20% y el 80%. Si el valor es mayor de 500, el robot se estará desviando hacia la derecha, calculando nuevamente el error para ajustar la velocidad de la rueda izquierda y activar el ventilador de la misma manera. Cuando el robot se sale de la línea, el ventilador se activa para frenar el avance. El programa también está preparado para recibir órdenes de un control remoto que maneje al usuario a distancia, si se recibe la señal de "detener", finaliza el programa, y si recibe la señal de "avanzar", continúa el bucle. El programa solo se detiene cuando el usuario envía la orden de detener mediante el control remoto.

**Figura 35**

Diagrama de flujo del programa del robot Velocista MN.



**Nota.** Diagrama de flujo del funcionamiento del programa del robot velocista MN.

### 3.3 Resultados de pruebas prácticas del robot velocista construido

Las pruebas prácticas realizadas al diseño final del robot velocista, después de completar el análisis *CFD* en *Ansys Fluent* y la programación, incluyeron mediciones de velocidad y consumo energético. Estas pruebas fueron grabadas en videos de alta calidad para analizar los tiempos con precisión fotograma a fotograma, tal como se puede ver en las *Figuras 37 a la 39*.

La primer prueba fue en línea recta a lo largo de 1760 milímetros (1.76 metros), *Figura 37 y 38*, tal y como se simuló en *CFD*, realizada con y sin la carrocería y sin el uso del ventilador para disminuir el arrastre al máximo. Sin la carrocería, el robot recorrió la distancia en 1.42 segundos, con un tiempo de estabilización de 1.1 segundos y una velocidad máxima de 1.23 metros por segundo (4.44 kilómetros por hora). Con la carrocería, el tiempo del recorrido fue de 1.26 segundos, con un tiempo de estabilización de 0.10 segundos y una velocidad máxima de 1.39 metros por segundo (5.02 kilómetros por hora). La segunda prueba se llevó a cabo en un óvalo, *Figura 39*, también con y sin carrocería, en esta ultima el robot recorrió medio óvalo en 2.22 segundos, y con la carrocería en 2.09 segundos.

Para evaluar la eficiencia energética, se midió el consumo de la batería (Lipo 3s 1000mAh), *Figura 24*, antes y después de cada recorrido. La batería se cargó completamente antes de cada prueba, y se utilizó un cargador baterías LiPo IMAX B6, *Figura 36*, como medidor de corriente para registrar la cantidad de miliamperios-hora (*mAh*) consumidos durante los recorridos. En la prueba sin carrocería, el robot completó 30 vueltas al óvalo, quedando 201 *mAh* en la batería después de aproximadamente 2.2 minutos de uso continuo. En la prueba con carrocería, el robot completó el mismo número de vueltas con 266 *mAh* restantes en la batería después de aproximadamente 2.0 minutos de uso continuo.

La eficiencia energética se calcula comparando el consumo de energía en ambas condiciones. Sin carrocería, el consumo fue de 799 *mAh* (1000 *mAh* iniciales menos 201 *mAh* restantes), con carrocería, el consumo fue de 734 *mAh* (1000 *mAh* iniciales menos 266 *mAh* restantes). A continuación, para determinar el porcentaje de energía restante

en la batería después de las pruebas, se deben comparar los *mAh* restantes con los *mAh* iniciales, utilizando la siguiente fórmula para calcular el porcentaje de energía restante:

$$\text{Porcentaje de energía restante} = \left( \frac{\text{mAh restantes}}{\text{mAh iniciales}} \right) \times 100$$

Comprobando así, que el porcentaje de energía restante para la prueba sin carrocería es de un 20.1%, y en la prueba con carrocería se obtiene un 26.6% de energía restante. Para calcular la mejora en la eficiencia energética en términos de porcentaje, se comparan la energía restante en ambas condiciones para así determinar el incremento en eficiencia al usar la carrocería. La fórmula para calcular esta mejora de eficiencia es igual al porcentaje de energía restante con carrocería, menos el porcentaje sin carrocería, y todo esto sobre el porcentaje de energía restante sin carrocería, para finalmente, multiplicar dicho resultado por cien y obtener el valor final.

$$\text{Mejora en eficiencia (\%)} = \left( \frac{26.6\% - 20.1\%}{20.1\%} \right) \times 100$$

$$\text{Mejora en eficiencia (\%)} = \left( \frac{6.5\%}{20.1\%} \right) \times 100$$

$$\text{Mejora en eficiencia (\%)} = 32.34\%$$

Demostrando que el robot con carrocería consume menos energía para completar el mismo recorrido, mejorando su eficiencia energética en un 32.34%.

No se midieron voltajes durante las pruebas prácticas porque la medición del consumo energético en términos de miliamperios-hora (*mAh*) proporcionaba una evaluación directa y precisa del consumo de energía de la batería en condiciones de uso continuo del robot, esto se puede evidenciar claramente en el libro *Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs*[13], del autor *Davide Andrea*, en donde aborda la importancia de medir la capacidad de las baterías en miliamperios-hora (*mAh*) en varios capítulos, particularmente en el *capítulo 3: BMS Functions*, donde se discuten las funciones del sistema de gestión de baterías y cómo la medición en *mAh* proporciona una evaluación directa y precisa del consumo energético en distintas condiciones de uso continuo. La medición de *mAh* es una práctica común para evaluar la capacidad y el consumo de

energía de las baterías recargables, tal como se evidencia en el texto mencionado, permitiendo comparar el rendimiento energético bajo diferentes configuraciones del robot, las cuales son con y sin la carrocería. En este contexto, la medida de *mAh* es más relevante para determinar el consumo total de energía y la eficiencia energética del robot bajo condiciones de carga específicas. Sin embargo, en futuros estudios, se podrían incluir mediciones de voltaje para complementar los datos de consumo de corriente y proporcionar una visión más completa del rendimiento eléctrico del sistema.

Las mejoras logradas con la carrocería fueron notables, ya que el tiempo de estabilización se redujo drásticamente, para las pruebas en el tramo de recta, aumentando la velocidad máxima del robot. Además, la eficiencia energética mejoró para las pruebas en ovalo, demostrando que la carrocería aerodinámica no solo optimiza la velocidad, sino también reduce el consumo de energía. Estos resultados subrayan la importancia de la construcción de un prototipo de robot velocista con base al diseño aerodinámico, que permitió evaluar su eficiencia en cuanto a velocidad y consumo energético, comparándolo con los referentes consultados, representando un avance revolucionario en la construcción y análisis de estos prototipos, con implicaciones significativas para futuras competencias y desarrollos tecnológicos en este campo.

**Figura 36**

*Cargador baterías LiPo IMAX B6.*



**Nota.** Imagen del cargador baterías LiPo IMAX B6. Tomado de: [ja-bots.com/producto](http://ja-bots.com/producto).

**Figura 37**

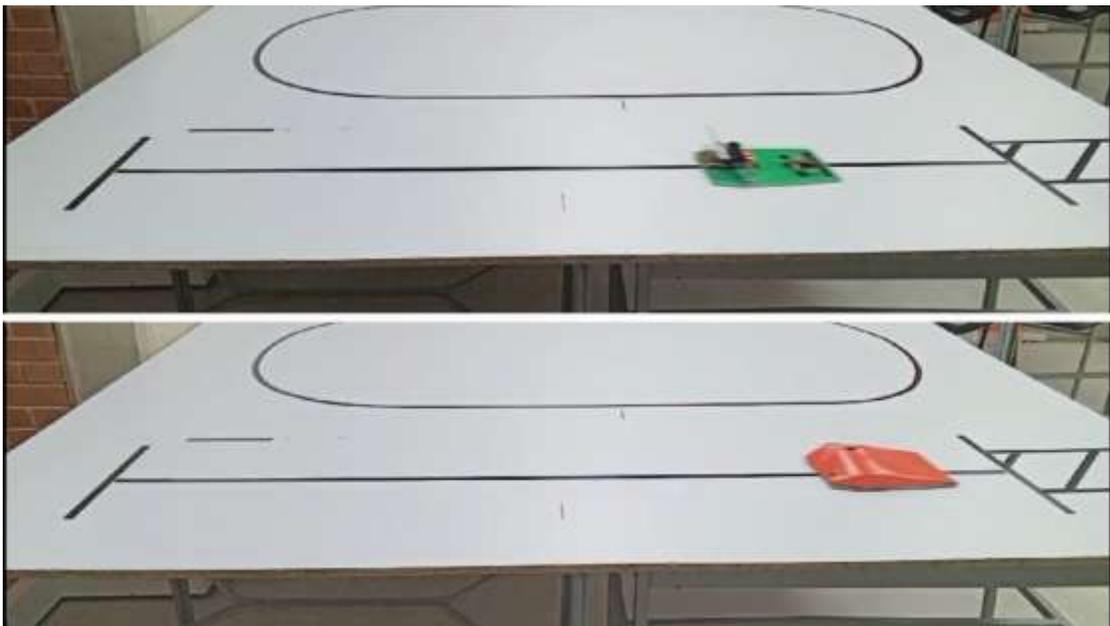
*Pruebas prácticas del robot velocista en recta.*



**Nota.** Imagen tomada del video de las pruebas prácticas del robot velocista en el tramo de recta.

**Figura 38**

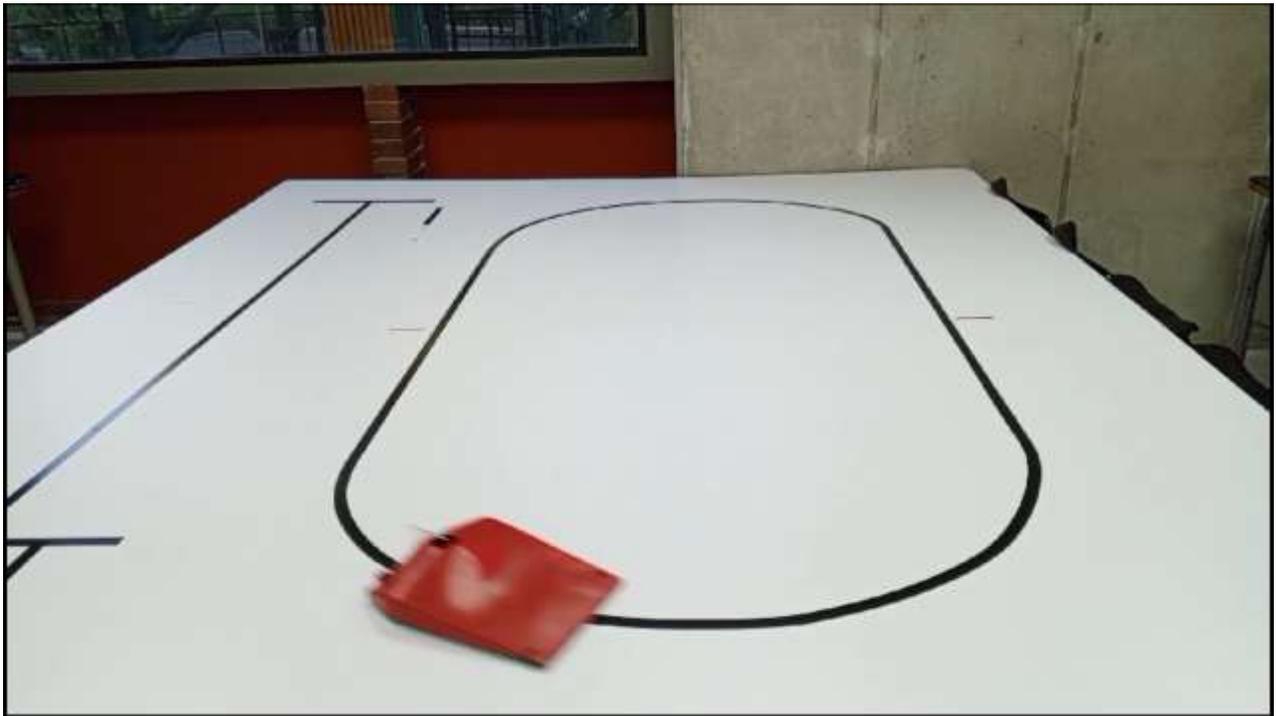
*Comparativa visual del recorrido.*



**Nota.** Imagen comparativa visual del recorrido, con y sin la carrocería, en el mismo tramo de recta y lapso de tiempo.

**Figura 39**

*Pruebas práctica del robot velocista en el ovalo.*



**Nota.** *Imagen tomada del video en las diversas pruebas prácticas del robot velocista en el ovalo.*

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo de grado ha respondiendo a la pregunta de cómo construir un prototipo de robot velocista a partir de un estudio aerodinámico, demostrado la importancia de la aerodinámica en sus diseño y rendimiento. A través de un análisis exhaustivo y la aplicación de principios aerodinámicos básicos, se ha logrado desarrollar un prototipo que mejora su desempeño en términos de sustentación y arrastre, lo cual impacta directamente en la velocidad y eficiencia energética.

Tras la exitosa identificación de las variables que más posibilidad tienen de llegar a impactar el diseño del prototipo de robot velocista, se pudieron hallar datos que son fundamentales, y también gracias a la caracterización de los referentes participantes en competencias mundiales de la categoría. Adicionalmente, la importancia de la aerodinámica se ve reflejada en la aplicación de conceptos tales como el flujo de aire alrededor del vehículo, ya que esto ha mostrado una mejora en el rendimiento del prototipo. Dichos principios, ampliamente utilizados en la industria automotriz y de competición, han sido adaptados con éxito en el trabajo de grado, también la construcción y planificación detallada para el diseño aerodinámico del prototipo, incluyendo la PCB como chasis y la incorporación de una carrocería, han permitido un ensamblaje eficiente y una mejora en el rendimiento general del robot. Tras diseñar un modelo aerodinámico para la construcción del prototipo de robot velocista, y utilizando las variables de diseño identificadas que se ajustan a las mejores características de los referentes consultados, las pruebas realizadas en el software *CFD* de Ansys Fluent, en cuanto a la evaluación del desempeño, reflejan una disminución en las turbulencias que generan vacíos de aire y choques directos con superficies perpendiculares al movimiento. Gracias a la aerodinámica aplicada se ha logrado conseguir que dichos vacíos y superficies rectas que generaban un mayor gasto de energía en los referentes consultados, no impacten de manera tan directa y agresiva al prototipo robótico propuesto, ya que tras construir el vehículo velocista con base al diseño aerodinámico, se pudo evidenciar su mejora en cuanto a velocidad y consumo energético. También se puede hacer la comparación con los referentes consultados, ya que se necesita menos esfuerzo del prototipo final para poder seguir avanzando en la dirección deseada y adicionalmente, una mejora de la

velocidad. Todos estos datos están respaldando así la construcción de un robot velocista desde un estudio aerodinámico y la efectividad del diseño implementado.

En resumen, este trabajo de grado acerca de la construcción de un prototipo de robot velocista desde un estudio aerodinámico, ha sentado las bases para una nueva era en sus diseños, integrando dichos principios para mejorar su rendimiento. Se espera que las futuras investigaciones sigan este camino, explorando nuevas tecnologías y enfoques para continuar mejorando el diseño y la eficiencia de estos fascinantes vehículos robóticos.

## 5. RECOMENDACIONES

En cuanto a la innovación en competencias de robots velocistas, este trabajo abre nuevas posibilidades para el diseño, marcando un hito en la integración de la aerodinámica en este campo. Se espera que en futuras competencias se vea un aumento en el uso de diseños aerodinámicos, mejorando el nivel y el rendimiento de los participantes. Se hace un hincapié en las recomendaciones de profundización de estudios en aerodinámica avanzada, también se recomiendan análisis más detallados, utilizando simulaciones *CFD* mucho más complejas y pruebas en túneles de viento para obtener datos más precisos y optimizar aún más el diseño de los robots velocistas. La investigación y uso de materiales más avanzados y ligeros pueden contribuir a reducir el peso de los robots y mejorar su rendimiento aerodinámico y estructural. El uso de compuestos y materiales con propiedades específicas para aplicaciones con dichos fines debería ser explorado, abriendo así más campos de desarrollo e investigación en el tema de la robótica.

Así mismo, es de vital importancia continuar explorando y perfeccionando el diseño de la carrocería, buscando formas que reduzcan aún más el arrastre y mejoren la sustentación. Un diseño modular de la carrocería podría permitir ajustes rápidos y personalizados para diferentes condiciones de competencia y también, la incorporación de aerodinámica activa, sin duda alguna llevara las validas de robots velocistas seguidores de línea aún más lejos resultando en eventos más competitivos, complejos y emocionantes. Todo ello junto con la integración de sensores y tecnologías avanzadas de retroalimentación en tiempo real para ajustar dinámicamente el diseño aerodinámico durante la competencia, permitiría una mejora constante y una adaptación rápida a diferentes entornos de carrera. El realizar estudios comparativos con otros robots velocistas, utilizando diferentes enfoques aerodinámicos, podría validar aún más las conclusiones obtenidas y proporcionar una base sólida para futuras investigaciones.

Finalmente, la colaboración multidisciplinaria entre diferentes disciplinas de ingeniería, incluyendo mecánica, electrónica, software y demás, para desarrollar diseños más integrales y avanzados, podrá fomentar la integración de conocimientos y técnicas de distintas áreas que pueden llevar a innovaciones significativas en el diseño de robots velocistas.

## REFERENCIAS

- [1] F. B. V. Benitti, “Exploring the educational potential of robotics in schools: A systematic review”, *Comput Educ*, vol. 58, núm. 3, pp. 978–988, 2012, doi: 10.1016/J.COMPEDU.2011.10.006.
- [2] by MarketSplash Team, “Más De 100 Estadísticas Importantes Sobre Automatización En 2023”. Consultado: el 8 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://marketsplash.com/estadisticas-de-automatizacion/>
- [3] by Mordor Intelligence team, “Mercado de robótica industrial - Estadísticas de participación, tamaño e industria”. Consultado: el 8 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/industrial-robotics-market>
- [4] Asociación red universitaria Bogotá, “RUNIBOT – Educación basada en Robótica de Competencia”. Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.runibot.com/>
- [5] RoboManiacs, “Facebook RoboManiacs Contest”. Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.facebook.com/robomaniacs.robo.5/>
- [6] Sharma Rajkumar, “Technoxian - World Robotics Championship”. Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.technoxian.com/>
- [7] Salameh Malik, “Line Following Robot Competition : vTools Events”. Consultado: el 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://events.vtools.ieee.org/m/367579>
- [8] YEISON DANIEL TAPIERO SANTA, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN ROBOT SEGUIDOR DE LÍNEA DE COMPETENCIA PARA LA CATEGORÍA VELOCISTA”, Universidad de Ibagué, Ibagué, 2019. Consultado: el 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12313/1297>
- [9] JORGE ANDRÉS VERA ARENAS y EDWARD ANDRÉS ALEJANDRO PROAÑO, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS ROBOTS SEGUIDORES DE LÍNEA

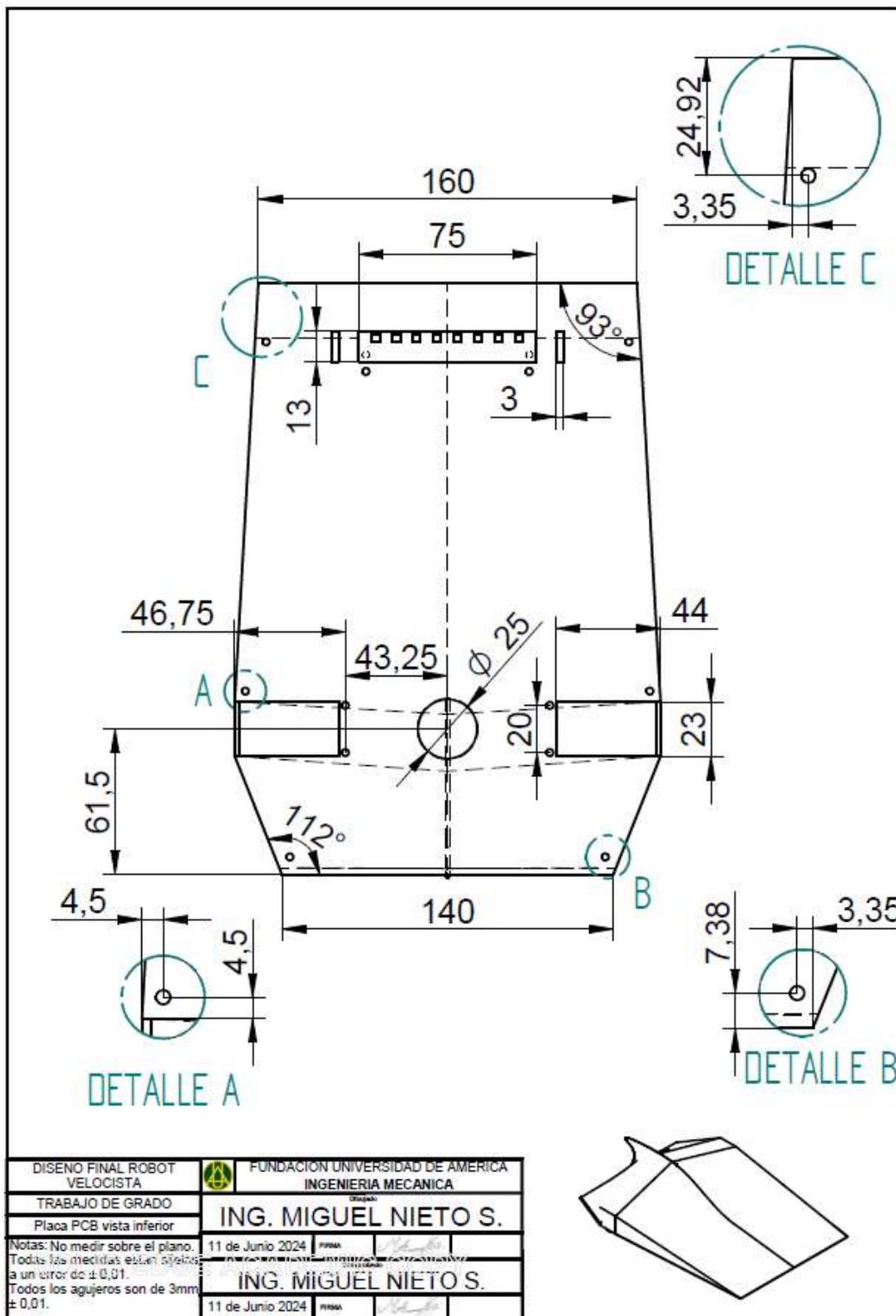
MODALIDAD VELOCISTA Y DESTREZA PARA PARTICIPACIONES EN CONCURSOS DE ROBÓTICA”, UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL, Guayaquil, 2016. Consultado: el 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5445>

- [10] ROMO CAICEDO DIEGO ANTONIO y TOCA TRUJILLO LUIS EDISON, “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE DOS ROBOTS DE COMPETENCIA (SEGUIDOR DE LÍNEA ESPECIALIDAD VELOCISTA, LABERINTO)”, ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL, Quito, 2016. Consultado: el 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/16546>
- [11] S. de las Heras, *Mecánica de fluidos en ingeniería*, Primera Edición., vol. 1. Barcelona: SERVICE POINT, 2012. Consultado: el 5 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/41821028.pdf>
- [12] J. Katz, “Aerodynamics of Race Cars”, 2005, doi: 10.1115/1.4040501.
- [13] D. Andrea, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, ARTECH HOUSE. Norwood (Massachusetts): ARTECH HOUSE, 2010. [En línea]. Disponible en: [www.TechnicalBooksPDF.com](http://www.TechnicalBooksPDF.com)

## **ANEXOS**

Figura 40

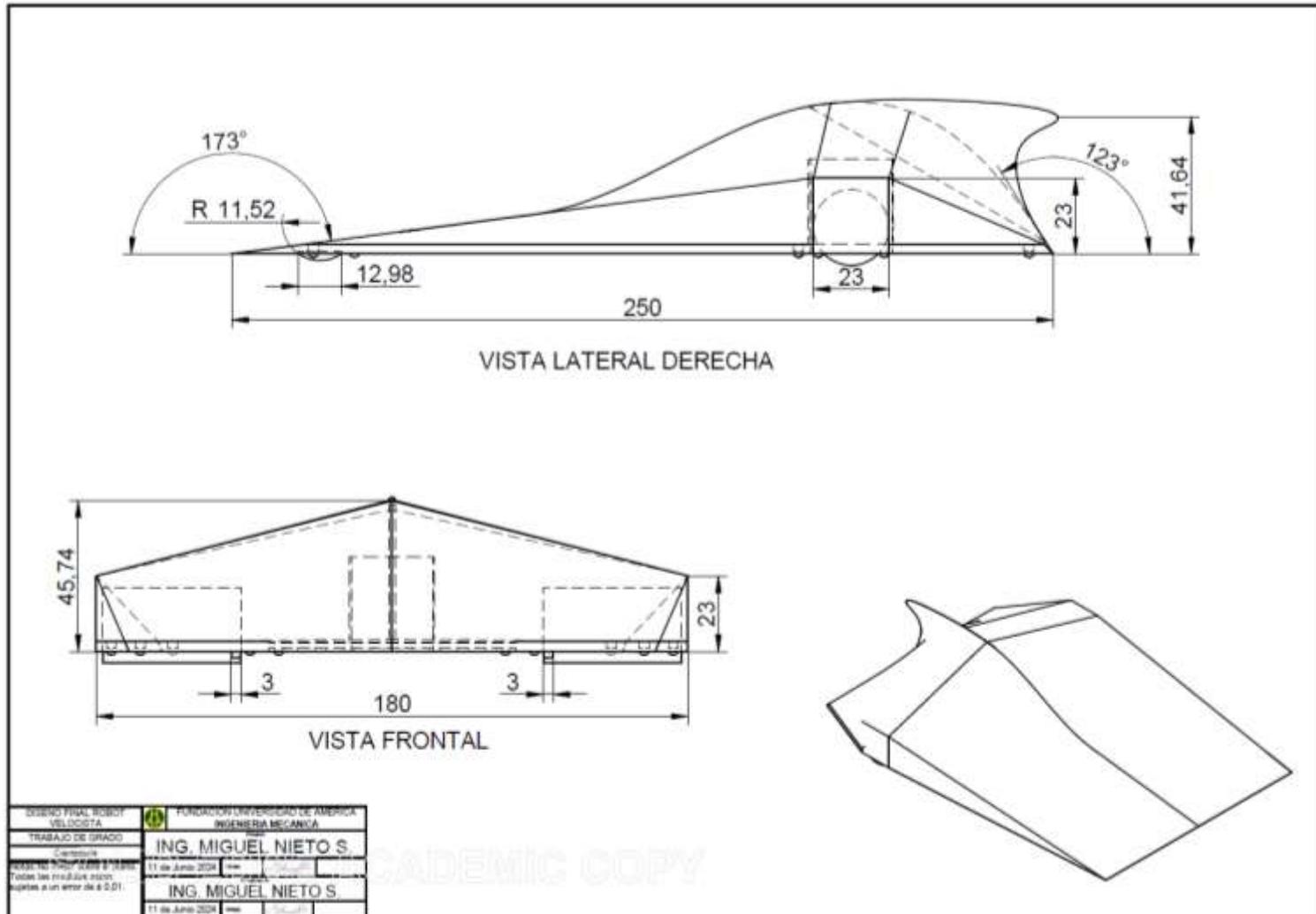
Planos de la placa PCB.



**Nota.** Imagen del plano (vista inferior) de la placa PCB del robot velocista diseñado.

**Figura 41**

*Planos de la carrocería del robot velocista.*



**Nota.** Imagen de los planos en diferentes vistas de la carrocería del robot velocista diseñado.

