

Fundación Universitaria Los Libertadores

Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas Programa de Ingeniería Aeronáutica Bogotá D.C, Colombia 2018

Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

LOS LIB<u>Presentado por</u> Henry Fernando Osorio Muñoz

en cumplimiento parcial de los requerimientos para optar al título de

Ingeniero Aeronáutico

Dirigida por MSc. John Jairo Vaca Ríos Codirector PhD. Salvador Vargas Díaz

Presentada a Programa de Ingeniería Aeronáutica Fundación Universitaria Los Libertadores Bogotá DC, Colombia.

2018

Notas de aceptación



LOS LIBERTADORES Fundación Universitaria

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá DC, Diciembre de 2018.



LOS LIBERTADORES FUNDACIÓN UNIVERSITARIA

Las directivas de la Fundación Universitaria Los Libertadores, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores y a los resultados de su trabajo.

Dedicatoria



Quiero dedicar este proyecto a el alguien que me ha acompañado durante toda mi etapa de formación universitaria, a mi amigo inseparable, por quien he alcanzado mis mayores conquistas, para Dios sea este y todos los logros que me permita alcanzar.
A mis padres, Enrique y Rosalba Osorio, este es el fruto de todo su amor, apoyo y esfuerzos; los amo y siempre les estaré profundamente agradecido. Y como olvidar a mis pastores Samir y Diana Diaz mis amigos de toda la vida.

Agradecimientos



Mil gracias a cada una de las personas que me acompañaron a emprender este proyecto:

A mi familia y amigos por ser mi mayor motivación para alcanzar mis sueños, por creer siempre en mi y servir de aliento en constantes oportunidades.

De manera especial agradezco a mi tutor de trabajo de grado, MSc. John Jairo Vaca Ríos, por su constante ayuda y apoyo incondicional; a la Ing. Marcela Rios Romero por su mano amiga a lo largo de mi formación académica, y al excelente equipo de docentes de ingeniería aeronáutica de la Fundación Universitaria Los Libertadores, a todos ellos me faltarían palabras para agradecerles por poder aprender de ustedes.

Gracias al grupo de investigación DETECAL de la Universidad Libre, en especial al M.Sc.Ing. Fredy Aguirre Gómez y el PhD. Salvador Vargas Díaz, por permitirnos trabajar en sinergia para la realización de este estudio, por su apoyo, interés y hospitalidad prestada a lo largo de este proceso.

Índice general

1	Intr	roducción	1
2	Pla	anteamiento del problema	3
	2.1	Objetivos	. 4
		2.1.1 Objetivo General	. 4
		2.1.2 Objetivos Específicos	. 4
	2.2	Justificación	. 5
3	Ma	arco teórico	6
	3.1	Shell Eco Marathon	. 6
	3.2	Aerodinámica en vehículos	. 8
	3.3	Experimentación en túnel de viento	. 10
		3.3.1 Túneles de viento \ldots	. 10
		3.3.2 Similitud Dinámica	. 11
		3.3.3 Correcciones de capa limite	. 12
		3.3.4 Métodos de Visualización del flujo	. 13
4	Met	etodología aplicada	14
	4.1	Fase I: Soporte teórico	. 15
		4.1.1 Elección del modelo de Vehículo	. 15
	4.2	Fase II: Elaboración del modelo a escala	. 16
		4.2.1 Modificación al diseño CAD	. 16
		4.2.2 Modificaciones al modelo a escala	. 18
	4.3	Fase III: Experimentación en el túnel de viento	. 18
		4.3.1 Aplicación de métodos de Visualización	. 19
		4.3.2 Adquisición de datos de presión	. 20
	4.4	Fase IV: Procesamiento de datos	. 22

5	Aná	ilisis y resultados	25	
	5.1	Análisis de la distribución de coeficientes de presión sobre el modelo	25	
		5.1.1 Resultados de las pruebas en túnel a 14 m/s \ldots	26	
		5.1.2 Resultados de las pruebas en túnel a 24 m/s \ldots	28	
		5.1.3 Resultados de las pruebas en túnel a 30 m/s \ldots	30	
		5.1.4 Comparación de distribución de Coeficientes de presión a diferentes		
		$Reynolds \ldots \ldots$	32	
	5.2	Estimación del coeficiente de arrastre (Cd)	34	
6	Con	aclusiones	37	
7	Rec	omendaciones	39	
Aj	Apéndice A Primer Apéndice			
	A.1	Coeficientes de presión aplicando la corrección de capa limite vs. coeficientes		
		sin corregir	43	
	A.2	Coeficientes de presión aplicando la corrección de capa limite vs. coeficientes		
		sin corregir	45	
	A.3	Plano del modelo estudiado	49	
Aj	pénd	ice B Segundo Apéndice	50	
	B.1	Función correspondiente a la forma del vehículo	50	
	B.2	Procedimiento y estimación del coeficiente de $drag$ por presiones	50	

Índice de figuras

Diseño de carrocerías ganadoras, categorías y consumo de combustible
Fuerzas resultantes sobre el vehículo
Metodología de trabajo
Especificaciones del diseño del vehículo
Proceso de modificación al modelo CAD 17
Distribución de tomas de presión
Realización de tomas de presión en el modelo a escala
Visualización de flujo superficial
Métodos de visualización del campo de flujo
Montaje para realizar toma de datos de presión
Distribución de C_p a $R_e = 217000$
Distribución de C_p Corregidos a $R_e = 217000 \dots 276000000000000000000000000000000000000$
Pruebas de visualización a 14 m/s
Distribución de C_p a $R_e = 373000$
Distribución de C_p corregidos a $R_e = 373000$
Pruebas de visualización a 24 m/s
Distribución de C_p a $R_e = 470000$
Distribución de C_p corregidos a $R_e = 470000$
Pruebas de visualización a 30 m/s, mediante <i>Tufts</i>
Distribución de C_p medidos en la parte superior del modelo
Distribución de C_p medidos en la parte inferior del modelo $\ldots \ldots \ldots 34$
Coeficientes de presión parte superior del modelo a 14 m/s 46
Coeficientes de presión parte inferior del modelo a 14 m/s
Coeficientes de presión parte superior del modelo a 24 m/s $\ldots \ldots \ldots \ldots 47$
Coeficientes de presión parte inferior del modelo a 24 m/s

A.5	Coeficientes de presión parte superior del modelo a 30 m/s $\ . \ . \ . \ .$	48
A.6	Coeficientes de presión parte inferior del modelo a 30 m/s	48
A.7	Plano modelo de vehículo desarrollado por el grupo de investigación DETE-	
	CAL, representado en m m $\ \ldots\ \ldots\$	49

Índice de tablas

5.1	Recolección de datos	35
5.2	Coeficiente de arrastre calculados a tres diferentes velocidades de experimen-	
	tación \ldots	36
A.1	Resultados coeficientes de presión parte superior del modelo a 14 m/s	44
A.2	Resultados coeficientes de presión parte inferior del modelo a 14 m/s	44
B.1	Estimación coeficiente de <i>Drag</i> a 14 m/s	51
B.2	Estimación coeficiente de $Drag$ a 24 m/s $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	51
B.3	Estimación coeficiente de $Drag$ a 30 m/s $\dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots$	52

Lista de Símbolos

 C_p Coeficiente de presión

- C_{pu} Coeficiente de presión parte superior del modelo.
- ${\cal C}_{pl}$ Coeficiente de presión parte inferior del modelo.
- C_D Coeficiente de drag
- C_f Coeficiente por fricción
- Re Numero de Reynolds
- ε_t factor de corrección por Blockage ratio
- dy_u Función de la geometría, parte superior del modelo
- dy_l Función de la geometría, parte superior del modelo
- q_∞ Presión dinámica
- ${\bf g}$ Gravedad
- μ Viscosidad Cinemática

Abstract

The present proyect search develop and standardize a methodology with the objective to do aerodynamic testing in Shell Eco-Marathon vehicles, the aerodynamic optimization in this kinds of automobiles is one of the most important aspect to achieve the best score and the first positions; thus, the results of this research are will be useful in the design and optimization vehicles phases. In first instance, it does a thorough review to relevant aerodynamic concepts to measure of aerodynamic vehicle drag, design a scale prototype to be used subsonic wind tunnel testing; use different techniques to know the aerodynamic behavior of the vehicle and in turn, measure the distribution of pressure coefficients above the scale model that allow to estimate the actual vehicle drag. The prototype desing was develop by mechanical engeenering students of the Libre University, the velocity range used for the testing are 9 km/h, 15 km/h y 20 km/h respectively. The experimental findings indicate that the testing methodology using scale prototype is a good tool to optimization for any vehicle model that belong to this kind of competition.

Keywords: Aerodynamics, subsonic wind tunnel, super effective car, Drag coefficient.

Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

Resumen

El presente trabajo busca desarrollar y estandarizar una metodología para la realización de pruebas aerodinámicas en vehículos pertenecientes a la competencia Shell Eco-Marathon, la optimización aerodinámica de este tipo de vehículos es uno de los principales aspectos para lograr las mejores marcas y buscar un lugar en el podio, por lo tanto, los resultados alcanzados serán de gran utilidad en las fases de diseño y optimización del vehículo. El trabajo consiste en realizar una revisión minuciosa a los conceptos aerodinámicos involucrados en la medición del *drag* del vehículo, diseñar un prototipo a escala que pueda ser utilizado en la experimentación en un túnel de viento subsónico; utilizar diferentes técnicas con el fin de conocer el comportamiento aerodinámico del vehículo y a su vez, medir los coeficientes de presión sobre un modelo a escala que permitan estimar el *drag* del vehículo de tamaño real. El diseño del prototipo fue realizado por estudiantes de ingeniería mecánica de la Universidad Libre de Colombia, el rango de velocidades utilizado para las pruebas es de 9 km/h, 15 km/h y 20 km/h respectivamente. Los hallazgos experimentales indican que la metodología de prueba desarrollada en prototipos a escala se puede utilizar como herramienta de optimización para todos los modelos de vehículos pertenecientes a este tipo de competencia.

Palabras claves: Aerodinámica, túnel de viento subsónico, vehículo de competición, Coeficiente de drag.

Capítulo 1

Introducción

A través de la historia de los automóviles, ha quedado en evidencia que el comportamiento de estos en la pista se ve influenciado por la actuación de fuerzas aerodinámicas que variaran dependiendo del diseño que posea cada automóvil. Sin embargo la aerodinámica en vehículos no fue estudiada detenidamente sino hasta principios de la década de 1960, con el desarrollo de las primeras competencias de autos de carrera; desde entonces el reconocimiento y la explotación de este hecho ha significado durante los últimos 30 años una gran evolución en el desarrollo tecnológico de la industria automotriz.

Esta industria que para el año 1970 tubo que afrontar la crisis en el precio del petroleo, y ahora tiene la tarea de minimizar la contaminación y el impacto al medio ambiente producto de la utilización de combustibles fósiles; ha tomado como medida que no solo se tenga como parámetro de diseño los gustos del consumidor o guardar el estilo en el diseño del fabricante, como anteriormente se hacia. Ahora se deberá implementar el estudio aerodinámico como herramienta para disminuir el consumo de combustible y mejorar las actuaciones del automóvil. Se debe tener en cuenta que existen tres influencias principales sobre la eficiencia de combustible en un vehículo, estas son: El peso del vehículo, la eficiencia del motor y la resistencia aerodinámica o Drag; únicamente el diseño aerodinámico será considerado en el presente trabajo, pero es importante reconocer que la interacción entre los tres parámetros anteriormente mencionados influyen en la estabilidad dinámica y la seguridad del vehículo [Cro09].

Como medio para fomentar el diseño y desarrollo de vehículos enérgicamente eficientes en las nuevas generaciones, la empresa Shell reconocida por ser una compañía internacional de energía y petroquímicas, que promueve soluciones de energía más limpia de maneras que sean económica, ambiental y socialmente responsables; ha organizado un evento llamado la Eco-Marathon, en donde se desafía a los jóvenes ingenieros de todo el mundo a diseñar, Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

construir y conducir vehículos eficientes desde el punto de vista energético, es decir que el vehículo ganador es aquel capaz de cubrir la mayor distancia con un gasto mínimo de energía y siguiendo algunas normas propias de la competencia [Glo17b].

De acuerdo con lo expuesto, el presente trabajo pretende implementar una metodología para realizar estudios aerodinámicos, aplicables de forma general, en cualquier prototipo de vehículo desarrollado para la competencia Eco-Marathon; el cual consta de cuatro faces: la primera de ellas es la recolección de datos acerca de los detalles del diseño del prototipo, la segunda fase la componen las tareas de elaboración del modelo a escala útil para la experimentación; por otra parte la fase numero tres esta compuesta por las actividades de experimentación en túnel de viento realizadas en dos etapas, uno cualitativa, en donde se determina el comportamiento del flujo de aire mediante la implementación de técnicas de visualización en la superficie del modelo y a su ves la visualización de flujo externo (refiriéndose al comportamiento del aire alrededor del cuerpo en estudio); y por otro lado, una segunda etapa cuantitativa, en donde se toman datos de presión a lo largo del modelo con el objetivo de medir las fuerzas aerodinámicas actuantes sobre este, especialmente, el arrastre o resistencia aerodinámica del vehículo. Al final y en cuarto lugar se encuentra la fase de procesamiento de datos estos datos producto de la experimentación formaran un soporte para determinar el drag por presión generado sobre el vehículo, ya que, dicha información resulta ser relevante para el diseñador, quien determinara si la resistencia aerodinámica producto de su diseño es aceptable o debe ser modificada.

Para tal efecto, el estudio se realizara en un modelo a escala diseñado por estudiantes del grupo de investigación DETECAL, perteneciente a la universidad Libre. La experimentación se llevó a cabo en un túnel de viento subsónico de baja velocidad de sección abierta a tres velocidad diferentes de experimentación.

Capítulo 2

Planteamiento del problema

Actualmente, una prueba evidente de la importancia de la aerodinámica, es el hecho de que los fabricantes de vehículos de competición, utilicen e integren túneles de viento como parte vital en el proceso de diseño y desarrollo de sus prototipos, dichos estudios se aplican en todas las categorías de este tipo de competencias, desde categorías menores hasta carros de Formula 1. No obstante, por ser un tema de rivalidad, la información concerniente a métodos de estudios aerodinámicos en vehículos y los resultados obtenidos de dichas experimentaciones, se encuentran, en muchos de los casos, reservados solo para los competidores que tienen la posibilidad y experiencia para realizarlos, por lo tanto esto se ve traducido en una carencia de información sobre este tema [WMD16].

Particularmente la Eco-Marathon organizada por Shell, es una categoría de competencia que busca crear vehículos energéticamente eficientes, enmarcados en el cumplimiento de unos determinados parámetros de diseño; por lo tanto, la eficiencia aerodinámica del vehículo juega un papel fundamental, pero, sin embargo, no se conoce con certeza el comportamiento aerodinámico y además no se cuenta con una metodología clara e información relevante que permita realizar estudios para esta clase de vehículos.

En razón a lo expuesto, la investigación propuesta busca dar respuesta a la siguiente pregunta: ¿Cómo realizar un estudio aerodinámico aplicable a cualquier prototipo de vehículo utilizado en la competencia Shell Eco-Marathon? Con la finalidad de obtener y compartir una información detallada, actualizada y confiable a cerca del estudio aerodinámico en vehículos de la competencia Eco-Marathon, que oriente a los participantes y diseñadores de estas competencia en la adopción de este tipo de estudios como estrategias para mejorar el desempeño aerodinámico de cada uno de sus vehículos y prototipos. Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

2.1 Objetivos

2.1.1 Objetivo General

Desarrollar y proponer una metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Considerar los factores involucrados en la realización de un estudio aerodinámico aplicado a vehículos de competición.
- Realizar un diagnóstico de las características aerodinámicas de un prototipo a escala del vehículo en estudio mediante la experimentación en un túnel de viento.
- Estimar el valor de la resistencia aerodinámica drag del modelo a escala.

2.2 Justificación

La ingeniería aeronáutica como especialidad, no está limitada para desarrollarse únicamente en el sector aeronáutico. Gracias al desenvolvimiento interdisciplinario que la componen, es posible que esta, haga parte fundamental en la industria automotriz, dada su capacidad para apoyar trabajos de diseño y mejoras en vehículos. Desde el punto de vista aeronáutico, no sólo se pueden mejorar factores como el ahorro en la cantidad de combustible, sino que a su vez, se pueden resolver problemas de estabilidad del vehículo y su maniobrabilidad en la pista, el resultado de dichos estudios son de suma importancia para el sector automotriz y mas aun, en su aplicación a automóviles de competición.

Aunque en Colombia el desarrollo de la industria automotriz solo se reduce a la producción de auto partes, actualmente ha crecido el interés por parte de grupos de investigación, empresas privadas y aficionados, que pretenden incursionar en el desarrollo y producción de vehículos enérgicamente eficientes, y que mejor lugar para demostrarlo que siendo parte de la competencia Shell Eco-Marathon. Esta, es una competencia a nivel mundial realizada por la compañía internacional Shell, proyectada para estudiantes que entre otras tareas buscan realizar el diseño aerodinámico mas eficiente que les permita reducir la cantidad de consumo de combustible de sus vehículos, todo esto con el fin de promover la disminución de contaminación al medio ambiente y resaltar las contribuciones que se pueden hacer a futuro en la industria automovilística, como dato adicional es posible mencionar que Colombia ha participado una sola vez en este encuentro, logrando alcanzar la posición numero 13 en el certamen; esto impulso a que mas personas se motivaran a hacer lo mismo, como por ejemplo estudiantes del grupo de investigación de ingeniería Mecánica DETECAL de la universidad Libre, quienes buscan ser los próximos participantes de esta competencia.

Mediante la realización de un estudio aerodinámico en un prototipo de vehículo a escala, proporcionado por el grupo de investigación DETECAL de la Universidad Libre, se busca generar una metodología para la realización de pruebas aerodinámicas con el objetivo de que cualquier participante pueda conocer con certeza las propiedades aerodinámicas del diseño de su vehículo, y a su ves, se le de un nivel de importancia mayor a este tipo de estudio dentro de la fases de diseño y fabricación. Esto como propuesta ante la carencia que existe actualmente de información que permite realizar este tipo de estudios en vehículos súper eficientes y promover el uso de energías limpias en el país. Por esta razón, este estudio resulta conveniente, ya que propone implementar una metodología que sea clara para la realización de estudios aerodinámicos en vehículos suscritos a la competencia Shell Eco-Marathon.

Capítulo 3

Marco teórico

Además de conocer con mas detalle las características del concurso y algunos parámetros de diseño expuestos por los organizadores de esta carrera, en el presente capítulo se dará una concisa introducción a la aerodinámica aplicada a vehículos de competición, además, se abordara el tema de túnel de viento debido a su importancia en el desarrollo del presente proyecto.

3.1 Shell Eco Marathon

Uno de los espacios mas relevantes para la competencia de vehículos con gran eficiencia energética es la Shell Eco-Marathon, esta no solo se destaca por promover la generación de conciencia del cuidado ambiental, a su vez, promueve la investigación y desarrollo de nuevas ideas, ya que, los vehículos participantes deben alcanzar a cubrir la mayor distancia posible, solamente haciendo uso de una unidad de combustible. Por estas razones, resulta ser todo un reto para cada competidor conseguir el vehículo mas óptimo como producto del trabajo en conjunto entre el diseño, construcción y puesta ha prueba en un circuito de carreras real. Actualmente esta competencia esta dividida en dos categorías, por un lado la clase Urban Concept que promueve el concepto de diseño mas práctico respondiendo a las necesidades de transporte actuales, en contraste con la categoría Prototype y como objeto de estudio, la cual se enfoca en alcanzar la mayor eficiencia del vehículo como sea posible; cabe resaltar que los automóviles se pueden sub-clasificar dependiendo del tipo de energía que utilizan, entre ellos encontramos: el uso de motores de combustión interna (Diesel, gasolina, combustible líquido hecho de gas natural y etanol), baterías eléctricas y vehículos que incorporen celdas de combustible de hidrógeno, [Glo17a].

Independientemente del tipo de energía que posea el vehículo, el concepto Prototype se

identifica por su diseño de tipo monocasco, no esta permitido la utilización de accesorios tales como alerones o cualquier dispositivo ajustable para mejorar las propiedades aerodinámicas del vehículo en pista. Aunque existan muchas formas diferentes de diseño, la mayoría de equipos coinciden en utilizar vehículos de 3 ruedas (dos en frente y una atrás), todas cubiertas por una carrocería en forma de gota; otra opción, pero menos popular, es diseñar una carrocería mas estrecha y ubicar las ruedas delanteras fuera de él. En la figura 3.1 se evidencian los diseños de los vehículos ganadores en todas las categorías en la Shell Eco-marathon organizado en las Américas 2018, y sus marcas hasta ahora registradas.

Figura 3.1: Diseño de carrocerías ganadoras, categorías y consumo de combustible.



(a) **BYU SMV**, Gasolina, 844,73 (Km/l).



(b) **Duke Electric Vehicles**, Eléctrico; 592,079 (Km/kWh).



(c) **Duke Electric Vehicles H2**, Hidrógeno; 383,1 (m/m3).

Fuente: [Veh17] [BYU17]

El mencionar dichas restricciones al diseño es con el propósito de demostrar la importancia y las implicaciones que posee la tarea de diseñar, ya que, uno de los factores que aumenta hasta en un 50% el consumo de combustible en esta clase de vehículos es derivado de la forma

Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

que posea, mas puntualmente, a la resistencia al movimiento o *drag* inducido producto de la forma del vehículo especialmente de su área frontal [WMD16], por lo tanto, el trabajo del diseñador debe ser en parte fundamental el disminuir el consumo de combustible mediante su diseño, teniendo en cuenta las especificaciones del reglamento y el espacio mínimo que debe tener tanto para albergar los componentes del vehículo dentro de la carrocería y el espacio del piloto.

Por último, como se menciono anterior mente, Colombia ha participado una sola vez en esta competencia gracias al trabajo de estudiantes de la Universidad de la Sabana, quienes en el año 2017 obtuvieron el puesto 13 en la categoría de prototipos eléctricos, al recorrer 83 km con tan solo 1 kWh (kilovatio por hora) de energía [Sab17].

3.2 Aerodinámica en vehículos

A primera vista, el lograr comprender completamente el comportamiento del flujo de aire sobre un vehículo puede ser una tarea compleja, teniendo en cuenta la interacción existente entre el vehículo, aire y el suelo; sin embargo, independientemente del tipo de cuerpo que se quiera estudiar, las fuerzas y momentos aerodinámicos sobre este son producidas por dos causas: La distribución de presión sobre la superficie del cuerpo, actuando de forma normal a la superficie; y por otra parte, la distribución de esfuerzos cortantes sobre la superficie del cuerpo, que actúa de manera tangencial a la superficie como producto del rozamiento existente entre el cuerpo y las propiedades viscosas del aire [D05]. Al integrar las distribuciones de presión y esfuerzos cortantes sobre la superficie completa del cuerpo, se obtiene como resultado las fuerzas aerodinámicas y momentos actuantes sobre el cuerpo, tales como *lift*, *drag* y momento total; la magnitud de estas fuerzas depende de la forma del cuerpo, de esta manera se puede observar que dicha forma influenciara en cierta magnitud el comportamiento del flujo y por consiguiente, el desempeño del vehículo en la pista [D01].

Con base en la Figura 3.2, y descartando el peso por ser una variable dependiente de los materiales utilizados en el vehículo, resulta pertinente enfocarse en tan solo dos fuerzas relevantes, *lift* y *drag.* La llamada fuerza de adherencia o *lift*, producida por las resultantes de las fuerzas normales a la superficie; según su magnitud, influye directamente en la estabilidad del vehículo, ya que hace que este se adhiera o tenga una tendencia a separarse del suelo; por lo tanto, el poseer una sustentación negativa en esta clase de vehículos resulta ser decisiva al tomar una curva, ya que reduce la posibilidad de perder el control del vehículo [McB05]. El *drag*, por su parte, también llamado arrastre aerodinámico, es el principal contribuyente en el aumento del consumo de combustible, debido a que es una fuerza inducida por la velocidad



Figura 3.2: Fuerzas resultantes sobre el vehículo

Fuente: Autores

relativa de un automóvil y un fluido, la cual actúa a lo largo de la dirección del flujo de fluido, pero de forma opuesta al movimiento del automóvil. Esta fuerza puede ser descrita como:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D$$
 (3.1)

Donde F_D es la fuerza de arrastre, ρ es el valor de la densidad del fluido, v la velocidad del cuerpo relativo al fluido, A es el área y C_D es el coeficiente de drag. Se debe tener en cuenta que el área en este caso, pertenece al área frontal proyectada del cuerpo [D05]. Tomando en

cuenta la anterior ecuación, el arrastre aerodinámico del vehículo incrementa con el cuadrado de la velocidad del automóvil, pero a su vez, guarda una relación directa con la forma de diseño del automóvil debido al área. El drag total entonces, es el resultado de sumar las contribuciones por parte del drag por fricción y el drag por presión: El drag por fricción se da como resultado del roce entre la superficie del vehículo y las partículas del fluido sobre este; y por otro lado, el drag por presión, proviene del desprendimiento de capa limite, es decir, en el momento en que el fluido deja de adherirse a la superficie del vehículo y comienza a comportarse de manera desorganizada o en forma de remolino. Para los cuerpos curvados, si la curvatura del cuerpo es muy grande, es posible que se genere un flujo inverso, es en este punto que existe un desprendimiento de capa limite. Para cerrar esta sección se pude decir

que el drag es la resistencia que ofrece un cuerpo a moverse dentro de un fluido por razón de su forma, es por ello que el diseñador a manera de disminuir el arrastre en el vehículo, puede reducir el área frontal del vehículo, el coeficiente de drag o ambos, de manera que se Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

produzca el menor arrastre como sea posible [Cro09]; en vehículos participantes en la Eco Shell-marathon estos coeficientes son muy bajos, encontrando valores extremos como 0.08 para el poseedor del récord PadCar II [SAN+07].

3.3 Experimentación en túnel de viento

La información obtenida como producto de la experimentación es útil para resolver problemas aerodinámicos, esta puede ser obtenida de varias maneras; sin embargo, en el presente trabajo consideraremos únicamente el uso de túneles de viento de baja velocidad, ya que se considera que es uno de los medios mas rápidos, económicos y precisos, también porque es capas de incluir la complejidad total del flujo de fluido real (aire) y proporcionar así gran cantidad de datos confiables. En el área de la automoción durante las etapas tempranas de diseño y desarrollo del vehículo es posible realizar diferentes pruebas en modelos a escala que permitirán probar varios modelos con diferentes características de diseño de una manera rentable y con la precisión adecuada. Desde otro punto de vista, resulta determinante que el túnel de viento haya sido una de las primeras herramientas utilizadas en la experimentación aerodinámica; la invención, uso y evolución de este es motivada por el interés de resolver problemas prácticos en aerodinámica y como segunda medida tiene en cuenta factores que los métodos teóricos y computacionales aun no han alcanzado.

3.3.1 Túneles de viento

En la actualidad existen muy pocos automóviles que se han desarrollado sin un programa de pruebas en túnel de viento, esta herramienta permite por medio de mediciones, analizar los comportamientos dinámicos de un elemento pasando a través de un flujo.[Car13] Hay tantas configuraciones existentes de estos, pero todas ellas buscan responder a la necesidad de exactitud y valides en cada una de las fuerzas y momentos medidos. Existen dos clases de túneles de viento, ya sea, de tipo circuito abierto o túnel de circuito cerrado; en un túnel de viento de circuito abierto el flujo de aire es conducido en forma recta, es decir, este fluye desde la entrada del túnel a una zona de contracción, seguidamente pasa por la sección de pruebas, difusor, una sección en donde se encuentra el ventilador y por ultimo pasa por un escape de aire en donde sera expulsado; por lo tanto, la entrada como la salida de aire están abiertas a la atmósfera, ha comparación de un túnel de viento de circuito cerrado en donde el aire recircula continuamente con poco o ningún intercambio con el exterior. A su ves, existen dos tipos de configuración para la sección de pruebas, ya sea del tipo cerrada (por la presencia de paredes que aíslan el aire en forma de conducto) y una sección de pruebas abierta la cual carece de cualquier tipo de muro [AMV17]; se establece que, para el presente trabajo, en la fase de experimentación se hará uso de un túnel de viento del tipo circuito abierto, compuesto por una sección de pruebas cerrada.

3.3.2 Similitud Dinámica

Durante la experimentación en túnel de viento, es necesario que cada una de los datos medidos en el prototipo a escala permitan predecir el comportamiento del vehículo ha escala real, dicha tarea se logra de manera eficaz, mediante la implementación de ecuaciones adimencionales. Existen tres coeficientes útiles como parámetros de similitud, estos son: El numero Froude, el numero Mach y el numero de Reynolds; debido a que el parámetro de Froude es mas utilizado en pruebas de túnel de viento en donde el modelo se encuentra en movimiento y por otra parte el numero Mach usualmente aplica solo para aeronaves volando a altas velocidades en donde la contribución del numero de Reynolds no es tan critica, es pertinente entonces, tomar como parámetro de similitud el numero de Reynold debido a que las velocidades de interés son menores a 0,3 Mach [BRP99].

Al utilizar el numero de Reynolds, las funciones adimencionales para los componentes de la velocidad del fluido, coeficientes de presión, densidad, viscosidad y temperatura van a ser las mismas para el flujo del modelo a escala y el vehículo real; esto se ve traducido en que a su vez los coeficientes de fuerza y momento serán los mismos para el modelo a escala como para el vehículo real. Por lo tanto el numero de Reynolds esta dado por la ecuación 3.2:

$$R_e = \frac{\rho_1 v^2 c}{\mu} \tag{3.2}$$

Siendo el numero Reynolds R_e igual al producto entre la densidad del fluido ρ , la velocidad del flujo v y la longitud de la cuerda c (tomada como la distancia entre los ejes del vehículo), dividido entre la viscosidad cinemática μ ; al igualar el Reynolds calculado para las condiciones del modelo real, así como el Reynolds del modelo a escala; es posible conocer tanto la velocidad y el valor de la distancia entre ejes como parámetro para saber el valor al cual debe estar escalado el modelo, como se muestra en la ecuación 3.3:

$$\frac{\rho_1 \ v_1^2 \ c_1}{\mu_1} = \frac{\rho_2 \ v_2^2 \ c_2}{\mu_2} \tag{3.3}$$

Metodología para realizar pruebas aerodinámicas en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon

3.3.3 Correcciones de capa limite

Teniendo en claro el tipo de configuración del túnel, es posible implementar una serie de correcciones a los datos calculados, debido a que, las condiciones del flujo al interior del túnel de viento no van a ser completamente iguales a las condiciones del aire con libertad de expandirse, ya que el viento se encuentra confinado entre las paredes de la sección de pruebas [ST04]. Para el tipo de túnel de viento utilizado, basta solamente con tener en cuenta los siguientes fenómenos: *Horizontal Buoyancy* se da por la variación de la presión estática a lo largo de la sección de pruebas, este efecto puede considerarse como la inexistencia de un flujo uniforme en la dirección de la corriente de aire, inducido por la existencia de limites laterales. *Solid Blockage* -En relación a la proporción entre el tamaño del cuerpo en estudio y el tamaño de la sección de pruebas; al aumentar la tensión superficial sobre el modelo, este efecto puede producir un cambio en la velocidad o la presión dinámica del flujo de aire sobre la superficie del modelo. *Wave Blockage* -Este fenómeno es el resultado del tamaño finito de la estela generada por el modelo, es característico por aumentar el drag calculado; debido a que la estela generada es función de la forma del modelo, este efecto es muy similar al fenómeno solid blockage.

Una manera para corregir los fenómenos anteriormente mencionados, es mediante la implementación de la corrección aproximada por *Blockage Ratio* ε , sugerida para una relación máxima entre áreas del 7.5 % [BRP99], dicha corrección esta dada por:

$$\varepsilon_t = \frac{1}{4} \frac{Area \ frontal \ del \ modelo}{Area \ seccion \ de \ pruebas} \tag{3.4}$$

Este corrección, modifica los valores de las presiones dinámicas medidas sobre el modelo, de manera que cada dato de presión, sera corregido de la siguiente manera:

$$q_c = q_A \ (1 + \varepsilon_t)^2 \tag{3.5}$$

Donde q_c es la presión dinámica corregida, producto de la multiplicación entre la presión dinámica medida q_A y el factor de corrección por Blockage ratio ε . En el caso que la relación entre el área transversal del modelo y el área transversal de la sección de pruebas sea mayor al 7.5 %, no se podrán corregir los datos usando ninguna de las anteriores ecuaciones, en cambio, la corrección para cada cada fenómeno se debe calcular de de forma separada [BRP99].

3.3.4 Métodos de Visualización del flujo

Una de las razones por las cuales es necesario la implementación de métodos de visualización como material de apoyo en el estudio aerodinámico en túnel de viento es que, pese a poder medir datos como *lift*, *drag* y momento fácilmente mediante la utilización de balanzas, estos datos son expresados de manera global y proveen muy poca información acerca de cual es la fuente en los cambios de medición o su asociación con la física del flujo. Por lo tanto, es necesario contar con información adicional que requiere detalles de la superficie para realizar mediciones mas amplias del campo del flujo.

El tener la capacidad para poder observar y estudiar los patrones del comportamiento del flujo alrededor de el cuerpo en estudio, es de utilidad ya que muy a menudo esta tarea es capas de brindar una idea de la posible solución a un problema aerodinámico. Los métodos de visualización se pueden estudiar desde dos perspectivas diferentes de captar los fenómenos aerodinámicos presentes en el modelo: *Surface Flow*: Es la visualización del flujo únicamente sobre la superficie del modelo, a través de la utilización de hilos, aceites o tintas. *Flow Field Visualization*: Es el estudio del campo de flujo al rededor del modelo, con la ayuda de Tufts Wands, Humo, Tufts Downwash, entre otros.

Mediante la utilización de estos métodos es posible identificar la generación de estelas turbulentas y vórtices generados, pero además, permite identificar la ubicación de puntos de estancamiento, líneas de separación, ubicación de la transición de la capa límite, inestabilidad característica, extensión de las zonas de separación, entre otras.

Capítulo 4

Metodología aplicada

Para poder entender con mayor claridad como realizar un estudio aerodinámico en vehículos teniendo en cuenta todos los factores que lo componen; a continuación, se expone un diagrama de flujo en el cual quedará evidenciado, cada una de las tareas realizadas a lo largo del desarrollo de este proyecto con la finalidad de facilitar la explicación de la metodología utilizada.





Fuente: Autores
Por consiguiente, en la presente sección se encuentra el proceso que se llevo a cabo para la elección del modelo de vehículo; especificando el trabajo de elaboración del prototipo a escala, así como el proceso de adaptación con la finalidad de que sirva como modelo de pruebas en el túnel de viento. Es pertinente aclarar que los procesos de fabricación del modelo a escala, así como los insumos y otras herramientas utilizadas en dicha actividad fueron facilitados por el grupo de investigación DETECAL de la universidad Libre de Colombia.

4.1 Fase I: Soporte teórico

En primera instancia resulta fundamental la elaboración de una *base line*, con la función de recolectar todos los datos posibles acerca de las condiciones en las cuales se va ha encontrar el vehículo a escala real, y de igual manera las condiciones en donde se llevara a acabo la experimentación; desde otro punto de vista, es necesario conocer los lineamientos y reglas de la competencia con tal de que el modelo cumpla con dichos requerimientos tanto en tamaño como en diseño, en resumidas palabras, la realización de una *base line* es útil para entender el contexto en el cual se trabajara el prototipo y el objetivo que busca la realización del estudio aerodinámico, como en el caso del presente proyecto en donde se busca estimar el arrastre aerodinámico generado por la forma del vehículo.

4.1.1 Elección del modelo de Vehículo

Como iniciativa para participar en la categoría Prototype de la competencia Shell Eco Marathon, estudiantes del grupo de investigación DETECAL de la universidad libre desarrollaron un modelo de vehículo eléctrico en su fase de diseño conceptual únicamente, de manera que, aun quedan una gran cantidad de incógnitas con el fin de saber si el diseño realizado resulta ser el mas conveniente, y por consiguiente es necesario conocer las propiedades aerodinámicas del vehículo con el objetivo de realizar correcciones al diseño de ser necesario. Teniendo en cuenta que esta necesidad es general no solo para ellos sino para cualquier equipo que quiera participar, se opto por seleccionar el diseño realizado por ellos como punto de partida del presente proyecto.

Como datos iniciales, se obtiene un modelo a escala del diseño de vehículo fabricado en material ABS mediante la utilización de una impresora 3D; a su vez como material de trabajo se cuenta con el modelamiento del diseño en CAD para ser modificado de ser pertinente, como se muestra en la Figura 4.2





Fuente: Autores

4.2 Fase II: Elaboración del modelo a escala

Una vez finalizado el proceso de selección del prototipo de diseño de vehículo que se quiere estudiar, como primera medida, se debe verificar la escala a la cual debe estar fabricado el modelo de pruebas, teniendo en cuenta los parámetros de similitud dinámica descritos en la sección 3.3.2, y a su vez, la relación entre el tamaño de la sección transversal del modelo con el tamaño de la sección de pruebas, sección 3.3.3. Una vez calculado el tamaño que debe tener el vehículo a escala, se procede a realizar una serie de modificaciones a este con el fin de que coincida con el tipo de pruebas que se van a realizar, dichos cambios son mencionados a continuación:

4.2.1 Modificación al diseño CAD

En el proceso de rediseñar el modelo ha escala para su experimentación en el túnel de viento es necesario tener en cuenta varios factores, como por ejemplo, la creación de agujeros pasantes con el fin de poder hacer mediciones de presión sobre la superficie del modelo; por otro lado, también es necesario tener en cuenta la manera en que va ser fijado el modelo dentro de la sección de pruebas del túnel, téngase en cuenta que dicha sujeción debe ser lo bastante fuerte para soportar las fuerzas y vibraciones producto del aire viajando a determinada velocidad al rededor del vehículo y a su vez se debe buscar minimizar al máximo cualquier tipo de interferencia al flujo que pueda afectar la toma de datos, es decir que el soporte no debe obstruir la circulación del flujo de aire al rededor del modelo.

Para llevar a cabo el proceso de modificación al diseño CAD fue necesario la utilización del software CATIA V5, este software desarrollado por Dassault Systémes, permitió importar el archivo de diseño en formato IGS, y posteriormente analizar y realizar modificaciones a dicha figura en 3D, con el beneficio de que el diseño final puede ser utilizado en el proceso de

fabricación del modelo a escala, mediante la utilización de herramientas CAM. El resultado final de dicha modificación se muestra a continuación en la figura 4.3.



Figura 4.3: Proceso de modificación al modelo CAD

Fuente: Autores

Figura 4.4: Distribución de tomas de presión



Fuente: Autores

En consideración con la figura 4.4, se puede añadir que cada una de las tomas de presión deben estar ubicadas en linea recta, ya que, es posible que el valor de la presión varié debido a

la presencia de algún tipo de estancamiento o perturbación en el flujo producto diseñar tomas de aire curvas. A su vez, desde otro punto de vista, algunos métodos de fabricación al intentar realizar los agujeros pueden dañar las condiciones superficiales del modelo, por lo tanto, es recomendable que cada una de las tomas de presión estén ubicadas perpendicularmente a la superficie curva del modelo.

4.2.2 Modificaciones al modelo a escala

Una de las principales limitaciones que posee la impresión del prototipo a escala, es que, al no poseer agujeros que permitan la obtención de datos de presión, este modelo únicamente sera útil para la realización de pruebas de visualización. En consecuencia, es posible tener una idea del comportamiento físico del flujo de aire actuando en el vehículo, pero, por otra parte, ser incapaz de cuantificar el resultado que representa para la eficiencia del vehículo dicho comportamiento del fluido, por ende se realizo una modificación al prototipo de modelo a escala, con el fin de que se pueda realizar la experimentación en túnel de viento de manera completa.

Utilizando un taladro de árbol se procedió a realizar una serie de perforaciones a lo largo del eje longitudinal del modelo; en total se realizaron 14 agujeros distribuidos a una distancia entre si de 3cm entre cada uno, pero, debido a que el modelo a escala no estaba fabricado de forma maciza, se hizo necesario unir los agujeros realizados en la parte superior con aquellos de la parte inferior por medio de tuberías plásticas muy pequeñas, como se evidencia en la Figura 4.5, estas se acoplaron al vehículo quedando fijadas, de manera que permitan el estudio de presiones tanto de la parte superior como la inferior de la superficie del modelo de pruebas.

4.3 Fase III: Experimentación en el túnel de viento

En este apartado se presenta el desarrollo de las pruebas experimentales realizadas desde dos puntos de vista, por un lado se encuentra la fase cualitativa en donde se implementan únicamente técnicas de visualización de flujo, en contraste con la fase cuantitativa, en donde, mediante la adopción de datos de presión se estimara la resistencia aerodinámica del vehículo. Dichas pruebas se realizaron bajo condiciones ambientales promedio de presión y temperatura de 74900 Pa y 20,5 C respectivamente; variando la velocidad del túnel de viento a 14m/s, 24 m/s, 30 m/s. Adicionalmente se señalan las herramientas y montajes implementados durante el desarrollo de dichas actividades.



Figura 4.5: Realización de tomas de presión en el modelo a escala

Fuente: Autores

4.3.1 Aplicación de métodos de Visualización

La visualización de flujo superficial se llevo a cabo con la ayuda de dos métodos, en primer lugar, mediante la implementación de *Tufts* o hilos de algodón mercerizado los cuales son adheridos a la superficie del modelo por medio de cinta adhesiva o algún tipo de pegamento, aunque la utilización de este ultimo medio no es recomendable ya que deja residuos sobre la superficie del modelo afectando así mediciones futuras; los hilos con una longitud de dos centímetros se colocaron alineados con el centro longitudinal de modelo, dejando un espacio de un centímetro entre cada hilera, con la finalidad de captar con detalle el comportamiento del flujo sobre toda la superficie [AMV17].

En segundo lugar aunque el humo es un método utilizado para la visualización del campo de flujo al rededor del modelo, en este caso, sera utilizado para analizar el comportamiento del flujo sobre la superficie del modelo a una velocidad de 14 m/s, puesto que la cámara de humo no tiene la capacidad de producir una nube de humo lo suficientemente densa como para no desvanecer con el aumento de la velocidad, además considere que se debe utilizar un determinado efecto de luz para mejorar la visualización; este método permite identificar los diferentes regímenes de flujo, así como el tamaño de la separación del flujo con respecto a la superficie del modelo y la ubicación de puntos de estancamiento, dichos montajes se

muestran en la figura 4.6.



Figura 4.6: Visualización de flujo superficial

Fuente: Autores

En cambio, la visualización del campo de flujo se desarrollo implementando la utilización de dos métodos: *Tufts Wands* - Emplea una ra delgada con hilos de algodón con una longitud de cinco centímetros y un espacio de un centímetro entre cada hilo; aunque es necesario la implementación de un tipo de soporte que fije la ra desde afuera de la sección de pruebas, este es un método versátil que busca trazar el flujo cercano al modelo. *Tuft Downstream* - Para el desarrollo de este método se instalo una placa plana sujetada al interior de la sección de pruebas con la finalidad de visualizar el comportamiento del flujo una ves que ha pasado por el modelo, este método es útil para conocer la estela del flujo producto de su perturbación, así como cualquier tipo de vorticidad o turbulencia generada en la parte posterior del modelo de pruebas, figura 4.7.

A modo de observación, existe la posibilidad de tratar los hilos de algodón con cierto tipo de colorante con propiedades fluorescentes, tenga en consideración que se puede aumentar la claridad en la visualización ya que permite ver con detalle el comportamiento de cada hilo, pero esta técnica puede ser contraproducente ya que puede disminuir la flexibilidad y por lo tanto restringir el movimiento de los hilos.

4.3.2 Adquisición de datos de presión

Como se ha mencionado anteriormente el propósito de medir las cargas sobre el modelo se hace con el fin de predecir la actuación del vehículo a escala real, haciendo uso de un túnel de viento de baja velocidad, existen al menos cuatro métodos diferentes para la obtención de



Figura 4.7: Métodos de visualización del campo de flujo

Fuente: Autores

este tipo de datos [low]:

- Implementación de balanzas aerodinámicas con el fin de medir fuerzas y momentos sobre el modelo ha escala completo.
- Calcular la distribución de presiones sobre el modelo por medio de orificios conectados a dispositivos de medición de presión.
- Medición de los cambios de presión sobre las paredes de la sección de pruebas como producto de los efectos que tiene el modelo sobre el flujo.
- Estudiando el modelo en movimiento bajo la actuación de fuerzas aerodinámicas y computando las fuerzas en ecuaciones de movimiento.

Debido a que la balanza aerodinámica del túnel de viento no se encuentra disponible, se opto, como segunda medida, en utilizar un manómetro de agua con el fin de calcular la distribución de presiones sobre el modelo, por lo tanto, el montaje realizado para la respectiva experimentación esta constituido por la utilización de un manómetro de agua, mangueras con acople y los agujeros hechos en el modelo; al unir cada agujero realizado en el modelo con el manómetro mediante la implementación de mangueras, es posible observar el aumento o disminución de la columna de agua producto de las presiones tomadas en cada sección del modelo con respecto a la medición de la presión estática medida dentro de la sección de pruebas. Por consiguiente el procedimiento seguido para la medición de presiones es en primera

instancia medir las presiones sobre la superficie del modelo y luego ubicar las mangueras por encima del modelo con tal de medir las presiones en la superficie inferior del modelo, como se muestra en la figura 4.8.



Figura 4.8: Montaje para realizar toma de datos de presión

Fuente: Autores

4.4 Fase IV: Procesamiento de datos

Una ves finalizada cada una de las pruebas realizadas al modelo en túnel de viento, se obtiene como resultado final una serie de imágenes del comportamiento físico del vehículo, así como también, una diferencia entre alturas de las columnas de agua una vez tomadas para cada toma de presión del modelo, pero debido a que aun no se desconoce el valor de las fuerzas actuantes sobre el vehículo y en especial de la variable de importancia para este proyecto (el arrastre aerodinámico), es necesario implementar las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.3 respectivamente, para obtener el coeficiente de *drag* por presión, como producto de calcular la distribución de coeficientes de presión.

$$P - P_{\infty} = \rho_{(H_2O)} \ g \ \Delta h \tag{4.1}$$

Donde la diferencia entre la presión tomada en cada punto del modelo P menos la presión de la corriente de flujo P_{∞} es igual a la densidad del fluido dentro del manómetro, en nuestro

caso agua (ρ) multiplicado por la gravedad (g) y por la diferencia de altura medida en el manómetro Δh ; este valor dividido entre la presión dinámica del flujo de aire da como resultado el coeficiente de presiones (c_p) .

$$c_p = \frac{P - P_\infty}{q_\infty} \tag{4.2}$$

Por consiguiente, se utilizara el subíndice (u) para referirse a los datos tomados en la parte superior del modelo; para aquellos datos producto de la medición en la parte inferior del modelo estarán identificados con el subíndice (l). Al igual que se comento en la sección 3.2, es posible descomponer cada una de las fuerzas actuando sobre el vehículo; siendo el drag el valor de interés en calcular, al realizar varios procedimientos matemáticos es posible obtener el coeficiente de drag expresado de la siguiente manera, ecuación 4.3, utilizada para calcular el arrastre aerodinámico en un cuerpo en 2D:

$$c_{d} = \frac{1}{c} \left[\int_{0}^{c} \left(C_{p,u} \frac{dy_{u}}{dx} - C_{p,l} \frac{dy_{l}}{dx} \right) dx + \int_{0}^{c} \left(C_{f,u} + C_{f,l} \right) dx \right]$$
(4.3)

Esta ecuación demuestra que la fuente de drag aerodinámico sobre un cuerpo es producido por la distribución de presiones C_p y esfuerzos cortantes C_f integrados sobre el cuerpo. Al enfocarse únicamente en la fuente que genera los esfuerzos cortantes, se sabe que dicho valor dependerá de la viscocidad del flujo, así como de la velocidad en cada punto de la superficie del modelo, esto resulta mejor explicado al argumentar que en las regiones de un campo de flujo donde los gradientes de velocidad son pequeños, los esfuerzos cortantes son pequeños y la influencia de la fricción localmente en el flujo es pequeña, por otro lado, en regiones donde los gradientes de velocidad son grandes, el esfuerzo cortante es grande y la influencia de la fricción local en el flujo puede ser sustancial [D01]. Por lo tanto, de manera practica para facilitar los cálculos de coeficiente de drag, no se tendrán en cuenta las contribuciones de drag por fricción ya que las velocidades en estudio son son bajas; en consecuencia, la ecuación utilizada para calcular el arrastre aerodinámico se ve reducida a la ecuación 4.4.

$$c_d = \frac{1}{c} \int_0^c \left(C_{p,u} \frac{dy_u}{dx} - C_{p,l} \frac{dy_l}{dx} \right) dx \tag{4.4}$$

Donde además de tener en cuenta la longitud del vehículo c, y los coeficientes de presión medidos en la parte superior como inferior C_{pu} y C_{pl} del modelo respectivamente, se debe en primera instancia, calcular la función de la forma de diseño del vehículo con respecto a la

longitud de este; la derivada de esta función se le llama $\frac{dy_u}{dx}$ para la curvatura presente en la parte superior, y $\frac{dy_l}{dx}$ es el valor correspondiente a la parte inferior.

Capítulo 5

Análisis y resultados

Los resultados obtenidos durante la fase de experimentación utilizando el túnel de viento, proveen varios parámetros a ser usados durante la evaluación del comportamiento aerodinámico del modelo de vehículo bajo estudio. Por lo cual, se utilizaran los datos recolectados producto de la visualización del flujo, en contraste con los resultados conseguidos de calcular los coeficientes de presión con base en las mediciones de presión realizadas, para dicho fin, los resultados son presentados en gráficas donde se expone el coeficiente de presión en relación con el porcentaje de la longitud del vehículo, permitiendo así una fácil comparación. Además, debido a que en el presente proyecto uno de los datos mas importantes es la estimación del coeficiente de drag total por presión sobre el modelo, se añadirá el valor estimado para cada uno de los números de Reynolds a los cuales se llevaron a cabo las pruebas, teniendo en cuenta que dicho valor es derivado de la utilización de la ecuaciones provistas en la sección 4.4.

5.1 Análisis de la distribución de coeficientes de presión sobre el modelo

Teniendo en cuenta que la velocidad durante la experimentación se vario con el fin de estudiar el modelo bajo tres condiciones de velocidad diferentes; a continuación se presenta la distribución de coeficientes de presión a lo largo de la superficie del modelo tanto, para aquellas presiones tomadas en la parte superior como también en la inferior; dichas velocidades son de 14 (m/s), 24 (m/s) y 30 (m/s) respectivamente. Por otra parte, se tendrán en cuenta los valores de presión medidos y los valores de presión corregidos al aplicar el factor de corrección de capa limite descrito en la Sección 3.3.3.

5.1.1 Resultados de las pruebas en túnel a 14 m/s

Analizando la Figura 5.1, es posible visualizar la distribución de presiones sobre el modelo a escala según sea su posición a lo largo de la longitud del vehículo; teniendo como lineas de referencia los coeficientes de presión calculados en la parte superior del modelo (linea de color azul), como los coeficientes de presión en la parte inferior (linea naranja); adicionalmente, a efectos de visualización se muestra la distribución de presión con los valores de C_p ya corregidos, por consiguiente como producto del análisis de las figuras 5.1 y 5.2 se puede afirmar que:



Figura 5.1: Distribución de C_p a $R_e = 217000$

Fuente: Autores

La presión ubicada arriba de la superficie del modelo se va incrementando sustancialmente hasta llegar a valores muy cercanos a la presión estática (presión de referencia), dicho comportamiento también se puede llamar como gradiente adverso, ya que, provoca que el flujo se separe de la superficie del vehículo, por consiguiente, desde un 80% de la longitud del vehículo en adelante, es posible que se presenten índices de turbulencia en el flujo, es decir, que el comportamiento deja de ser laminar y pasa a ser del tipo turbulento, como es visible en las figura 5.3.

En cambio, los valores tomados en la parte inferior del vehículo demuestran su tendencia a comportarse de manera constante hasta cerca del 30% de la longitud del modelo; desde este punto hasta una distancia cercana al 80% de su longitud, se denotan cambios drásticos



Figura 5.2: Distribución de C_p Corregidos a $R_e = 217000$

Fuente: Autores

en los valores de presión, ya que estos tienden a aumentar significativamente y a su vez disminuye repentinamente. Dicho comportamiento puede estar relacionado con algún tipo de perturbación en el flujo generado posiblemente por el soporte del modelo de pruebas con el cual se sujeta al tune, por lo cual, una vez el flujo logra volver a estabilizarse en cierta medida, sus valores son parecidos a los tomados en la parte de enfrente; en consecuencia, no se descarta que dicha perturbación al flujo se mantenga a lo largo de toda la experimentación aun variando las velocidades.

Asimismo, es valido mencionar que debido a que el flujo se encuentra mas adherido a la superficie del modelo en la parte de abajo comparado con el aumento de presión de la parte superior del modelo; cerca a la sección final del vehículo puede que se genere una clase de vorticidad normal al flujo de aire, esto explica porque los hilos en esta zona tienden a oscilar en esta dirección; además, visto desde la parte de arriba, como se evidencia por la experimentación con humo, figura 5.3, se puede observar que la capa limite una vez desprendida tiende a volverse a adherir a la superficie, dicho comportamiento es visible en la estela de humo generada en la parte trasera del vehículo donde se denota una ligera curva de esta, por lo cual, no se descarta que se generen vórtices en el flujo una vez halla terminado de pasar por el modelo.

Figura 5.3: Pruebas de visualización a 14 m/s



Fuente: $\overline{Autores}$

5.1.2 Resultados de las pruebas en túnel a 24 m/s

De la misma manera en que se realizo el análisis en el apartado 5.1.1, las figuras 5.4 y 5.5 para los valores de C_p corregidos, indican los resultados obtenidos en el análisis del vehículo a una velocidad de 24 m/s.



Según los valores de coeficiente de presión tomados en en la sección superior del vehículo, es de notar que el primer dato de coeficiente de presión calculado en la parte de enfrente cerca al 6% de la longitud, se mantiene por encima de la presión estática, es posible que este comportamiento se deba a su cercanía con un punto de estancamiento generado sobre el vehículo en la parte frontal del modelo y dada la curvatura del modelo, donde la velocidad del flujo se reduce a valores cercanos a cero. De este punto en adelante la presión se mantiene por debajo del valor de la presión estática y a su vez no se muestra señales de algún gradiente de presión adverso que pueda generar el desprendimiento de capa limite, pero al 60% de la longitud del modelo, dicha presión aumenta drásticamente hasta alcanzar un valor de -0,1 lo que hace muy probable que exista una separación de capa limite en esta zona del vehículo, siendo este fenómeno una de las fuentes del aumento del arrastre aerodinámico mas significativas, puesto que resistencia al avance aumenta debido a la formación de un flujo turbulento.



Figura 5.5: Distribución de C_p corregidos a $R_e = 373000$

Fuente: Autores

Por su parte, el flujo de aire en la parte inferior del vehículo se comporta de manera turbulenta por la incidencia del soporte del modelo de pruebas como se menciono anteriormente y la forma del vehículo, siendo esta generada desde una zona del 30 % en adelante, es probable que se visualice flujo turbulento hasta el final del vehículo teniendo un comportamiento ascendente con la capa limite desprendida a una altura del 60 %, figura 5.6.



Figura 5.6: Pruebas de visualización a 24 m/s

Fuente: Autores

5.1.3 Resultados de las pruebas en túnel a 30 m/s

Como se ha venido observando anterior mente, el diseño del vehículo posee algunas características que promueven el desprendimiento de capa limite en la zona de atrás del vehículo; en un vehículo de alto desempeño energético, es crucial que la capa limite no se desprenda tan tempranamente, como es el caso del modelo en estudio, en donde en zonas aproximadas de desprendimiento son al 60 hasta el 80 % de la longitud.



Ahora bien, al realizan pruebas a 30m/s, teniendo en cuenta las figuras 5.7 y 5.8 es notable

ver que el flujo en la parte inferior del vehículo se comporta de manera turbulenta, visible porque los coeficientes de presión tienden a igualarse a la presión estática del flujo de aire; en la parte superior del modelo, analizando únicamente hasta el 50 % de la longitud, la curvatura que tiene el diseño resulta tener una incidencia positiva en el flujo ya que este las presiones en este zona tienden a disminuir, por lo tanto, este comportamiento se ve traducido en que el flujo se comporta de manera laminar; pero cuando el flujo viaja a valores cercanos al 50 % de la longitud del vehículo, comienza a aparecer una aumento importante en las presiones con pendiente positiva, lo cual hace exista una zona transitoria donde probablemente el fluido deje de comportarse de manera laminar y pase a ser turbulenta, este ultimo comportamiento del fluido es posible que se genere dado a que la curvatura en la parte superior del vehículo comienza a decrecer, por lo tanto es recomendable tener en cuenta este factor para que según sean las modificaciones hechas al diseño, se logre retardar así el desprendimiento de capa limite sobre la superficie superior del vehículo.



Fuente: Autores

Adicionalmente a esto, las figuras 5.7 y 5.8 para los valores de presión corregidos, denotan el aumento en la magnitud de los coeficientes de presión situados en la parte inferior del vehículo, pero a su vez muestra que a una mayor velocidad el flujo se tienden a adherir mas a la superficie del vehículo pero aun así es mas probable que exista un desprendimiento de capa limite de manera mas temprana en la longitud del vehículo.

Dicho aumento en la magnitud de los coeficientes de presión puede ser observado en la figura 5.9, en donde se evidencia que las oscilaciones en los hilos de algodón son cada vez mas grande a una distancia del 60 % del modelo, como producto de la turbulencia generada tanto en la parte inferior como superior.



Figura 5.9: Pruebas de visualización a 30 m/s, mediante Tufts

Fuente: Autores

5.1.4 Comparación de distribución de Coeficientes de presión a diferentes Reynolds

Como herramienta para analizar el comportamiento del fluido con respecto a la variación de la velocidad, a continuación en las Figuras 5.10 y 5.11, que corresponden a los coeficientes de presión medidos en la parte superior e inferior del modelo respectivamente, se muestra el valor de coeficiente de presión para las velocidades de experimentación anteriormente analizadas.

Por su parte, en la figura 5.10 se muestra que además de la influencia que tiene el punto de estancamiento en la parte frontal del vehículo, ya que incrementa el coeficiente de presión a la altura del 6% de la longitud del modelo para cualquier numero de Reynolds; el valor seguido mas alto esta ubicado en la zona cercana al 67% en donde, como se ha mencionado anteriormente, es probable que sea producto del desprendimiento de capa limite. Como resultado de las fuerzas viscosas, una vez generado el desprendimiento de capa limite, las partículas de aire tenderán a unirse nuevamente a la superficie, dicho comportamiento puede ser visible al 70 % de la longitud, donde se nota un gradiente de presión positiva en los tres casos de velocidad, ya que las presiones en este punto tienden a descender; analizando dicho comportamiento desde este punto de vista, es mas fácil para un flujo a mayor velocidad el volver a adherirse a la superficie del vehículo puesto que se evidencia una mayor pendiente en relación con las demás velocidades. También es posible añadir que la curvatura del prototipo en su parte frontal juega un papel fundamental con respecto al aumento o disminución de la presión, al aumentar dicha curvatura los coeficientes de presión serán mas bajos, pero llegado el momento en que la curvatura es leve, la presión en dichos puntos empieza a aumentar, por lo tanto es trabajo del equipo de diseñadores el contemplar este tipo de factores, para buscar un buen balance ente la curvatura de la superficie del vehículo y el área transversal proyectada, como se hablo muy tempranamente en el presente estudio.



Figura 5.10: Distribución de C_p medidos en la parte superior del modelo

Fuente: Autores

Por otra parte, en la figura 5.11, a pesar de la existencia de la turbulencia generada por parte del soporte de ajuste del modelo a escala, es posible señalar que gracias a que la forma en la parte inferior del vehículo tiende a ser mas plana en contraste con la parte superior, los coeficientes de presión medidos en este punto son mas bajos y tienden a acercarse a la presión estática del flujo de aire, por consiguiente, analizando el modelo en su primera mitad, se observa que la sección de las ruedas tienden a aumentar la presión en este punto, si la pendiente de este aumento resulta ser lo bastante pronunciada, podemos decir que se

generara un gradiente de presión adverso cerca del 30 % de la longitud del vehículo, haciendo que exista un desprendimiento de capa limite y por lo tanto que el flujo se comporte de forma turbulenta de hay en adelante; como nota adicional, la mayoría de vehículos de competición en otro tipo de competencias incorporan una serie de aletas con el objetivo de mantener el flujo de tipo laminar debajo del vehículo mucho mas tiempo, pero en este tipo de competencia de la Shell Eco Marathon esta estrategia no es permitida.



2



Fuente: Autores

Como se ha visto anterior mente, hasta este punto queda demostrado que siguiendo los pasos vistos en el presente trabajo, es posible realizar un estudio aerodinámico en prototipos de vehículos a escala de la competencia Shell Eco-Marathon con el objetivo de observar su comportamiento aerodinámico para cualquier tipo de diseño realizado. Pero, adicionalmente, el arrastre aerodinámico se puede calcular siguiendo los pasos a continuación.

5.2 Estimación del coeficiente de arrastre (Cd)

Una vez implementadas las ecuaciones enunciadas en la sección 4.4, los resultados de dichos valores pueden ser incorporados en el modelo de tabla 5.1, téngase en cuenta que la tabla 5.1 únicamente es mostrada a manera explicativa, los valores en ella contenidos se pueden ver en el anexo B, sección B.2.

x [m]	Сри	Cpl	dyu/dx	dyl/dx	C_dparcial
0,03					
0,06					
0,09					
x_n					

Tabla 5.1: Recolección de datos

Fuente: Autores

Donde x es la distancia a la cual están dispuestas cada una de las tomas de presión, tomando como referencia inicial la parte frontal del vehículo, la cantidad de valores aquí representada dependerá de la cantidad de tomas de presión analizadas, siendo el subíndice u utilizado para los valores en la parte superior del modelo y l para los valores de la parte inferior, se presentan los valores de coeficiente de presiones medidos para ambos casos. Entre tanto, para los valores de $\frac{dy}{dx}$ son iguales a evaluar cada una de las distancias de cada toma de presión en la derivada de la función que mas se acerca a describir la forma del diseño del vehículo, en este caso tanto para la sección superior del modelo $\frac{dy_l}{dx}$, como también para la parte inferior $\frac{dy_l}{dx}$, debido a que no es un modelo simétrico longitudinalmente. Para finalizar es necesario multiplicar todo el resultado por 0.03 que es el resultado de la integración del valor dx. De tal forma que, realizando únicamente la operación mostrada en la ecuación 5.1 para cada una de las tomas de presión se obtiene el resultado mostrado en las columna $C_{dparcial}$.

$$Cd_{parcial} = \left(\left(C_{pu} * \frac{dy_u}{dx} \right) - \left(C_{pl} * \frac{dy_l}{dx} \right) \right) * 0,03$$
(5.1)

Siendo el resultado total de la integral descrita en la ecuación 4.4 igual a la sumatoria para cada $C_{dparcial}$ en cada una de las tomas de presión, se procede a dividir esta entre la longitud del vehículo, 5.2, obteniendo finalmente el valor de coeficiente de *drag* por presión, obteniendo así los valores de arrastre aerodinámico registrados para cada una de las velocidades a las cuales se sometió el modelo.

$$Cd = \frac{C_{dparcial}}{c} \tag{5.2}$$

Velocidades Vehiculo real	Cd_Estimado	Cd_Corregido		
9	0,008509125	0,00841422		
15,43	0,008362709	0,008269437		
19,54	0,008631545	0,008535275		
Pad Carll	0,08	-		

Tabla 5.2: Coeficiente de arrastre calculados a tres diferentes velocidades de experimentación

Fuente: Autores

Analizando cada uno de los valores calculados de Cd para cada una de las velocidades, es de notar que en la medida que se aumente la velocidad, el arrastre aerodinámico aumentara igualmente, por lo tanto, es muy posible que al estudiar el mismo modelo bajo un numero de Reynolds correspondiente a una velocidad de 40 km/h de la escala real, el resultado incrementara. Ahora bien, teniendo en cuenta el récord actual del vehículo PadCarII con un coeficiente de drag = 0.08, y el coeficiente de drag generado para un perfil alar en 2D se encuentra en el orden de 0.004 en adelante, como parámetros de comparación; podemos ver que al estudiar la distribución de presiones en el eje longitudinal y mediante la utilización del la ecuación 4.3, los valores calculados corresponderán entonces al arrastre aerodinámico del vehículo en 2D únicamente.

Capítulo 6 Conclusiones

- El presente trabajo presenta una metodología aplicable en prototipos a escala de vehículos de la competencia Shell Eco-Marathon, permitiendo el estudio aerodinámico en esta clase de vehículos de competición, mediante la medición de coeficiente de presión y la utilización de técnicas de visualización, como se muestra en el capítulo 4. Los resultados obtenidos gracias a este estudio pueden ser usados como guía útil para diseñar nuevos prototipos de vehículos que pueden hacer parte de próximas competencias.
- Como principal factor a tener en cuenta en el estudio aerodinámico de un vehículo de competición es que exista en primera instancia una similitud dinámica, como se expresa en sección 3.3.2; además de esto, se de debe tener en cuenta las correcciones de capa limite debido a que el flujo dentro de la sección de pruebas se encuentra confinado, según la sección 3.3.3; y por ultimo otro de los factores a tener en cuenta es la adaptabilidad que tenga el modelo de pruebas con el tipo de túnel de viento utilizado, a modo de explicación se aclaran los parámetros para realizar las tomas de presión en el modelo y el tipo de sujeción que debe tener con el túnel de viento en estudio, mencionando estos datos a lo largo de la metodología implementada en el presente trabajo.
- Mediante la implementación de diversos tipos de metodologías de visualización, vistas en la sección 3.3.4 y la sección 4.3.1, es posible identificar y determinar el comportamiento del flujo en relación a las características de diseño del vehículo, permitiendo hallar zonas de turbulencia y vorticidad como las encontradas en la parte posterior del vehículo en estudio; a si mismo, es posible identificar la zona en la cual el comportamiento del flujo es del tipo transitorio con la finalidad de que se puedan tomar medidas en el diseño para prever la existencia de un desprendimiento de capa limite a una longitud del vehículo muy temprana, también es posible percibir un aumento de presión

en la parte inferior del vehículo en relación con la ubicación de las ruedas delanteras y su disposición.

• Es posible calcular el arrastre aerodinámico por presión, de cualquier modelo de diseño de vehículo basándose únicamente en la medición de distribución de presiones y mediante un estudio aerodinámico de tipo teórico experimental; los valores obtenidos con respecto al coeficiente de *drag* por presión, resultan ser bajos debido a que en este caso, se calculo únicamente en la sección longitudinal del vehículo, puesto que la ecuación utilizadas 4.3 esta dada para un modelo en 2D; además desde otro punto de vista, no se tienen en cuenta la contribución del arrastre aerodinámico por fricción y a su ves es posible que la perturbación del flujo producto del soporte del modelo halla incidido en dicho resultado.

Capítulo 7

Recomendaciones

- En este trabajo se presentó la estimación de Coeficiente de *drag* por presiones calculado a una velocidad máxima de experimentación en túnel de viento de 30 m/s con relación a una velocidad del modelo igual a 20 km/h, por lo tanto se recomienda realizar dichas pruebas ya sea aumentando la velocidad de experimentación, o mediante la realización de un nuevo prototipo a escala con la finalidad de estudiar la aerodinámica del vehículo real donde se varían las desde 20 km/h a 40 km/h.
- Se recomiendo utilizar un sistema de medición de presiones digital o cualquier otro dispositivo, con el propósito de brindar una mayor confiabilidad a los datos obtenidos.
- No se recomienda la utilización de una placa plana para realizar las pruebas de visualización tipo *Downstream* ya que esta tiene una incidencia en el flujo, por lo que no resulta proveer información acerca del comportamiento del flujo ubicado en esta zona con referencia al modelo; desde otro punto de vista, es una buena opción la utilización de pinturas y otro tipo de colorantes fluorescentes con el fin de visualizar cada hilo por separado, siempre y cuando no se incurra en alterar la flexibilidad de estos impidiendo así una buena experimentación; adicionalmente a esto, se plantea como otra opción, la utilización de detergentes líquidos ricos en fosfato, ya que al sumergir las fibras de algodón en este tipo de sustancias ayuda a que sean mas brillantes en relación a la cantidad de luz fluorescente a las que sean expuestas.
- Al utilizar el método de visualización por *Tuft*, es recomendable analizar una sola zona de interés a la ves, retirando los hilos restantes con el fin de estudiar el comportamiento del flujo sobre el modelo de una manera mas adecuada.
- Realizar una validación de los datos obtenidos experimentalmente mediante la simula-

ción CFD, además gracias a esta herramienta es posible estimar el perfil de velocidades generado sobre la superficie del vehículo, con la cual se calcula la distribución de esfuerzos cortantes, variable que no se tubo en cuenta en el presente trabajo.

Bibliografía

[BRP99]	J. Barlow, W. Rae y A. Pope. Low Speed Wind Tunnel Testing. Primera Edición. Jhon Wiley y Sons, Inc, 1999.
[D01]	A. Jhon D. <i>Fundamentals of Aerodynamics</i> . Third Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2001.
[ST04]	D. SAHINI y B. Tech. "Wind Tunnel blockage corrections". En: Texas Tech University (2004).
[D05]	A. Jhon D. <i>Introduction to flight</i> . Fifth Edition. McGraw-Hill Higher Education, 2005.
[McB05]	S. McBeath. <i>Aerodinámica del automóvil de competición</i> . Primera Edición. CEAC S.A, 2005.
[SAN+07]	J. SANTIN y col. <i>The worlds most fuel efficient vehicle desing and development of Pac-carII</i> . Primera Edición. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zurich Voltastrasse, 2007.
[Cro09]	D. Crolla. Automotive engineering powertrain, Chassis System and vehicle body. Primera edición. Elsevier, 2009.
[Car13]	M. Caro. "Diseño de un túnel de viento subsónico para hélices de máximo 30 pulgadas". En: <i>Tecno Esufa</i> (2013), págs. 37-36.
[WMD16]	P. Wojciech, S. Mateusz y W. Dariusz. "Investigation on Aerodynamics of Super-Effective Car for Drag Reduction". En: <i>Mechanics and Mechanical Engineering</i> 20.3 (2016), págs. 94-100.

[AMV17] J. Ayala, D. Martinez y J Valbuena. "Diseño de un dispositivo reductor de la resistencia aerodinámica en un bus intermunicipal". En: FUNDACIÓN UNI-VERSITARIA LOS LIBERTADORES (2017).

- [BYU17] News BYU. One vehicle, 10 students and 1,700 mpg. 2017. URL: https:// news.byu.edu/news/one-vehicle-10-students-and-1700-mpg (visitado 08-10-2018).
- [Glo17a] shell Global. RESULTS AND AWARDS. 2017. URL: https://www.shell. com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/americas/results-andawards.html (visitado 20-08-2018).
- [Glo17b] shell Global. SHELL ECO-MARATÓN. 2017. URL: https://www.shell.com/ energy-and-innovation/shell-ecomarathon.html (visitado 08-11-2018).
- [Sab17] Universidad del la Sabana. Así fue nuestra participación en la Shell Eco Marathon 2017. 2017. URL: https://www.unisabana.edu.co/programas/carreras/ facultad-de-ingenieria/ingenieria-mecanica/nuestra-participacionen-la-shell-eco/ (visitado 30-10-2018).
- [Veh17] Duke Electric Vehicles. 2018 Maxwell World Record Specifications. 2017. URL: http://www.duke-ev.org/prototype-evolution/ (visitado 08-07-2018).

Apéndice A

Primer Apéndice

A.1 Coeficientes de presión aplicando la corrección de capa limite vs. coeficientes sin corregir

En el presente apéndice se muestran los datos obtenidos producto de la experimentación en túnel de viento, como evidencia de la mediciones realizadas en el barómetro de agua con respecto a las alturas de las columnas de agua; seguidamente se muestran los resultados de calcular los coeficientes de presión corregidos y sin ningún tipo de corrección de capa limite, para cada una de las tomas de presión. Los resultados varían con relación a la velocidad de pruebas dentro del túnel de viento, a manera de mostrar dicha tarea se muestran los datos obtenidos en la experimentación a 14 m/s.

Donde las columnas Toma 1, 2, 3 respectivamente son las deferencias de alturas medidas en centímetros en cada una de las tomas de presión con el objetivo de obtener un valor promedio de la longitud de la columna de agua; Luego se realiza un factor de conversión a metros y se presenta el valor final promediado de $\Delta h = a$ la columna Total h.

# Toma de Presión	Toma1	Toma2	Toma3	Total h(m)	ср	Cp Corregido
1u	0,1	0,1	0,1	0,001	0,1052572	0,10408323
2u	-0,35	-0,18	-0,2	-0,0024333	-0,2561258	-0,2532692
3u	-0,25	-0,2	-0,22	-0,0022333	-0,2350744	-0,2324525
4u	-0,3	-0,2	-0,25	-0,0025	-0,263143	-0,2602081
5u	<mark>-0,28</mark>	-0,2	-0,21	-0,0023	-0,2420916	-0,2393914
6u	-0,22	-0,2	-0,2	-0,0020667	-0,2175315	-0,2151053
<mark>8u</mark>	-0,21	-0,2	-0,2	-0,0020333	-0,214023	-0,2116359
9u	-0,23	-0,22	0,21	-0,0008	-0,0842058	-0,0832666
10u	-0,18	-0,17	-0,17	-0,0017333	-0,1824458	-0,1804109
11u	-0,1	-0,1	-0,1	-0,001	-0,1052572	-0,1040832
12u	-0,11	-0,12	-0,12	-0,0011667	-0,1228001	-0,1214304
13u	-0,2	-0,2	-0,2	-0,002	-0,2105144	-0,2081665
14u	-0,2	-0,2	-0,19	-0,0019667	-0,2070058	-0,204697
15u	-0,09	-0,1	-0,1	-0,0009667	-0,1017486	-0,1006138

Tabla A.1: Resultados coeficientes de presión parte superior del modelo a 14 m/s

Tabla A.2: Resultados coeficientes de presión parte inferior del modelo a 14 m/s

# Toma de Presión	Toma1	Toma2	Toma3	Total h(m)	ср	Cp Corregido
1	-0,18	-0,15	-0,15	-0,0016	-0,1684115	-0,1665332
21	-0,12	-0,12	-0,12	-0,0012	-0,1263086	-0,1248999
31	-0,1	-0,1	-0,1	-0,001	-0,1052572	-0,1040832
41	-0,12	-0,12	-0,12	-0,0012	-0,1263086	-0,1248999
51	-0,09	-0,09	-0,1	-0,0009333	-0,0982401	-0,0971443
61	-0,1	-0,1	-0,1	-0,001	-0,1052572	-0,1040832
81	0,4	0,4	0,4	0,004	0,42102879	0,41633292
91	-0,4	-0,4	-0,4	-0,004	-0,4210288	-0,4163329
10	-0,39	-0,39	-0,39	-0,0039	-0,4105031	-0,4059246
11	1,4	<mark>1,45</mark>	<mark>1,45</mark>	0,01433333	1,50868649	1,49185961
121	-0,4	-0,4	-0,4	-0,004	-0,4210288	-0,4163329
13	-0,45	-0,45	-0,45	-0,0045	-0,4736574	-0,4683745
141	-0,3	-0,3	-0,3	-0,003	-0,3157716	-0,3122497
151	-0,2	-0,2	-0,2	-0,002	-0,2105144	-0,2081665

Fuente: Autores

Fuente: Autores

A.2 Coeficientes de presión aplicando la corrección de capa limite vs. coeficientes sin corregir

Para poder analizar el cambio en los resultados totales de los coeficientes de presión como producto de realizar las respectivas correcciones de capa limite, a continuación se evidencian los valores medidos de coeficiente de presión sin corrección contrastados con los coeficientes de presión corregidos, para los datos tomados en la parte superior e inferior del modelo, para cada una de las velocidad de prueba.



Figura A.1: Coeficientes de presión parte superior del modelo a 14 m/s

Fuente: Autores

Figura A.2: Coeficientes de presión parte inferior del modelo a 14 m/s



Fuente: Autores



Figura A.3: Coeficientes de presión parte superior del modelo a 24 m/s

Fuente: Autores

Figura A.4: Coeficientes de presión parte inferior del modelo a 24 m/s



Fuente: Autores

.



Figura A.5: Coeficientes de presión parte superior del modelo a 30 m/s

Fuente: Autores

Figura A.6: Coeficientes de presión parte inferior del modelo a 30 m/s



Fuente: Autores

A.3 Plano del modelo estudiado

Figura A.7: Plano modelo de vehículo desarrollado por el grupo de investigación DETECAL, representado en mm



Fuente: Autores

Apéndice B

Segundo Apéndice

B.1 Función correspondiente a la forma del vehículo

Gracias al software WebPlotDigitizer, mediante la importación del plano en 2D del prototipo de vehículo en estudio, se obtuvo una tabla en donde se relacionaba la altura de la curva del diseño del modelo con relación a su ubicación en el eje x, con el objetivo de poder encontrar la función y que describa el diseño tanto en la parte de arriba del vehículo como también la superficie inferior de esta. Obteniendo así la siguientes funciones para la parte superior B.1, e inferior B.2 respectivamente:

$$y = -\frac{7321}{50}x^6 + \frac{5457}{25}x^5 - \frac{3241}{25}x^4 + \frac{7917}{200}x^3 - \frac{13953}{2000}x^2 + \frac{7341}{10000}x + \frac{13}{5000}$$
(B.1)

$$y = 27,123x^{6} - 42,735x^{5} + 32,569x^{4} - 12,991x^{3} + 2,506x^{2} - 0,2269x - 0,01$$
(B.2)

B.2 Procedimiento y estimación del coeficiente de *drag* por presiones

Una vez calculada la distribución de presiones sobre el modelo a escala, a continuación se expresan las tablas de resultados para cada valor utilizado con la finalidad de estimar el coeficiente de arrastre en el vehículo.
x	Cpu	Cpu	Cpl	Cpl	dyu/dx	dyl/dx	Cd_Parcial	Cd_parcial
0.03	0.1052572	0.10408323	-0.1684115	-0.1665332	0.4093	-0.1083	0.00074528	0.00073697
0.06	-0.2561258	-0.2532692	-0.1263086	-0.1248999	0.2259	-0.041	-0.0018911	-0.00187
0,09	-0,2350744	-0,2324525	-0,1052572	-0,1040832	0,1286	-0,0096	-0,0009372	-0,0009268
0,12	-0,263143	-0,2602081	-0,1263086	-0,1248999	0,0782	-0,0018	-0,0006242	-0,0006172
0,15	-0,2420916	-0,2393914	-0,0982401	-0,0971443	0,0488	-0,0081	-0,0003783	-0,0003741
0,18	-0,2175315	-0,2151053	-0,1052572	-0,1040832	0,0257	-0,0213	-0,000235	-0,0002324
0,24	-0,214023	-0,2116359	0,42102879	0,41633292	-0,0214	-0,0473	0,00073484	0,00072665
0,27	-0,0842058	-0,0832666	-0,4210288	-0,4163329	-0,0432	-0,0526	-0,0005553	-0,0005491
0,3	-0,1824458	-0,1804109	-0,4105031	-0,4059246	-0,0594	-0,0487	-0,0002746	-0,0002716
0,33	-0,1052572	-0,1040832	1,50868649	1,49185961	-0,0684	-0,0325	0,00168696	0,00166814
0,36	-0,1228001	-0,1214304	-0,4210288	-0,4163329	-0,073	-0,0002297	0,00026603	0,00026306
0,39	-0,2105144	- <mark>0,208166</mark> 5	-0,4736574	-0,4683745	-0,0829	0,0529	0,00127524	0,00126102
0,42	-0,2070058	-0,204697	-0,3157716	-0,3122497	-0,1173	0,1331	0,00198933	0,00196714
0,45	-0,1017486	-0,1006138	-0,2105144	-0,2081665	-0,2076	0,288	0,00245253	0,00242518
							0,00425456	0,00420711
						Cd	0.00850913	0.00841422

Tabla B.1: Estimación coeficiente de Draga 14 m/s

Fuente: Autores

x	Cpu	Cpu Corregido	Cpl	Cpl	dyu/dx	dyl/dx	Cd_Parcial	Cd_parcial
				Corregido				corregido
0,03	0,17812157	0,17613492	-0,1888089	-0,186703	0,4093	-0,1083	0,00157371	0,00155616
0,06	-0,2291831	-0,2266269	-0,2173083	-0,2148846	0,2259	-0,041	-0,0018205	-0,0018002
0,09	-0,25887	-0,2559828	-0,1128103	-0,1115521	0,1286	-0,0096	-0,0010312	-0,0010197
0,12	-0,2826196	-0,2794674	-0,2173083	-0,2148846	0,0782	-0,0018	-0,0006748	-0,0006672
0,15	-0,283807	-0,2806416	-0,0926232	-0,0915902	0,0488	-0,0081	-0,000438	-0,0004331
0,18	-0,261245	-0,2583312	0,06887367	0,0681055	0,0257	-0,0213	-0,0001574	-0,0001557
0,24	-0,2826196	-0,2794674	0,28499451	0,28181588	-0,0214	-0,0473	0,00058585	0,00057931
0,27	-0,261245	-0,2583312	-0,2873695	-0,2841643	-0,0432	-0,0526	-0,0001149	-0,0001136
0,3	-0,2386829	-0,2360208	-0,3206188	-0,3170429	-0,0594	-0,0487	-4,309E-05	-4,261E-05
0,33	-0,104498	-0,1033325	1,13997805	1,1272635	-0,0684	-0,0325	0,00132591	0,00131112
0,36	-0,1781216	-0,1761349	-0,4631161	-0,4579508	-0,073	-0,0002297	0,00038689	0,00038258
0,39	-0,2137459	-0,2113619	-0,3028067	-0,2994294	-0,0829	0,0529	0,00101214	0,00100085
0,42	-0,2374954	-0,2348466	-0,1484346	-0,1467791	-0,1173	0,1331	0,00142845	0,00141251
0,45	-0,1472472	-0,1456049	-0,1424973	-0,1409079	-0,2076	0,288	0,00214823	0,00212427
							0,00418135	0,00413472
						Cd	0,00836271	0,00826944

Tabla B.2: Estimación coeficiente de Draga 24 m/s

Fuente: Autores

Cpu Cpl Cd_parcial dyu/dx dyl/dx Cd_Parcial Cpu Cpl x Corregido Corregido corregido 0,00204271 0,03 0,17763504 0,17565381 -0,035527 -0,0351308 0,4093 -0,1083 0,00206575 0,2259 0,06 -0,2568307 -0,2539661 -0,0266453 -0,0263481 -0,041 -0,0017733 -0,0017535 0,09 -0,2812555 -0,2781185 -0,0222044 -0,0219567 0,1286 -0,0096 -0,0010915 -0,0010793 -0,0007312 0,12 -0,314562 -0,3110536 -0,0266453 -0,0263481 0,0782 -0,0018 -0,0007394 -0,3182628 -0,3147131 -0,0207241 -0,0204929 -0,0081 -0,000471 -0,0004657 0,15 0,0488 -0,0002527 0,18 -0,309381 -0,3059304 -0,0222044 -0,0219567 0,0257 -0,0213 -0,0002499 -0,2664526 -0,2634807 -0,0473 0,00029378 0,24 0,08881752 0,08782691 -0,0214 0,00029709 -0,2930978 0,00023703 0,27 -0,2898288 -0,0888175 -0,0878269 -0,0432 -0,0526 0,0002397 0,3 -0,2457285 -0,2429878 -0,0865971 -0,0856312 -0,0594 -0,0487 0,00031137 0,0003079 0,33 -0,1036204 -0,1024647 0,31826277 0,31471308 -0,0684 -0,0325 0,00052294 0,0005171 -0,073 -0,0002297 0,00036409 0,00036003 0,36 -0,1665328 -0,1646755 -0,0888175 -0,0878269 0,39 -0,2146423 -0,2122484 -0,0999197 -0,0988053 -0,0829 0,0529 0,00069239 0,00068467 -0,2442482 0,42 -0,241524 -0,2153825 -0,2129802 -0,1173 0,1331 0,00171953 0,00170035 0,45 -0,1746745 -0,1727263 -0,1554307 -0,1536971 -0,2076 0,288 0,00243079 0,00240368 0,00431577 0,00426764 Cd 0.00863155 0,00853527

Tabla B.3: Estimación coeficiente de Drag a 30 m/s

Fuente: Autores