



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño y caracterización de cascos de ciclismo y motociclismo ante efectos del viento mediante Dinámica de Fluidos Computacional y su comparación con arreglo experimental en túnel de viento

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero mecánico

P R E S E N T A

Erick Montiel Montiel

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mi mamá y a mi abuela que me han enseñado el valor del esfuerzo y la dedicación, son verdaderos ejemplos de vida.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por permitirme culminar con salud una etapa más.

A mi mamá Lilia Montiel Portillo y a mi abuela Reynalda Montiel Portillo, por impulsarme a lo largo de mi vida, por su amor y por ver que nada fuera un obstáculo para continuar mis estudios.

A mi hermano Edgar Montiel Montiel, por ser además un amigo, por aconsejarme y acompañarme a lo largo de mi vida como estudiante.

A mi novia Mariel Campuzano, por ser fuente de motivación y acompañarme desde el inicio de este proyecto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por darme la oportunidad de formarme en sus aulas y con sus excelentes profesores.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM por las facilidades prestadas, mismas que permitieron la realización de este trabajo.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-IN101318), por el apoyo económico destinado al desarrollo de esta tesis.

Al Dr. Adrián Pozos Estrada, por asesorar este trabajo de principio a fin, por su compromiso conmigo y los demás estudiantes y por compartirme no sólo su conocimiento sino también su amistad.

A los integrantes del Grupo de Ingeniería de Viento (GIV), especialmente al Dr. Edmundo Amaya, al M.I. Vladimir Guzmán, y al M.I. Josué U. Rodríguez por asistirme en las diferentes etapas del proyecto.

RESUMEN

En el presente trabajo se estudiaron un casco de ciclismo tipo urbano y un casco de motociclismo tipo integral con técnicas CFD (Computational Fluid Dynamics), se caracterizaron mediante el software de simulación numérica ANSYS FLUENT y con base en sus parámetros aerodinámicos se diseñaron dos cascos más. Los resultados numéricos se compararon con pruebas experimentales, las cuales se realizaron en el túnel de viento del Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT). El casco de ciclismo y el de motociclismo fueron analizados a 3 m/s, 6 m/s, 12 m/s y a 9 m/s, 15 m/s y 21 m/s respectivamente, calculando las correspondientes fuerzas y coeficientes de arrastre. De igual manera se presentan pruebas de visualización de flujo realizadas con un generador de humo y en las que se identificaron los puntos de separación de flujo y estelas de cada modelo. Los resultados calculados con la simulación son comparables con los obtenidos experimentalmente por lo que se considera una correcta validación de los mismos. No obstante, se presenta la discusión y análisis de resultados con la finalidad de considerar fuentes de error y de evaluar el estudio en general.

ABSTRACT

In the present study, an urban-type cycling helmet and a full-face motorcycle helmet were studied with CFD (Computational Fluid Dynamics) techniques, they were characterized using the software ANSYS FLUENT and, based on their aerodynamic parameters, two more helmets were designed. Numerical results were compared with experimental tests, which were carried out in the wind tunnel of the Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT). The cycling helmet and the motorcycle helmet were analyzed at 3 m/s, 6 m/s, 12 m/s and at 9 m/s, 15 m/s and 21 m/s respectively, calculating the corresponding forces and drag coefficients. Likewise, flow visualization tests performed using smoke as seeding particles are presented in which the flow separation points and wake of each model were identified. The results obtained in the simulation are comparable with those obtained experimentally, so it is considered a correct validation. However, the discussion and analysis of results are presented in order to consider sources of error and to evaluate the study in general.

CONTENIDO

RESUMEN	iii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS	vii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 El casco y la aerodinámica.....	2
1.2 Objetivo general.....	4
1.3 Objetivos específicos	4
1.4 Justificación	4
1.5 Alcance y limitaciones.....	4
1.6 Tipos y características.....	5
1.6.1 Tipos de cascos de ciclismo	5
1.6.2 Tipos de cascos de motociclismo	8
1.7 Elección y justificación.....	9
1.7.1 Casco de ciclismo	9
1.7.2 Casco de motociclismo.....	9
2 CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS	10
2.1 Definiciones y principios básicos	11
2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes.....	12
2.2.1 Conservación de la masa o ecuación de continuidad	12
2.2.2 Conservación de cantidad de movimiento.....	13
2.2.3 Conservación de la energía.....	15
2.3 Número de Reynolds	15
2.4 Capa límite.....	16
2.4.1 Espesor de capa límite	16
2.4.2 Régimen de capa límite	16
2.4.3 Desprendimiento de la capa límite	17
2.5 Resistencia de superficie y de forma	19
2.5.1 Resistencia de superficie	19
2.5.2 Resistencia de forma.....	20
2.6 Fuerza y coeficiente de arrastre	20

3	ASPECTOS GENERALES DE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y DE EXPERIMENTOS EN TÚNEL DE VIENTO	23
3.1	Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)	24
3.2	Modelos de turbulencia.....	25
3.2.1	Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS).....	25
3.2.2	Modelos de Simulación de Grandes Escalas (LES)	25
3.2.3	Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS).....	26
3.2.3.1	Modelos de cero ecuaciones	27
3.2.3.2	Modelos de una ecuación.....	27
3.2.3.3	Modelos de dos ecuaciones.....	28
3.2.3.3.1	El modelo $k-\epsilon$	28
3.2.3.3.2	El modelo $k-\omega$	29
3.2.3.4	Modelo SST	29
3.3	Softwares de simulación numérica	30
3.4	Modelado en ANSYS FLUENT	30
3.4.1	Geometría	31
3.4.2	Malla.....	31
3.4.3	Parámetros de simulación.....	31
3.4.4	Post procesamiento	32
3.5	Túnel de viento	32
3.5.1	Tipos de túnel de viento	32
3.5.1.1	Túnel de circuito abierto	33
3.5.1.2	Túnel de circuito cerrado	33
3.6	Túnel de viento del LemAT.....	36
4	DESARROLLO DEL DISEÑO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA	41
4.1	Metodología	42
4.2	Datos preliminares y consideraciones.....	43
4.3	Estudio de modelo de referencia: Ciclismo	44
4.3.1	Fuerza y Coeficiente de arrastre	46
4.4	Estudio de modelo de referencia: Motociclismo	46
4.4.1	Fuerza y Coeficiente de arrastre	49
4.5	Recopilación de modelos aerodinámicos.....	50

4.6	Modelos propuestos en CAD.....	51
4.7	Simulación de modelos propuestos en ANSYS FLUENT	52
4.7.1	Geometría y Dominio Computacional.....	52
4.7.2	Malla.....	53
4.7.3	Parametros de simulación.....	56
4.7.4	Post- procesamiento.....	56
4.7.5	Resultados.....	58
5	PRUEBAS DE LABORATORIO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS	63
5.1	Diseño del experimento	64
5.1.1	Manufactura.....	64
5.1.2	Pruebas de visualización.....	65
5.1.2.1	Ciclismo	66
5.1.2.2	Motociclismo	69
5.1.3	Instrumentación	71
5.1.4	Medición de Presión y procesamiento de datos.....	72
5.1.5	Cálculo de fuerza y coeficiente de arrastre.....	75
5.2	Resultados del experimento	77
5.3	Comparación de resultados	78
5.3.1	Rendimiento	80
6	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	82
6.1	Conclusiones	82
6.2	Recomendaciones	83
	Referencias y bibliografía	84
	ANEXOS	87
	ANEXO A. Planos de modelos propuestos	87
	ANEXO B. Resultados experimentales	89

ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

Tabla 3.1 Softwares comerciales y libres para simulación.....	30
Tabla 3.2 Características generales del túnel de viento del LemAT [22].....	37
Tabla 4.1 Condiciones ambientales en la Ciudad de México.....	43
Tabla 4.2 Características de los modelos de referencia.....	43
Tabla 4.3 Resultados obtenidos en ANSYS.....	46
Tabla 4.4 Resultados de modelo de referencia obtenidos en ANSYS.....	49
Tabla 4.5 Configuración de malla de ambos modelos.....	55
Tabla 4.6 Parámetros de solución.....	56
Tabla 5.1 RPM para modelo de bicicleta y motocicleta.....	72
Tabla 5.2 Resultados experimentales de modelo propuesto de ciclismo	77
Tabla 5.3 Resultados experimentales de modelo propuesto de motociclismo	77
Tabla 5.4 Cp en distintos taps de modelos de ciclismo y motociclismo	80
Figura 1.1 Atleta en la sección de prueba del túnel de viento (a) detalles del casco y tubos de PVC (b) [1]	2
Figura 1.2 Distribución de presión sobre geometría de atleta y casco [1].....	3
Figura 1.3 Prueba de visualización de flujo (izquierda) y propuesta estudiada en ANSYS (derecha).....	3
Figura 2.1 Relación de Presión y Velocidad en el efecto Venturi.....	11
Figura 2.2 Comportamiento turbulento y laminar	11
Figura 2.3 Desarrollo de la capa límite [18].....	16
Figura 2.4 Diferentes regímenes de capa límite [8].....	17
Figura 2.5 Desprendimiento de capa límite en cuerpo romo [18].....	18
Figura 2.6 Separación del flujo con superficie lisa (izquierda) y superficie rugosa (derecha) [18]	19
Figura 2.7 Efecto de la resistencia de forma: a) casco estándar b) casco aerodinámico [9]	20
Figura 2.8 Coeficientes generados a diferentes números de Reynolds [8].....	21
Figura 2.9 Ejemplos de coeficientes de arrastre [8]	22
Figura 3.1 Proceso de resolución CFD.....	24
Figura 3.2 Ventana de proyecto en Workbench de ANSYS.	31
Figura 3.3 Diagrama de túnel de circuito abierto.	33
Figura 3.4 Diagrama de Túnel de viento de un retorno.....	34
Figura 3.5 Diagrama de túnel de viento de doble retorno	35
Figura 3.6 Diagrama de túnel de viento de retorno anular	35
Figura 3.7 Plano en planta del túnel de viento del LemAT [22].	36
Figura 3.8 Ventilador visto desde el exterior (izquierda) y al interior del túnel (derecha). ..	37
Figura 3.9 Difusor	38
Figura 3.10 Deflectores al interior del túnel.....	38
Figura 3.11 Cámara de estabilización.....	39
Figura 3.12 Panel estabilizador	39
Figura 3.13 Cono de contracción.....	40

Figura 3.14 Mesa giratoria en sección de pruebas.....	40
Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología adoptada.....	42
Figura 4.2 Modelo de referencia a) CAD y b) Físico.....	44
Figura 4.3 Estela de modelo de referencia con líneas de corriente vista en planta.	45
Figura 4.4 Velocidad con líneas de corriente.....	45
Figura 4.5 Punto de separación en modelo de referencia.....	45
Figura 4.6 Modelo de referencia en a) CAD y b) Físico.....	47
Figura 4.7 Diagrama de contorno de velocidad en modelo de referencia.	47
Figura 4.8 Estela de modelo de referencia con líneas de corriente vista en planta.....	48
Figura 4.9 Punto de separación de flujo en modelo de referencia.....	49
Figura 4.10 Modelos comerciales tipo aero.....	50
Figura 4.11 Modelos comerciales tipo integral.....	50
Figura 4.12 Modelo propuesto en CAD en vista a) Frontal, b) Isométrico, c) Posterior y d) Lateral.....	51
Figura 4.13 Modelo propuesto en CAD en vista a) Frontal, b) Lateral y c) Posterior.....	51
Figura 4.14 Dominio computacional y subseccionamiento.....	52
Figura 4.15 Dominio computacional y subseccionamiento.....	53
Figura 4.16 Mallado del dominio en casco de bicicleta.....	53
Figura 4.17 Mallado del dominio en casco de motocicleta.....	53
Figura 4.18 Detalle de mallado sobre modelo propuesto de ciclismo.....	54
Figura 4.19 Detalle de malla sobre modelo propuesto de motociclismo.....	55
Figura 4.20 Diagrama de contorno de Presión total.....	57
Figura 4.21 Campo de vectores de velocidad.....	57
Figura 4.22 Diagrama de contorno de Presión total.....	57
Figura 4.23 Campo de vectores de velocidad.....	57
Figura 4.24 Resultados de casco de ciclismo.....	58
Figura 4.25 Estela de modelo propuesto en planta (izquierda) y lateral (derecha).....	59
Figura 4.26 Estela de modelo de referencia en planta (izquierda) y lateral (derecha).....	59
Figura 4.27 Comparación en el punto de separación del flujo a) Propuesta y b) Referencia.....	60
Figura 4.28 Resultados de casco de motociclismo.....	60
Figura 4.29 Estela de modelo de referencia en planta (izquierda) y lateral (derecha).....	61
Figura 4.30 Estela de modelo propuesto en planta (izquierda) y lateral (derecha).....	61
Figura 4.31 Comparación en el punto de separación de flujo a) Referencia y b) Propuesta.....	62
Figura 5.1 Proceso experimental.....	64
Figura 5.2 Manufactura del modelo propuesto (izquierda) y modelo terminado (derecha).....	64
Figura 5.3 Proceso de manufactura; a) Modelo en papel, b) cubierto con resanador y c) terminado.....	65
Figura 5.4 Componentes del generador de humo.....	65
Figura 5.5 Unidad de control.....	65
Figura 5.6 Ingreso del fluido mineral a la unidad de control.....	66
Figura 5.7 Separación de la corriente en modelo de referencia (arriba) y propuesto (abajo).....	67

Figura 5.8 Comparación de estelas; arriba modelo de referencia y abajo propuesta	68
Figura 5.9 Separación de la corriente en modelo de referencia (arriba) y propuesto (abajo)	69
Figura 5.10 Comparación de estelas; modelo de referencia (arriba) y propuesto (abajo)....	70
Figura 5.11 Instrumentación de modelos propuestos; a) ciclismo y b) motociclismo	71
Figura 5.12 Conexión de mangueras de modelo a ZOCs.	71
Figura 5.13 Anemómetro de hilo caliente colocado en la sección de pruebas.....	72
Figura 5.14 Interfaz de software FLOPAC en prueba de modelo de bicicleta.....	73
Figura 5.15 Interfaz de software FLOPAC en prueba de modelo de motocicleta.....	73
Figura 5.16 Modelos en sección de pruebas; ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)	74
Figura 5.17 Vectores de presión en modelos propuestos; ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)	75
Figura 5.18 Detalle de vectores en modelo de ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha).....	76
Figura 5.19 División de áreas en modelo de ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)	76
Figura 5.20 Comparación de Cd y Cp de CFD y Túnel (bici).....	78
Figura 5.21 Comparación de Cd y Cp de CFD y Túnel (Moto).....	78
Figura 5.22 Comparación de Cp por CFD (izquierda) y túnel de viento (derecha) en casco de bicicleta.....	79
Figura 5.23 Comparación de Cp por CFD (izquierda) y túnel de viento (derecha) de casco de motocicleta.....	79
Figura 5.24 Comparación de potencia en modelos de referencia y propuestos de ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha).....	81

1 INTRODUCCIÓN

La resistencia que el viento manifiesta sobre los cuerpos ha sido un reto a vencer dentro de la ingeniería. El enfoque que se le da depende del área de interés; actualmente se estudian los efectos del viento en edificaciones altas y bajas, pero también se desarrollan diseños que le den a los autos el mejor rendimiento aerodinámico posible. En el campo de los deportes la ciencia y la tecnología han logrado grandes avances si de aerodinámica hablamos.

En este capítulo se presenta el panorama general de un elemento específico dentro del ciclismo y el motociclismo: el casco. Se darán a conocer los estudios existentes donde el análisis mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y experimentos en túnel de viento están involucrados. También se presentan los objetivos, alcances y limitaciones de este trabajo, los tipos de cascos de las dos disciplinas y, finalmente, la elección justificada de los mismos.

1.1 El casco y la aerodinámica

De manera general, los cascos deportivos aparecieron, dado el riesgo de daño en la cabeza, exclusivamente como accesorio de protección. Con el tiempo se observó que, en el proceso de optimización aerodinámica, el casco era un área de oportunidad. A continuación, se muestran brevemente algunos de los trabajos de investigación en los que se han estudiado los efectos del viento en cascos tanto de ciclismo como de motociclismo. De estas dos disciplinas la que cuenta con mayor profundidad de investigación es el ciclismo, lo cual se justifica por la naturaleza de competición que implica.

Existen varios estudios que muestran el comportamiento del viento incidiendo sobre el ciclista y su bicicleta. Aquí se analizan los factores que se ven involucrados en la resistencia como lo son: la posición del ciclista, las ruedas de la bicicleta y el tipo de casco y su posición. Uno de los trabajos en los que se enfoca la atención en el casco es el de Stefano Giappino y colaboradores [1] en el que se estudia un casco de competencia mediante CFD y se compara con resultados de túnel de viento.

Giappino reporta una similitud aceptable entre resultados de simulaciones y experimentales, menciona que la posición del casco influye significativamente en la distribución de presiones, con ello afirma que conducir con la cabeza hacia abajo es la peor postura pues genera mayor resistencia (Figuras 1.1 y 1.2).

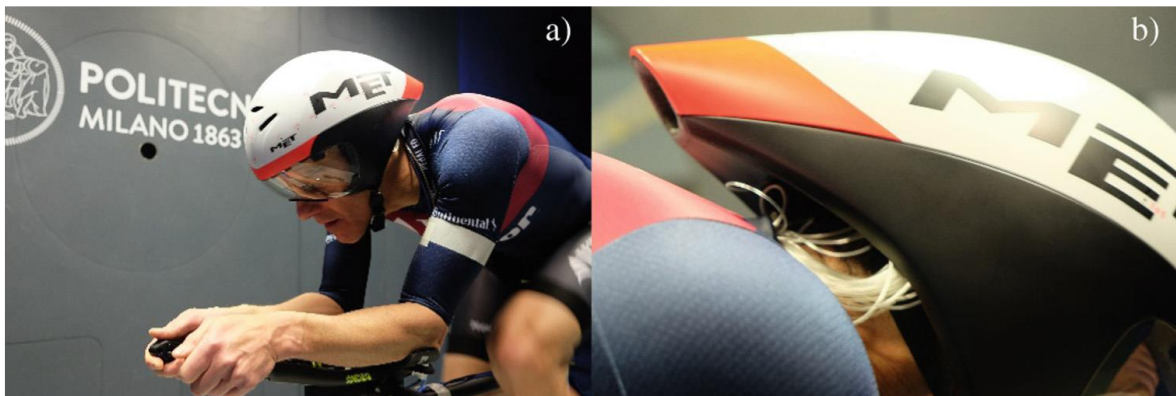


Figura 1.1 Atleta en la sección de prueba del túnel de viento (a) detalles del casco y tubos de PVC (b) [1]

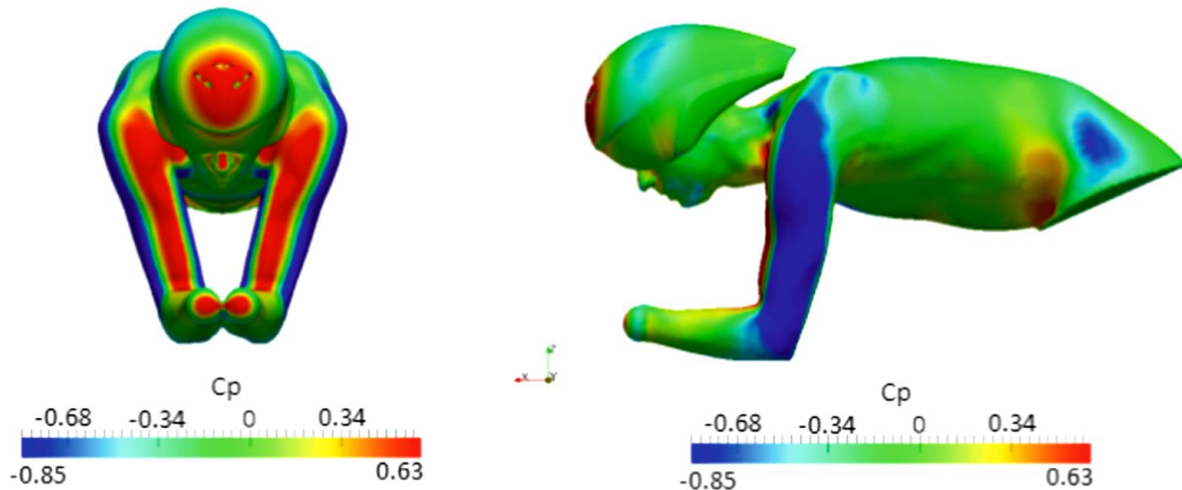


Figura 1.2 Distribución de presión sobre geometría de atleta y casco [1]

En el caso de motociclismo no se dispone de mucha información en cuanto a optimización aerodinámica de cascos. A pesar de esto se puede tomar como antecedente el trabajo de Brayan Agudelo [2] de la Universidad Pontificia Bolivariana (Figura 1.3), en donde estudia un casco de motocicleta en túnel de viento y propone, basado en sus resultados, mejoras aplicables al modelo.

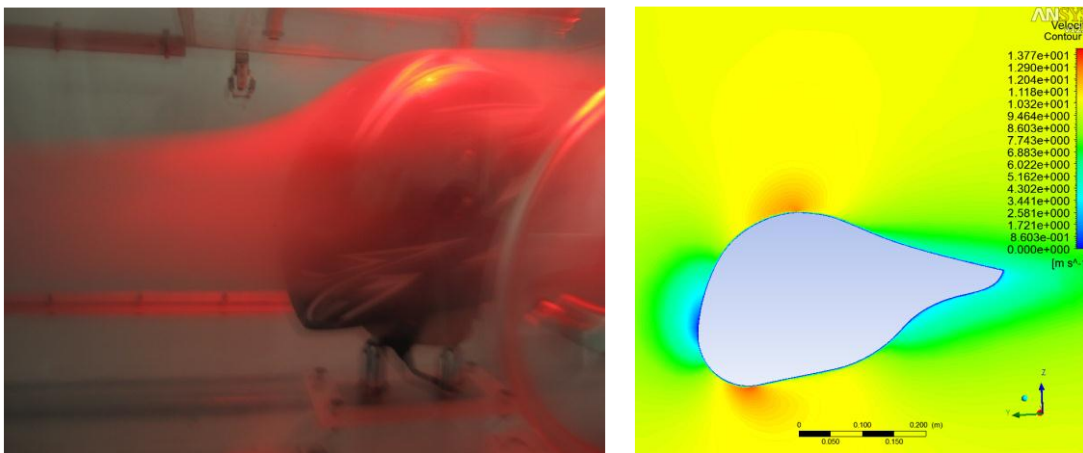


Figura 1.3 Prueba de visualización de flujo (izquierda) y propuesta estudiada en ANSYS (derecha)

Agudelo propuso un redondeo de 80 mm en la parte baja del casco, lo que se tradujo en una reducción de fuerza de arrastre, pasando de 3 N a 2.17 N a una velocidad de 12 m/s, esto equivale a un 27.7% de optimización.

La intención de este trabajo fue combinar estas dos metodologías y aplicarlo a ambos cascos. En el capítulo 1 se muestran los diferentes tipos de cascos que existen en el mercado, así como la elección de casco y justificación de la misma. Luego, en el capítulo 2, se hace una revisión bibliográfica sobre generalidades de mecánica de fluidos, incluyendo las ecuaciones que gobiernan al flujo.

Los aspectos generales de simulación numérica y experimentos en túnel de viento se presentan en el capítulo 3. El desarrollo del diseño de ambos cascos y su estudio CFD se encuentran en el capítulo 4. En el capítulo 5 se muestran los resultados y análisis tanto de las pruebas de visualización como de distribución de presiones. Aquí también se discuten y comparan los resultados de simulación y experimentales. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones se enlistan en el capítulo 6.

1.2 Objetivo general

Estudiar, analizar y mejorar la aerodinámica de cascos de ciclismo y motociclismo a través de modelos matemáticos y simulación numérica y comparar con los resultados obtenidos con pruebas en túnel de viento.

1.3 Objetivos específicos

- Reducir, mediante técnicas de diseño, el coeficiente de arrastre en un casco de motociclismo e identificar su repercusión en la potencia requerida.
- Reducir, mediante técnicas de diseño, el coeficiente de arrastre en un casco de ciclismo e identificar su repercusión en el rendimiento del ciclista.
- Evaluar la similitud o discrepancia presentes en los resultados teóricos y experimentales para validar la credibilidad del estudio.

1.4 Justificación

Validar el análisis obtenido mediante simulaciones numéricas en cascos con pruebas experimentales. Estudiar modelos y demostrar que su uso no se limita a la competencia, sino para uso cotidiano permite al público que ocupa este accesorio considerar los beneficios aerodinámicos que ofrece, con la posibilidad real de adquirirlos. La generación de conocimiento es parte de este estudio pues no existe en la actualidad una base de investigación con las características que aquí se presentan.

1.5 Alcance y limitaciones

En este trabajo se estudiarán dos cascos, uno de ciclismo y otro de motociclismo, a tres velocidades cada uno (3 m/s, 6 m/s, 12 m/s y 9 m/s, 15 m/s, 21 m/s, respectivamente) en los ensayos experimentales y 6 velocidades en simulaciones numéricas. Los estudios en ANSYS FLUENT se limitan a un dominio computacional cuya dimensión es diferente al túnel de viento en que se realizaron las pruebas, esto debido a que el recurso computacional no es suficiente.

1.6 Tipos y características

1.6.1 Tipos de cascos de ciclismo

Tipo de casco	Características
<i>Urbano</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Diseñados específicamente para aquellos ciclistas que se mueven por la ciudad. • Son compactos y prácticos, aunque por lo general son básicos y tienen pocos orificios de ventilación. • No están diseñados para ser los más ligeros ni aerodinámicos. • Están pensados para usarse en recorridos relativamente tranquilos [4].

Urbano



Características

- Diseñados específicamente para aquellos ciclistas que se mueven por la ciudad.
- Son compactos y prácticos, aunque por lo general son básicos y tienen pocos orificios de ventilación.
- No están diseñados para ser los más ligeros ni aerodinámicos.
- Están pensados para usarse en recorridos relativamente tranquilos [4].

Cascos para Ciclismo de Montaña (MTB)

Clásico con visera pequeña



- Su visera puede retirarse y le otorga un punto polivalente [3].
- Tienen diseños afilados y agresivos [4].
- Buena ventilación [4].
- Son los más utilizados por los practicantes de ciclismo de montaña [4].

Trail



- Parecidos a los clásicos, pero con una visera más grande que no se puede retirar [3].
- Sus formas son más redondeadas [3].
- Se usan para competiciones de trial o triatlones [3].
- Suelen tener una forma menos aerodinámica que los clásicos [4].

Enduro/Downhill

- Son los que ofrecen una protección más completa. [3]
- Cubren la cabeza completamente incluyendo la mandíbula, asemejándose a un casco de motocicleta. [3]
- Sacrifica aerodinámica y ventilación por seguridad. [4]

Tipo de casco**Características**

Cascos para ciclismo de Carretera

Clásico

- Es el que se ha empleado siempre con un diseño tradicional, son similares a los cascos de montaña, pero sin visera [4].
- Predomina fundamentalmente la ventilación y la aerodinámica [4].
- Son los más utilizados por los usuarios, por lo que existe una gran variedad en el mercado [3].

Con tendencia aero

- Son los más novedosos y los emplean los ciclistas profesionales durante las competiciones [4].
- Sacrifica un poco la ventilación en favor de la aerodinámica; tienen también orificios para ventilación, pero muchos menos que uno clásico.
- Su uso ha venido popularizándose en los últimos años, dentro del pelotón internacional de ciclismo profesional [4].

Aero



- Sacrifican casi por completo la ventilación y su diseño está destinado a tener el menor coeficiente de rozamiento posible [4].
- Son los cascos que usan los sprinters dentro de los equipos profesionales de ciclismo [4].
- Se han hecho muy populares últimamente entre los triatletas y duatletas [4].

Cascos para ciclismo de Contrarreloj

Tipo de casco

Características

Cola pequeña



- Resultan extraordinariamente aerodinámicos al contar con un diseño muy compacto y sin apenas ventilación [4].
- Disponen de una lente para proteger los ojos y son pequeños y manejables [4].

Cola media



- Son un poco más grandes que los de cola corta, pero no llegan a tener un tamaño demasiado excesivo [4].
- Son de diseño alargado y también incluyen la lente protectora [4].
- Se han vuelto muy populares en los triatlones de media y larga distancia [4].

Cola larga



- Son los que más suelen usarse en los triatlones de media y larga distancia por parte de los profesionales [4].
- Son los más pesados e incómodos de llevar [4].
- Son los que más beneficios aerodinámicos proporcionan [4].

1.6.2 Tipos de cascos de motociclismo

Tipo de casco

Características

Calimero



- No cubren la cara ni la nuca.
- Son prácticos a la hora de ponerse y quitarse.
- Se adquieren por su diseño y no por la protección que ofrece.
- Nivel de protección: Baja [5].

Jet



- Protegen tanto la nuca como la zona de las orejas, aunque no la cara (salvo los que incluyen pantalla).
- Son habituales en ciudad y en conductores de scooters. Entre sus ventajas, su reducido tamaño y su ligereza.
- Nivel de protección: Baja [5].

Integral



- Están compuestos de una sola pieza que no se puede desmontar.
- Protegen toda la cara y la barbilla y son los que mejor se adaptan a la cabeza [5].
- Son los que mejor aíslan del ruido y del aire.
- Nivel de protección: Muy alta [6].

Modular



- Gracias a su mentonera abatible, puede pasar de un casco integral a uno tipo jet, lo que lo hace útil en viajes largos [5].
- Debido al mecanismo de abatimiento es más pesado que un casco integral [5].
- Nivel de protección: Media

Motocross/ Off road



- Están específicamente pensados para la práctica del deporte [5].
- Cubren completamente la cabeza y mentón, además incluye una visera para proteger contra el sol [6].
- Ofrecen buena visión y ventilación, pero no son recomendables para los viajes en carretera [5].
- Nivel de protección: Media.

1.7 Elección y justificación

1.7.1 Casco de ciclismo

Después de analizar las características de cada casco se determinó que la mejor opción como objeto de estudio es el *casco de carretera tipo aero*. La razón principal de esta elección fue el propósito y diseño preestablecido; a pesar de que otros tipos de casco poseen gran área de oportunidad, como el tipo urbano, rediseñarlos no implicaría un gran impacto pues una buena aerodinámica, por el tipo de actividad, no es el principal aspecto a cuidar. Por otra parte, los cascos para ciclismo de carretera son los más utilizados por ciclistas, por lo que no sólo se utilizan para competencias sino también por público amateur. Finalmente, una optimización específica a un casco tipo aero: mejorar propiedades aerodinámicas sin sacrificar la ventilación representaría otorgarle un plus al casco y con ello la posibilidad de ser utilizado en competencias contrarreloj.

1.7.2 Casco de motociclismo

La variedad de estos cascos es menor respecto a la de ciclismo, lo que facilitó la elección del *casco tipo integral*. El casco tipo modular fue descartado debido a que la mentonera abatible no es relevante para analizar su comportamiento pues levantar la mentonera es sólo para evitar retirar el casco en paradas durante viajes largos. El tipo integral es el más seguro y el más utilizado con lo que el público beneficiado por mejorar su aerodinámica y rendimiento de combustible sería de mayor dimensión.

2 CONCEPTOS BÁSICOS DE MECÁNICA DE FLUIDOS

La Mecánica de Fluidos es la rama de la física que estudia el comportamiento de los fluidos en reposo y en movimiento, así como las fuerzas que intervienen en ellos. La relevancia de estudiar y comprender este comportamiento ha incrementado debido a los beneficios que brinda en múltiples áreas, una de ellas, por ejemplo, es el deporte.

En este capítulo se presenta el fundamento teórico inmerso en el estudio de la aerodinámica, con la intención de contextualizar y así lograr una mejor comprensión. Se parte de lo general a lo particular: desde principios básicos como flujo laminar, pasando por las ecuaciones que gobiernan al fluido y teoría de la capa límite, hasta la fuerza de arrastre, cuya disminución es el objetivo de este trabajo.

2.1 Definiciones y principios básicos

- **Aerodinámica**: Es la rama de la mecánica de fluidos que se ocupa del movimiento del aire y otros fluidos gaseosos, estudia la interacción que tiene el aire con los cuerpos en él inmersos. Conocer dicha interacción permite analizar propiedades como Presión y Velocidad, así como fuerzas o momentos sobre los cuerpos [7].
- **Principio de Bernoulli**: Enunciado por Daniel Bernoulli en 1738, establece que para un flujo no viscoso y estacionario la energía permanece constante en cualquier punto del recorrido. De modo que:

$$P + \frac{\rho v^2}{2} + \rho g z = cte \quad (2.1)$$

- **Efecto Venturi**: Es regido por el principio de Bernoulli. Muestra que, a consecuencia de la reducción de área en la que circula un fluido, la velocidad del mismo aumenta, mientras que su presión se reduce en la misma proporción (Figura 2.1).

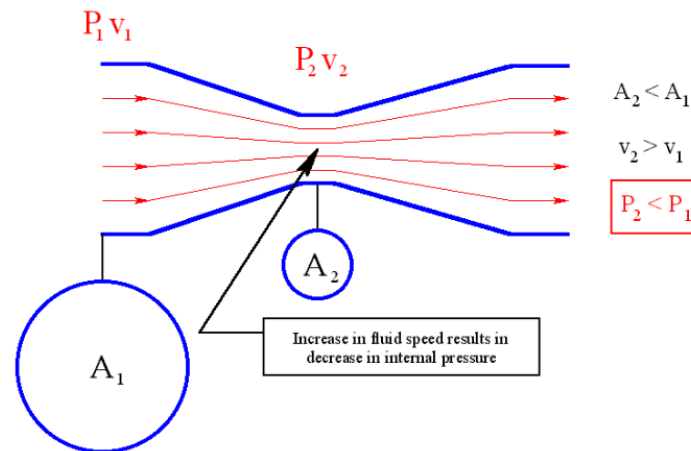


Figura 2.1 Relación de Presión y Velocidad en el efecto Venturi

- **Flujo laminar**: Aquel flujo en el cual el número de Reynolds es moderado, el movimiento es lento y ordenado. Se caracteriza por variaciones suaves [8].
- **Flujo turbulento**: Flujo en el cual el número de Reynolds es alto. Se presenta cuando el flujo se hace más irregular, caótico e impredecible, las partículas se mueven desordenadamente y las trayectorias de las partículas se encuentran formando pequeños vórtices. Aparece a velocidades altas o cuando existen obstáculos abruptos en el movimiento del fluido (Figura 2.2).

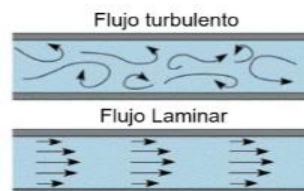


Figura 2.2 Comportamiento turbulento y laminar

- Flujo interno: está confinado por paredes, y las regiones fluidas sometidas a los efectos viscosos crecerán a medida que se alejan del borde de entrada y se encontrarán hasta ocupar todo el flujo [8].
- Flujo externo: También llamado corriente exterior, no tiene paredes confinantes y es libre de expandirse a pesar de que puedan crecer las capas viscosas de los cuerpos inmersos en él. Por ello, lejos de los cuerpos el flujo es prácticamente no viscoso [8].
- Flujo compresible: Es aquel flujo cuya densidad varía significativamente ante un cambio de presión. Tanto los gases, como los líquidos y los sólidos disminuyen su volumen cuando se les aplica una presión (Líquidos y sólidos escasamente respecto a los gases). La compresibilidad de un fluido se puede evaluar mediante la velocidad en que se transmiten pequeñas perturbaciones dentro del mismo fluido, velocidad conocida como velocidad sónica. [10].
- Flujo incompresible: Es aquel flujo cuya densidad no varía ante un cambio de presión. A diferencia de los gases, los sólidos y líquidos reducen su volumen mínimamente ante variaciones de presión, por lo que se dice que son incompresibles [10].

2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes

Dentro de la mecánica de fluidos existe una forma analítica para caracterizar al flujo e incluso predecir su comportamiento. Esto se logra gracias a las ecuaciones formuladas por Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes en 1845. En forma general, se trata de la aplicación de la segunda ley de Newton considerando términos de presión y esfuerzos resultados del efecto de la viscosidad. Con estas consideraciones se obtiene un conjunto de ecuaciones diferenciales parciales no lineales por lo que la solución no es trivial, razón por la cual se han desarrollado métodos numéricos para resolverlas.

Para obtener estas ecuaciones es necesario hacer un análisis de otros principios de la mecánica de fluidos que gobiernan el comportamiento de un fluido:

- Conservación de la masa o ecuación de continuidad.
- Conservación del momento cinético o de la cantidad de movimiento.
- Conservación de la energía.

2.2.1 Conservación de la masa o ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad resulta de la aplicación de la conservación de masa la cual establece que el cambio en la masa es la suma de la materia que sale a través de la frontera más aquella que se agrega al interior. Así, imaginando un volumen Ω y aplicando el Teorema de transporte de Reynolds, el Teorema de divergencia y la regla de integración de Leibniz, se tiene:

$$\int_{\Omega} \frac{dP}{dt} + \nabla \cdot (P\vec{u}) + Q dV = 0 \quad (2.2)$$

Donde:

P = Propiedad contenida en un volumen Ω

Q = Cantidad de propiedad P que entra o sale debido a fuentes o sumideros dentro del volumen.

Igualando el integrando a cero:

$$\frac{dP}{dt} dV + \nabla \cdot (P\vec{u}) + Q dV = 0 \quad (2.3)$$

que es la forma general de la ecuación de continuidad.

Aplicando esta ecuación a la densidad (que es la propiedad intensiva equivalente a la masa) se obtiene:

$$\frac{d\rho}{dt} dV + \nabla \cdot (\rho\vec{u}) + Q dV = 0 \quad (2.4)$$

Dado que el volumen de control utilizado se considera constante no existe fuentes o sumideros ($Q=0$). Por lo que:

$$\frac{d\rho}{dt} dV + \nabla \cdot (\rho\vec{u}) = 0 \quad (2.5)$$

esta ecuación es conocida como la ecuación de conservación de masa. Con fines de simplificación de la ecuación (2.5) se pueden hacer la consideración de manejo de fluido incompresible, donde la densidad es una constante. Así, aplicando la derivada de una constante dividiendo ambos lados de la ecuación entre la densidad se obtiene la expresión más general de la ecuación de continuidad:

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2.6)$$

2.2.2 Conservación de cantidad de movimiento

El principio de conservación de la cantidad de movimiento, de acuerdo a la segunda ley de Newton, establece que la tasa de variación de la cantidad de movimiento de un cuerpo es igual a la fuerza neta actuando sobre dicho cuerpo, expresado como:

$$\frac{D}{Dt} \int_V \rho v dV = \int_S b dS + \int_V \rho f dV \quad (2.7)$$

Donde:

b = contribución de todas las fuerzas de superficie actuando sobre el elemento fluido.
f = contribución de todas las fuerzas de cuerpo actuando sobre el volumen del elemento de fluido.

Las fuerzas de superficie (b) corresponden a las fuerzas de presión y fuerzas viscosas, mientras que las fuerzas volumétricas son aquellas que actúan sobre todo el volumen, como la fuerza de gravedad, centrífuga, de Coriolis o electromagnéticas. A su vez, las fuerzas de superficie están formadas por dos términos: la componente isótropa de la presión y un tensor de esfuerzos viscosos, este último es función de las propiedades dinámicas del fluido y si tomamos al aire como fluido de análisis tendremos que el tensor de esfuerzos es proporcional al gradiente de velocidades (fluidos newtonianos).

Realizando el desarrollo matemático se obtiene la ecuación para un fluido Newtoniano ($\rho = k, \mu = l$) incompresible suponiendo que la única fuerza exterior que actúa sobre el fluido es la gravedad:

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = -\nabla P + \mu \nabla^2 v + \rho g_i \quad (2.8)$$

Donde $\nabla P = \left(\frac{\partial p}{\partial x}, \frac{\partial p}{\partial y}, \frac{\partial p}{\partial z} \right)$, $g = (g_x, g_y, g_z)$ y $V = (u, v, w)$ por lo que en la forma extendida, para las tres componentes:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (2.9)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} \quad (2.10)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt} \quad (2.11)$$

Las ecuaciones anteriores son consideradas como las ecuaciones de Navier – Stokes en las que se observa que son ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden no lineales, su solución es compleja por lo que es usual discretizar estas ecuaciones en mallas finas para simular el comportamiento de los fluidos usando un software que lo solucione numéricamente.

2.2.3 Conservación de la energía

La ecuación de la conservación de la energía se obtiene de la primera ley de la termodinámica, la cual establece que un sistema puede intercambiar energía con otro, mediante energía calorífica, trabajo, o por radiación. La ecuación de la energía se expresa como:

$$\rho \frac{d\hat{u}}{dt} + p(\nabla \cdot V) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \Phi \quad (2.12)$$

Donde λ es el *coeficiente de conductividad térmica* del fluido, Φ es la *función de disipación viscosa*. Esta ecuación es válida para un fluido newtoniano bajo unas condiciones muy generales de flujo no estacionario, compresible, viscoso y conductor del calor; sólo se desprecian la transferencia de calor por radiación y las fuentes internas de calor que podrían aparecer en una reacción química o nuclear.

La ecuación (2.12), que debe resolverse junto con las ecuaciones de la continuidad, cantidad de movimiento y estado llevan a la necesidad de resolverlo por computadora o bien, haciendo las aproximaciones:

$$d\hat{u} = c_v dT \quad c_v, \mu, \lambda, \rho \approx cte$$

La ecuación de la energía se convierte entonces, para $\nabla \cdot V = 0$,

$$\rho c_v \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + \Phi \quad (2.13)$$

que involucra a la temperatura T como variable primaria y a la velocidad como variable secundaria [8].

2.3 Número de Reynolds

Es un número adimensional definido como la relación entre fuerzas de inercia y fuerzas viscosas. Nos permite distinguir los diferentes regímenes en los flujos newtonianos.

$$\frac{Fi}{F\mu} = \frac{Ma}{\tau A} = \frac{\rho L^3 L}{(\mu V/L) L^2 T^2} = \frac{\rho L V^2}{\mu V} = \frac{\rho L V}{\mu} \quad (2.14)$$

V y L representan la velocidad y longitud características del flujo. Dado que μ y ρ entran como cociente en este parámetro, dicho cociente tiene significado propio y se denomina viscosidad cinemática [8,11].

2.4 Capa límite

Es una capa del fluido cercana a la superficie del cuerpo con el que está en contacto en donde los efectos debidos a la viscosidad del fluido no pueden ser despreciados. Debido al principio de no deslizamiento el flujo presenta un perfil de velocidades; esto implica que las partículas ubicadas en la superficie tienen velocidad cero y aumenta verticalmente. Cuando esta velocidad llega a un punto donde es “igual” a la de la corriente libre (99%) se dice que ese punto es el *espesor de la capa límite* (δ). La capa límite crece a medida que el cuerpo avanza sobre el fluido (Figura 2.3).

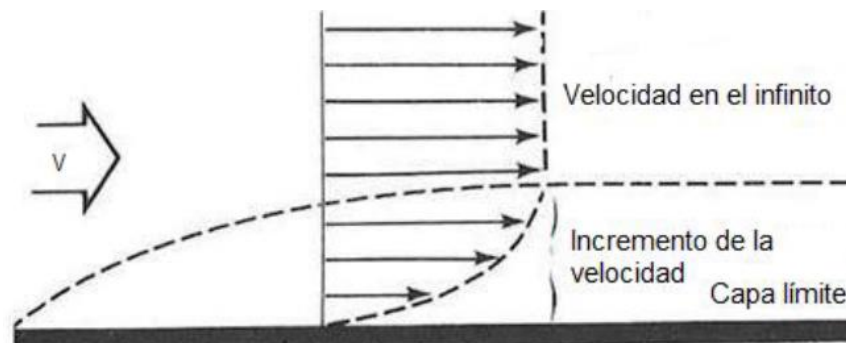


Figura 2.3 Desarrollo de la capa límite [18]

2.4.1 Espesor de capa límite

Para una placa plana la solución del espesor de la capa límite está dada por las siguientes ecuaciones donde, para flujo laminar el intervalo de número de Reynolds es de $10^3 < Re < 10^6$ mientras que para $Re > 10^6$ se utiliza la ecuación de capa límite turbulenta.

$$\frac{\delta}{x} \approx \begin{cases} \frac{5.0}{Re_x^{1/2}} & \text{laminar} \\ \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} & \text{turbulent} \end{cases}$$

2.4.2 Régimen de capa límite

Si la longitud (x) del cuerpo es lo suficiente grande la capa límite se desarrollará; iniciando con régimen laminar, posteriormente pasará por una zona de transición para finalmente convertirse en una capa límite turbulenta (Figura 2.4).

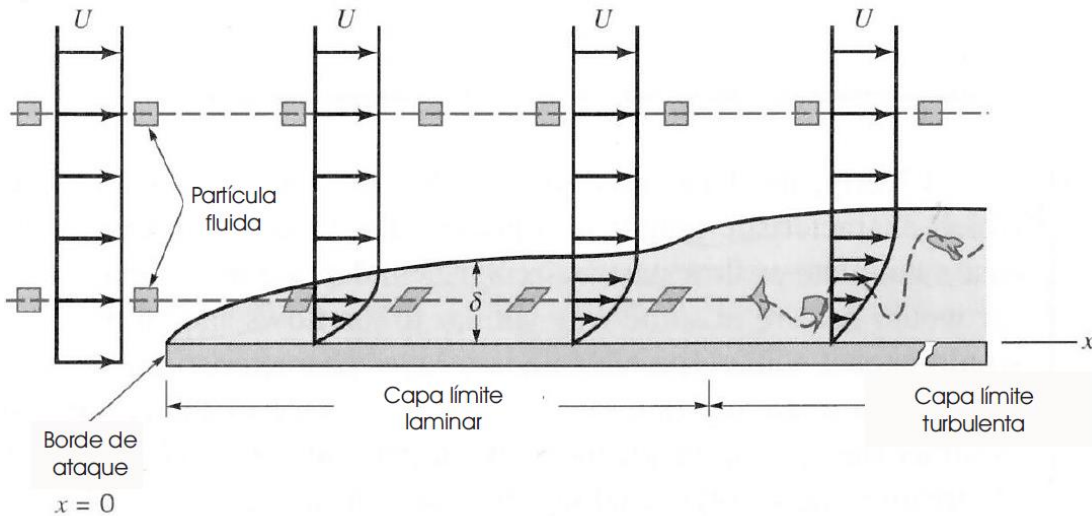


Figura 2.4 Diferentes regímenes de capa límite [8]

En la capa límite laminar las capas de flujo se mueven ordenadamente, se encuentran sometidas a esfuerzos cortantes por lo que las posibles perturbaciones existentes se eliminan y la estructura se mantiene estable. Sin embargo, a medida que el fluido avanza y el espesor de la capa límite crece, el esfuerzo cortante disminuye y las capas de fluido tienden a mezclarse ocasionando un cambio de régimen debido a la incapacidad de controlar la turbulencia.

El número de Reynolds indica cada régimen de la capa límite. No obstante, no existe un valor específico en el que se pueda predecir la transición de laminar a turbulenta ya que factores como la temperatura y rugosidad de la superficie, gradiente de presión y turbulencia de la corriente libre. De manera general, se ha observado que capas cuyo flujo tienen números de Reynolds mayores a 5×10^5 pueden considerarse como turbulentas.

2.4.3 Desprendimiento de la capa límite

La teoría de capa límite anteriormente descrita es aplicable a placas planas. Para cuerpos curvos igualmente es aplicable; sin embargo, se debe añadir una consideración: el gradiente de presión. Los cuerpos curvos presentan gradientes tanto de velocidad como de presión, de acuerdo al teorema de Bernoulli, cuando el flujo llega al borde del cuerpo su presión es máxima mientras que su velocidad es mínima (*punto de estancamiento*). Al avanzar sobre la superficie se presenta un decremento en la presión conocido como *gradiente favorable de presión*. Posterior al cuerpo ocurre un efecto contrario; la presión empieza a incrementarse y la velocidad a disminuir. Este efecto se denomina *gradiente de presión adverso*. En presencia de un gradiente de presión adverso las partículas más próximas a la superficie son frenadas debido a la pérdida de cantidad de movimiento a tal punto que el gradiente de velocidad se

vuelve cero y los esfuerzos cortantes también se anulan, provocando el *desprendimiento de la capa límite* (Figura 2.5).

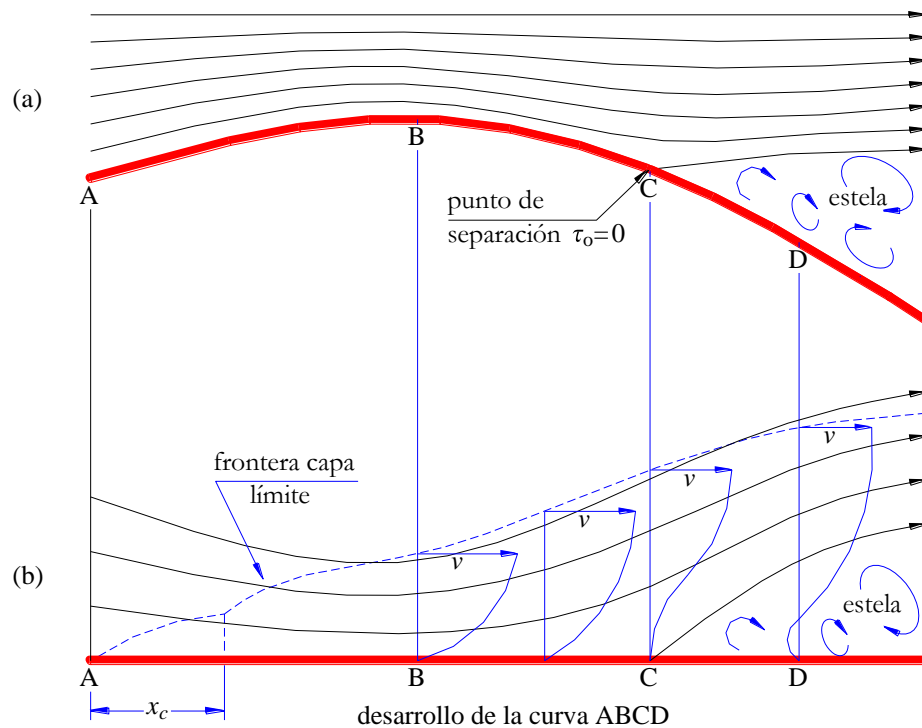


Figura 2.5 Desprendimiento de capa límite en cuerpo romo [18]

El punto en donde el perfil de velocidades, a causa del gradiente de presiones adverso, cambia de sentido se denomina *punto de desprendimiento*, detrás del cual se origina una restructuración del flujo conocida como *estela*. Debido a este fenómeno se da paso a la resistencia de forma.

Una de las diferencias entre capa límite laminar y turbulenta es la resistencia al desprendimiento; la capa límite turbulenta, al tener mayor energía, presenta mayor resistencia al gradiente de presiones adverso y, por consiguiente, al desprendimiento. Por ello uno de los métodos utilizados en el campo de la aerodinámica es provocar una capa límite turbulenta a lo largo del cuerpo con el fin de retrasar el punto de separación, lo que implicaría una estela estrecha y así, una baja resistencia de forma. Esto se puede ver en la Figura 2.6; si a una esfera lisa se le agrega un área rugosa el flujo se mantendrá adherido a la esfera, provocando una menor resistencia.

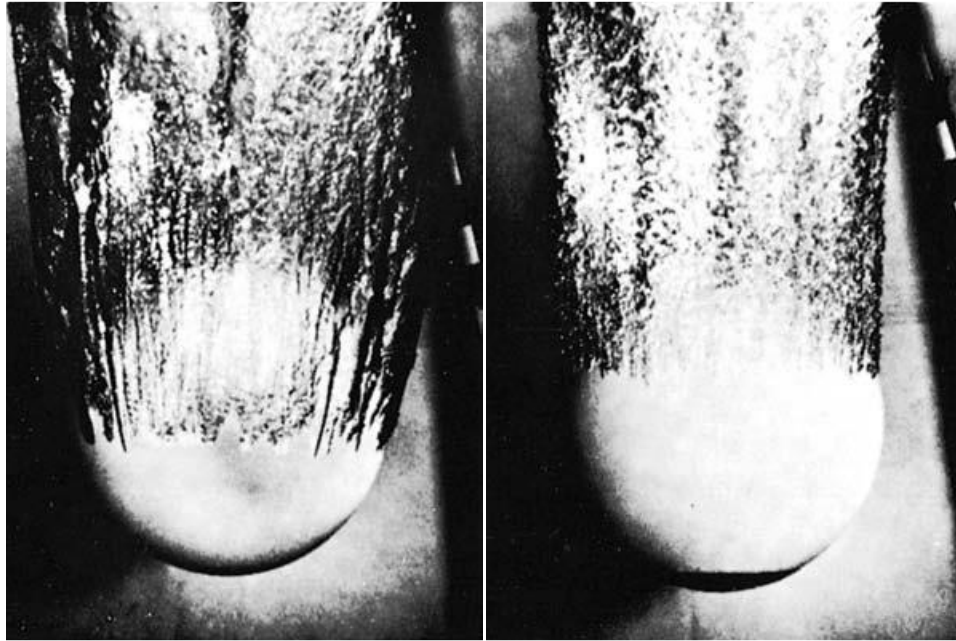


Figura 2.6 Separación del flujo con superficie lisa (izquierda) y superficie rugosa (derecha) [18]

2.5 Resistencia de superficie y de forma

En el campo de la aerodinámica existen diversas fuerzas actuando sobre los cuerpos. Las principales que se oponen al desplazamiento son la fuerza de *arrastre* y la fuerza de *sustentación* [10]. La primera es producida en la misma dirección del desplazamiento y en sentido contrario, mientras que la segunda es perpendicular a la dirección del desplazamiento. Debido a que la fuerza de sustentación sólo es significativa en ciertos casos como la presencia de vientos laterales, la fuerza de arrastre toma mayor relevancia y, a su vez, se divide en dos fuerzas: la de *superficie* y la de *forma*.

2.5.1 Resistencia de superficie

La resistencia de superficie o de fricción, es aquella debida a la fuerza producida por la fricción laminar del aire con el cuerpo con el que está en contacto. Cuando un cuerpo se desplaza a través del aire se produce un rozamiento del aire con la superficie de dicho cuerpo, lo que constituye una fuerza que reduce la velocidad denominada fuerza de arrastre viscoso o superficial. La intensidad de esta fuerza dependerá de la viscosidad del fluido y el rozamiento de deslizamiento del aire a través de la superficie.

2.5.2 Resistencia de forma

La resistencia de forma o de presión, es aquella debida a una fuerza producida cuando el aire que se desliza alrededor del objeto es incapaz de seguir su contorno. Cuando el aire choca con un objeto parte de él se frena por el contacto con la sección transversal (frente del objeto), mientras que el resto podría o no seguir la forma del objeto. Si el aire no sigue el contorno se producen vórtices o corrientes en torbellinos detrás del objeto (Figura 2.7) que, según el teorema del momento cinético, producen una fuerza opuesta al desplazamiento. Además, debido a que la velocidad del fluido varía detrás del cuerpo y de acuerdo al teorema de Bernoulli, se origina una fuerza de succión a causa del gradiente de presión, lo que resulta en la disminución de la velocidad del cuerpo [9, 12].

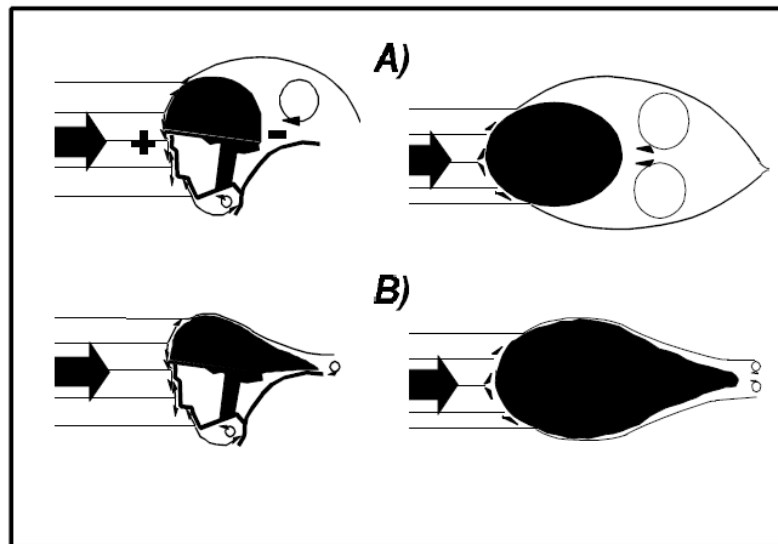


Figura 2.7 Efecto de la resistencia de forma: a) casco estándar b) casco aerodinámico [9]

Por lo general la resistencia de forma es mayor que la resistencia superficial, por lo que, en muchos deportes como automovilismo, ciclismo, motociclismo, etc., lo que se busca es encontrar el mejor diseño de manera que la geometría le permita al flujo no separarse de la superficie y de esta forma tener ventaja en las competencias.

2.6 Fuerza y coeficiente de arrastre

La *fuerza de arrastre* o *Drag* en inglés, es aquella fuerza presente en la interacción de un objeto con un fluido. Se trata de una fuerza resistiva por lo tanto ocurre en la misma dirección a la velocidad del objeto, pero en sentido contrario. Esto significa que la fuerza de arrastre tiende a disminuir la velocidad del objeto. Esta fuerza depende de variables como el tamaño del objeto L , propiedades del flujo (ρ, μ) y de la velocidad del mismo. Por lo que podemos decir que:

$$F_D = f_1(L, V, \mu, \rho) \quad (2.15)$$

Con fines de practicidad se puede reducir el número de variables recurriendo a un parámetro adimensional para que, finalmente, podamos expresar la fuerza de arrastre como:

$$F_D = C_D \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad (2.16)$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre (N)

C_D = Coeficiente de arrastre

ρ = Densidad del flujo (kg/m^3)

V = velocidad del flujo (m/s)

A = área frontal (m^2)

Como ya se ha mencionado, el *coeficiente de arrastre* (C_D) es un número adimensional, de determina de forma experimental y depende de factores como el número de Reynolds (Re), la forma del cuerpo, la rugosidad de la superficie y el ángulo de ataque. Si variamos estos factores podemos modificar el coeficiente de arrastre para un mismo cuerpo en las mismas condiciones. Por ejemplo, si estudiamos dos cilindros lisos, con las mismas dimensiones y a la misma altitud (misma densidad del aire) pero con diferente régimen de flujo, notaríamos las diferentes características aerodinámicas: el flujo laminar no resiste a los gradientes de presión adversos como lo hace el flujo turbulento, en consecuencia, la separación en flujo laminar ocurre a $\theta = 82^\circ$, esto da paso a una estela ancha y por lo tanto una resistencia importante. Caso contrario ocurre a mayor Re , donde el punto de separación se retrasa, la estela es estrecha y la resistencia es mucho menor (Figura 2.8).

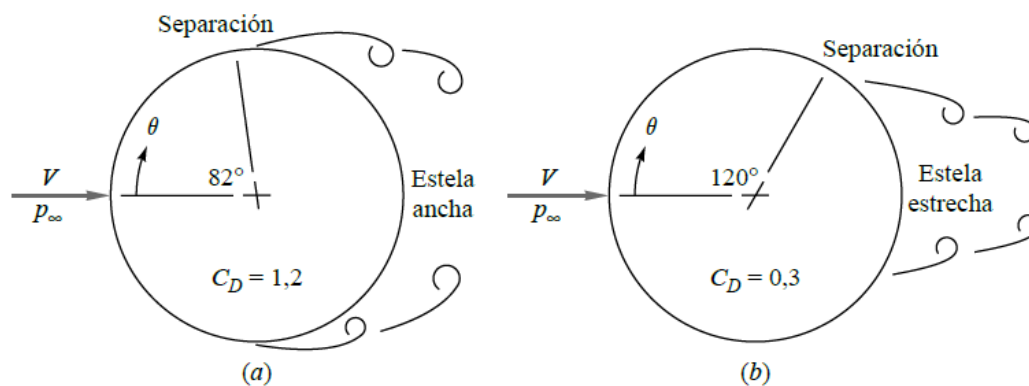


Figura 2.8 Coeficientes generados a diferentes números de Reynolds [8]

De manera general podemos decir que las aristas en un objeto siempre originan la separación de la corriente y una alta resistencia que es independiente del número de Reynolds. Los cuerpos redondeados como el elipsoide tienen una resistencia que depende del punto de separación, de modo que el número de Reynolds y el carácter de la capa límite son importantes. La longitud del cuerpo, por lo general, disminuye la resistencia de forma por hacer el cuerpo relativamente más esbelto, pero tarde o temprano la resistencia superficial

acaba por dominar. En un cilindro de caras planas la resistencia de forma decrece con L/d , pero la de superficie aumenta de manera que la resistencia mínima se logra aproximadamente en $L/d = 2$ [8]. La Figura 2.9 ilustra algunas formas bidimensionales y tridimensionales con sus respectivos coeficientes de arrastre.

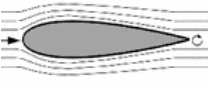


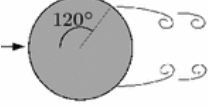
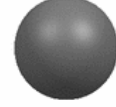

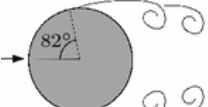
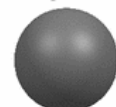

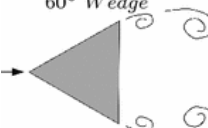
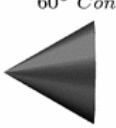







2-D Geometry	3-D Geometry	Complex 3-D Geometry
<p><i>Air foil</i></p>  <p>$x = \text{chord } (c)$ $A = c(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 0.1$</p>	<p><i>Elipsoid</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 0.05$</p>	<p><i>Faired - HPV</i></p>  <p>$x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 1.5 \times 10^6$ $C_D \approx 0.07$</p>
<p><i>Circular Cylinder</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = d(b)$ $Re \approx 5 \times 10^5$ $C_D \approx 0.4$</p>	<p><i>Sphere</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re \approx 5 \times 10^5$ $C_D \approx 0.1$</p>	<p><i>Fast - Back Car</i></p>  <p>$x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 4 \times 10^6$ $C_D \approx 0.28$</p>
<p><i>Circular Cylinder</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = d(b)$ $Re \approx 1 \times 10^4$ $C_D \approx 1.2$</p>	<p><i>Sphere</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re \approx 1 \times 10^4$ $C_D \approx 0.5$</p>	<p><i>Small Bus</i></p>  <p>$x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 3.5 \times 10^6$ $C_D \approx 0.42$</p>
<p><i>60° Wedge</i></p>  <p>$x = \text{width } (w)$ $A = w(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 1.4$</p>	<p><i>60° Cone</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re > 1 \times 10^4$ $C_D \approx 0.8$</p>	<p><i>Cyclist - Time Trial</i></p>  <p>$x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 7 \times 10^5$ $C_D \approx 0.60$</p>
<p><i>90° Wedge</i></p>  <p>$x = \text{width } (w)$ $A = w(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 1.6$</p>	<p><i>90° Cone</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re > 1 \times 10^4$ $C_D \approx 1.15$</p>	<p><i>Semi - Trailer</i></p>  <p>$x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 6 \times 10^6$ $C_D \approx 0.70$</p>
<p><i>Flat Plate</i></p>  <p>$x = \text{width } (w)$ $A = w(b)$ $Re \approx 1 \times 10^5$ $C_D \approx 2.0$</p>	<p><i>Disk</i></p>  <p>$x = \text{diameter } (d)$ $A = \frac{\pi}{4}d^2$ $Re > 1 \times 10^3$ $C_D \approx 1.1$</p>	<p><i>Cyclist - Upright</i></p>  <p>$x = \sqrt{A}$ $A = \text{frontal}$ $Re \approx 7 \times 10^5$ $C_D > 0.80$</p>

Figura 2.9 Ejemplos de coeficientes de arrastre [8]

3 ASPECTOS GENERALES DE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y DE EXPERIMENTOS EN TÚNEL DE VIENTO

Encontrar la solución de las ecuaciones que gobiernan al flujo, presentadas en el capítulo anterior, resulta una tarea muy difícil debido a la complejidad de las ecuaciones. Para obtener información del flujo existen dos opciones: simulación numérica y ensayos con modelos a escala real o reducida.

En este capítulo se hace una revisión a la categorización de los diferentes modelos de turbulencia que utilizan los softwares de simulación. Se describe el proceso de análisis que siguen estos últimos, haciendo énfasis en el software ANSYS FLUENT. También se describe al túnel de viento; su funcionamiento, componentes y tipos que existen. De igual manera se describe el túnel de viento del Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT) en donde se realizaron las pruebas experimentales.

3.1 Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)

Las siglas CFD significan Dinámica de Fluidos Computacional (Computational Fluid Dynamics) y se puede definir como aquellas herramientas de cálculo utilizadas para resolver problemas fluido dinámicos. Cuando las ecuaciones que gobiernan un fluido no pueden resolverse analíticamente es necesario recurrir al CFD ya que, a pesar de no brindar soluciones exactas, la aproximación que consigue es lo suficiente cercana a la realidad para ser tomada en cuenta en diseños.

En términos simples, la manera en que trabaja CFD es la siguiente: las ecuaciones diferenciales (sin solución) son discretizadas o divididas a ecuaciones algebraicas (con solución). Como su nombre lo indica, CFD utiliza una computadora u ordenador para resolver las ecuaciones mediante métodos numéricos en los que repiten los procedimientos hasta que el intervalo de resultados entre cada iteración se vuelve mínima (criterio de convergencia)(Figura3.1).

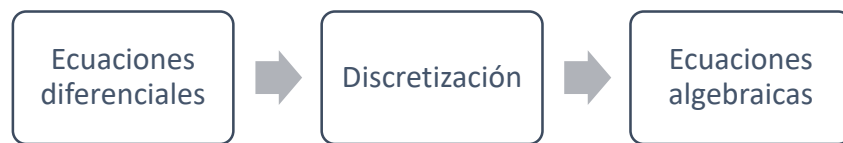


Figura 3.1 Proceso de resolución CFD

Todo proceso CFD consta de tres etapas fundamentales:

- Preproceso: Es donde se modela conceptualmente el problema, incluye la geometría y la malla, además se establece las condiciones de frontera.
- Cálculo: Es la parte principal del proceso. Aquí la computadora ejecuta el programa que resuelve las ecuaciones de manera iterativa.
- Postproceso: Consiste en analizar, interpretar y presentar los resultados obtenidos, se apoya en gráficas y tablas.

La dinámica de fluidos computacional tiene diversas aplicaciones dentro de la ingeniería, algunas de ellas son:

- Aerodinámica – aviones y automóviles
- Hidrodinámica de embarcaciones
- Motores- Combustión por chispa, motores diesel
- Turbomáquinas- bombas y turbinas
- Transferencia de calor- sistemas de calentamiento o enfriamiento
- Ingeniería de procesos – mezclas y reacciones químicas
- Cargas de viento – fuerzas y respuesta dinámica de estructuras
- Riesgos de fuego y explosiones
- Ingeniería medioambiental – transporte de efluentes líquidos y gaseosos
- Ingeniería costera – cargas en estructuras costeras y “offshore”

- Hidráulica – redes de tuberías, depósitos, canales, presas, etc.
- Oceanografía – corrientes oceánicas y maremotos
- Meteorología – predicción numérica del tiempo
- Ingeniería biomédica – flujo de la sangre en el corazón, venas y arterias
- Electrónica – refrigeración de circuitos

3.2 Modelos de turbulencia

La turbulencia es un fenómeno bastante complejo, objeto de estudio de muchas investigaciones. Es por eso que modelar su comportamiento ha representado un gran reto de la dinámica de fluidos. En el caso de flujo no viscoso resulta sencillo resolver las ecuaciones que lo gobiernan, por el contrario, para los flujos viscosos (turbulentos) sí se presentan serios problemas. Ante esta necesidad, la dinámica de fluidos computacional (CFD) ha desarrollado diferentes estrategias matemáticas con base en las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas estrategias se conocen como *modelos de turbulencia* y se agrupan en tres grupos, apareciendo en orden de demanda computacional:

- Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS por sus siglas en inglés).
- Modelos de Simulación de Grandes Escalas (LES).
- Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS).

3.2.1 Modelos de Simulación Numérica Directa (DNS)

El modelo de simulación numérica directa trata de resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de una forma directa, sin emplear más valores promedios o aproximaciones que las discretizaciones numéricas, por lo tanto, es el más completo en cuanto a la exactitud de los resultados que ofrece. El problema principal del modelo DNS es que el tamaño de las celdas para la solución de los vórtices en todas las escalas de existencia debe ser tan pequeño que la potencia computacional existente muchas veces es limitada [13].

3.2.2 Modelos de Simulación de Grandes Escalas (LES)

Los modelos LES aparecen como alternativa a los DNS cuando la discretización no necesita ser muy fina. Esta técnica se basa en la separación del tratamiento de las escalas de turbulencia; las grandes se resuelven directamente mientras que las pequeñas, por su carácter más universal, se pueden aproximar o modelar su influencia en la variación general de los parámetros del flujo. El problema con esta técnica es que la demanda computacional sigue siendo elevada, por lo que su aplicación en problemas de flujo complejo en ingeniería está limitada. De acuerdo al método de filtrado de las ecuaciones y a la forma concreta de las expresiones de cierre se conocen los modelos *Smagorinsky*, de *similaridad de escala*, *dinámico de Germano* y de *función estructural*.

3.2.3 Modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier – Stokes (RANS)

Esta es la técnica más utilizada en problemas con elevados números de Reynolds. Su principio básico, propuesto por Reynolds en 1895 es resolver las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, esto es, sustituir todas las magnitudes por la suma de su valor medio más una componente fluctuante.

En un flujo turbulento el valor de la variable ϕ en un punto puede presentar fluctuaciones a lo largo del tiempo. Reynolds propuso que el valor instantáneo de la variable ϕ puede ser expresado como la suma de un valor medio y una fluctuación instantánea. Esto es:

$$\phi(t) = \bar{\phi} + \phi'(t) \quad (3.1)$$

El valor medio de la variable ϕ está definido como:

$$\bar{\phi} = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \phi(t) dt \quad (3.2)$$

De esta ecuación se observa que $\overline{\phi'(t)} = 0$.

La aplicación de la descomposición de Reynolds derivará en las ecuaciones promediadas de Reynolds. Estas se presentan a continuación

Componente x de la ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{v}) + \nabla \cdot (\overline{v'v'}) - \nu \nabla \cdot (\nabla \bar{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \quad (3.3)$$

Componente y de la ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{v}) + \nabla \cdot (\overline{v'v'}) - \nu \nabla \cdot (\nabla \bar{v}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \quad (3.4)$$

Componente z de la ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial \bar{w}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{u}\bar{v}) + \nabla \cdot (\overline{v'v'}) - \nu \nabla \cdot (\nabla \bar{w}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} \quad (3.5)$$

El término $\overline{v'v'}$ es denominado como *tensor de esfuerzos de Reynolds* y la divergencia de este término aparece en estas ecuaciones. Este tensor, al ser un tensor de segundo orden tiene nueve componentes, por lo que se han introducido seis incógnitas más (el tensor es simétrico) a las ecuaciones de transporte. Los modelos de turbulencia basados en las ecuaciones

promediadas de Reynolds buscan cerrar el sistema de ecuaciones por medio de nuevas ecuaciones para calcular estas nuevas incógnitas [14]. Para ello se utiliza la asunción propuesta por Boussinesq la cual indica que el tensor de esfuerzos de Reynolds es proporcional al valor medio del tensor de rapidez de deformación (\overline{D}). En esta hipótesis se incluye la variable μ_t que corresponde a la *viscosidad turbulenta*. Y es precisamente este término el que se convierte en la incógnita a calcular, mediante una o más ecuaciones, en los modelos subsecuentes de esta técnica; si se necesita tan sólo una ecuación más se está delante de un modelo de 1-ecuación; si son necesarias un par, el modelo se denomina de 2-ecuaciones. Si μ_t se obtiene a partir de una relación algebraica entre μ_t y el gradiente de velocidades, el modelo se denomina algebraico (o de 0-ecuaciones –de transporte-).

3.2.3.1 Modelos de cero ecuaciones

El *modelo de la longitud de la longitud de mezcla* (formulado por Ludwig Prandtl en 1925) es el más sencillo pues solo precisa el cálculo de una expresión algebraica la cual considera que la viscosidad turbulenta es proporcional al producto del cuadrado de una longitud característica del flujo llamada longitud de mezcla l_m y el valor absoluto del gradiente de velocidad media. Por lo que

$$\mu_t = l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (3.6)$$

Su principal desventaja es su limitación al campo bidimensional; toma en cuenta que una sola escala de longitud y una sola de velocidad son suficientes para modelar los efectos de la turbulencia. Existen otros modelos que se basan en este, como el modelo Balwin-Lomax y el modelo de Cebeci-Smith.

3.2.3.2 Modelos de una ecuación

Prandtl (1945) y Kolmogorov (1942) sugirieron que una ecuación de dependencia con la energía cinética (k) podría calcular la viscosidad turbulenta en lugar de una algebraica. De esta manera:

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu l_{pk} \sqrt{k} \quad (3.7)$$

donde C_μ es una constante empírica y l_{pk} es una longitud que se calcula mediante diferentes formulaciones existentes. Existen otros modelos de una ecuación como el *modelo Balwin-Barth* y el modelo *Spalart-Allmaras*.

3.2.3.3 Modelos de dos ecuaciones

Los modelos de dos ecuaciones son los más utilizados dentro de los modelos RANS y, en general, en el campo de la ingeniería. En estos modelos además de una ecuación para la energía cinética turbulenta, también se emplea una ecuación para la escala de longitud. Existen diversos modelos de dos ecuaciones, pero todos utilizan la ecuación de la energía cinética turbulenta, la diferencia que presenta cada una es su modelación de la segunda variable de transporte. Los modelos más utilizados son el $k-\varepsilon$ y el $k-\omega$.

3.2.3.3.1 El modelo $k-\varepsilon$

Este modelo incorpora dos ecuaciones de balance en derivadas parciales en las que se relacionan la energía cinética del fluido turbulento k y su tasa de disipación ε al sistema de ecuaciones del fluido. Luego, obtenidos estos dos parámetros, se calcula la viscosidad turbulenta mediante:

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.8)$$

Donde C_μ es una constante que toma el valor de 0.09 en el modelo estándar y $\varepsilon = 2\nu \overline{D':D'}$, siendo D' la parte fluctuante del tensor de rapidez de deformación. Las ecuaciones para la energía cinética y su tasa de disipación son:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} k) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) = 2\mu_t \bar{D} : \bar{D} - \rho \varepsilon \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} \varepsilon) - \nabla \cdot \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t \bar{D} : \bar{D} - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.10)$$

Donde las constantes σ_k , σ_ε , $C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$, después de múltiples experimentos en flujos turbulentos, tienen como valores 1, 1.3, 1.44 y 1.92, respectivamente.

A pesar de ser uno de los modelos más utilizados y de resultados aceptables, presenta algunas desventajas, una de ellas es que no es completamente preciso en flujos que presentan gradientes de presión adversos elevados. Es por eso que existen algunas modificaciones de este modelo, las más conocidas son el modelo $k-\varepsilon$ *RNG* (Renormalización de grupos) y el $k-\varepsilon$ *Realizable*.

3.2.3.3.2 El modelo $k-\omega$

Este modelo también emplea dos ecuaciones que interactúan para posteriormente calcular la viscosidad turbulenta. La diferencia es que aquí se obtiene la energía cinética turbulenta k y su tasa de disipación específica ω . La expresión para μ_t es

$$\mu_t = \bar{\rho} \frac{k}{\omega} \quad (3.11)$$

Las ecuaciones que permiten calcular la energía cinética y su disipación turbulenta específica son:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} k) - \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) = P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (3.12)$$

Donde $P_k = 2\mu_t \bar{D} : \bar{D} - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot \bar{V}$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \bar{V} \omega) - \nabla \cdot \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \nabla \omega \right) = P_\omega - \beta_1 \rho k \omega^2 \quad (3.13)$$

Donde $P_\omega = \gamma_1 (2\mu_t \bar{D} : \bar{D} - \frac{2}{3} \rho \omega \nabla \cdot \bar{V})$

Los valores de las constantes σ_k , σ_ω , γ_1 , β^* y β_1 son, respectivamente 2, 2, 0.533, 0.09, 0.075.

Una de las ventajas que este modelo ofrece frente al $k-\varepsilon$ es su mejor comportamiento al tratar procesos en la capa límite, incluso con la presencia de gradientes de presión adversos.

3.2.3.4 Modelo SST

El modelo SST (Shear Stress Transport) es una modificación del modelo $k-\omega$ que resulta de la necesidad de cubrir las deficiencias que éste presentaba. Es modelo que combina características de los modelos $k-\varepsilon$ y $k-\omega$ para diferentes partes del flujo. En la capa límite interna se desarrolla mediante $k-\omega$ mientras que en la región fuera de la capa límite se maneja como $k-\varepsilon$, de esta forma se garantiza precisión tanto en zonas cercanas a la pared como en la corriente libre. Además, las ecuaciones con el término ω encajan muy bien en transiciones de flujo laminar a flujo turbulento.

3.3 Softwares de simulación numérica

En el mercado podemos encontrar múltiples opciones en cuanto a plataformas capaces de realizar simulaciones. La mayoría de los softwares de diseño poseen módulos de simulación como SolidWorks (Flow Simulation) o Autodesk. Si bien algunos resultan potentes y con resultados confiables, el costo de las licencias para su uso en ocasiones es una limitante. Por ello los softwares libres son una buena opción. A continuación, se muestran algunos de los softwares del mercado actual.

Tabla 3.1 Softwares comerciales y libres para simulación

Comerciales	Libres
<ul style="list-style-type: none"> • ANSYS • Star – CCM+ • Phoenics • NaSt3DGPf • CosmosFloWorks 	<ul style="list-style-type: none"> • OpenFoam • FreeFVM • Dolphyn • Fenics • Elmer • Clawpack

No se puede dictaminar cuál es mejor. Depende de las necesidades del usuario y su estudio; algunos poseen mayor calidad en gráficos y simulación, otros tienen mayor potencia en la discretización y otros son más amigables en su interfaz, etcétera.

3.4 Modelado en ANSYS FLUENT

ANSYS FLUENT proporciona capacidades de modelado para un amplio intervalo de problemas de flujo de fluidos; compresible o incompresible, laminar o turbulento. Pueden ser desarrollados análisis de estado estacionario o transitorio. Se puede trabajar con flujos monofásicos y multifásicos, dependiendo del problema que se trate. También se puede simular transferencia de calor y reacciones para aplicaciones industriales. Estos van desde el flujo de aire sobre el ala de un avión hasta la combustión en un horno, desde columnas de burbujas hasta plataformas petroleras, desde el flujo de sangre hasta la fabricación de semiconductores y desde el diseño de salas limpias hasta las plantas de tratamiento de aguas residuales. Fluido abarca una amplia gama, que incluye modelos especiales, con capacidades para modelar la combustión en cilindro, aeroacústica o turbomaquinaria [15, 16].

ANSYS se apoya en dos plataformas de análisis: *Workbench* y *Mechanical APDL*; la primera, como otros softwares, utiliza una interfaz gráfica, es accesible e interactiva con el usuario. La segunda se enfoca en instrucciones de programación, maneja un sistema de tareas específicas y es poco visual. Todas las simulaciones aquí presentadas se realizaron en la plataforma *Workbench* y en el sistema de análisis *Fluid Flow (FLUENT)*.

A continuación, se describen de manera breve los pasos necesarios para realizar una simulación en ANSYS, mencionando que este procedimiento se ejemplificará más adelante en el capítulo 4 con los modelos diseñados en este trabajo. Cuando se crea un nuevo proyecto se despliega una ventana en la que se muestran las diferentes secciones que componen el análisis, aparecen en orden de trabajo y cuando estas secciones están completadas correctamente aparecen como en la Figura 3.2.

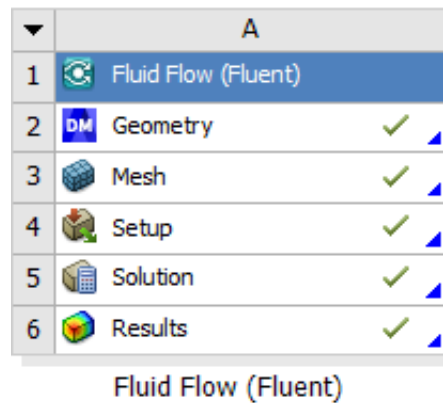


Figura 3.2 Ventana de proyecto en Workbench de ANSYS.

3.4.1 Geometría

Como primer paso se genera la geometría a estudiar. Esto se puede hacer de dos formas; dibujando en el programa de diseño o importando los archivos en formato compatible. Después, mediante la herramienta de edición y diseño *Design Modeler*, se prepara la geometría. Esta preparación incluye: especificar las unidades (mm, cm, m, etc.), filtrar sólidos y superficies, creación del dominio y operación booleana, en donde se separa el modelo y el dominio.

3.4.2 Malla

El mallado juega un papel importante en el análisis pues unos resultados precisos dependen en gran medida de un mallado correcto. Consiste en la división de la geometría en elementos lo suficientemente pequeños para calcular, en cada uno de ellos, las ecuaciones que caracterizan al flujo.

En este módulo se controla todo sobre estos elementos como su forma, tamaño, distribución, etc.

3.4.3 Parámetros de simulación

Después se procede a configurar los parámetros con los que FLUENT resolverá el caso estudio. Aquí se establece desde los recursos de computo con la que se cuenta hasta el número de iteraciones que se van a realizar. Pasando por otros parámetros como modelo de turbulencia, especificación del fluido, condiciones atmosféricas (Presión, Temperatura y

Densidad), algoritmo, fuerza y coeficiente de arrastre. Aquí también se definen las condiciones de frontera (velocidad de entrada, paredes, % intensidad turbulenta, etc).

3.4.4 Post procesamiento

En FLUENT se pueden pre visualizar los resultados; sin embargo, existe un componente exclusivo para analizar lo obtenido. En esta etapa final se visualizan las propiedades que en el módulo anterior se especifican; por defecto se pueden observar Presión estática, velocidad, flujo másico, etc. Pero se pueden añadir otros, según sea lo que se desea estudiar, por ejemplo, presión dinámica, intensidad de turbulencia o coeficiente de presión. De este módulo se pueden extraer diagramas de contorno de planos o superficies, así como campos de vectores o líneas de corriente en 2D o 3D. Las animaciones también son parte de las herramientas que ofrece el post procesador y resulta útil para visualizar el comportamiento del flujo.

Otra forma de estudiar el flujo, además de la analítica y por simulación numérica, está la experimental. Por ello, y a manera de introducción, en las siguientes páginas se abordarán temas referentes a la principal herramienta de la experimentación en este campo: el túnel de viento; desde su definición, pasando por la revisión de los tipos de túneles que existen, hasta llegar a la descripción del túnel que se utilizó en el presente trabajo.

3.5 Túnel de viento

El túnel de viento o túnel aerodinámico, es una herramienta científico tecnológica utilizada para la experimentación que tiene como objetivo estudiar, reproducir los fenómenos asociados al flujo de aire, así como sus efectos en los objetos o cuerpos con los que interactúa. Gracias a los criterios de semejanza es posible simular las condiciones, por ejemplo, de un edificio alto, estudiar la distribución de presiones y los resultados serán muy cercanos a la realidad. También se pueden medir otros parámetros como la velocidad, fuerza de arrastre o sustentación. Además del área de ingeniería civil, el túnel de viento se puede utilizar en aerodinámica de diversos campos (vehículos, deportes, aeronaves), arquitectura y meteorología. Esto permite innovar en el diseño de estructuras, productos, reducir costos y prevenir desastres.

El funcionamiento básico de un túnel de viento, independientemente de la categoría a la que pertenezca, consiste, mediante un ventilador, activar el movimiento del aire, éste circula a través de un ducto y llega a una zona de pruebas, donde un modelo estará instrumentado. Además de la sección de prueba y el sistema de propulsión, los componentes típicos de un túnel son contracciones, difusor, intercambiador de calor (dependiendo del tipo de túnel) y estabilizador de flujo (Honeycomb).

3.5.1 Tipos de túnel de viento

Existen distintas formas de clasificar a los túneles de viento; ya sea por la velocidad del flujo, según el recorrido del viento, por su aplicación, etc. En este trabajo se presentan las dos primeras clasificaciones.

Según la velocidad del flujo un túnel de viento puede ser:

- Subsónico (<980 km/h)
- Transónico: La velocidad es próxima a la del sonido (980 – 1230 km/h)
- Supersónico: La velocidad puede alcanzar un número de Mach del orden de 5 (1230-6150 km/h)
- Hipersónico: Con Mach > 5 (6150 – 12300 km/h)

Según el recorrido del viento se dividen en:

3.5.1.1 Túnel de circuito abierto

También conocido como *túnel recto* por su extensión longitudinal. Se caracteriza por no recircular el aire que pasó a través de la sección de prueba, es decir, el aire que entra solo circula una vez en el interior del túnel. El aire que entra lo puede hacer por succión o por inyección; si el ventilador se encuentra al inicio del circuito es inyección de aire, mientras que si el ventilador se encuentra al final del circuito será succión de aire. En general es de bajo costo en su construcción, es ideal en experimentos que utilizan humo para la visualización de las líneas de corriente pues el humo es expulsado sin problemas. Otra de sus ventajas es que al estar abierto en sus extremos el aire no aumenta su temperatura debido a la fricción con las paredes por lo que no es necesario un intercambiador de calor (Figura 3.3).

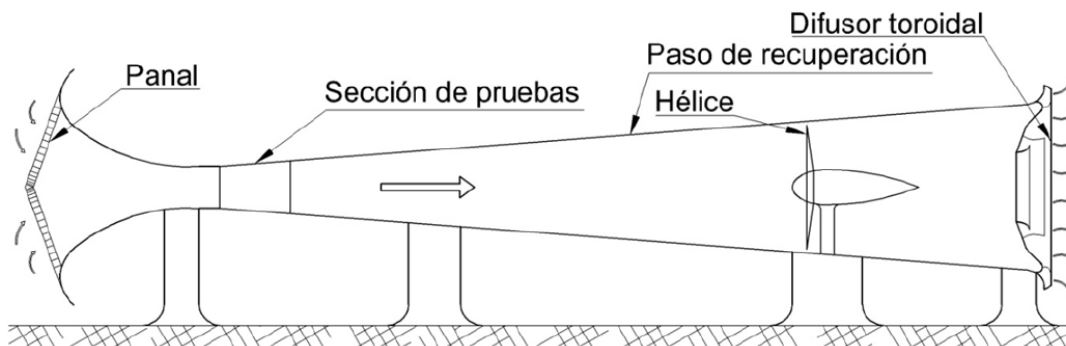


Figura 3.3 Diagrama de túnel de circuito abierto.

Las desventajas que presenta este tipo de túnel son las condiciones del exterior las cuales pueden afectar las pruebas: el ruido durante el ensayo o las altas o bajas temperaturas del ambiente pueden repercutir en el perfil de velocidades. También cabe mencionar que la potencia requerida en un motor para túnel de circuito abierto debe ser mayor respecto a la de un túnel de circuito cerrado.

3.5.1.2 Túnel de circuito cerrado

Este tipo de túnel es más grande que el de circuito abierto debido a que necesita una estructura tal, que le permita al flujo recircular continuamente. Esta configuración compleja eleva el costo de construcción. Sin embargo, a diferencia de los túneles de circuito cerrado, el costo de operación del ventilador de un túnel de circuito cerrado es bajo pues no tiene que generar

viento todo el tiempo, sino que sólo aporta la energía necesaria para vencer la fricción con las paredes. Por otra parte, debido a esta fricción constante con el mismo flujo, la densidad del aire tiende a modificarse y en consecuencia la temperatura también cambia. Es por ello que los intercambiadores de calor son necesarios en este tipo de túneles.

El túnel de circuito cerrado puede ser de tres tipos:

Túnel de viento de un retorno

Este tipo de túnel, también conocido como “canal de viento” se caracteriza por poseer solo un paso por el cual circula el aire. Es el más utilizado en la investigación por mantener un balance entre la variedad de estudios que se pueden realizar y el costo de operación y construcción (Figura 3.4).

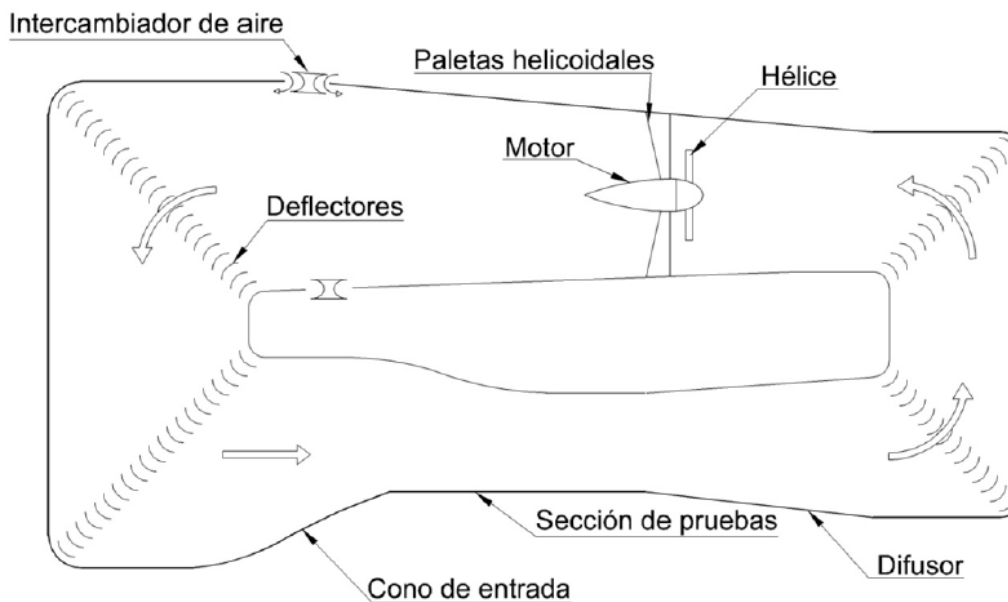


Figura 3.4 Diagrama de Túnel de viento de un retorno.

Los componentes de este tipo de túnel pueden variar dependiendo del diseño del propio túnel. No obstante, posee los componentes fundamentales: ventilador, difusor, honeycomb, cono de contracción y sección de pruebas. También se pueden incluir otros elementos, tales como los deflectores para dirigir el flujo y evitar pérdidas de energía debido al cambio de dirección en las esquinas. El intercambiador de calor para regular la temperatura y mallas de seguridad para atrapar posibles modelos o elementos desprendidos. Este tipo de túnel también se caracteriza por la capacidad del ventilador de estabilizar el flujo después de que el modelo genera variaciones en él.

Túnel de viento de doble retorno

En este tipo de túnel, como su nombre lo indica, el flujo circula a través de dos ductos, por lo que es necesario más de un ventilador. No es tan utilizado como el de un retorno; la razón

principal es que la distribución de velocidades en la sección de prueba varia. Esto se debe a que en pruebas cuyos modelos son muy grandes la estela no se puede corregir (Figura 3.5).

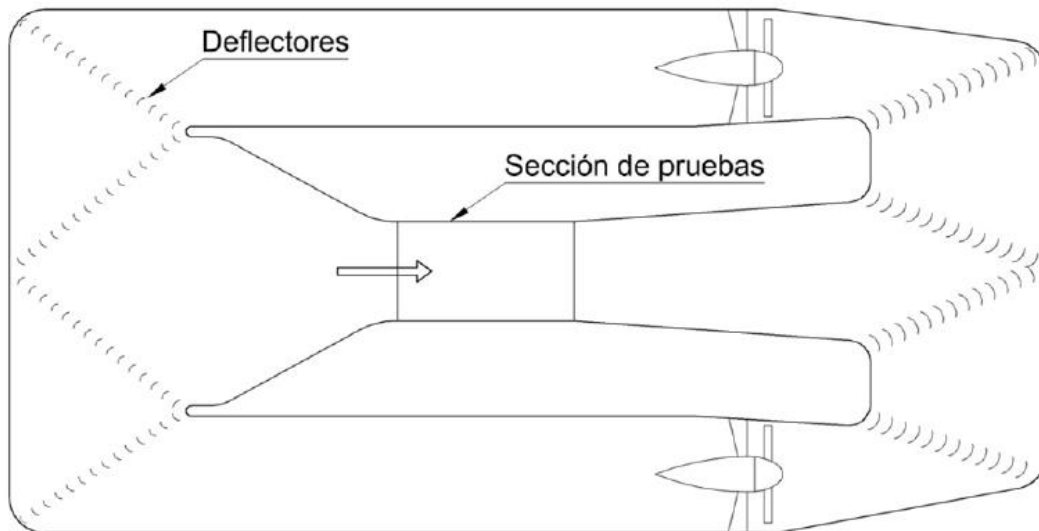


Figura 3.5 Diagrama de túnel de viento de doble retorno

Túnel de viento de retorno anular

Este tipo de túnel no es comúnmente utilizado pues sus resultados son menos confiables que los que se obtienen con un túnel de viento de un retorno. Además, al igual que el túnel de doble retorno, éste presenta flujo no uniforme, provocando errores de las mediciones en la sección de pruebas (Figura 3.6).

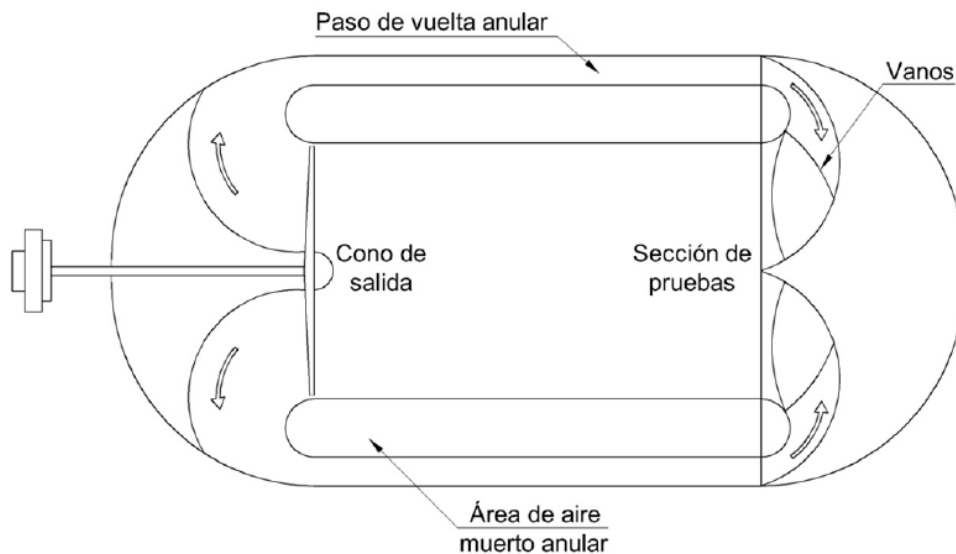


Figura 3.6 Diagrama de túnel de viento de retorno anular

3.6 Túnel de viento del LemAT

La parte experimental de este trabajo fue utilizada en el túnel de viento del Laboratorio de Estructuras y Materiales de Alta Tecnología (LemAT) el cual, desde 2015, realiza proyectos nacionales e internacionales en distintas áreas de la ingeniería. Posee los componentes fundamentales de un túnel de viento (Ventilador, difusor, deflectores, honeycomb, cono de contracción y sección de pruebas).

En la Figura 3.7 se muestra el plano con todas las dimensiones del túnel de viento del LemAT. A continuación, se hará una breve descripción de los elementos que conforman el túnel de viento y en la Tabla 3.2 sus características técnicas generales.

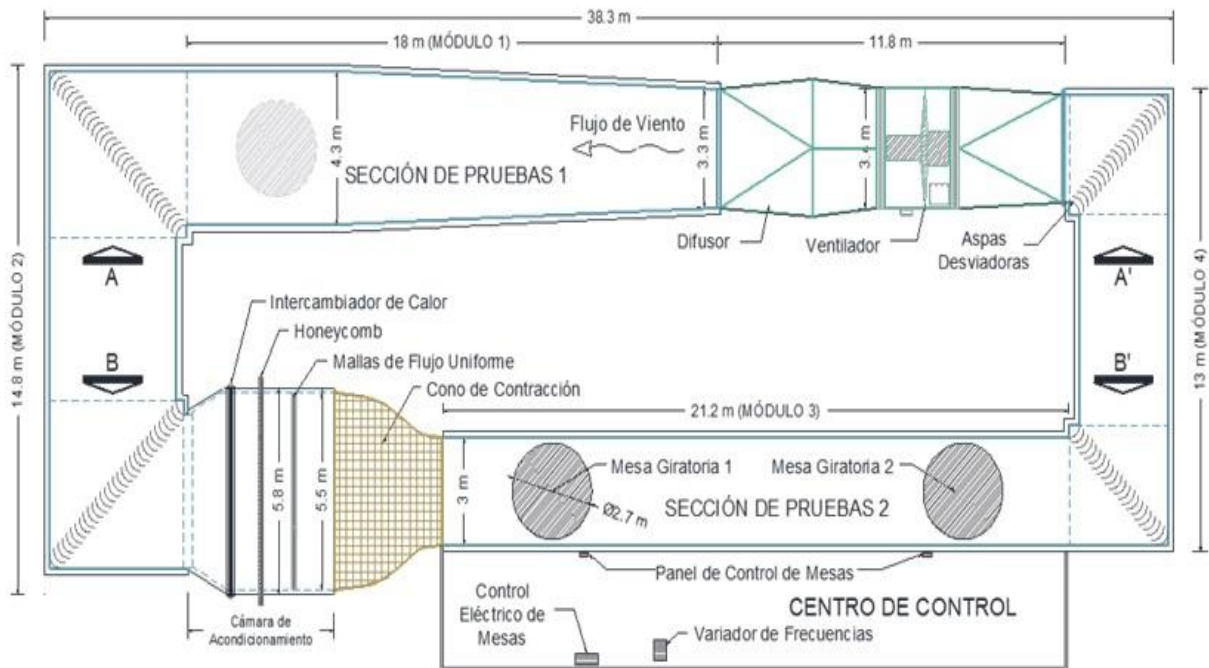


Figura 3.7 Plano en planta del túnel de viento del LemAT [22].

Características generales

- *Tipo*: Túnel subsónico de circuito cerrado y de retorno simple.
- *Velocidad máxima*: 600 rpm (80 km/h en sección de pruebas aprox.)
- *Dimensiones*: 38.3 m x 14.8 m
- *Sección de pruebas*: dos secciones, una de ellas con dos mesas giratorias.
- *Administración*: Alianza Fiidem
- *Operación*: Instituto de Ingeniería UNAM

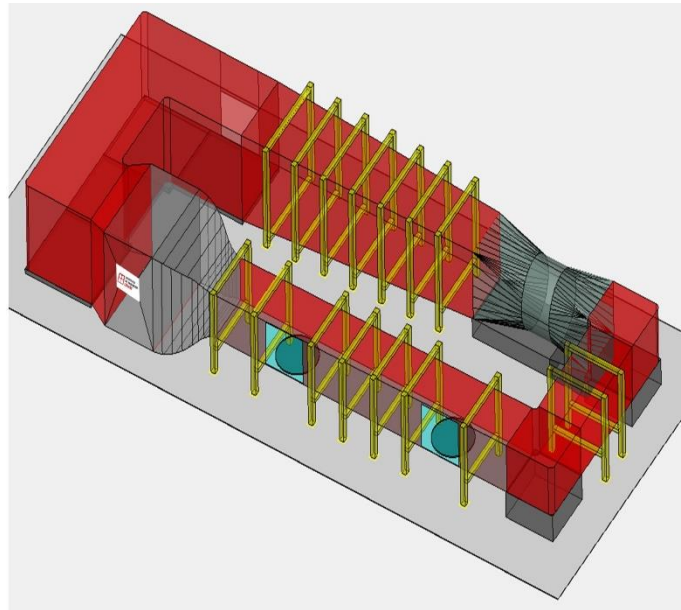


Tabla 3.2 Características generales del túnel de viento del LemAT [22].

Ventilador

El ventilador con el que cuenta el túnel de viento es de tipo axial, mide 3.3 m de diámetro y el motor tiene una velocidad máxima de 600 rpm. El ventilador, así como su velocidad de giro son controlados remotamente desde el cuarto de control donde mediante un panel se pueden fijar las revoluciones por minuto necesarias. Gracias a la capacidad de este componente se puede analizar y estudiar los efectos en modelos de vientos equivalentes a un huracán categoría 4.



Figura 3.8 Ventilador visto desde el exterior (izquierda) y al interior del túnel (derecha).

Difusor

Está instalado a la salida del ventilador, su objetivo es volver uniforme el flujo mediante un cambio de sección; al aumentar el área la velocidad decrece. Sin este elemento el flujo se mantendría turbulento y causaría grandes pérdidas de energía lo que se traduce en un mayor costo de operación. Este cambio de sección se da pasando de 3.5 m a 4.3 m de ancho en una distancia de 24.68 m.

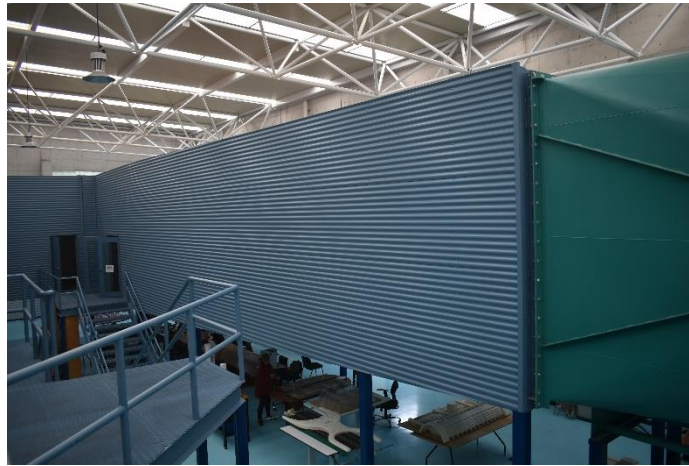


Figura 3.9 Difusor

Deflectores

Los deflectores o alabes guía están ubicados en las cuatro esquinas del túnel. Su función es evitar las pérdidas de energía originadas por los cambios bruscos de dirección, por ello los deflectores son curvos, el cambio es gradual con lo que se mantiene la uniformidad del flujo. Están hechos de aluminio y su diseño es robusto y aerodinámico.

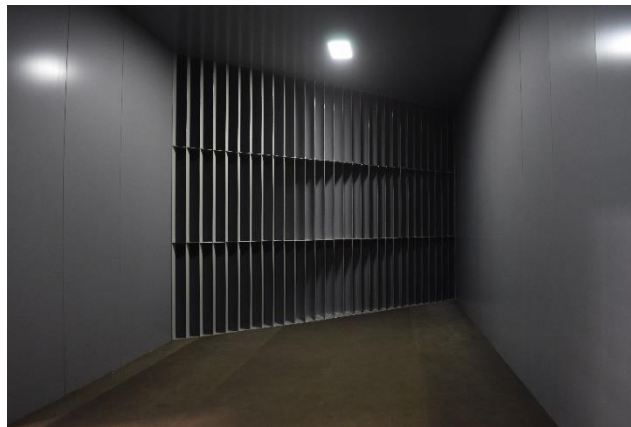


Figura 3.10 Deflectores al interior del túnel

Cámara de estabilización

Antes de llegar a la sección de pruebas se debe garantizar el régimen laminar del flujo. Es por eso que dentro de la cámara de estabilización se encuentra el panel estabilizador o honeycomb el cual está fabricado de aluminio y cuyo espesor es de 15 cm. La geometría hexagonal de este panel le otorga un coeficiente de pérdida ($k = 0.2$) menor respecto a otras configuraciones. En apoyo al honeycomb la cámara de estabilización también cuenta con dos pantallas de turbulencia.

Debido a que el aire no puede salir fuera del túnel las partículas tienden a aumentar su temperatura por la fricción en las paredes. Es por eso que el túnel de viento del LemAT cuenta con un intercambiador térmico en la cámara de estabilización el cual hace circular agua para controlar la temperatura. Con esto se logra que la densidad del aire no cambie y por lo tanto parámetros como la presión dinámica o el número de Reynolds no se vean afectados.



Figura 3.11 Cámara de estabilización



Figura 3.12 Panel estabilizador

Cono de contracción

Una vez que el flujo posee la temperatura y régimen deseado la última propiedad a controlar es la velocidad. Después de la cámara de estabilización está ubicado el cono de contracción el cual pasa de una sección de 5.3 m a una de 3 m de ancho. Con esto se aumenta la velocidad en proporción controlada y se conserva la uniformidad del flujo proveniente de la cámara de estabilización.



Figura 3.13 Cono de contracción

Sección de pruebas

El túnel de viento del LemAT cuenta con dos secciones de prueba: una de baja velocidad (4 m x 4 m) y otra de alta velocidad (3 m x 2 m). Esta última es la sección principal, se ubica a la salida del cono de contracción y es donde se encuentran las dos mesas giratorias. Esta es una de las secciones de prueba más grandes del mundo ya que la distancia entre centros de cada mesa es de 14 m. Cada mesa está graduada para ubicar los modelos en los ángulos de incidencia del viento de interés. La mesa más alejada del cono de contracción es la más utilizada ya que es ideal para estudios de modelos en los que se requiere la formación de la capa límite atmosférica, esta se logra mediante la colocación de rugosidades a lo largo de la sección de pruebas.



Figura 3.14 Mesa giratoria en sección de pruebas

4 DESARROLLO DEL DISEÑO Y SIMULACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo se presenta la metodología adoptada para la simulación, la cual consistió en tres pasos: revisión de cascos existentes en el mercado de las dos disciplinas, estudio en simulación (CFD) de modelos tomados como referencia y diseño de modelos propuestos, de los cuales el criterio para considerarlos como modelos más eficientes fue haber arrojado valores de coeficientes de arrastre menores respecto de los obtenidos de los modelos de referencia. La descripción de los estudios en ANSYS de los cascos diseñados también se presentan de manera detallada (Geometría, dominio, malla, parámetros de simulación y post-procesamiento) así como los resultados obtenidos y la comparación de los modelos de referencia y los modelos propuestos.

4.1 Metodología

Para el estudio con CFD de ambos cascos el procedimiento fue el mismo. De manera general éste siguió la siguiente metodología: después de recolectar los datos generales (tipo, uso, dimensiones) se buscó un modelo de referencia. El coeficiente de arrastre de este modelo, obtenido del análisis en ANSYS, fue comparado con el de un modelo propuesto, si el coeficiente de arrastre del modelo propuesto era menor al de referencia se procedía a realizar el post proceso de datos para finalmente tener un modelo en disposición a construirse físicamente, en caso contrario se replantearía la geometría del modelo (Figura 4.1).

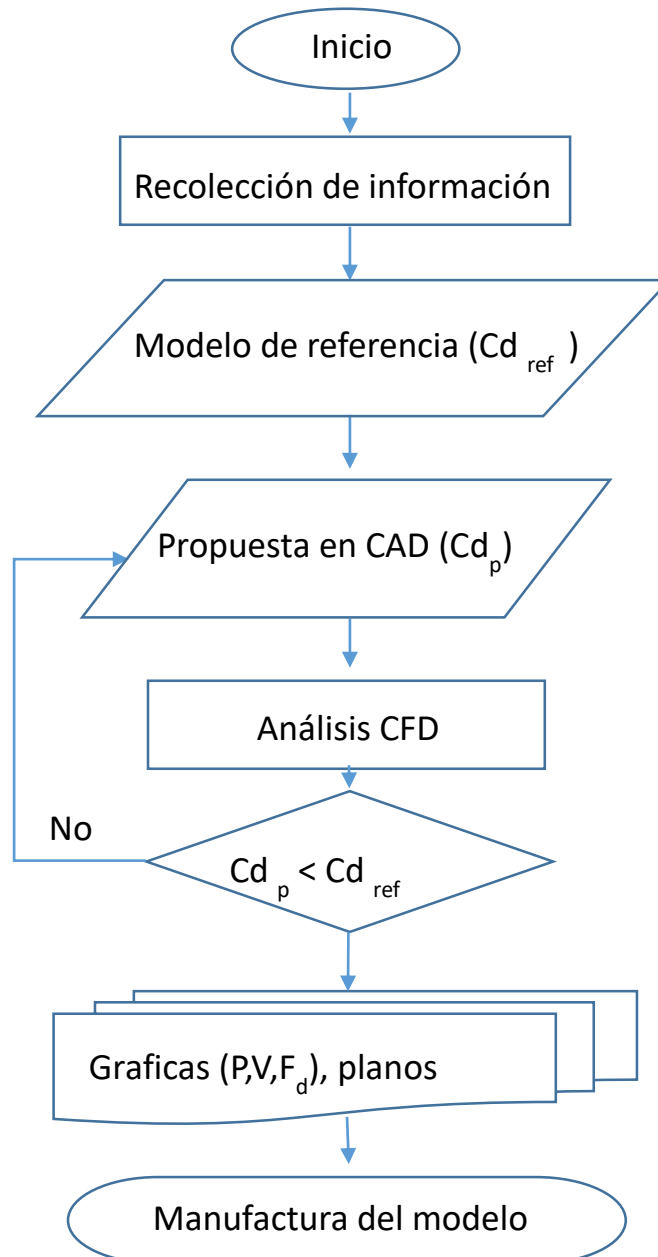


Figura 4.1 Diagrama de flujo de la metodología adoptada

4.2 Datos preliminares y consideraciones



Antes del análisis CFD fue necesario establecer algunas consideraciones. Para ambos cascos se utilizaron datos de condiciones ambientales correspondientes a la Ciudad de México (Presión, Temperatura y Densidad) (Tabla 4.1). Adicionalmente, se consideró la existencia de aire pasivo, es decir, solo se tomó en cuenta la velocidad del objeto (ciclista/motociclista) y no la de un viento que impulse o detenga al objeto. También se consideraron nulos los vientos laterales, con el fin de evitar fuerzas en otras direcciones.

Tabla 4.1 Condiciones ambientales en la Ciudad de México.

Condiciones CDMX	
Presión	78126 [Pa]
Temperatura	295.15 [K]
Cte particular del aire (R)	286.9 [$\frac{J}{Kg K}$]
Densidad	0.9226 [$\frac{Kg}{m^3}$]

Adicionalmente se tomaron las consideraciones resumidas en la Tabla 4.2

Tabla 4.2 Características de los modelos de referencia

Ciclismo	Motociclismo
	
<ul style="list-style-type: none"> • Bicicleta tipo ruta: posición semi erguida y manillar sin reducción de área. • Velocidad media: 6 [m/s] • Área frontal: 0.0237 [m²] 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo: AGV K1 TOP ECE2205 - EDGE 46 • Motocicleta urbana de baja cilindrada: posición prácticamente erguida. • Velocidad media: 21 [m/s] • Área frontal: 0.118851 [m²]

4.3 Estudio de modelo de referencia: Ciclismo

El estudio de un modelo de referencia tiene como objetivo obtener la caracterización de un modelo base, cuyos resultados determinarán los valores a mejorar por parte del modelo propuesto. Estos valores serán la fuerza y coeficiente de arrastre. Más adelante se describirá detalladamente el proceso de un estudio CFD, con el modelo propuesto. Aquí se presenta un análisis rápido pues lo principal fue obtener las características del modelo de referencia, por lo que no se muestran todos los parámetros y condiciones utilizados. No obstante, cabe mencionar que dichos parámetros (dominio, criterios de mallado, condiciones de frontera, etc.) fueron prácticamente los mismos respecto al modelo propuesto.

Todos los diseños y modelados se realizaron en el software SolidWorks® versión 16.0. Para el caso del casco de ciclismo la geometría se realizó con base en un casco comercial con el que se contó físicamente y del cual se pudieron obtener todas las dimensiones reales. (Figura 4.2). Para la obtención del coeficiente de arrastre se realizaron seis simulaciones: 3, 6, 9, 12, 15 y 18 m/s. En las figuras de resultados sólo se muestran la velocidad de 6 m/s por ser la velocidad media de un ciclista.

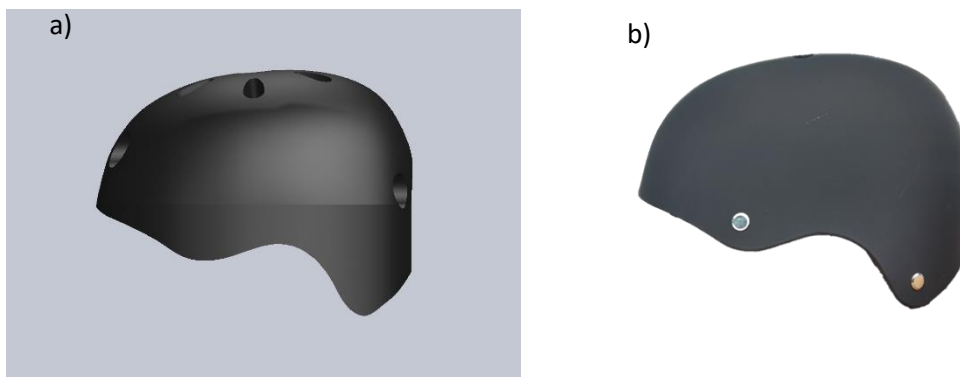


Figura 4.2 Modelo de referencia a) CAD y b) Físico

Post- procesamiento

Como parte final del proceso de simulación numérica, el post- procesamiento, una vez que el solver ha finalizado las iteraciones tomando en cuenta los criterios de malla y configuración de solución, muestra gráficamente los resultados.

En la figura 4.3 se observa, con líneas de corriente, la estela formada por el casco en la parte posterior, mientras que en la Figura 4.4 se muestra, también con las líneas de corriente y en el plano normal al eje X, el comportamiento del flujo a una velocidad de entrada de 6 m/s. Como se esperaba, la mínima velocidad se encuentra en la parte frontal del casco, mientras que la máxima, la cual fue de aproximadamente 8 m/s, se ubica en la parte superior.

Finalmente se puede identificar de manera aproximada el punto de separación el cual se ubica aproximadamente a la mitad del modelo, como se indica en la Figura 4.5. Acercar este punto a la parte posterior es el objetivo en la parte de diseño. Más adelante se presenta el comparativo de los puntos de separación del modelo de referencia y del modelo propuesto.

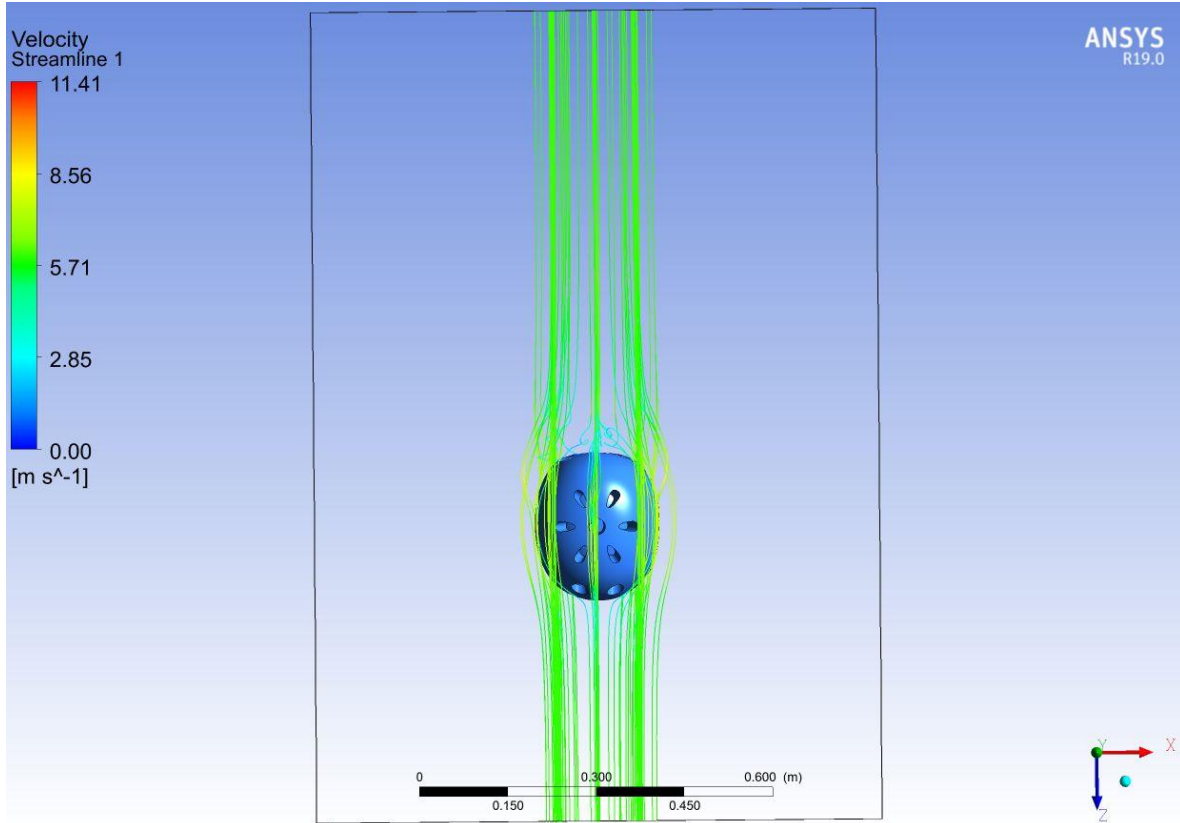


Figura 4.3 Estela de modelo de referencia con líneas de corriente vista en planta.

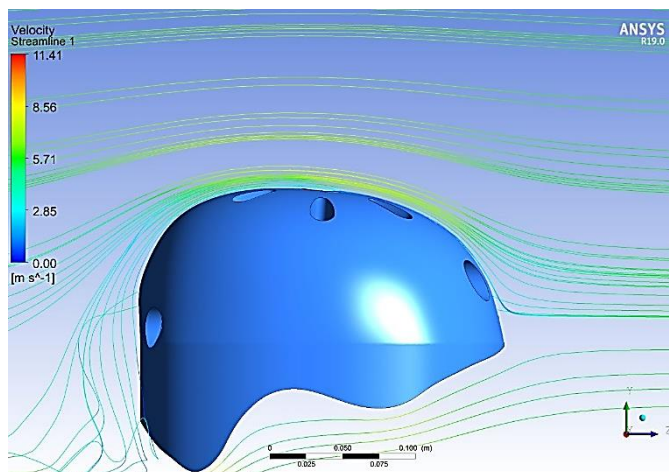


Figura 4.4 Velocidad con líneas de corriente

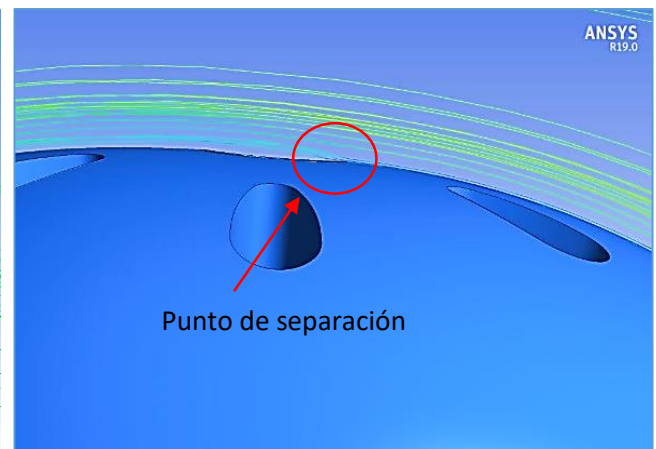


Figura 4.5 Punto de separación en modelo de referencia

4.3.1 Fuerza y Coeficiente de arrastre

Dado que el solver tiene como herramienta el cálculo del coeficiente de arrastre lo único que fue necesario introducir fue el área frontal proyectada y la dirección de entrada del viento que en este caso fue en $-Z$. Se repitió la simulación seis veces para obtener las seis fuerzas con sus respectivos coeficientes. Los resultados se muestran a continuación (Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Resultados obtenidos en ANSYS

Modelo de referencia ciclismo		
V [m/s]	F_a [N]	C_d
3	0.132	1.017
6	0.266	0.51
9	0.472	0.4017
12	0.754	0.36
15	1.113	0.34
18	1.539	0.327

Se observa que el comportamiento del coeficiente, como se esperaba, responde a la variación de la velocidad; a bajas velocidades el coeficiente es grande mientras que a altas velocidades es mucho menor. A partir de 12 m/s el coeficiente no cambia significativamente por lo que se puede pensar que si se hicieran más simulaciones con mayores velocidades el coeficiente se mantendría relativamente constante.

Estos resultados se tomaron como referencia para el diseño del nuevo casco; la optimización debía verse significativamente, con lo que obtener valores de coeficiente de arrastre iguales o cercanos a los anteriormente mostrados indicarían un mal diseño y por lo tanto habría que replantear el mismo.

4.4 Estudio de modelo de referencia: Motociclismo

De forma similar al casco de referencia de ciclismo el de motociclismo se dibujó basado en un modelo existente en el mercado; sin embargo, esta vez la geometría se apoyó sólo de fotografías pues no fue posible adquirir el modelo físico (Figura 4.6). Por esta razón el modelo CAD no es exactamente igual al casco comercial.

Al igual que en el casco de ciclismo aquí se muestran los resultados obtenidos a la velocidad media de un motociclista (21 m/s).

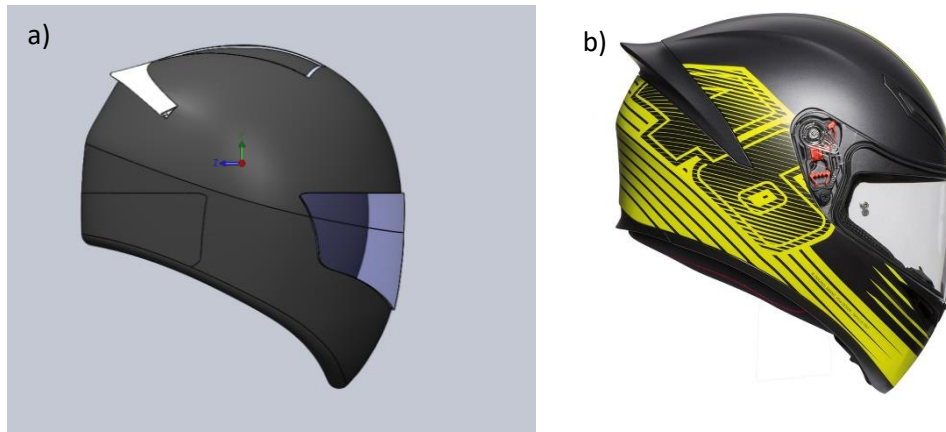


Figura 4.6 Modelo de referencia en a) CAD y b) Físico

Post- procesamiento

Para este estudio la velocidad máxima que se alcanzó sobre la superficie del casco fue de aproximadamente 26 m/s en la parte superior (Figura 4.7). Cabe aclarar que debido al vértice ubicado en la barbilla la velocidad en ese punto es más elevada, pero si se considera que detrás de esa zona, en condiciones de operación, estaría el cuerpo del conductor, dejaría de ser una zona crítica.

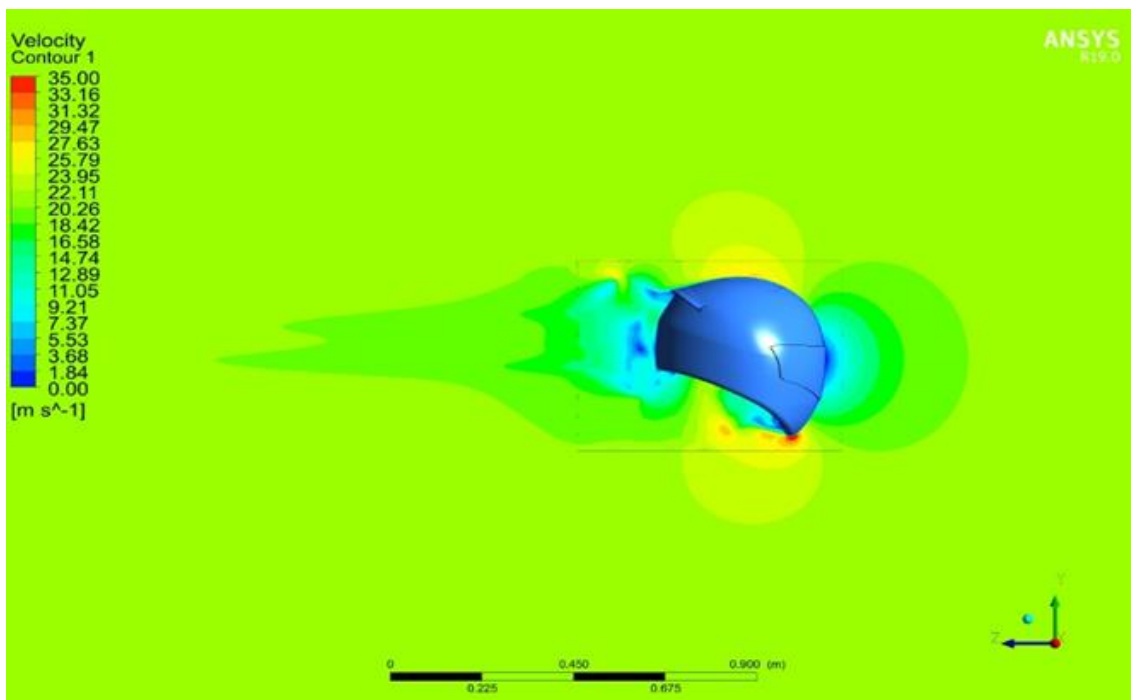


Figura 4.7 Diagrama de contorno de velocidad en modelo de referencia.

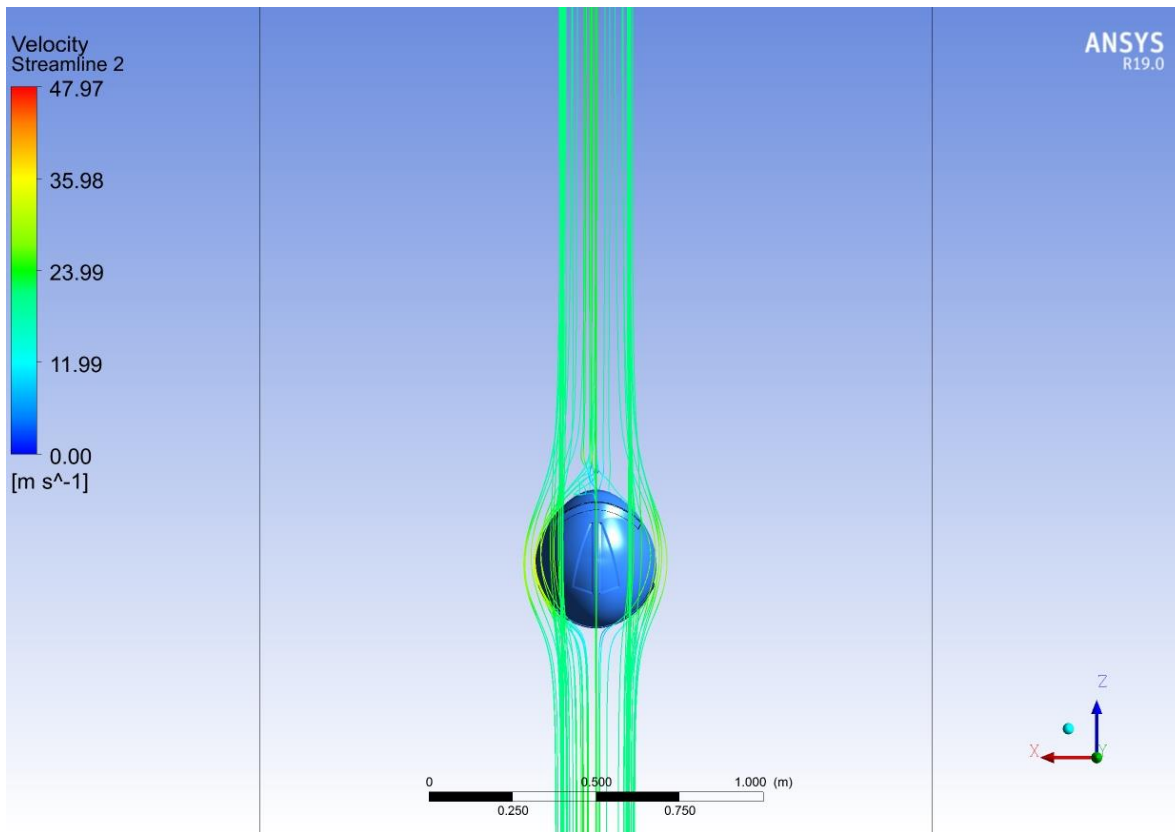


Figura 4.8 Estela de modelo de referencia con líneas de corriente vista en planta

La estela para este caso resultó ancha (Figura 4.8) debido a la forma en la parte frontal. En el estudio CFD del modelo propuesto se hará la comparación de ambas estelas.

En la figura 4.9 se muestra un acercamiento del esquema de contornos de velocidad en el cual está señalado el punto de separación del flujo. Este punto está ubicado aproximadamente a la mitad del casco.

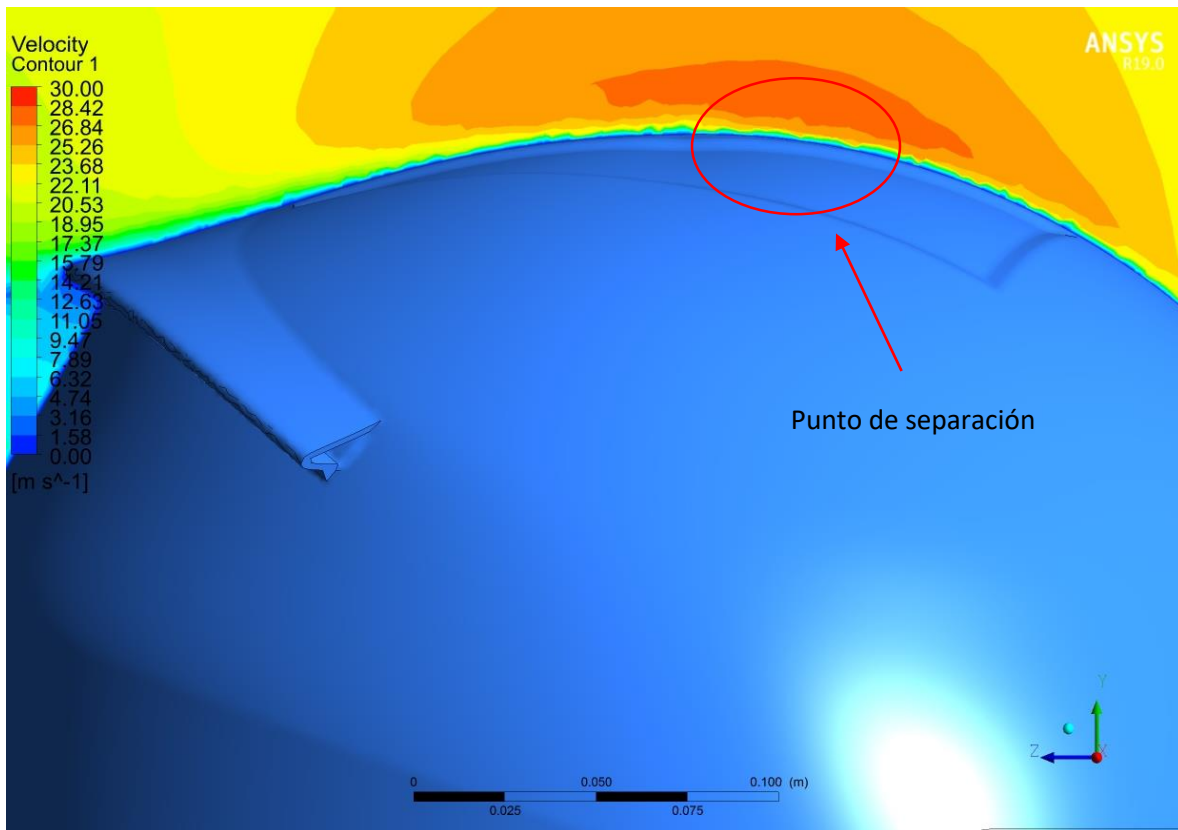


Figura 4.9 Punto de separación de flujo en modelo de referencia

4.4.1 Fuerza y Coeficiente de arrastre

De igual forma fue introducida el área frontal proyectada y la dirección de entrada del viento la cual fue +Z. Las velocidades propuestas simuladas para este casco de referencia fueron: 9 m/s, 15 m/s, 21 m/s, 27 m/s, 33 m/s y 39 m/s. Los resultados fueron los siguientes:

Tabla 4.4 Resultados de modelo de referencia obtenidos en ANSYS

Modelo de referencia motociclismo		
V [m/s]	F_a [N]	C_d
9	3.289	0.466
15	7	0.357
21	10.932	0.285
27	14.626	0.247
33	21.17	0.223
39	28.39	0.214

4.5 Recopilación de modelos aerodinámicos

Con la finalidad de observar y analizar las características típicas que hacen tanto de un casco aero como de uno integral cascos aerodinámicos, se realizó una recopilación de modelos existentes en el mercado. A continuación, se muestran los modelos elegidos para ambos deportes (Figuras 4.10 y 4.11).

Ciclismo



Figura 4.10 Modelos comerciales tipo aero

Se puede observar en la figura 4.10 que los tres cascos poseen poca ventilación, tal como se describió en las características en el Capítulo 1. Los dos rasgos adicionales encontrados fueron la forma de media elipse y la abertura o toma de aire en la parte superior.

Motociclismo



Figura 4.11 Modelos comerciales tipo integral

Para el caso de motociclismo no hubo grandes diferencias entre los modelos, los cambios se encontraron principalmente en los diseños de los spoilers, la forma y tecnología de la ventilación y la forma de la barbilla. Aerodinámicamente hablando la característica más sobresaliente fue la forma de la parte frontal del casco; los más aerodinámicos fueron los que poseían una forma “triangular”, por lo que se tomó la decisión de incluir esta particularidad en el modelo propuesto.

4.6 Modelos propuestos en CAD

Después de considerar las características de los modelos existentes en el mercado para cada casco y de proponer algunos diseños se realizó la prueba en ANSYS FLUENT, de acuerdo al diagrama de flujo presentado al inicio de este capítulo (Figura 4.1). Más de un modelo para cada disciplina cumplieron con la condición de tener coeficientes de arrastre menores a los obtenidos en los modelos de referencia, por ello para determinar los modelos finales se hizo un balance para obtener la mejor relación diseño- rendimiento en cada casco. Los modelos propuestos finales se presentan abajo (Figura 4.12 y 4.13), mencionando que los planos, donde se puede observar el detalle de cada uno, se encuentran en el Anexo A. La principal característica en ambos cascos que determinó la mejora aerodinámica es su forma; en el de bicicleta se reemplazó la forma redonda del frente y lateral por una más ovalada. En el de motocicleta se inclinó la vertical en la parte frontal y en la zona de las mejillas se diseñó una forma triangular, con el fin de evitar la incidencia del viento de manera perpendicular.

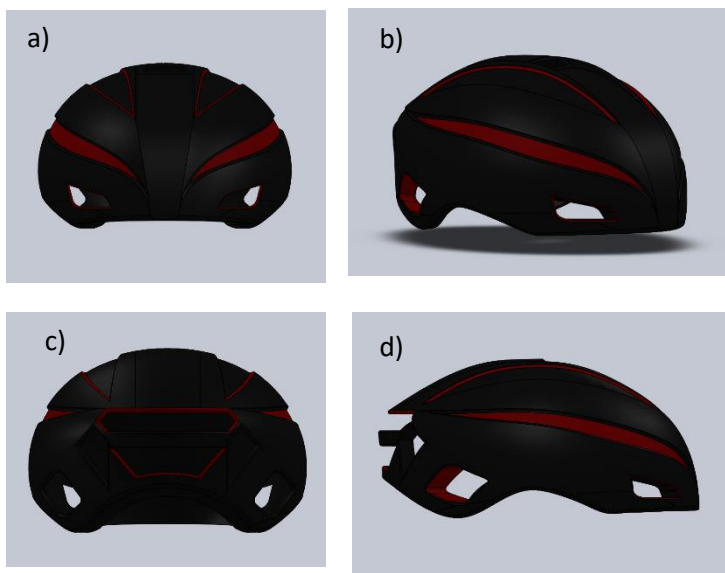


Figura 4.12 Modelo propuesto en CAD en vista a) Frontal, b) Isométrico, c) Posterior y d) Lateral

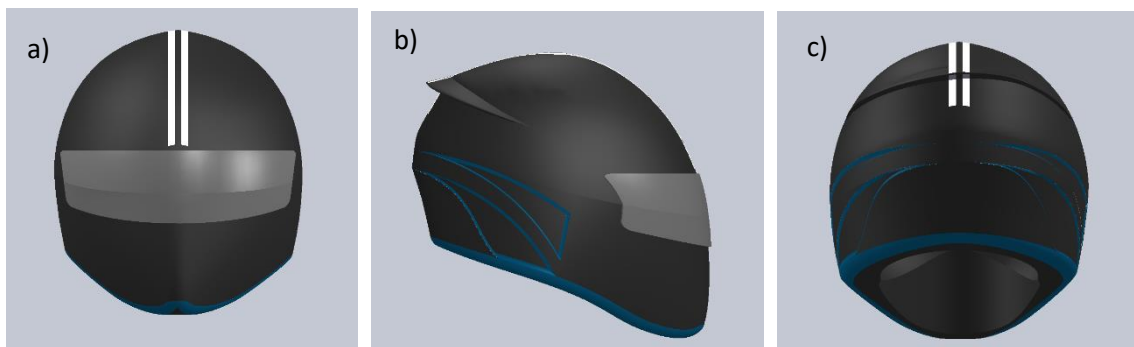


Figura 4.13 Modelo propuesto en CAD en vista a) Frontal, b) Lateral y c) Posterior

4.7 Simulación de modelos propuestos en ANSYS FLUENT

Como se mencionó anteriormente, en esta sección se describirá con mayor detalle el procedimiento que se siguió en las simulaciones, las cuales se realizaron en el software ANSYS en su versión 19.0. Se describirán las tres etapas que conforman el estudio (pre-proceso, cálculo y post-proceso) de los dos cascos propuestos de manera simultánea.

4.7.1 Geometría y Dominio Computacional

ANSYS contiene *Design Modeler*, una herramienta de diseño donde se puede dibujar como en otros softwares CAD. Dado que las geometrías de los modelos propuestos se realizaron en SolidWorks los archivos se exportaron para cambiar el formato de “.SLDPRT” a “.STEP” para que fueran compatibles con el programa.

A pesar de que los modelos ya estaban hechos fue necesario crear en Design Modeler el Dominio Computacional, el cual idealmente tendría como dimensiones las medidas del túnel de viento en donde se realizaron las pruebas experimentales; sin embargo, debido a que no se contaba con la capacidad computacional suficiente para hacer un mallado tan grande se tomó la decisión de proponer las dimensiones, estas fueron: para el casco de bicicleta tres veces la longitud horizontal (L_h) para las direcciones X y Y, y 4.5 veces la longitud horizontal en Z (Figura 4.14). Para el casco de motocicleta: cuatro veces la longitud horizontal para las direcciones X y Y, y seis veces la longitud horizontal en Z (figura 4.15).

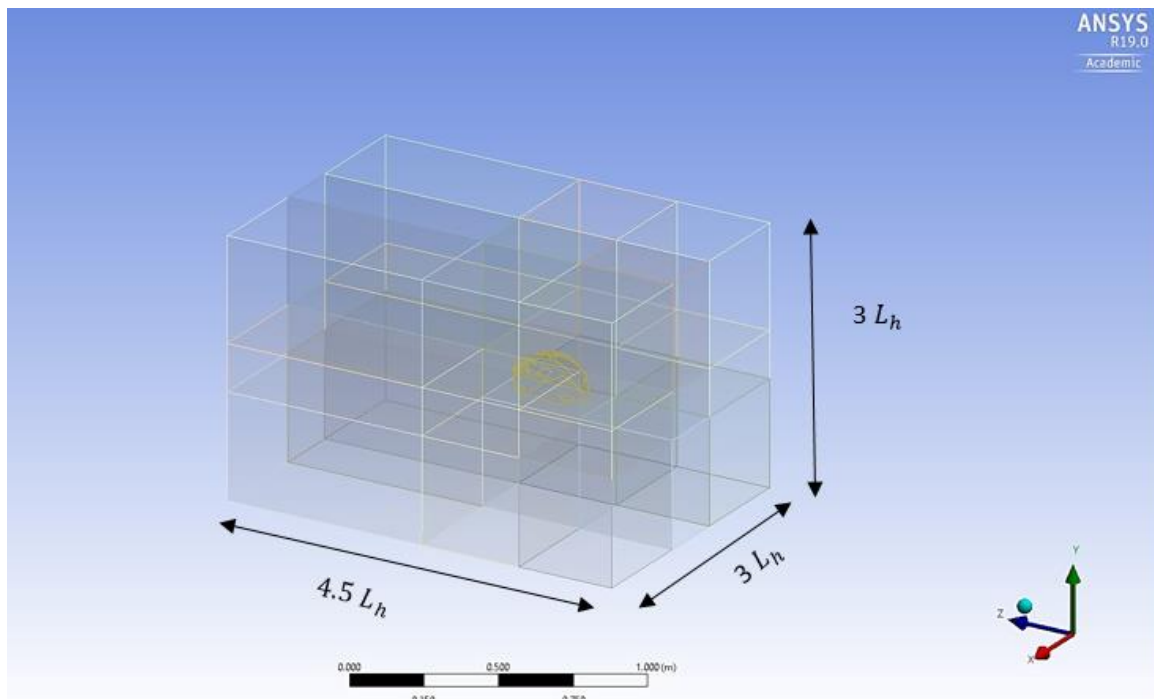


Figura 4.14 Dominio computacional y subseccionamiento

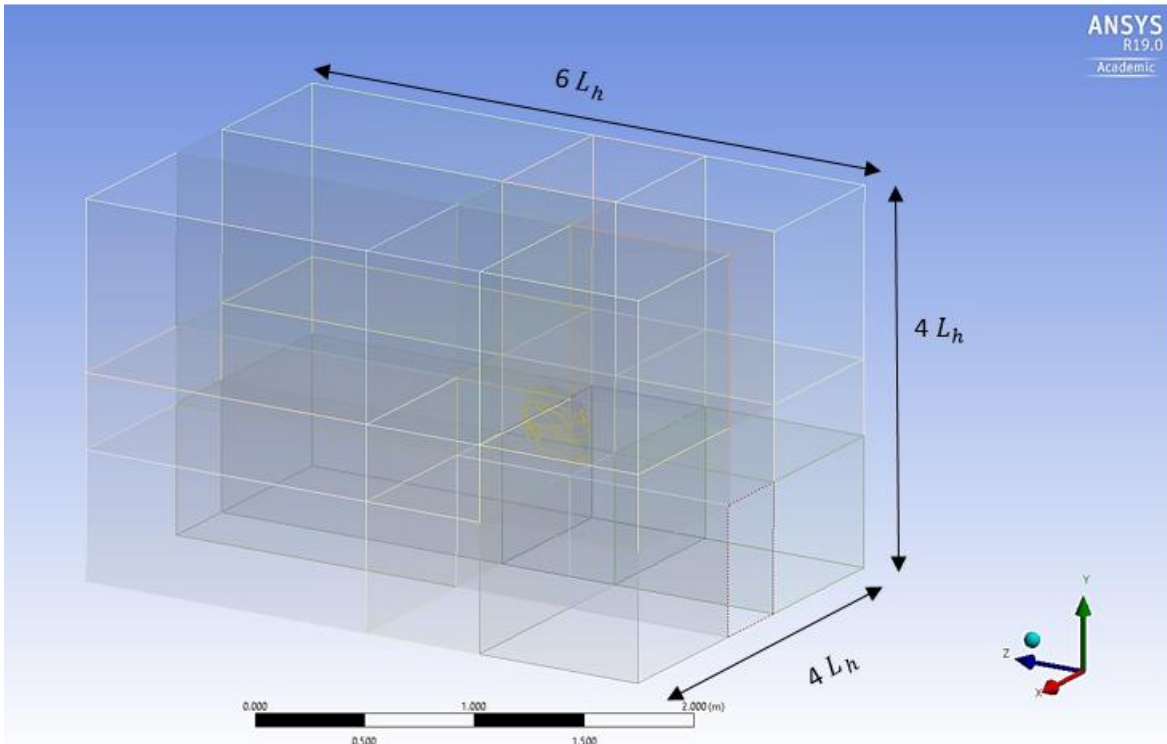


Figura 4.15 Dominio computacional y subseccionamiento

Adicionalmente, para ambos casos se creó un subdominio con ayuda de planos adicionales en las tres direcciones, esto con la finalidad de seccionar el dominio y así centrar el análisis en el bloque que encierra a cada casco. En este módulo también se realizó la *operación booleana*, que consiste en separar un volumen determinado del resto del dominio.

4.7.2 Malla

En el módulo de mallado (*Mesh*) se configuró todos los parámetros utilizados en la conformación de la malla (Figuras 4.16 y 4.17). Entre ellos el tamaño de elemento el cual para ambos casos no rebasó los diez milímetros por lo que las dos mallas tuvieron varios millones de elementos.

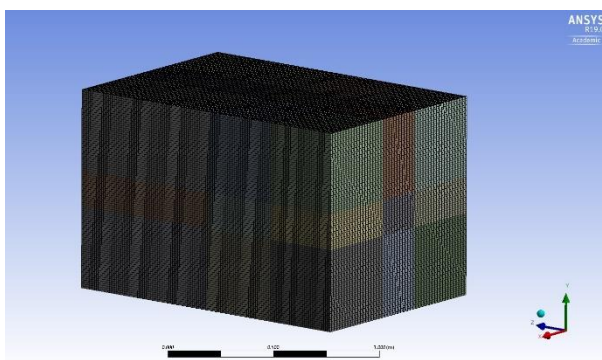


Figura 4.16 Mallado del dominio en casco de bicicleta

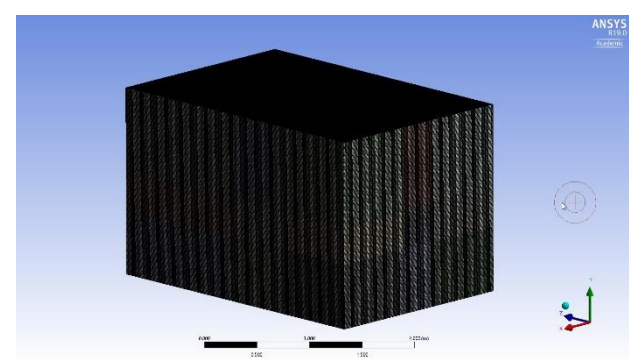


Figura 4.17 Mallado del dominio en casco de motocicleta

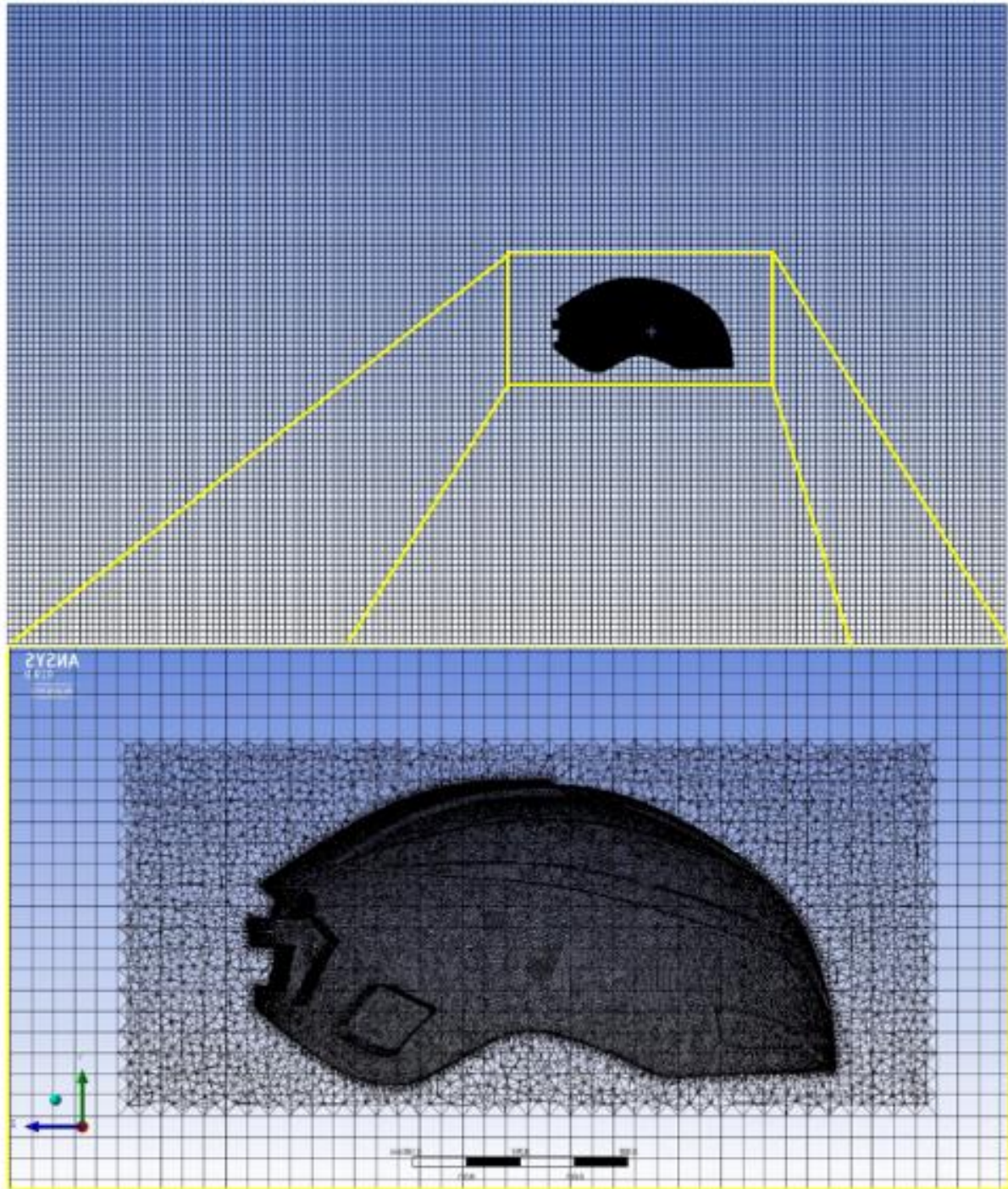


Figura 4.18 Detalle de mallado sobre modelo propuesto de ciclismo

Gracias al seccionamiento realizado en el módulo de edición de geometría fue posible insertar diferentes tamaños de elementos; para ambos casos los bloques en los que se encuentran los modelos tienen un tamaño de 5 mm, mientras que el resto de bloques en el Dominio tuvieron un tamaño de 10 mm. Con esto la configuración de mallas se optimizó; mientras en el casco y su bloque fue malla no estructurada, en el resto del dominio se manejó malla estructurada, reduciendo tiempo de cálculo.

En las Figuras 4.18 y 4.19 se puede apreciar los tres tamaños: de cara en el modelo, cuerpo del bloque del modelo y del resto del Dominio.

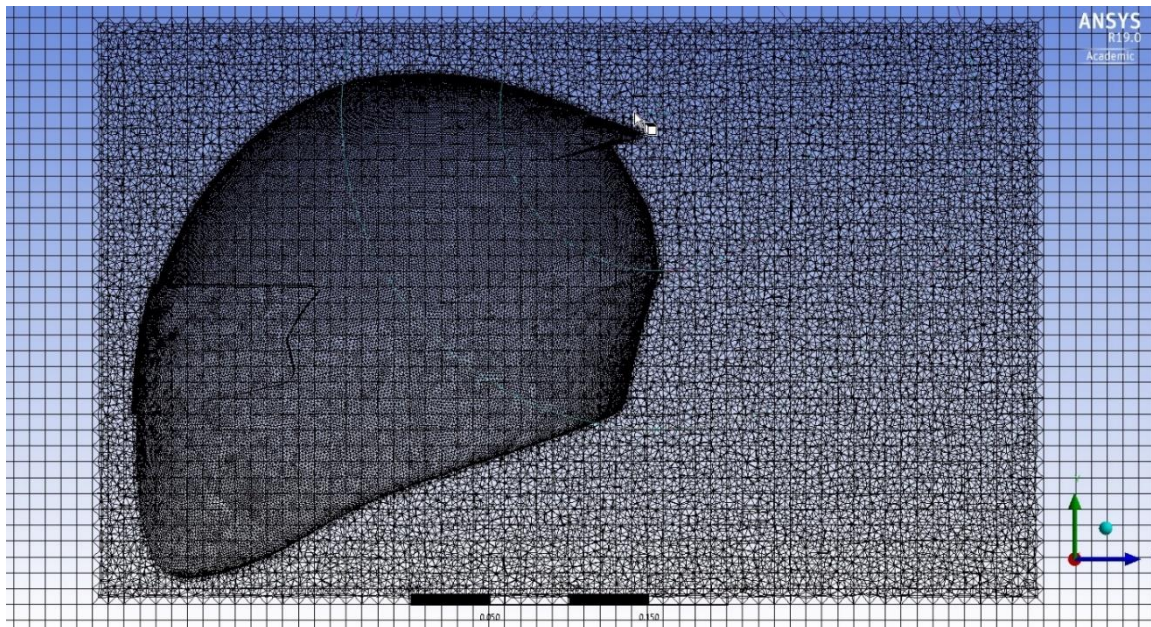


Figura 4.19 Detalle de malla sobre modelo propuesto de motociclismo

En esta parte del análisis también se nombraron las diferentes caras del dominio y de los modelos que servirán para definir las condiciones de frontera. Se nombró la cara de entrada (*inlet*), de salida (*outlet*), paredes (Wall) y las caras del modelo (*helmet*). En la siguiente tabla se muestran algunos de los parámetros de la malla utilizada.

Tabla 4.5 Configuración de malla de ambos modelos

Parámetro	Casco Ciclismo	Casco Motociclismo
Número de elementos	2801003	15712784
Número de nodos	1857420	11906284
Función de tamaño	Adaptativo	Curvatura
Centro de relevancia	Fino	NA
Relevancia	100	NA
Suavizado	Alto	Alto
Tamaño de elemento en cara	1 mm	2 mm
Tamaño de elemento en cuerpo (casco)	5 mm	5 mm
Tamaño de elemento en cuerpo (Dominio)	10 mm	10 mm
Método de mallado en bloque de casco	Tetraedros	Tetraedros
Método de mallado en el dominio	Multizone	Multizone

4.7.3 Parámetros de simulación

Una vez configurado el mallado el siguiente paso es establecer los parámetros de solución. Para ello ANSYS cuenta con FLUENT, la aplicación o *solver* con la que resuelve las ecuaciones que caracterizan el flujo. Lo primero fue especificar la operación de los procesos, los cuales fueron cuatro, con doble precisión y de forma paralela. Las propiedades del fluido (aire) se ingresaron de acuerdo a las condiciones de CDMX y que se utilizaron en las simulaciones de los modelos de referencia. Lo siguiente fue elegir el modelo de turbulencia, elección que fue tomada con base en estudios previos realizados por especialistas y que, de acuerdo a este tipo de estudio, recomiendan utilizar el modelo $k-\omega$ SST [20].

Las condiciones de frontera establecidas fueron las siguientes:

- Entrada: especificación de las diferentes velocidades de entrada para cada casco. También se estableció el método de especificación de turbulencia ($k-\omega$).
- Salida: 0 [Pa] como presión de salida. Presión total como especificación de la presión de contraflujo. De igual forma K y Ω fue el método especificado de turbulencia.
- Caras laterales, superior e inferior: Definidas en condición de no deslizamiento.
- Modelo: Definido en condición de no deslizamiento.

Así mismo se utilizó un esquema de discretización *upwind* de segundo orden para aumentar la precisión de los resultados. El algoritmo SIMPLEC fue utilizado para calcular el campo de presión y se utilizó un esquema de segundo orden para la interpolación de la presión. En esta sección también se ingresaron los valores de área frontal en valores de referencia. También se estableció el cálculo de la fuerza y coeficiente de arrastre. En la siguiente tabla se resume los parámetros utilizados.

Tabla 4.6 Parámetros de solución

Parámetro	Valor o descripción
Solver type	Pressure- based
Time	Steady
Modelo de turbulencia	$k-\omega$ SST
Algoritmo	SIMPLEC
Inicialización	Híbrida
Iteraciones	200

4.7.4 Post- procesamiento

Después de las 200 iteraciones las propiedades que fueron calculadas se visualizan en el post procesador en el cual se verifican que los resultados obtenidos sean congruentes con lo esperado. Hubo que realizar varias simulaciones pues en algunas de ellas, a pesar de generarse correctamente la malla, los resultados carecían de sentido por lo que fue necesario modificar los parámetros de malla.

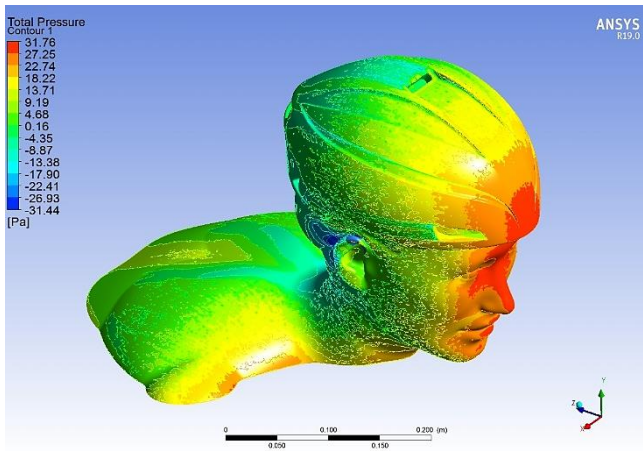


Figura 4.20 Diagrama de contorno de Presión total

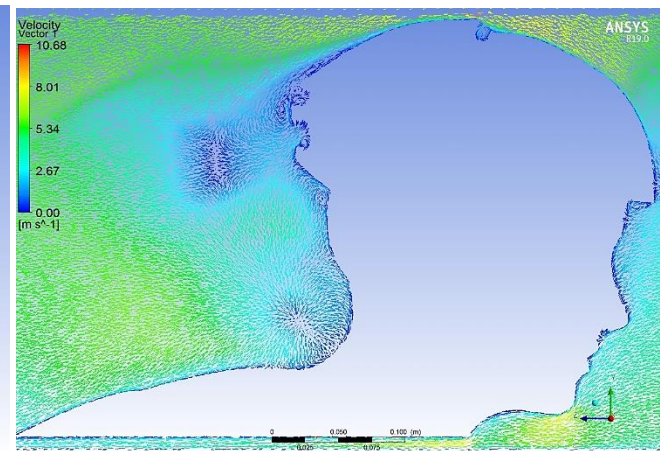


Figura 4.21 Campo de vectores de velocidad

En general para ambos modelos la presión y la velocidad, principales propiedades, se comportaron de acuerdo a la teoría; con puntos de estancamiento en la parte frontal, máxima velocidad en la parte superior y zonas de recirculación en la parte posterior. Para el caso del casco de ciclismo fue agregado un modelo de ciclista (Figura 4.21) con la finalidad de replicar el modelo físico en la visualización, pues el objeto de estudio es sólo el casco. En este casco se observa que la máxima velocidad alcanzada, tomando como entrada una velocidad media de 6 m/s, fue de 10 m/s en el borde de la entrada de aire de la parte superior. Por otra parte, la máxima presión total (estática y dinámica) fue de aproximadamente 32 Pa y se localizó en una pequeña zona en la parte frontal del casco y en la frente y ojos del ciclista.

En el modelo de motociclista no se añadió un maniquí de conductor pues se consideró que este no influiría significativamente en los valores de presión y velocidad además de que incrementaría el tiempo de mallado y de simulación. En las Figuras 4.22 y 4.23 se observa que, con una velocidad de entrada de 21 m/s, la velocidad máxima alcanzada fue de alrededor de 30 m/s, mientras que la presión total máxima fue de 292 Pa en la parte frontal. Detrás del visor, en las zonas laterales, se encontró la presión mínima con un valor de -336 Pa.

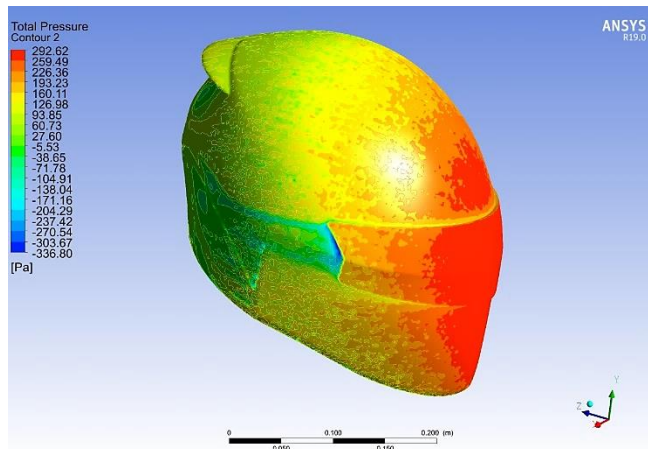


Figura 4.22 Diagrama de contorno de Presión total

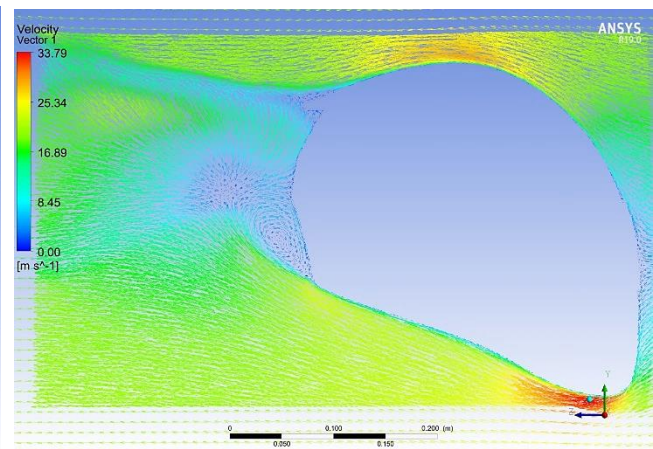


Figura 4.23 Campo de vectores de velocidad

En la siguiente sección se presentan otros esquemas de post procesamiento de estos estudios y servirán para comparar visualmente las características aerodinámicas de cada casco.

4.7.5 Resultados

Aquí se presentan los resultados de los cascos propuestos y además se retoman los obtenidos en las simulaciones de los cascos de referencia con la finalidad de identificar la optimización alcanzada con los nuevos diseños.

Ciclismo

Para la recopilación de resultados de las simulaciones, al igual que en el modelo de referencia, sólo fue necesario introducir el área frontal proyectada (0.02747 m^2), el vector de velocidad de entrada (0, 0, -1) y las diferentes magnitudes de velocidad (3, 6, 9, 12, 15 y 18 m/s).

A continuación, se muestran los valores de fuerza y coeficiente de arrastre obtenidos tanto del modelo de referencia como los del propuesto:

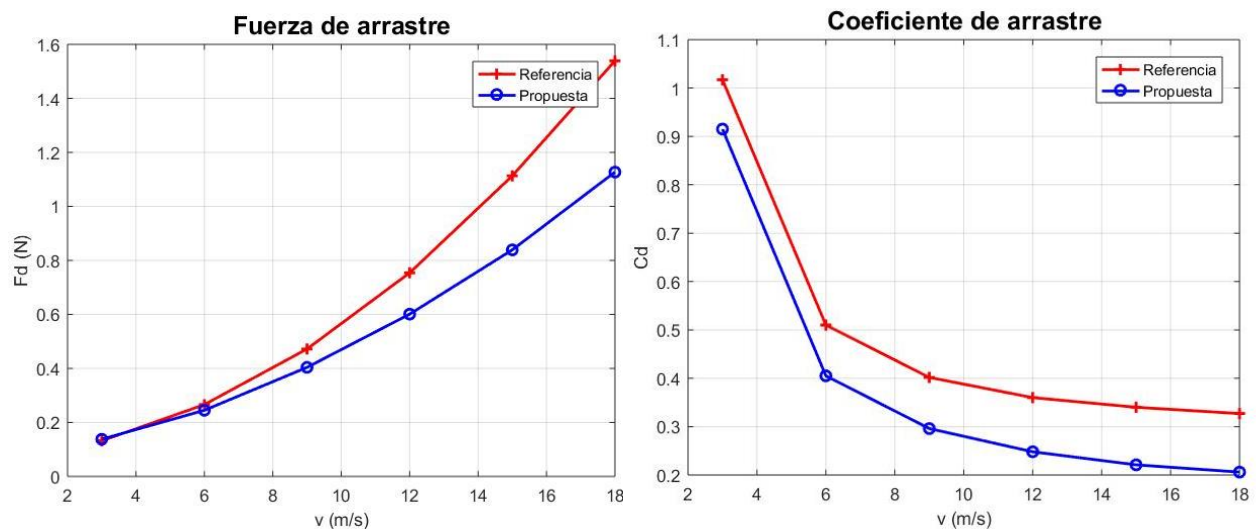


Figura 4.24 Resultados de casco de ciclismo

De manera general el comportamiento o tendencia es similar; la fuerza aumenta conforme aumenta la velocidad y el coeficiente de arrastre comienza alto a bajas velocidades y se reduce a medida que la velocidad aumenta. A pesar de que tanto la fuerza como el coeficiente de ambos modelos inician con valores cercanos entre sí, el aumento de velocidad revela la menor resistencia que el casco propuesto ofrece.

Mediante los contornos de velocidad y planos con líneas de corriente obtenidos en el post procesamiento (Figuras 4.25 y 4.26) se puede comparar gráficamente el tamaño de la estela generada por cada casco, se observa que la del modelo propuesto es significativamente más estrecha que la del modelo de referencia, con lo que se comprueba la menor fuerza de arrastre obtenida en los resultados.

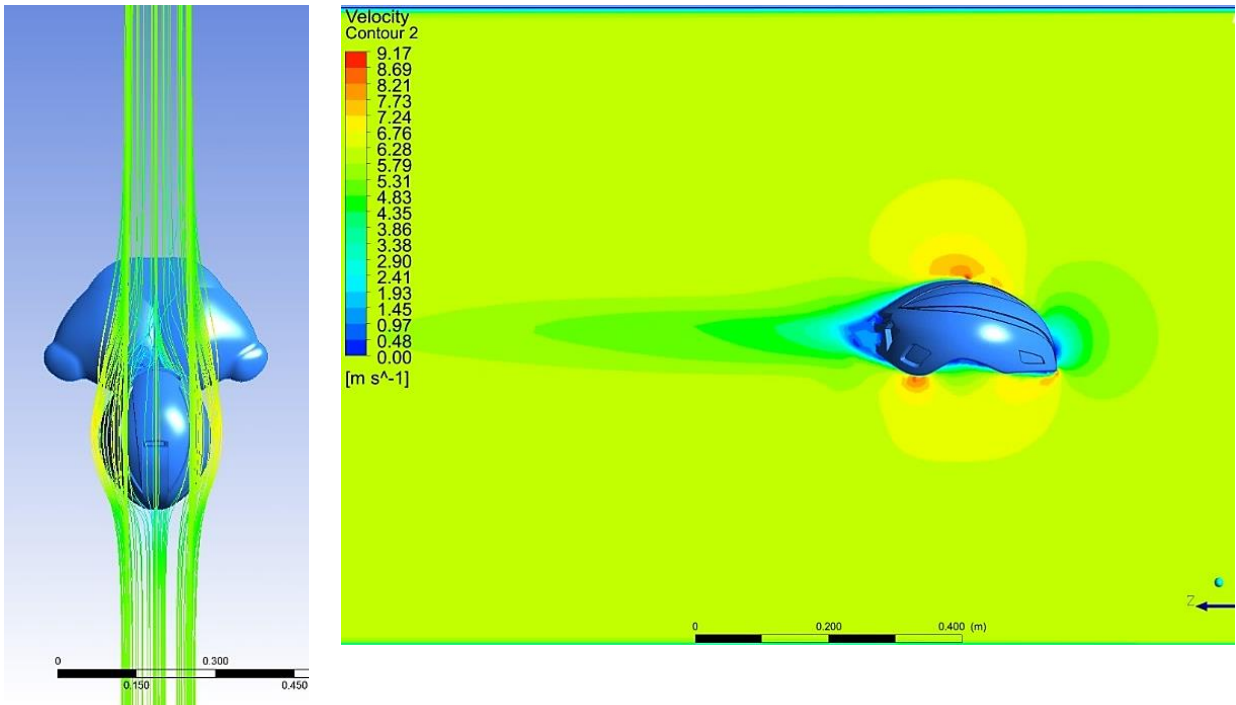


Figura 4.25 Estela de modelo propuesto en planta (izquierda) y lateral (derecha)

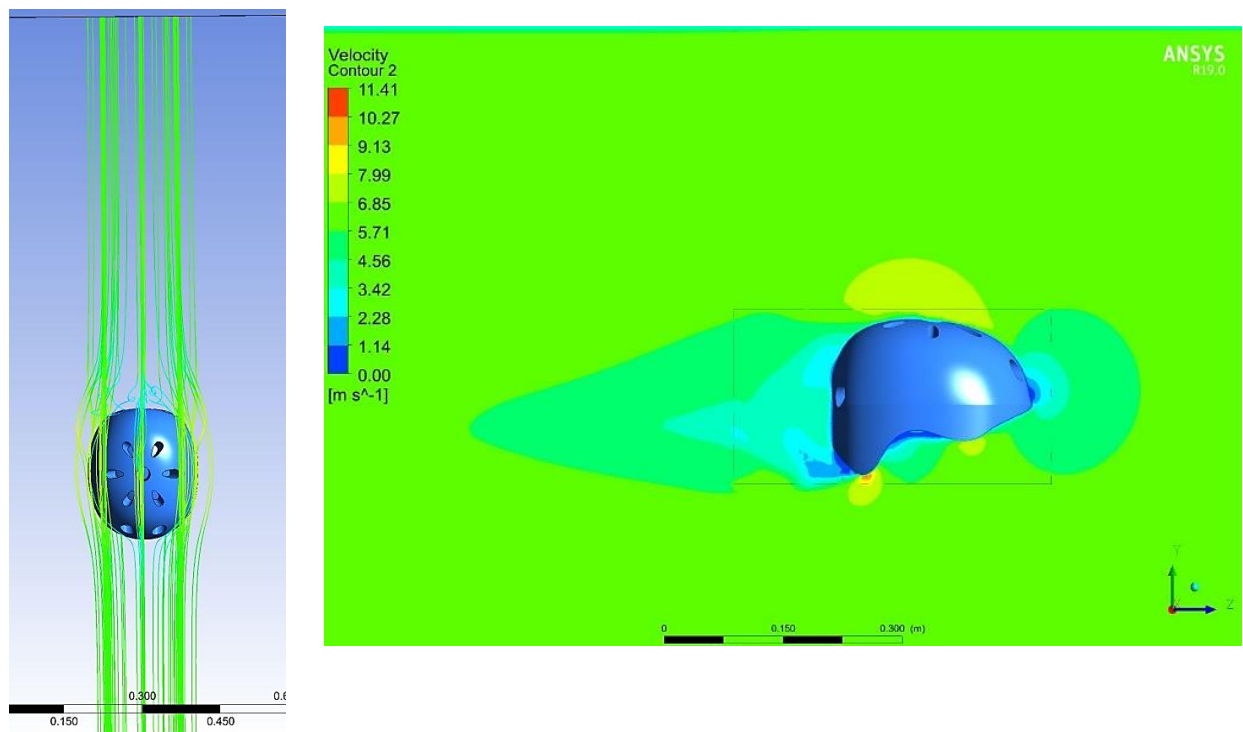


Figura 4.26 Estela de modelo de referencia en planta (izquierda) y lateral (derecha)

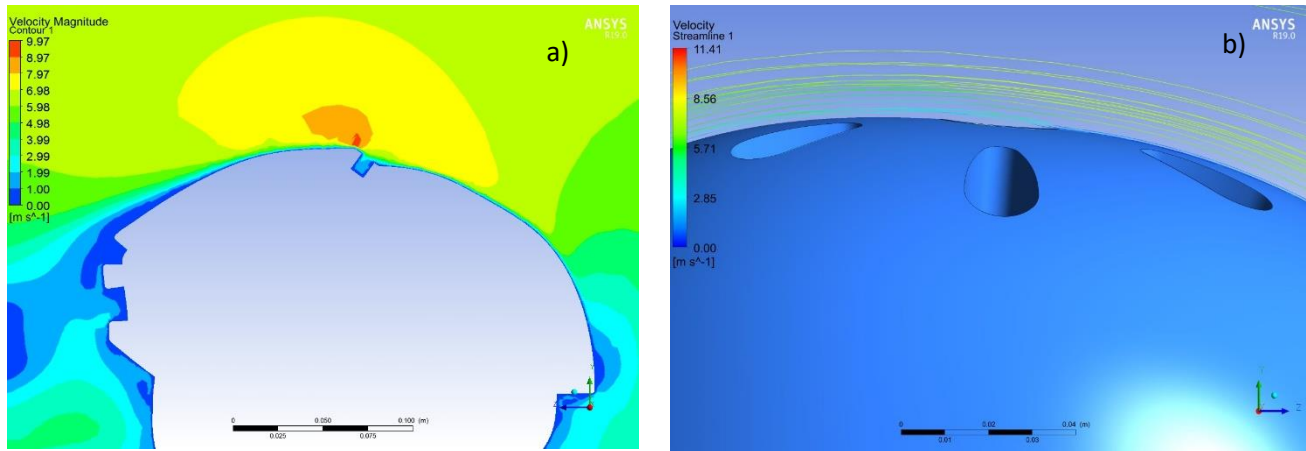


Figura 4.27 Comparación en el punto de separación del flujo a) Propuesta y b) Referencia

También fue posible analizar e identificar el punto de separación del flujo de cada casco (Figura 4.27) en donde se encontró, como se anticipaba, una mayor adherencia del flujo en el modelo propuesto, lo que provocó una estela estrecha y con ello una menor resistencia.

Motociclismo

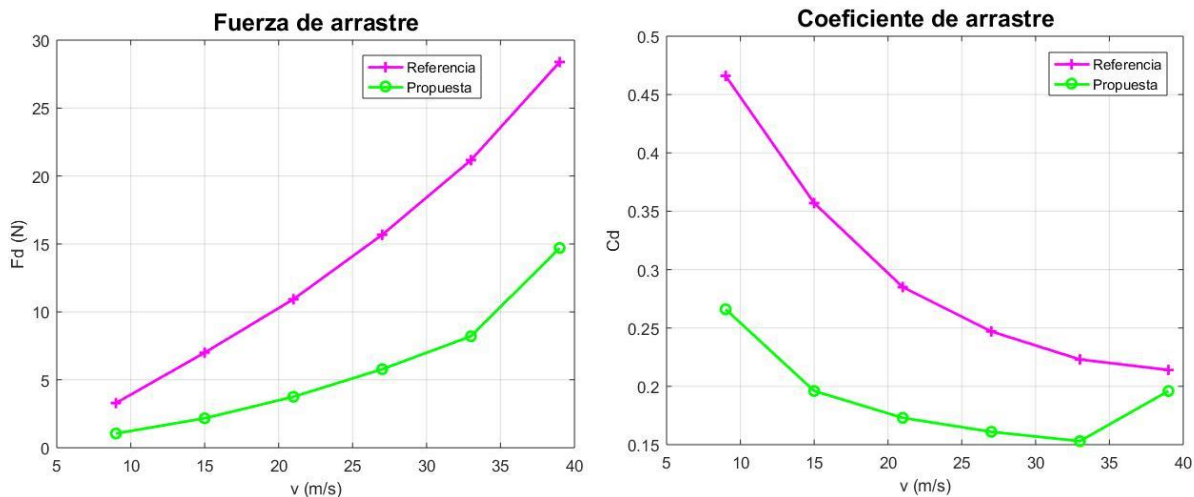


Figura 4.28 Resultados de casco de motociclismo

Para la caracterización del modelo propuesto se introdujo su área frontal (0.07623 m^2), las seis velocidades de entrada (9, 15, 21, 27, 33 y 39 m/s) y el vector de velocidad (0, 0, 1). Al igual que en los resultados en el casco de bicicleta, en los del casco de motocicleta las gráficas de fuerza y coeficiente de arrastre se comportaron de manera similar entre la referencia y la propuesta (Figura 4.28).

Dentro de la comparación de resultados entre modelos se destaca que, lejos de los 28.39 [N] de fuerza máxima, la obtenida en el modelo propuesto fue tan solo de 14.69 [N], lo cual implica una reducción del 50% en el arrastre. Por otro lado, el coeficiente de arrastre se comporta de manera similar al de la referencia, no obstante, el coeficiente a 39 m/s fue de

0.196, valor parecido al obtenido a 15 m/s. Esto sugiere que después de alcanzar el valor mínimo, el coeficiente se eleva ligeramente para luego permanecer relativamente constante.

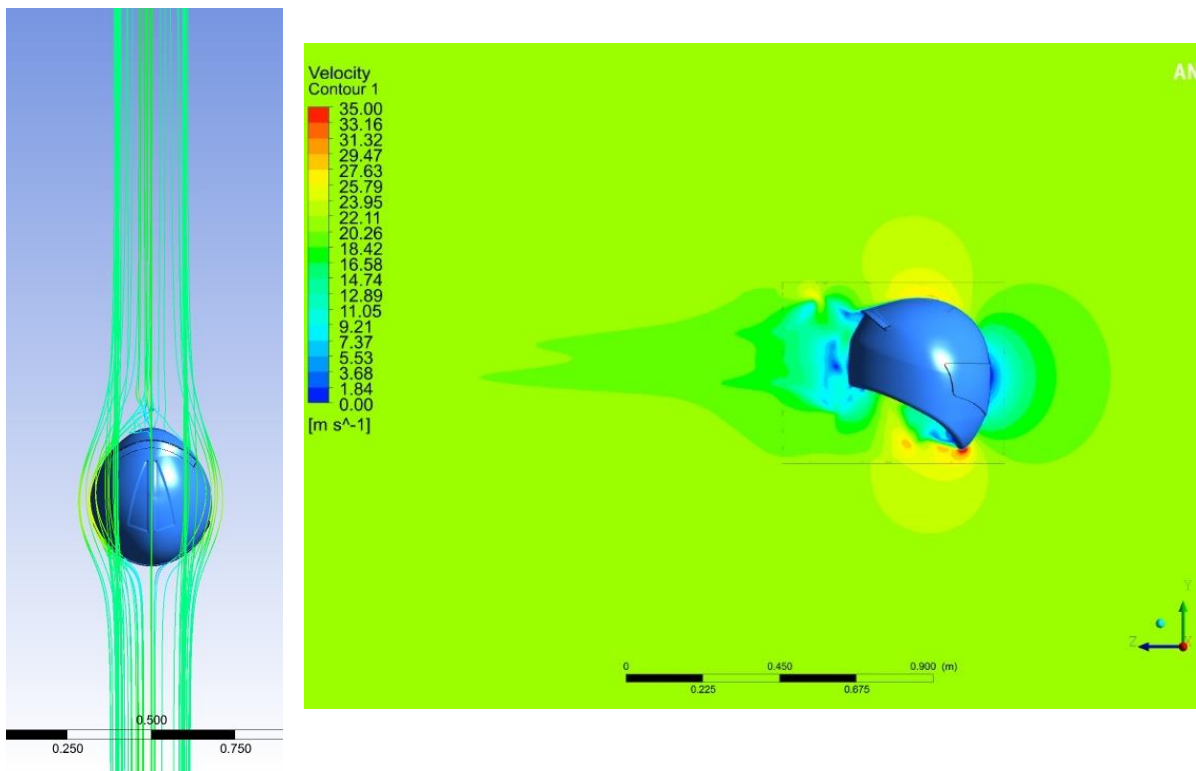


Figura 4.29 Estela de modelo de referencia en planta (izquierda) y lateral (derecha)

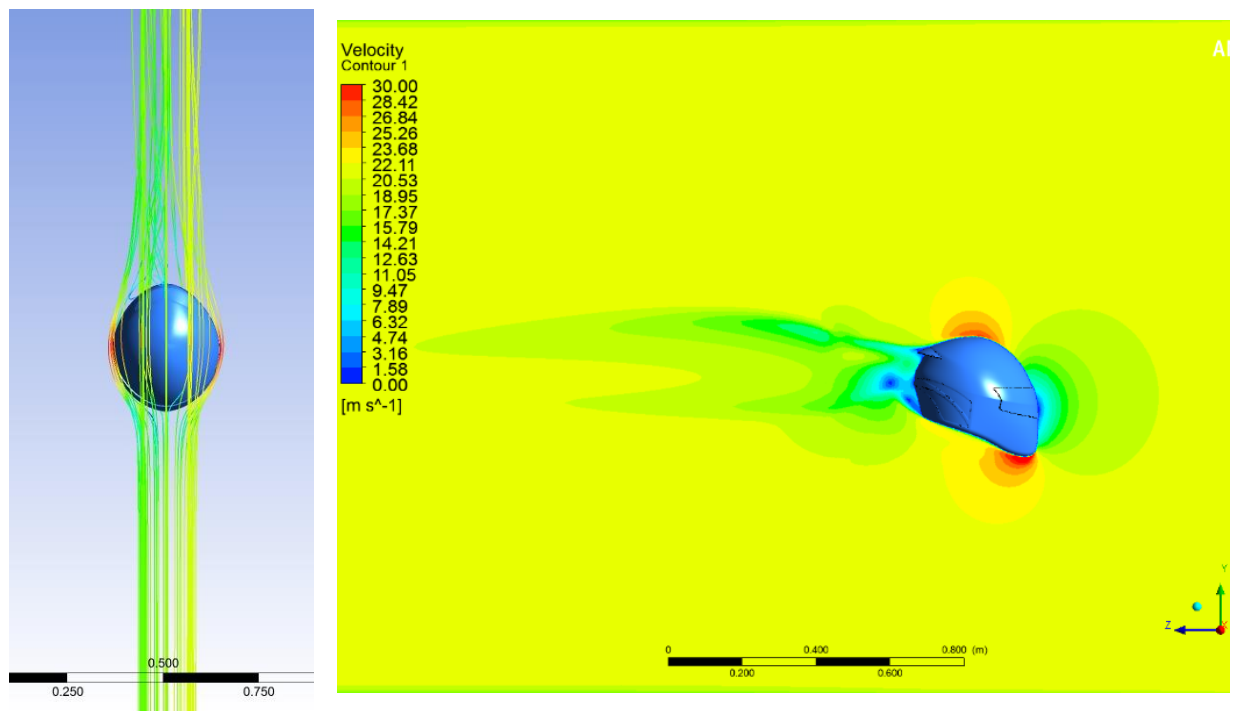


Figura 4.30 Estela de modelo propuesto en planta (izquierda) y lateral (derecha)

Al igual que en los modelos de ciclismo en este estudio se observa una estela reducida por parte de la propuesta (Figuras 4.29 y 4.30). Así mismo, el punto de separación está más retrasado por parte del modelo propuesto, tal como se señala en la comparación de la Figura 4.31.

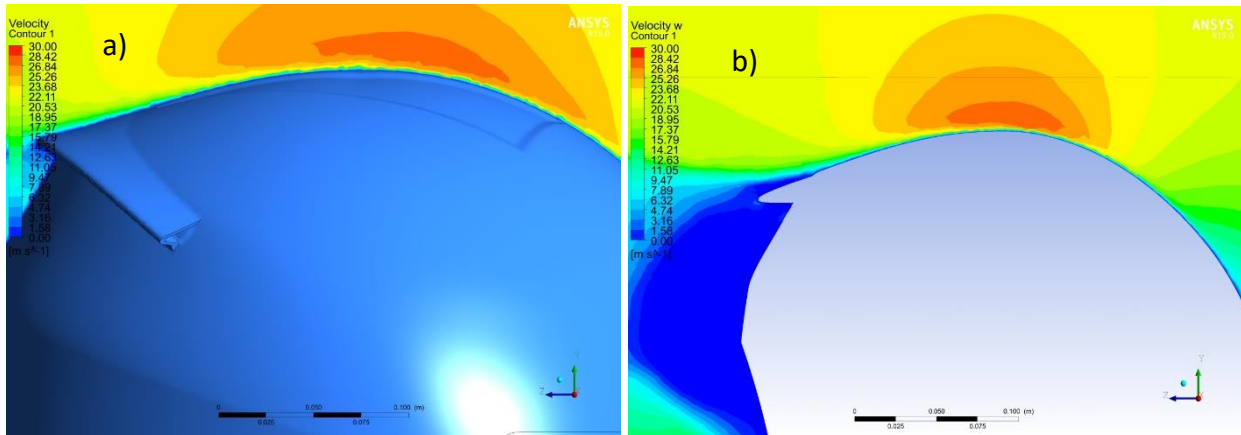


Figura 4.31 Comparación en el punto de separación de flujo a) Referencia y b) Propuesta

5 PRUEBAS DE LABORATORIO Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A diferencia del capítulo anterior, donde el análisis se realizó completamente en ordenador, en este capítulo se presenta el análisis experimental realizado en túnel de viento, en el cual se describe cada fase del mismo; desde la manufactura de los modelos propuestos, pasando por la instrumentación, medición de presión y procesamiento de datos hasta el cálculo de las fuerzas y coeficientes de arrastre. Adicionalmente se presenta un experimento de visualización, el cual tiene como objetivo mostrar las diferencias que existen entre el flujo al pasar sobre los modelos de referencia y al pasar sobre los modelos propuestos. Finalmente se presenta la comparación de resultados experimentales con los obtenidos en simulación numérica, así como la discusión de las similitudes o, en su caso, de las discrepancias.

5.1 Diseño del experimento

Una vez que los modelos propuestos fueron evaluados, y de acuerdo al diagrama de flujo de la Figura 4.1, estos pasaron a manufacturarse para luego iniciar las pruebas en túnel de viento. El procedimiento se muestra en el siguiente diagrama.



Figura 5.1 Proceso experimental

En este capítulo se describirán cada una de estas etapas en cada casco, explicando los materiales utilizados, equipo necesario, consideraciones requeridas, procedimientos, cálculos, etc. Todo ello con la finalidad de dar una idea de la metodología que se sigue en este tipo de ensayos.

5.1.1 Manufactura

Para construir los modelos propuestos se siguieron diferentes procesos; sin embargo, el túnel de viento en que se realizaron las pruebas permitió que ambos modelos se construyeran a escala natural (1:1). Para la manufactura del casco de bicicleta se recurrió a la impresión 3D por lo que sólo fue necesario el archivo del modelo y exportarlo a “.stl”, formato estándar de cuerpos 3D. El resultado fue un modelo a dimensión natural y con superficie lisa (Figura 5.2).



Figura 5.2 Manufactura del modelo propuesto (izquierda) y modelo terminado (derecha)

La elaboración del casco de motocicleta fue más compleja ya que fue necesario recurrir al programa *Pepakura Designer* para obtener múltiples piezas del modelo, de manera que se pudieran imprimir para después doblar y unir en una especie de rompecabezas. Después se siguió un proceso de modelaje, mediante el uso de resanador automotriz se dio forma al casco ya que con las piezas de papel se perdieron los redondeos. Se necesitaron varias capas de este

resanador y de lijado para lograr una superficie completamente lisa. Finalmente, se sometió a un proceso de pintado. En la Figura 5.3 se muestra el desarrollo de manufactura.

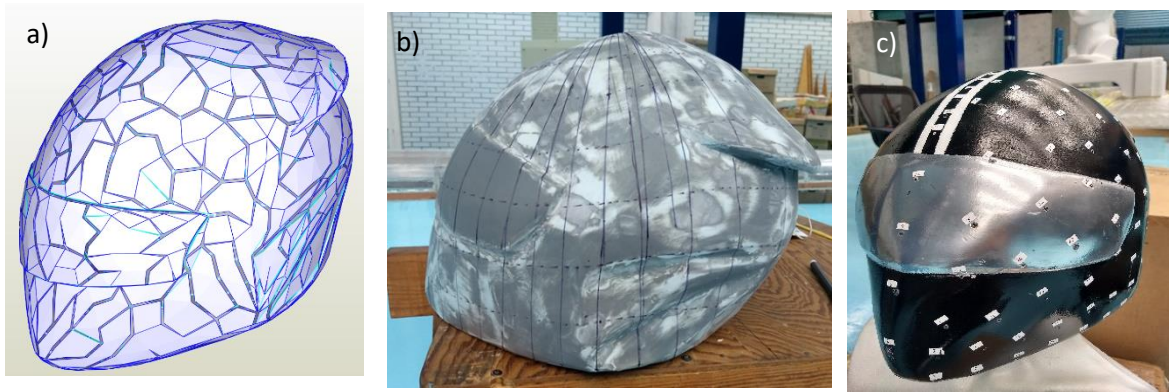


Figura 5.3 Proceso de manufactura; a) Modelo en papel, b) cubierto con resanador y c) terminado

5.1.2 Pruebas de visualización

De los diversos métodos que existen para visualizar un campo de flujo en túnel de viento como generadores de niebla o hilos, se eligió mediante generador de humo, el cual se describe líneas abajo y se observa en la Figura 5.4. Todos los ensayos se realizaron en la sección de pruebas del túnel de viento del LemAT, con una cortina negra adherida a la pared del túnel para lograr un mayor contraste del flujo. El intervalo de velocidades en esta parte del experimento fue de entre 30 y 40 rpm (0.7 m/s y 1.5 m/s aproximadamente).

El equipo utilizado fue un generador de humo de la marca AEROLAB™, empresa estadounidense especializada en ensayos en túnel de viento.



Figura 5.4 Componentes del generador de humo



Figura 5.5 Unidad de control

Se compone básicamente de tres elementos: barra, de la que es expulsado el humo, fluido, unidad de control (Figura 5.5) en la que se especifican las condiciones de operación y se introduce el fluido.

Para poner en funcionamiento el generador (siguiendo las instrucciones del manual) [25] el procedimiento fue el siguiente:

- Se conectaron a la unidad de control los elementos de la barra: manguera, cable de alimentación y sensor de temperatura.
- Fue retirada la tapa protectora de la barra y se llenó el contenedor con fluido (Figura 5.6), el cual es un aceite mineral especial para este equipo.
- Se conectaron a la unidad de control el cable de alimentación, así como la manguera de la compresora.
- Con la perilla reguladora se estableció la presión de operación (20 PSI).
- La perilla de regulación del flujo se abrió levemente para que empezara a gotear en el extremo de la barra.
- Finalmente, poco a poco la temperatura se aumentó hasta que el fluido cambió de fase, entonces estuvo listo para usarse.



Figura 5.6 Ingreso del fluido mineral a la unidad de control

5.1.2.1 Ciclismo

En las pruebas de ciclismo fue posible ingresar al túnel una bicicleta (tipo ruta, de acuerdo a las consideraciones del capítulo 4), esto para observar el comportamiento del flujo con la postura de operación del ciclista. En esta prueba se introdujo el casco en que se basó el modelo de referencia y del que se hizo el análisis CFD. Y posteriormente se introdujo el modelo propuesto.



Figura 5.7 Separación de la corriente en modelo de referencia (arriba) y propuesto (abajo)

A pesar de ser una prueba con resultados cualitativos fue posible observar las principales características de flujo alrededor de cuerpos curvos: punto de estancamiento, aceleración del flujo, punto de separación y zonas de recirculación. En la figura 5.7 se señala la zona en la que se desprende el flujo en cada casco, la cual en ambos casos se observa es aproximadamente a la mitad. Una causa por la que el casco propuesto no muestra un retraso en el punto de separación es la presencia de la toma de aire la cual representa un cambio relativamente súbito en la geometría. Otra razón sería la velocidad en la que se hizo la prueba, aumentando el número de Reynolds probablemente se pudo haber observado una mayor permanencia del flujo en la superficie. Este escenario no fue posible debido a que a mayores revoluciones el humo dejaba de ser perceptible.

Por otra parte, al comparar el tamaño de las estelas (Figura 5.8) sí se aprecia que la generada por la propuesta es más estrecha respecto a la de la referencia. También se aprecia que los vórtices generados por la referencia son más grandes que los de la propuesta. Esto se debe a la forma ovalada de la propuesta contra un cambio casi vertical en la parte de atrás de la referencia.



Figura 5.8 Comparación de estelas; arriba modelo de referencia y abajo propuesta

5.1.2.2 Motociclismo

Para este caso no fue posible ingresar al túnel el casco que se estudió en ANSYS por lo que el ensayo se limitó a observar un casco integral básico. En estas pruebas sucedió algo similar a las de los modelos de ciclismo: el punto de desprendimiento del flujo ocurre casi en el mismo lugar tanto en el modelo de referencia como en el propuesto (Figura 5.9). Esto se explica comparando la forma en la parte superior de los dos modelos, son similares, la diferencia sería el spoiler en el modelo propuesto.

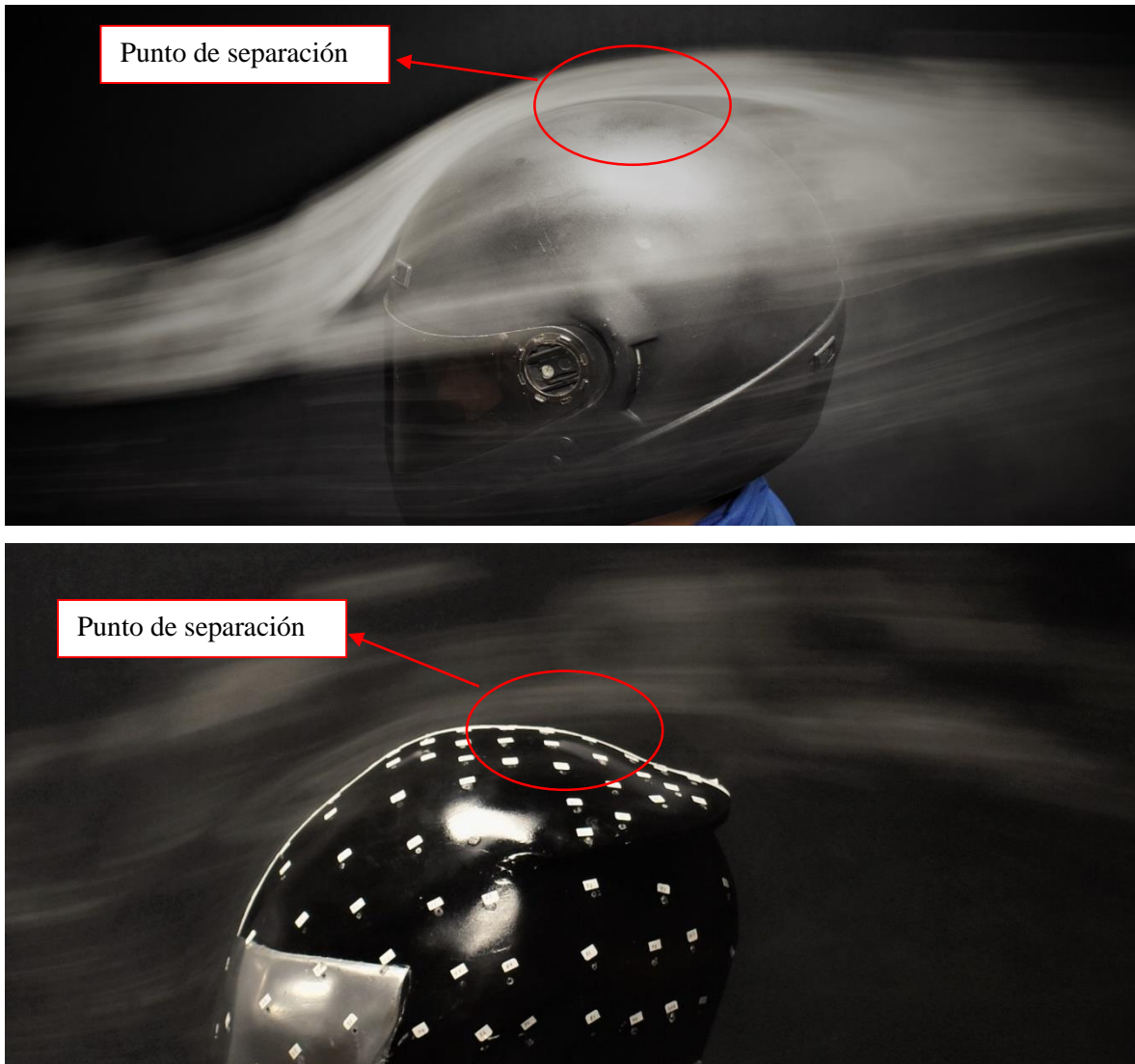


Figura 5.9 Separación de la corriente en modelo de referencia (arriba) y propuesto (abajo)

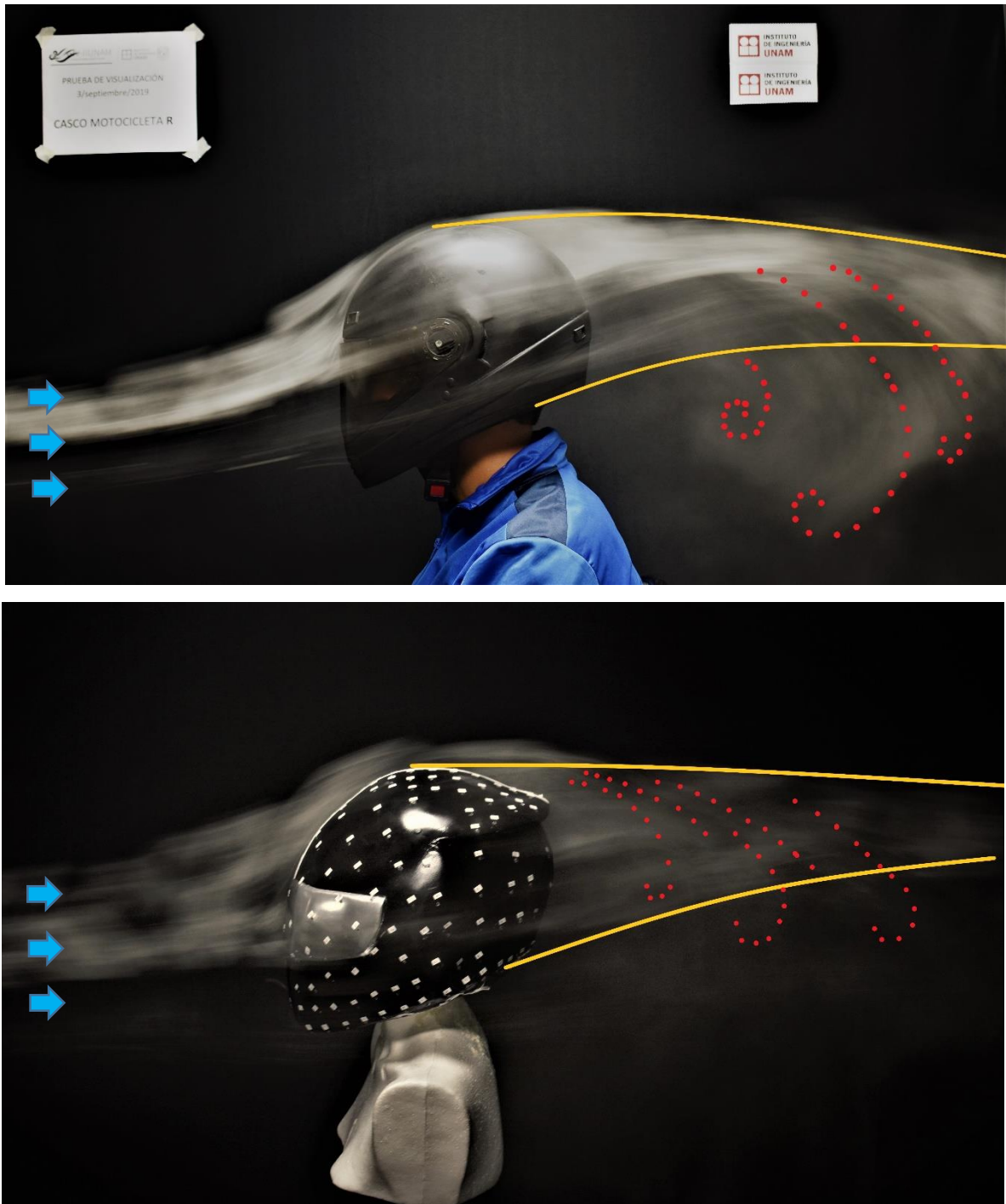


Figura 5.10 Comparación de estelas; modelo de referencia (arriba) y propuesto (abajo)

La principal diferencia en la geometría es la forma en la parte inferior; mientras el casco integral básico es redondo en prácticamente toda la superficie, en el propuesto es triangular a lo largo del mentón, esto hizo que el tamaño de la estela fuera significativamente menor al casco básico (figura 5.10). También se observó que el casco propuesto genera menos vorticidad respecto al básico.

5.1.3 Instrumentación

Lo que se hizo en esta etapa del experimento fue adaptar los modelos antes de llevar a la sección de pruebas. Para ello se hicieron pequeños orificios sobre las superficies en los cuales fueron adheridas mangueras de 1.2 mm. Dada la geometría de los cascos se decidió instrumentar la mitad de los mismos y hacer la suposición de esperar comportamientos iguales o similares en ambos lados. Estos orificios, o *taps*, fueron numerados y la cantidad de ellos en el casco de bicicleta y de motocicleta fue de 96 y 120, respectivamente. En la Figura 5.11 se muestran los modelos instrumentados.

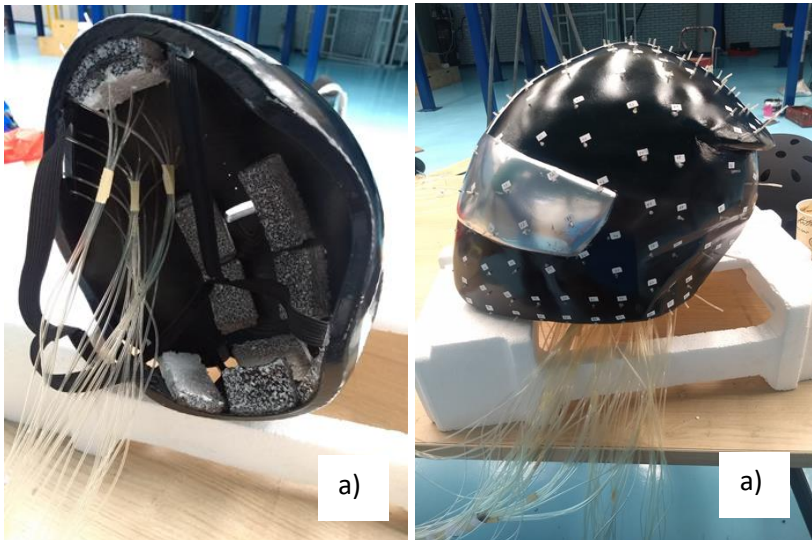


Figura 5.11 Instrumentación de modelos propuestos; a) ciclismo y b) motociclismo

Las mangueras también fueron numeradas y se unieron con silicón frío, evitando la fuga de aire. Estas mangueras, una vez colocado cada modelo, se conectaron a las unidades de escaneo del túnel (ZOC) (Figura 5.12). Cada unidad cuenta con 32 entradas, por lo que en ambos modelos se utilizaron 4 ZOCs, esto debido a que además de conectar cada tap también fue necesario conectar las mangueras correspondientes al tubo Pitot, instrumento utilizado para medir la presión total y la presión estática de la corriente libre.



Figura 5.12 Conexión de mangueras de modelo a ZOCs.

5.1.4 Medición de Presión y procesamiento de datos

A diferencia de las pruebas de visualización, los ensayos con modelos instrumentados fue el método cuantitativo para caracterizar el flujo alrededor de los cascos, por ello esta etapa es la esencia del experimento.

Dado que la velocidad de viento se ingresa en el panel de control en rpm fue necesario medir la velocidad al interior del túnel para registrar su equivalente en rpm. Para esto se utilizó un anemómetro de hilo caliente (Figura 5.13), instrumento que, de forma general, consiste en pequeños filamentos con una temperatura determinada, al entrar en contacto con el viento se crea una diferencia de temperaturas que se puede traducir en velocidad del flujo. El anemómetro fue colocado aproximadamente a la mitad de cada modelo. Después de registrar las historias en el tiempo se obtuvo el promedio de todos los datos. Las equivalencias se muestran en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 RPM para modelo de bicicleta y motocicleta

Modelo de bicicleta	
Altura: 115 cm	
RPM	Velocidad (m/s)
345	11.9
180	6.0
95	3.05
Modelo de motocicleta	
Altura: 105 cm	
RPM	Velocidad (m/s)
240	9
398	15.7
570	21.6

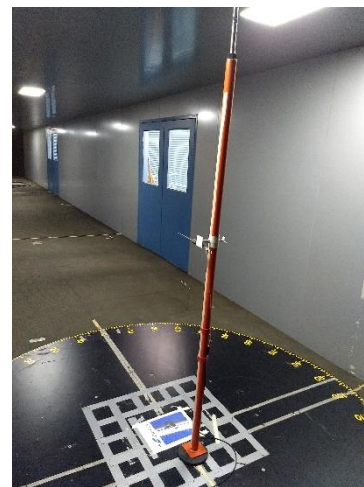


Figura 5.13 Anemómetro de hilo caliente colocado en la sección de pruebas

Una vez que las velocidades fueron tomadas, los modelos instalados en la sección de pruebas y las mangueras se conectaron a los ZOCs, inició la adquisición de datos. Para ello se utilizó el software FLOPAC en el que se ingresaron datos de configuración; el tiempo de muestreo propuesto (60 y 120 segundos) y las unidades de trabajo (Pa). Los canales en que se conectaron las mangueras del tubo Pitot fueron el 97 para la presión total y 98 para la estática (Figura 5.15). Mientras que en el modelo de motociclismo los canales fueron el 121 para la total y 122 para la estática (Figura 5.14).

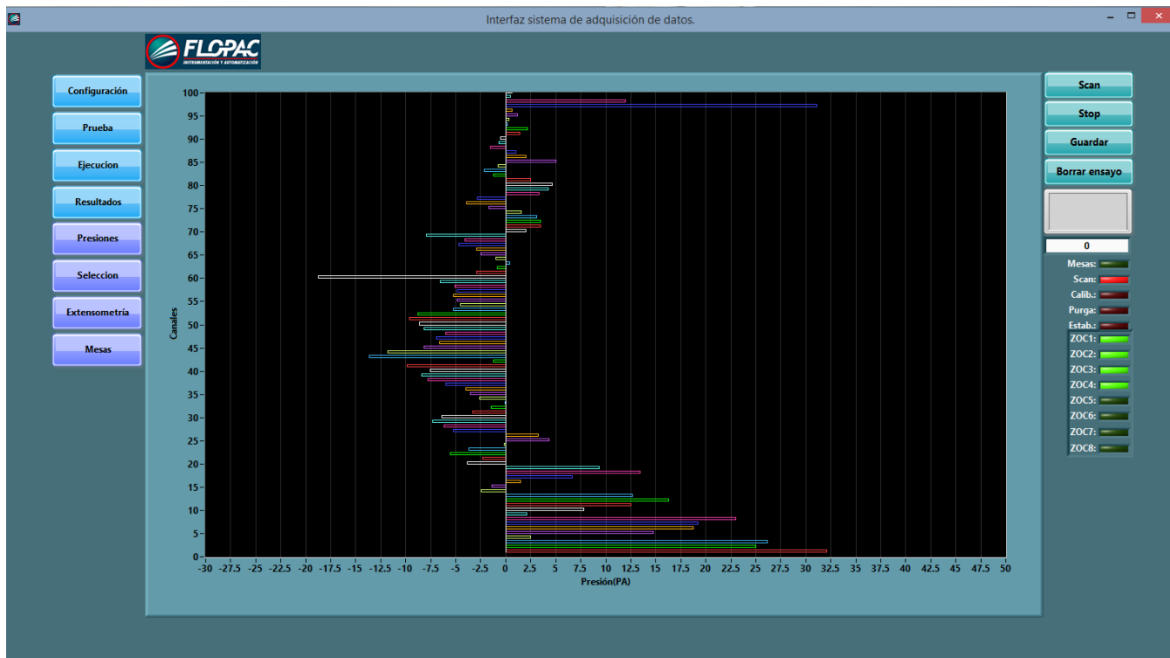


Figura 5.14 Interfaz de software FLOPAC en prueba de modelo de bicicleta

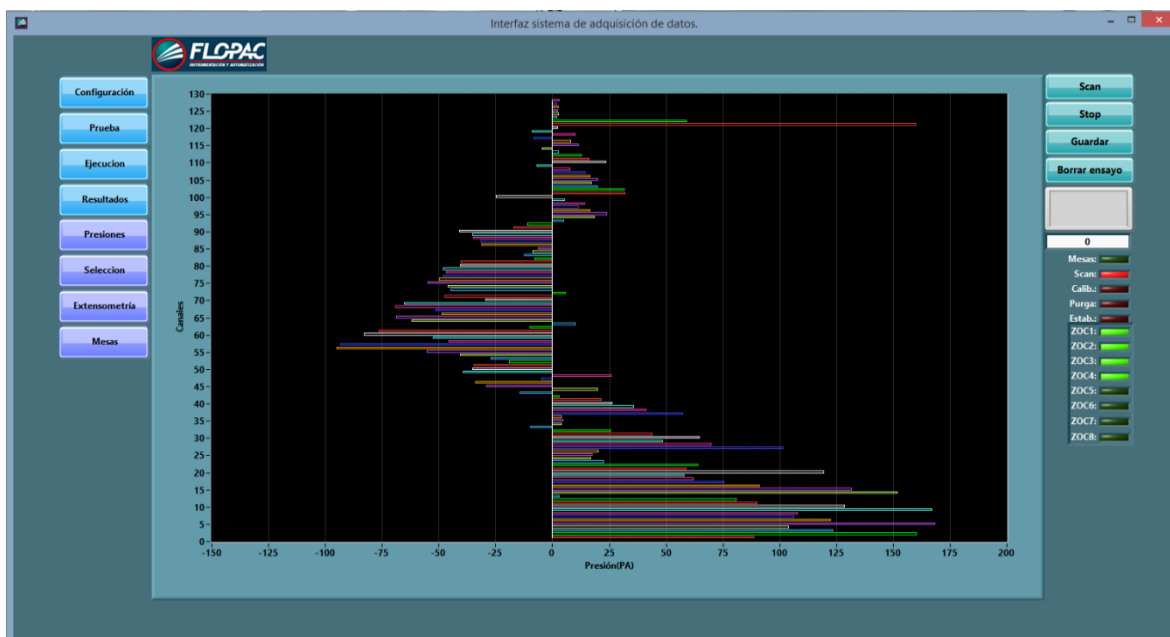


Figura 5.15 Interfaz de software FLOPAC en prueba de modelo de motocicleta



Figura 5.16 Modelos en sección de pruebas; ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)

En el proceso de instalación de los modelos (Figura 5.12) algunas de las mangueras se desprendieron, específicamente los canales 33 (casco de bicicleta) y 13, 72 y 120 (casco motocicleta) por lo que fueron omitidos en los cálculos.

En total se hicieron 45 pruebas: 10 por cada velocidad en el casco de bicicleta (95, 180 y 345 rpm) y 5 por cada velocidad en el casco de motocicleta (240, 398 y 570 rpm). Para el modelo de bicicleta se realizaron diez pruebas de un minuto cada una, mientras que en el de motocicleta fueron 5 de dos minutos cada una. Después de las pruebas del modelo de ciclismo se observó que las lecturas no diferían significativamente una de otra por lo que se consideró factible reducir el número de pruebas y aumentar el tiempo de muestreo. Cabe señalar que sólo se ensayaron tres velocidades pues la cantidad de datos obtenidos de haber estudiado 6 velocidades (como se propuso en ANSYS) habría sido el doble al igual que el tiempo de prueba. Además de que para el caso del modelo de motociclismo no se podría ensayar a más de 600 rpm pues esta es la velocidad máxima de la turbina del túnel.

Posterior a la adquisición de datos se realizó un tratamiento de los mismos, con la finalidad de analizar e interpretar de mejor manera la información. La primera tarea fue importar los archivos generados por el sistema ya que estos estaban en formato “.tdms”. Mediante una herramienta en Excel desarrollada en el Grupo de Ingeniería de Viento fue posible convertir los archivos al formato “.xlsx”. En promedio se obtuvieron alrededor de 24 mil datos por prueba; sin embargo, fue necesario depurar los últimos datos pues presentaban magnitudes sin sentido, esta anomalía ocurre por defecto al detener cada ensayo. Con esto el promedio fue de aproximadamente 20 mil datos.

Lo siguiente fue obtener la presión estática y el coeficiente de presión en cada tap. Para ello se realizó la diferencia de la presión que el sensor registró y la presión estática obtenida con el tubo Pitot. Mediante la ecuación 5.1 se calculó los coeficientes de presión.

$$C_p = \frac{P_{tap} - P_{est}}{P_{din}} \quad (5.1)$$

C_p = Coeficiente de presión

P_{tap} = Presión registrada en cada tap [Pa]

P_{est} = Presión estática (Tubo Pitot) [Pa]

P_{din} = Presión dinámica [Pa]

5.1.5 Cálculo de fuerza y coeficiente de arrastre

Para la obtención de fuerza de arrastre de los datos experimentales la operación no fue tan directa. Para calcularla fue necesario encontrar la componente en dirección del flujo (Z) de la presión estática y multiplicarla por un área representativa de cada tap. Esto se puede ver en la ecuación 5.2.

$$F_D = P_Z * A \quad (5.2)$$

Donde:

F_D = Fuerza de arrastre experimental [N]

P_Z = Componente de la Presión estática en cada tap [Pa]

A = área representativa de cada tap [m^2]

A los valores de presión obtenidos en las 10 pruebas de cada velocidad se le extrajo la media en ambos modelos. Después se hizo la suma de todas las fuerzas y el resultado se duplicó pues lo calculado sólo correspondía a una mitad del casco. Una vez teniendo la fuerza todas las variables de la ecuación de coeficiente de arrastre eran conocidas por lo que se pudo calcular de forma directa.

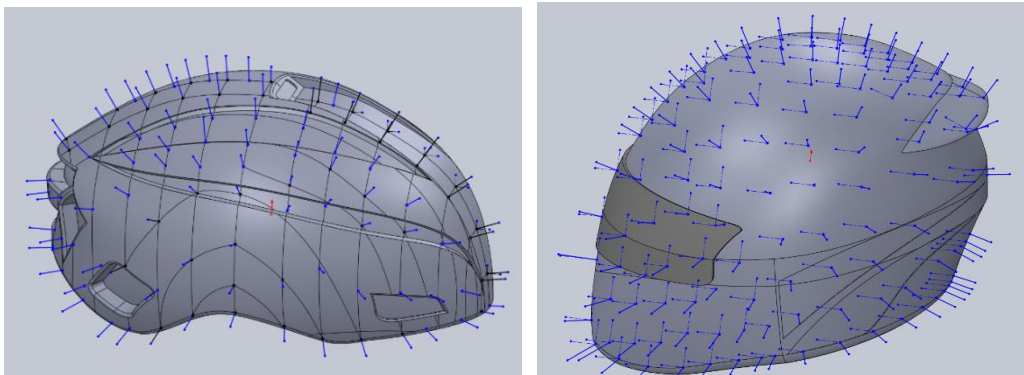


Figura 5.17 Vectores de presión en modelos propuestos; ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)

Dado a que el viento incide perpendicularmente en cada tap, las presiones y succiones también tienen esta dirección. Por ello se dibujaron y ubicaron, apoyado en el mismo software de diseño, vectores a lo largo de la superficie representando estas presiones y succiones (Figura 5.15).

Para obtener la componente de la presión primero fue necesario conocer el ángulo que formaba el vector perpendicular a la superficie y el eje paralelo a la dirección del flujo, que en los dos casos fue en dirección de Z. Esto se logró dibujando líneas de construcción en cada vector con la restricción de permanecer en dirección del eje coordenado Z y midiendo el ángulo que los separa (Figura 5.16).

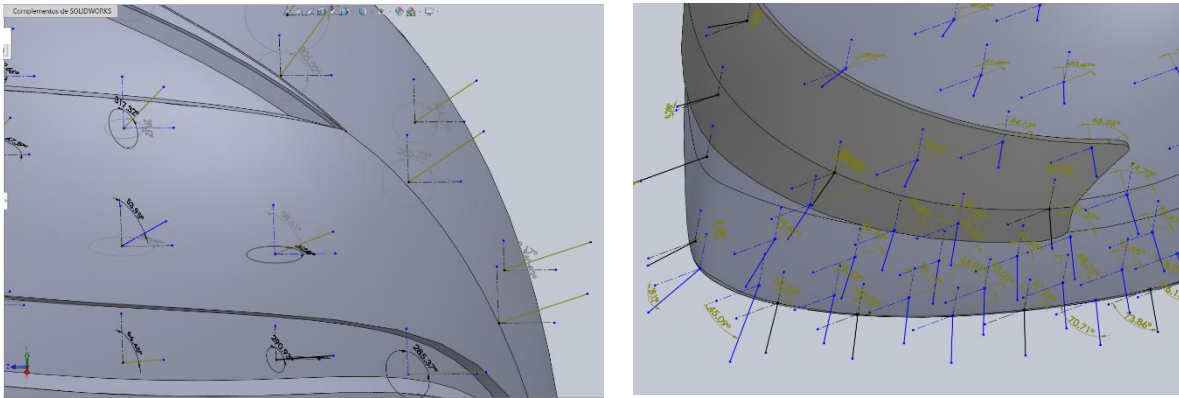


Figura 5.18 Detalle de vectores en modelo de ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)

El último paso para calcular la fuerza fue obtener las áreas, para lo cual se dibujaron cuadriláteros alrededor de cada vector (Figura 5.17) y con la herramienta “medir” se extrajeron y registraron todas las áreas.

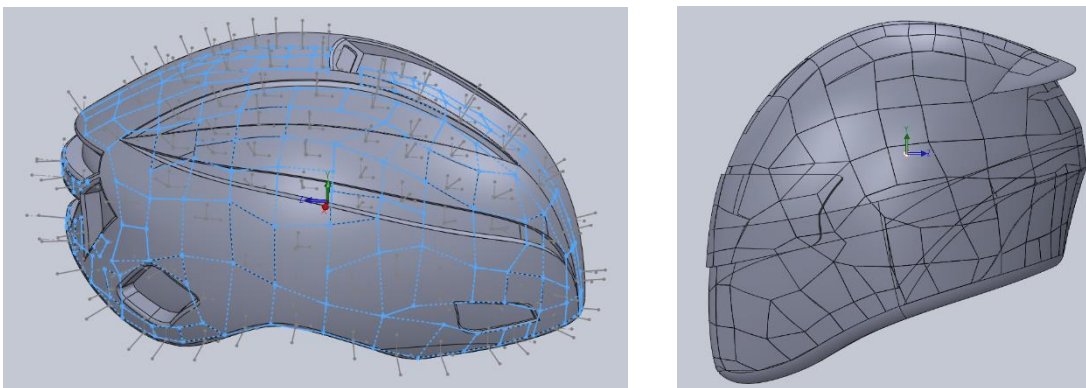


Figura 5.19 División de áreas en modelo de ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)

5.2 Resultados del experimento

Una vez que se obtuvieron todas las fuerzas en todas las tomas de presión lo siguiente fue calcular la fuerza resultante para posteriormente duplicarla (recordando que sólo se instrumentó la mitad del modelo). Por último esta fuerza se introdujo en la ecuación de coeficiente de arrastre, con sus correspondientes valores de velocidad y de área frontal. Para lograr una mejor interpretación de los resultados se calculó el número de Reynolds con la ecuación:

$$Re = \frac{\rho v l_c}{\mu} \quad (5.3)$$

Donde

l_c = longitud característica (m)

ρ = Densidad del flujo (kg/m^3)

v = velocidad del flujo (m/s)

μ = viscosidad dinámica (Pa s)

Para los resultados aquí mostrados se tomó como longitud característica la correspondiente a la longitud horizontal de cada casco y en vista lateral. En el casco de bicicleta fue de 273 mm y de 336 mm para el casco de motocicleta. La viscosidad dinámica se tomó como $\mu = 1.8 \times 10^{-5}$ [Pa s][9]. Tanto la densidad como las diferentes velocidades son las mismas que se han trabajado anteriormente.

Casco de bicicleta			
Velocidad [m/s]	Número de Reynolds	F_D Total [N]	C_D
3	55075.93	0.06775346	0.46021761
6	110151.86	0.19453074	0.42552674
12	220303.72	0.32501741	0.25912817

Tabla 5.2 Resultados experimentales de modelo propuesto de ciclismo

Casco de motocicleta			
Velocidad [m/s]	Número de Reynolds	F_D Total [N]	C_D
9	203357.28	1.0521476	0.28154336
15	338928.8	2.23190683	0.21500432
21	474500.32	3.90775951	0.19206263

Tabla 5.3 Resultados experimentales de modelo propuesto de motociclismo

Los resultados, mostrados en las Tablas 5.2 y 5.3, revelan un comportamiento congruente a lo esperado; cuando el número de Reynolds aumenta, la fuerza de arrastre aumenta cada vez en menor medida lo que resulta en la disminución del coeficiente de arrastre.

5.3 Comparación de resultados

Teniendo los resultados de ambos métodos se observa que de cinco de los seis coeficientes de arrastre calculados son idénticos por lo que se puede decir que hay una validación de resultados numéricos aceptables. La primera observación es que en prácticamente el total de resultados la tendencia es un intervalo de valores experimentales mayor respecto a los obtenidos con técnicas CFD. Este comportamiento se observa también en otros trabajos de investigación [24] [27] mismos que validan los resultados aquí presentados.

El dato en que se presentó un margen de error significativo fue en la primera velocidad del casco de bicicleta; mientras que en la simulación la fuerza de arrastre fue de 0.138 N, en la prueba de túnel de viento fue de apenas 0.067 N, es decir, la mitad de lo obtenido en ANSYS. Esto se puede explicar observando el resto de datos; a partir de la segunda velocidad ($Re=110151.86$) las fuerzas y coeficientes son muy similares, con lo que se puede concluir que a bajas velocidades el cálculo mediante simulación considera que la separación ocurre antes de la mitad del modelo. A pesar de esto, la distribución de presiones es muy similar entre ambas formas de estudio (Figuras 5.20 y 5.21) pues, excluyendo ese primer valor, el resto de datos presentan una semejanza tal que el rango de porcentaje se encuentra entre 4.43% y 10.98%.

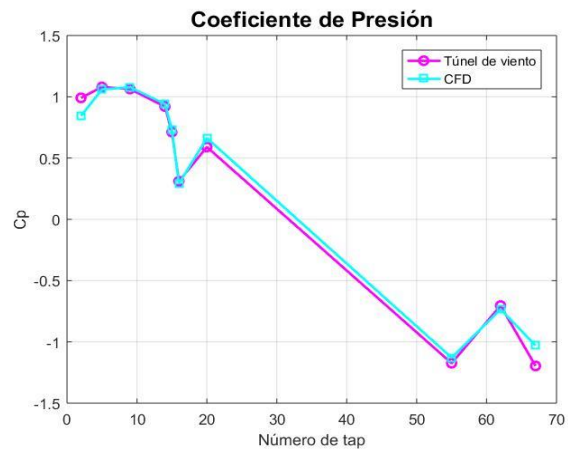
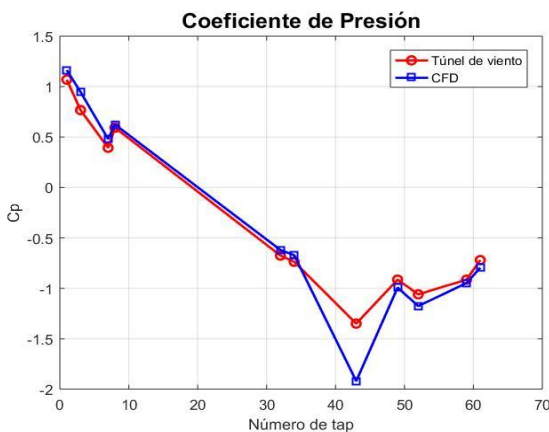
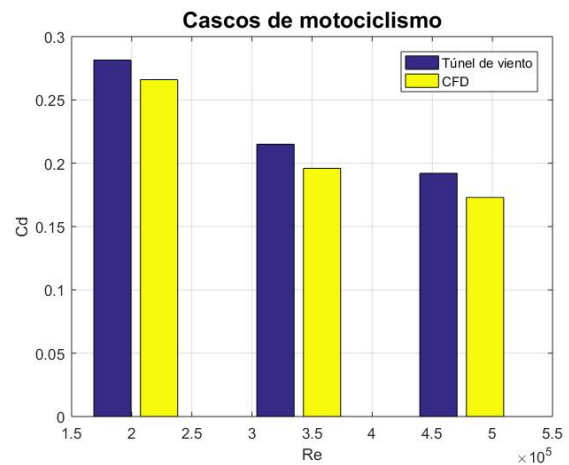
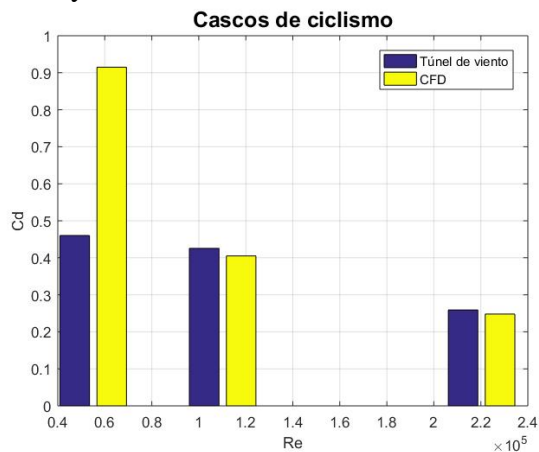


Figura 5.20 Comparación de C_d y C_p de CFD y Túnel (bici)

Figura 5.21 Comparación de C_d y C_p de CFD y Túnel (Moto)

Esto se confirma con la comparación realizada entre los coeficientes de presión en ambos modelos estudiados a velocidad media ($V_{\text{bici}}=6 \text{ m/s}$, $V_{\text{moto}}= 21\text{m/s}$). En las Figuras 5.22 y 5.23 se puede apreciar la similitud de este parámetro en cada toma de presión y, adicionalmente, se muestra también en la Tabla 5.4 el desglose completo con los valores puntuales de los coeficientes de presión. Se observa que el mayor error se presenta en el tap 43 del casco de bicicleta con un valor de 29.6%. Este punto está ubicado encima de la toma de aire, en la parte superior, en donde se registra la menor presión. Mientras el dato de ANSYS indica una succión significativa, el resultado experimental sugiere una menor velocidad del flujo. Esto confirma la complejidad en la predicción de la turbulencia. No obstante, el resto de la comparativa muestra valores similares, con un error en la mayoría de ellos de menos de 10%.

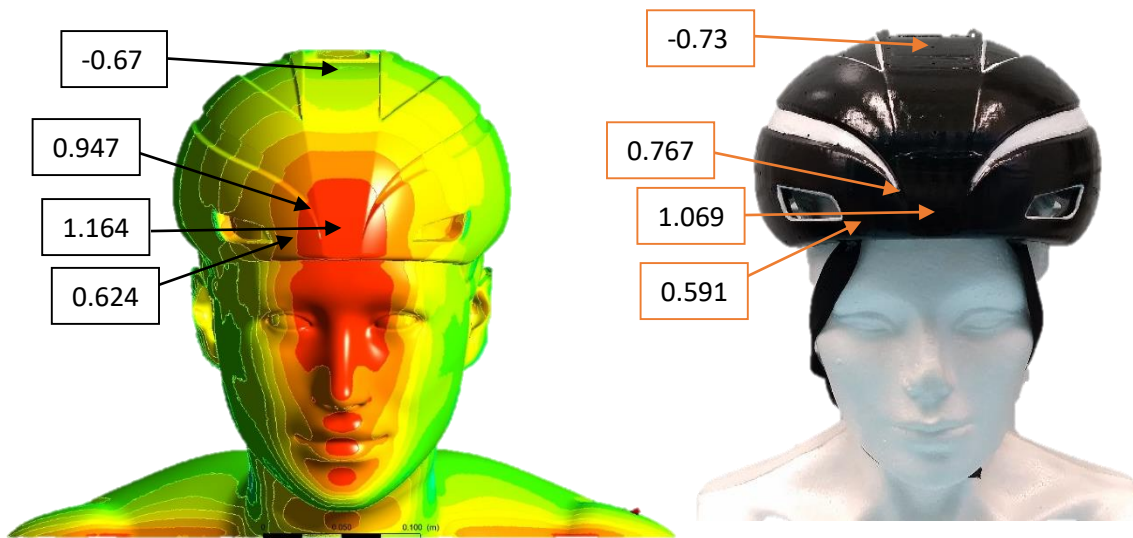


Figura 5.22 Comparación de C_p por CFD (izquierda) y túnel de viento (derecha) en casco de bicicleta

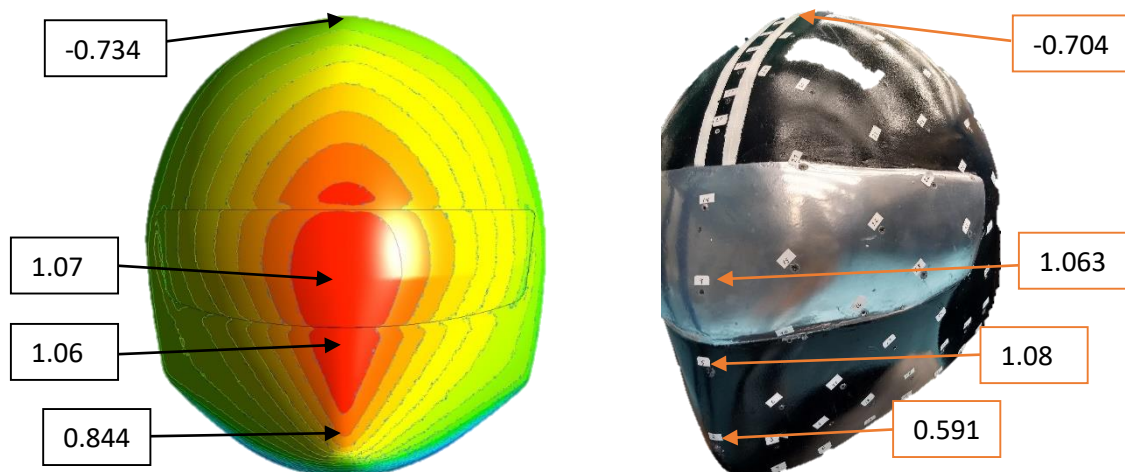


Figura 5.23 Comparación de C_p por CFD (izquierda) y túnel de viento (derecha) de casco de motocicleta

Tabla 5.4 Cp en distintos taps de modelos de ciclismo y motociclismo

Casco de ciclismo				Casco de motociclismo			
Tap	Túnel de viento	CFD	% Error	Tap	Túnel de viento	CFD	% Error
1	1.069	1.164	8.161	2	0.991	0.844	17.417
3	0.767	0.947	19.00	5	1.08	1.06	1.886
7	0.3933	0.48	18.062	9	1.063	1.078	1.391
8	0.5919	0.624	5.144	14	0.92	0.942	2.335
32	-0.675	-0.62	8.870	15	0.712	0.73	2.465
34	-0.737	-0.672	9.672	16	0.311	0.291	6.872
43	-1.35	-1.92	29.68	20	0.59	0.663	11.01
49	-0.914	-0.993	7.955	55	-1.174	-1.129	3.985
52	-1.06	-1.176	9.863	62	-0.704	-0.734	4.087
59	-0.914	-0.948	3.586	67	-1.196	-1.029	16.229
61	-0.72	-0.795	9.433				

Es importante mencionar que estas diferencias, además del error inherente que implican los experimentos, pueden deberse a que para medir el coeficiente de presión en ANSYS se tuvo que hacer manualmente con su herramienta de medición puntual, por lo que la ubicación de cada punto no fue exactamente la misma respecto a la ubicación de los taps en los modelos físicos y esto cobra relevancia ya que se observan cambios notables a lo largo de la superficie en el orden de milímetros. Hablando del experimento, los resultados aquí también podrían tener mayor precisión colocando los modelos en la misma posición en la que se ubicaron en la simulación pues una orientación que no es completamente horizontal significa en incidencias de viento diferentes. Otro factor a considerar son las condiciones del viento dentro del túnel; por una parte, la velocidad a pesar de medirse con el anemómetro antes de las pruebas para conocer la mejor configuración en rpm, no se puede garantizar que esas velocidades serán las mismas al momento del ensayo. De igual manera, al aumentar la velocidad aumenta también la temperatura con lo que cambia la densidad del fluido, lo que se traduce en un cambio en la presión. Esta variación de la densidad impactó más en el modelo de motociclismo, por las altas velocidades que se manejaron.

5.3.1 Rendimiento

Para poder evaluar la optimización de cada casco en términos de energía es necesario medir la potencia de ambos modelos, la cual se expresa como:

$$P = F * v \quad (5.4)$$

Donde P es la potencia medida en Watts [W], F la fuerza [N] y v la velocidad [m/s]. Dado que el enfoque de este estudio está en los cascos, la fuerza corresponderá a la de arrastre, por lo que la potencia necesaria para vencer la resistencia del viento queda como:

$$P = C_D \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (5.5)$$

En la Figura 5.24 se muestran los datos de potencia necesaria para vencer la resistencia del viento en cada casco a las velocidades simuladas. Se observa que la mayor optimización se presenta en el casco de motocicleta, esto debido a que las velocidades de operación son mucho mayores a las de ciclismo.

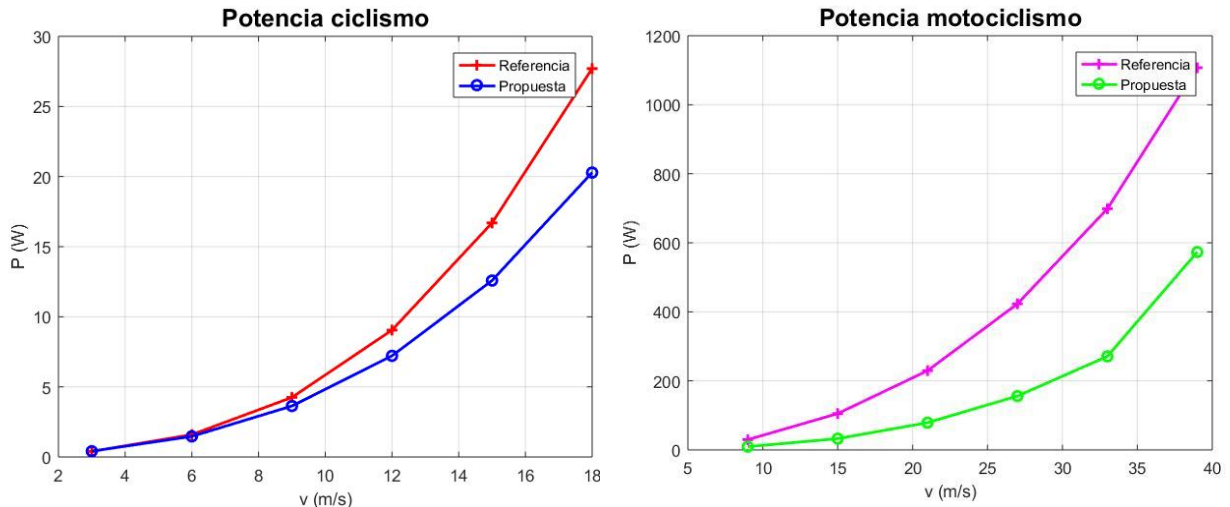


Figura 5.24 Comparación de potencia en modelos de referencia y propuestos de ciclismo (izquierda) y motociclismo (derecha)

En el casco de bicicleta se tiene que en la bibliografía [28] se reportan datos de referencia para calcular la potencia. Estos datos, para un sistema ciclista- bicicleta son $C_D=0.9$ y $A=0.45 \text{ m}^2$. Si suponemos una densidad estándar y una velocidad de 10 m/s la potencia requerida del sistema sería de 263 W (con casco básico); con las mismas condiciones, pero con el casco propuesto el ahorro sería de apenas 1 W , cifra aparentemente baja pero que puede ser significativa a grandes distancias de manejo.

En el otro caso se aprecia que el ahorro de potencia se presenta desde la primera velocidad, hasta alcanzar una diferencia de 533.9 W , esto implica un menor arrastre total (motociclista, conductor y casco) y finalmente se traduce en un mayor rendimiento de combustible.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Al realizar los estudios tanto a los modelos de referencia como a los propuestos de ciclismo y motociclismo mediante simulaciones numéricas para posteriormente realizar pruebas de túnel de viento y comparar los resultados, se puede concluir lo siguiente:

- Los resultados arrojados en los ensayos de túnel de viento en términos de fuerza y coeficiente de arrastre son ligeramente mayores a los obtenidos en ANSYS FLUENT, comportamiento observado en otros trabajos de investigación. Exceptuando una de las velocidades, en ambos modelos el intervalo en porcentaje de error se encuentra entre 4.43% y 10.98% con lo que los resultados se consideran correctamente validados.
- La distribución de presiones registrada en el túnel de viento y la obtenida en simulación indican que la configuración de malla, elección de modelo de turbulencia y algoritmo fueron correctos pues la diferencia de resultados en este parámetro no rebasó el 19%.
- Implementar como técnica de diseño hacer una forma ovalada y limitadas entradas de aire en el casco de ciclismo se tradujo en la optimación aerodinámica pues a pesar de haber reducción de área frontal, el coeficiente de arrastre se redujo en un 20% aproximadamente, esto a la velocidad media de operación (6 m/s).
- Implementar como técnica de diseño hacer una forma triangular en la zona baja de incidencia del viento y una ligera inclinación en la parte frontal del casco de motocicleta, tuvo como consecuencia una reducción en el coeficiente de arrastre de alrededor de 40% a velocidad media de operación (21 m/s).
- El ahorro energético obtenido con el modelo propuesto de ciclismo toma relevancia a partir de 12 m/s, lo cual tiene sentido considerando que la potencia crece exponencialmente debido a la velocidad. Sin embargo, este rendimiento puede notarse si las distancias de conducción son grandes.
- El ahorro energético obtenido con el modelo propuesto de motociclismo respecto a un casco estándar fue de aproximadamente de 65% a la velocidad media de operación (21 m/s), lo que a mediano y largo plazo se traducirá en un mejor rendimiento de combustible.
- Se verifica el comportamiento del flujo en cuerpos romos que reporta la literatura; el desprendimiento de la corriente cambia cuando el número de Reynolds aumenta, lo que implica cambios en la fuerza de arrastre también.
- El uso de una herramienta CFD para simular los efectos del viento no sólo permitió crear una base para el diseño, sino que, en el caso del casco de motociclismo, se pudo ampliar la caracterización, ya que la simulación incluyó una velocidad máxima de 39 m/s, condición a la que en túnel de viento no es posible.

6.2 Recomendaciones

Para futuros proyectos de investigación en los que se utilicen técnicas CFD para diseño y posteriormente se realice una validación de resultados con pruebas en túnel de viento, se recomienda:

- De ser posible, replicar las dimensiones del túnel de viento en la definición del dominio computacional, esto permitirá también replicar el comportamiento del flujo de manera más precisa.
- Hacer un refinamiento en la malla mediante la herramienta *inflation layer*, con la finalidad de lograr un acoplamiento más gradual en el sistema modelo-flujo.
- Considerar velocidades resultantes; suponer no solo que el viento o el conductor tienen movimiento sino ambos. Considerar también la presencia de vientos laterales.
- Proponer en el diseño un cambio en la superficie del casco, esto para buscar una capa límite turbulenta y mantener adherida la corriente.
- En el caso de ciclismo, proponer un diseño basado en la inclinación existente en los cascos al momento de la operación, el cual es en promedio de 26.25 grados respecto a la horizontal.

Referencias y bibliografía

- [1] Giappino S., Omarini S., Schito P., Somaschini C., Belloli M., Tenni M. (2019) Cyclist Aerodynamics: A Comparison Between Wind Tunnel Tests and CFD Simulations for Helmet Design. Ricciardelli F., Avossa A. (eds) Proceedings of the XV Conference of the Italian Association for Wind Engineering. IN VENTO 2018. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 27. pp. 336–349. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-12815-9_27
- [2] Agudelo, Brayan. (2013). *Metodología para el análisis de resultados CFD y propuesta de diseño casco de motocicleta*. Tesis de licenciatura. Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia.
- [3] Tipos de cascos de bicicleta, ¿cuál elegir? (2015, 30 noviembre). Recuperado de <https://www.ar-hotels.com/blog/tipos-de-cascos-de-bicicleta-cual-elegir>
- [4] Análisis sobre los tipos de cascos de ciclismo. (2016, 30 julio). Recuperado de <https://www.milregalos.es/blog//an%C3%A1lisis-sobre-los-tipos-de-cascos-de-ciclismo>
- [5] Como elegir tu casco: estos son los tipos de casco y sus características. (2016). Recuperado de <https://www.motopoliza.com/consejos-seguros-y-motos/ventajas-de-las-motos/dudas-de-motos/como-elegir-tu-casco-estos-son-los-tipos-de-casco-y-sus-caracteristicas/>
- [6] Redacción Comotos, R. C. (2018, 13 febrero). Como elegir un Casco de Moto. Recuperado de <https://comotos.co/como-elegir-un-casco-de-moto/>
- [7] Zitnik, J. (2018). Manual de vuelo del PIPER PA-11. Recuperado de: http://juanzitnik1.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/4_aerodinamica.pdf
- [8] White, F. M., (2008) *Mecánica de Fluidos*. University of Rhode Island (Sexta edición). Estados Unidos. Mc Graw Hill.
- [9] M. Gutiérrez.,(1994) Biomecánica y ciclismo. *Revista Motricidad*. Vol 1, p. 77-94.
- [10] González, M. (2010, 22 septiembre). Flujo compresible | La Guía de Química. Recuperado de <https://quimica.laguia2000.com/conceptos-basicos/flujo-compresible>
- [11] Modon, A. (2017) Teoría de mecánica de los fluidos (apuntes), Universidad Nacional de Cuyo, Argentina
- [12] Hernández, J. L. (Ed). (1998). *TECNOLOGÍA DEPORTIVA. Control del rendimiento de los deportistas y de las instalaciones*. Madrid, España: Ministerio de Educación y Cultura

- [13] Capote, J.A., Alvear, D., Abreu, O. V., Lázaro, M. y Espina, P. (2008) Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 24, (3), p. 227-245.
- [14] Báez, Alejandro. (2017). *Simulación numérica de los efectos del viento sobre un conjunto de paneles solares*. Tesis de licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [15] Sanches, Alejandro. (2013). *Modelación y análisis de un panel ante los efectos del viento empleando dinámica de fluidos computacional y su comparación con resultados de túnel de viento*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [16] ANSYS Inc. (2020, 27 enero). ANSYS Fluent. Recuperado de <https://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>
- [17] Vega, M. (2011). *Medición de capa límite en el perfil aerodinámico S830 para turbina eólica*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [18] J. Agüera.(2015).Flujos externos (apuntes). Universidad de Córdoba, España.
- [19] Osorio, Kozvy. (2015). *Caracterización aerodinámica de un vehículo pesado*. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México.
- [20] Crouch, T.N., Burton, D., LaBry, Z.A. et al. Sports Eng (2017) Riding against the wind: a review of competition cycling aerodynamics. *Sports engineering*. Vol 20, p. 81-110. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s12283-017-0234-1>
- [21] Borja, Pallás. (2018). *Introducción a la aerodinámica en el ciclismo mediante calculo CFD*. Tesis de licenciatura. Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [22] Instituto de Ingeniería UNAM. (2019, enero). Grupo de Ingeniería de Viento (GIV). Recuperado de <http://grupos.iingen.unam.mx/ingviento/es-mx/Paginas/default.aspx>
- [23] Alianza Fiidem. (2015, 3 febrero). Túnel de viento LemAT. Recuperado de <http://www.alianzafiidem.org/noticia31.html>
- [24] M. D. Griffith, T. Crouch, M. C. Thompson, D. Burton and J. Sheridan (Diciembre de 2012). Elite Cycling Aerodynamics: Wind Tunnel Experiments and CFD. 18th Australasian Fluid Mechanics Conference. Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Monash University. Congreso llevado a cabo en Victoria 3800, Australia.

[25] Yoko Co. (2017, 31 agosto). Smoke Generator - Aerolab. Recuperado de <https://www.aerolab.com/products/smoke-generator/>

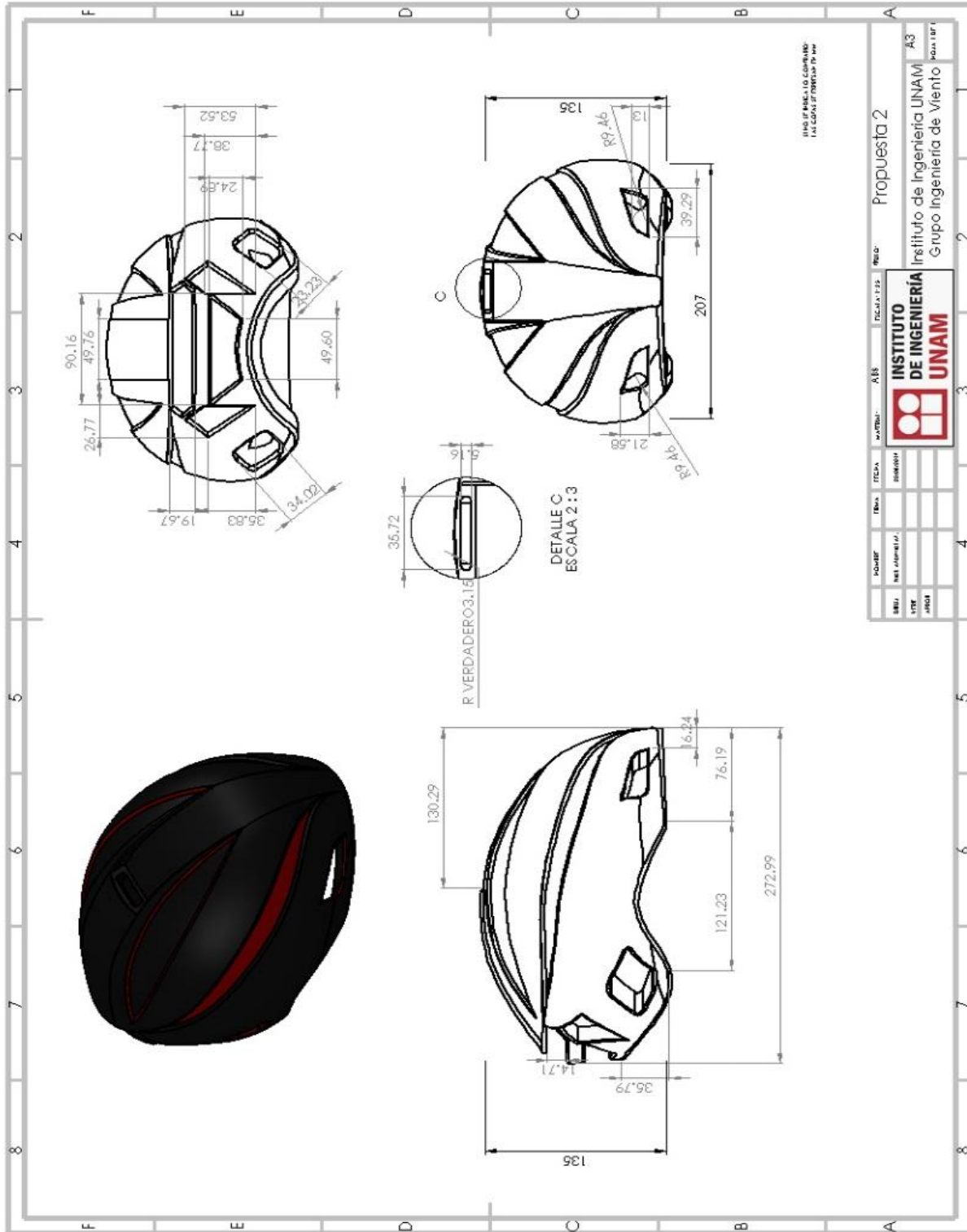
[26] Capote, J.A., Alvear, D., Abreu, O. V., Lázaro, M. y Espina, P. (2008) Influencia del modelo de turbulencia y del refinamiento de la discretización espacial en la exactitud de las simulaciones computacionales de incendios. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*. Vol. 24, (3), p. 227-245.

[27] Blocken, B., van Druenen, T., Toparlar, Y. (2019). CFD analysis of an exceptional cyclist sprint position. *Sports Eng* 22, p. 1-11. Recuperado de: <https://doi.org/10.1007/s12283-019-0304-7>

[28] Navarro, P., Rui, J., Fernández, A., Altisench, O., García, C., Julia, J., Rui, M. A. (2010). *Ingeniería de la bicicleta*. Madrid, España: Fundación ESTEYCO.

ANEXOS

ANEXO A. Planos de modelos propuestos



ANEXO B. Resultados experimentales

Canal	Z	Z (rad)	PRESION MEDIA			COSZ	Área [m2]	DRAG		
			v=3 m/s	v=6 m/s	v=12 m/s			v=3 m/s	v=6 m/s	v=12 m/s
1	0	0.0000	4.972	19.788	78.073	1.0000	0.00011	0.00052	0.00208	0.00820
2	7.57	0.1321	3.623	13.012	50.975	0.9913	0.00024	0.00085	0.00307	0.01201
3	7.57	0.1321	3.813	14.108	55.709	0.9913	0.00042	0.00160	0.00592	0.02338
4	0	0.0000	2.335	9.535	34.353	1.0000	0.00029	0.00067	0.00273	0.00984
5	19.17	0.3346	1.126	2.692	8.407	0.9445	0.00031	0.00033	0.00079	0.00247
6	19.17	0.3346	2.127	6.777	25.647	0.9445	0.00052	0.00104	0.00333	0.01259
7	29.85	0.5210	1.976	7.002	28.033	0.8673	0.00031	0.00054	0.00190	0.00760
8	34.49	0.6020	3.016	10.772	42.079	0.8242	0.00030	0.00075	0.00268	0.01045
9	35.73	0.6236	1.825	10.096	41.297	0.8118	0.00034	0.00050	0.00279	0.01142
10	35.73	0.6236	0.930	5.199	20.607	0.8118	0.00064	0.00049	0.00271	0.01076
11	34.64	0.6046	1.685	4.589	28.645	0.8227	0.00025	0.00034	0.00094	0.00586
12	42.53	0.7423	1.591	4.339	16.058	0.7369	0.00049	0.00057	0.00156	0.00579
13	49.93	0.8714	1.124	3.580	12.865	0.6437	0.00019	0.00013	0.00043	0.00153
14	54.98	0.9596	2.866	11.844	58.956	0.5739	0.00025	0.00041	0.00169	0.00843
15	54.98	0.9596	2.402	10.433	53.895	0.5739	0.00027	0.00037	0.00161	0.00833
16	49.14	0.8577	1.815	10.605	42.476	0.6542	0.00066	0.00079	0.00459	0.01837
17	47.52	0.8294	0.810	5.634	25.096	0.6753	0.00079	0.00043	0.00299	0.01332
18	50.55	0.8823	0.943	3.770	6.215	0.6354	0.00036	0.00022	0.00087	0.00143
19	51.17	0.8931	0.079	2.661	10.331	0.6270	0.00024	0.00001	0.00041	0.00158
20	60.73	1.0599	2.739	12.589	62.328	0.4889	0.00026	0.00034	0.00157	0.00779
21	60.73	1.0599	2.606	12.534	52.745	0.4889	0.00046	0.00058	0.00279	0.01174
22	60.38	1.0538	3.240	11.680	48.650	0.4942	0.00047	0.00076	0.00273	0.01137
23	59.42	1.0371	2.988	11.866	32.560	0.5087	0.00059	0.00089	0.00355	0.00973
24	58.06	1.0133	2.140	10.008	14.365	0.5290	0.00086	0.00097	0.00455	0.00653
25	60.1	1.0489	1.325	7.871	-12.365	0.4985	0.00082	0.00054	0.00323	-0.00507
26	67.27	1.1741	1.579	8.960	-9.354	0.3864	0.00038	0.00023	0.00133	-0.00139
27	69.36	1.2106	2.790	17.075	-69.767	0.3525	0.00015	0.00015	0.00091	-0.00372
28	69.36	1.2106	2.937	18.060	-74.659	0.3525	0.00039	0.00040	0.00248	-0.01024
29	67.34	1.1753	2.703	19.235	-81.573	0.3853	0.00054	0.00056	0.00397	-0.01682
30	67.39	1.1762	3.217	18.736	-76.345	0.3845	0.00039	0.00048	0.00282	-0.01147
31	66.9	1.1676	2.680	15.376	-62.068	0.3923	0.00041	0.00043	0.00248	-0.01003
32	67.96	1.1861	2.390	13.304	-52.109	0.3753	0.00066	0.00059	0.00330	-0.01291
33	73.9	1.2898	2.512	-11.973	-49.606	0.2773	0.00067	0.00047	-0.00223	-0.00924
34	77.52	1.3530	2.452	-14.460	-60.202	0.2161	0.00011	0.00006	-0.00035	-0.00145
35	82.81	1.4453	2.648	-15.508	-65.636	0.1252	0.00018	0.00006	-0.00035	-0.00147
36	82.81	1.4453	2.704	-15.363	-65.145	0.1252	0.00025	0.00008	-0.00047	-0.00200
37	75.57	1.3189	2.791	-17.427	-75.007	0.2492	0.00042	0.00029	-0.00184	-0.00790
38	75.04	1.3097	2.958	-19.490	-81.051	0.2581	0.00037	0.00028	-0.00187	-0.00776
39	75.25	1.3134	3.103	-19.569	-81.347	0.2546	0.00058	0.00045	-0.00286	-0.01191
40	75.37	1.3155	2.966	-19.148	-80.654	0.2526	0.00031	0.00023	-0.00149	-0.00629
41	76.87	1.3416	3.898	-21.135	-89.973	0.2272	0.00053	0.00047	-0.00255	-0.01085
42	78.37	1.3678	2.448	-12.525	-51.721	0.2016	0.00053	0.00026	-0.00134	-0.00554
43	90	1.5708	4.432	-26.008	-137.483	0.0000	0.00008	0.00000	0.00000	0.00000
44	92.72	1.6183	2.823	-23.485	-101.040	-0.0475	0.00015	-0.00002	0.00017	0.00071
45	88.12	1.5380	2.663	-19.398	-84.187	0.0328	0.00040	0.00004	-0.00026	-0.00111
46	87.74	1.5314	-2.597	-17.700	-80.112	0.0394	0.00079	-0.00008	-0.00055	-0.00250
47	88.06	1.5369	-2.731	-18.387	-88.584	0.0339	0.00045	-0.00004	-0.00028	-0.00136
48	88.31	1.5413	-3.082	-17.331	-81.265	0.0295	0.00078	-0.00007	-0.00040	-0.00186
49	88.67	1.5476	-2.837	-19.280	-82.705	0.0232	0.00102	-0.00007	-0.00046	-0.00196
50	89.74	1.5663	-3.501	-20.059	-83.374	0.0045	0.00024	0.00000	-0.00002	-0.00009
51	89.82	1.5677	-4.238	-21.693	-89.571	0.0031	0.00052	-0.00001	-0.00004	-0.00015
52	91.23	1.5923	-2.932	-20.697	-76.918	-0.0215	0.00015	0.00001	0.00007	0.00024
53	93.88	1.6385	-2.989	-16.907	-60.676	-0.0677	0.00014	0.00003	0.00017	0.00059
54	95.21	1.6617	-2.661	-16.435	-62.109	-0.0908	0.00020	0.00005	0.00030	0.00115
55	97.64	1.7041	-2.603	-16.089	-63.840	-0.1329	0.00035	0.00012	0.00074	0.00294

56	97.31	1.6984	-2.543	-16.456	-67.733	-0.1272	0.00049	0.00016	0.00104	0.00426
57	99.82	1.7422	-2.586	-16.883	-70.886	-0.1706	0.00043	0.00019	0.00124	0.00519
58	99.9	1.7436	-2.220	-16.483	-68.625	-0.1719	0.00054	0.00021	0.00153	0.00635
59	100.58	1.7555	-2.809	-17.802	-74.535	-0.1836	0.00073	0.00037	0.00237	0.00992
60	100.24	1.7495	-2.663	-10.054	-58.270	-0.1778	0.00078	0.00037	0.00139	0.00807
61	97.81	1.7071	-3.043	-14.126	-50.680	-0.1359	0.00015	0.00006	0.00029	0.00105
62	103.66	1.8092	-3.116	-11.689	-43.517	-0.2362	0.00013	0.00010	0.00037	0.00136
63	104.63	1.8261	-3.830	-11.496	-44.627	-0.2526	0.00023	0.00022	0.00067	0.00262
64	106.96	1.8668	-3.679	-12.624	-41.225	-0.2917	0.00048	0.00052	0.00178	0.00581
65	107.6	1.8780	-3.703	-14.241	-42.212	-0.3024	0.00038	0.00043	0.00165	0.00488
66	107.66	1.8790	-3.945	-15.042	-47.873	-0.3034	0.00026	0.00031	0.00117	0.00371
67	107.31	1.8729	-3.239	-17.173	-61.496	-0.2975	0.00086	0.00083	0.00439	0.01572
68	110.1	1.9216	-3.989	-16.126	-60.289	-0.3437	0.00086	0.00118	0.00478	0.01787
69	106.12	1.8521	-3.487	-19.719	-98.889	-0.2777	0.00023	0.00022	0.00126	0.00630
70	109.17	1.9054	-3.816	-11.345	-36.287	-0.3284	0.00013	0.00016	0.00047	0.00152
71	114.03	1.9902	-3.941	-10.803	-31.822	-0.4072	0.00010	0.00016	0.00044	0.00129
72	113.82	1.9865	-3.775	-10.412	-29.187	-0.4039	0.00037	0.00056	0.00154	0.00432
73	114.25	1.9940	-3.912	-10.686	-29.667	-0.4107	0.00052	0.00084	0.00230	0.00639
74	113.94	1.9886	-3.028	-11.662	-37.313	-0.4058	0.00043	0.00053	0.00206	0.00658
75	113.22	1.9761	-3.792	-15.618	-50.206	-0.3943	0.00039	0.00059	0.00242	0.00779
76	119.17	2.0799	-2.528	-15.343	-54.095	-0.4874	0.00017	0.00021	0.00128	0.00452
77	112.64	1.9659	-2.461	-15.099	-61.882	-0.3849	0.00016	0.00015	0.00094	0.00387
78	117.74	2.0550	-2.756	-9.645	-28.500	-0.4655	0.00015	0.00020	0.00069	0.00203
79	120.45	2.1022	-2.517	-9.186	-24.648	-0.5068	0.00035	0.00044	0.00162	0.00434
80	120.12	2.0965	-2.596	-9.234	-25.362	-0.5018	0.00046	0.00060	0.00213	0.00585
81	121.55	2.1214	-2.596	-11.261	-37.806	-0.5232	0.00030	0.00041	0.00176	0.00590
82	125.3	2.1869	-2.471	-14.285	-51.221	-0.5779	0.00038	0.00055	0.00316	0.01134
83	126.87	2.2143	-2.754	-15.077	-52.836	-0.6000	0.00012	0.00019	0.00105	0.00368
84	117.82	2.0563	-2.486	-14.521	-50.399	-0.4667	0.00016	0.00019	0.00110	0.00382
85	125.86	2.1967	-2.063	-10.520	-34.179	-0.5858	0.00030	0.00036	0.00186	0.00604
86	122.7	2.1415	-2.261	-11.195	-40.751	-0.5402	0.00030	0.00036	0.00181	0.00658
87	143.25	2.5002	-2.193	-12.302	-44.494	-0.8013	0.00002	0.00004	0.00020	0.00073
88	138.89	2.4241	-2.768	-14.902	-55.076	-0.7534	0.00008	0.00016	0.00085	0.00313
89	131.75	2.2995	-2.680	-14.239	-51.467	-0.6659	0.00016	0.00028	0.00149	0.00537
90	130.24	2.2731	-2.550	-13.637	-48.418	-0.6460	0.00012	0.00019	0.00103	0.00367
91	179.27	3.1289	-2.232	-12.085	-42.939	-0.9999	0.00013	0.00029	0.00158	0.00562
92	159.65	2.7864	-2.331	-13.322	-40.899	-0.9376	0.00020	0.00045	0.00255	0.00783
93	147.17	2.5686	-2.191	-12.248	-44.416	-0.8403	0.00017	0.00032	0.00179	0.00650
94	145.14	2.5332	-2.474	-13.244	-50.462	-0.8206	0.00019	0.00039	0.00207	0.00788
95	159.82	2.7894	-2.148	-11.174	-45.793	-0.9386	0.00015	0.00030	0.00158	0.00647
96	180	3.1416	-2.982	-11.251	-41.823	-1.0000	0.00007	0.00021	0.00080	0.00296

Canal	Z	Z (rad)	Presión [Pa]			COSZ	Área [mm2]	Área [m2]	Drag [N]		
			9 m/s	15 m/s	21 m/s				9 m/s	15 m/s	21 m/s
1	39.12	0.6828	8.639	28.106	59.044	0.776	209.21	0.00021	0.00140	0.00456	0.00958
2	8.68	0.1515	34.296	99.442	210.661	0.989	522.23	0.00052	0.01771	0.05134	0.10875
3	45.09	0.7870	21.926	63.032	132.626	0.706	737.19	0.00074	0.01141	0.03281	0.06903
4	52.36	0.9139	15.583	41.758	73.573	0.611	295	0.00030	0.00281	0.00752	0.01325
5	2.04	0.0356	37.459	108.415	229.476	0.999	1160.41	0.00116	0.04344	0.12573	0.26612
6	34.67	0.6051	22.227	62.117	129.539	0.822	985.74	0.00099	0.01802	0.05036	0.10502
7	53.42	0.9324	16.185	46.135	98.592	0.596	754.02	0.00075	0.00727	0.02073	0.04430
8	60.02	1.0475	16.388	47.049	102.652	0.500	754.02	0.00075	0.00617	0.01773	0.03868
9	6.28	0.1096	36.715	106.527	225.882	0.994	1278.36	0.00128	0.04665	0.13536	0.28703
10	33.72	0.5885	23.955	68.622	144.080	0.832	1009.97	0.00101	0.02012	0.05765	0.12104
11	46.72	0.8154	10.898	30.047	62.058	0.686	1669.17	0.00167	0.01247	0.03438	0.07101
12	59.14	1.0322	8.037	20.770	42.900	0.513	683.8	0.00068	0.00282	0.00728	0.01505
13	64.86	1.1320	20.467	57.071	113.458	0.425	792.65	0.00079	0.00689	0.01922	0.03821
14	15.48	0.2702	31.796	91.926	195.532	0.964	1018.14	0.00102	0.03120	0.09020	0.19186
15	32.29	0.5636	25.492	72.385	151.143	0.845	1756.99	0.00176	0.03786	0.10751	0.22449
16	46.89	0.8184	11.337	31.774	65.848	0.683	650.23	0.00065	0.00504	0.01412	0.02926
17	55.39	0.9667	1.599	14.965	40.347	0.568	1200	0.00120	0.00109	0.01020	0.02750
18	63.02	1.0999	1.836	2.870	5.424	0.454	1259.97	0.00126	0.00105	0.00164	0.00310
19	67.59	1.1797	0.382	-1.838	-2.338	0.381	590.97	0.00059	0.00009	-0.00041	-0.00053
20	24.57	0.4288	20.682	59.657	126.487	0.909	490	0.00049	0.00922	0.02659	0.05637
21	32.44	0.5662	2.985	-0.133	-8.054	0.844	1599.05	0.00160	0.00403	-0.00018	-0.01087
22	43.68	0.7624	2.017	4.539	7.738	0.723	1469.21	0.00147	0.00214	0.00482	0.00822
23	53.54	0.9344	9.384	36.198	73.116	0.594	1825.28	0.00183	0.01018	0.03926	0.07931
24	62.68	1.0940	12.724	42.022	92.048	0.459	1420.34	0.00142	0.00829	0.02739	0.06000
25	68.35	1.1929	12.216	40.953	89.938	0.369	1259.97	0.00126	0.00568	0.01904	0.04181
26	70.71	1.2341	-12.348	-39.507	-82.540	0.330	529.1	0.00053	-0.00216	-0.00691	-0.01443
27	29	0.5061	14.794	42.170	89.803	0.875	482.4	0.00048	0.00624	0.01779	0.03789
28	32.65	0.5699	4.139	10.256	20.077	0.842	449.9	0.00045	0.00157	0.00389	0.00761
29	41.74	0.7285	2.477	10.539	25.810	0.746	460	0.00046	0.00085	0.00362	0.00886
30	47.43	0.8278	1.897	5.094	11.777	0.676	1559.33	0.00156	0.00200	0.00537	0.01242
31	51.09	0.8917	4.588	15.432	33.488	0.628	787.98	0.00079	0.00227	0.00764	0.01657
32	54.13	0.9447	10.161	33.249	73.164	0.586	841.43	0.00084	0.00501	0.01639	0.03607
33	64.53	1.1263	4.151	10.359	20.648	0.430	1128.24	0.00113	0.00201	0.00503	0.01002
34	67.36	1.1757	17.026	52.683	114.349	0.385	630.88	0.00063	0.00413	0.01279	0.02777
35	72.66	1.2682	0.985	12.548	34.218	0.298	627.45	0.00063	0.00018	0.00235	0.00640
36	73.86	1.2891	16.360	52.866	-111.624	0.278	388.18	0.00039	0.00177	0.00570	-0.01205
37	41.48	0.7240	0.482	-1.566	-2.728	0.749	360.31	0.00036	0.00013	-0.00042	-0.00074
38	47.43	0.8278	6.313	17.704	-35.834	0.676	355.04	0.00036	0.00152	0.00425	-0.00861
39	48.7	0.8500	7.663	23.040	-48.756	0.660	315.05	0.00032	0.00159	0.00479	-0.01014
40	52.7	0.9198	10.196	32.304	-71.768	0.606	1447.7	0.00145	0.00894	0.02834	-0.06296
41	57.9	1.0105	12.190	-37.762	-85.319	0.531	2225.15	0.00223	0.01441	-0.04465	-0.10088
42	60.47	1.0554	17.318	-55.837	-129.377	0.493	1441.66	0.00144	0.01231	-0.03968	-0.09193
43	65.26	1.1390	21.568	-71.580	-160.586	0.419	820	0.00082	0.00740	-0.02456	-0.05511
44	74.7	1.3038	18.141	36.206	-59.856	0.264	1385.34	0.00139	0.00663	0.01324	-0.02188
45	76.47	1.3347	18.807	-79.895	-188.516	0.234	1178.09	0.00118	0.00518	-0.02202	-0.05196
46	78.07	1.3626	21.293	-83.976	-191.548	0.207	591.33	0.00059	0.00260	-0.01026	-0.02341
47	76.14	1.3289	18.469	-60.629	-124.442	0.240	276.08	0.00028	0.00122	-0.00401	-0.00823
48	53.69	0.9371	11.583	-32.756	-67.849	0.592	339.31	0.00034	0.00233	-0.00658	-0.01363
49	61.44	1.0723	-33.037	-97.998	-209.345	0.478	476	0.00048	-0.00752	-0.02230	-0.04764
50	62.41	1.0893	-32.164	-93.947	-199.166	0.463	442.86	0.00044	-0.00660	-0.01927	-0.04085
51	67.56	1.1791	-32.010	-93.422	-197.861	0.382	664.3	0.00066	-0.00812	-0.02369	-0.05017
52	67.56	1.1791	-26.707	-78.579	-168.352	0.382	1400	0.00140	-0.01427	-0.04199	-0.08997
53	70	1.2217	-29.095	-87.257	-192.651	0.342	2171.84	0.00217	-0.02161	-0.06482	-0.14310
54	74.61	1.3022	-32.422	-100.614	-226.315	0.265	1557.82	0.00156	-0.01340	-0.04160	-0.09356
55	84.86	1.4811	-29.205	-108.632	-250.420	0.090	1133.39	0.00113	-0.00297	-0.01103	-0.02543

56	88.57	1.5458	-22.758	-131.751	-341.872	0.025	279	0.00028	-0.00016	-0.00092	-0.00238
57	84.7	1.4783	-22.798	-128.780	-284.422	0.092	976.2	0.00098	-0.00206	-0.01161	-0.02565
58	82.66	1.4427	-23.826	-92.606	-200.637	0.128	767.23	0.00077	-0.00234	-0.00908	-0.01967
59	72.69	1.2687	-39.221	-111.408	-234.147	0.298	511.52	0.00051	-0.00597	-0.01696	-0.03564
60	74.14	1.2940	-47.017	-141.789	-302.763	0.273	437.46	0.00044	-0.00562	-0.01695	-0.03620
61	74.84	1.3062	-45.928	-135.621	-289.826	0.262	437.46	0.00044	-0.00525	-0.01552	-0.03316
62	84.5	1.4748	-22.007	-67.713	-150.412	0.096	396.59	0.00040	-0.00084	-0.00257	-0.00572
63	90	1.5708	-15.673	-47.282	-98.665	0.000	345.095	0.00035	0.00000	0.00000	0.00000
64	84.07	1.4673	-41.202	-121.483	-258.633	0.103	345.095	0.00035	-0.00147	-0.00433	-0.00922
65	81.14	1.4162	-43.561	-128.989	-275.547	0.154	1376.29	0.00138	-0.00923	-0.02734	-0.05841
66	79.38	1.3854	-37.251	-109.071	-231.181	0.184	1007.62	0.00101	-0.00692	-0.02025	-0.04293
67	82.47	1.4394	-39.022	-115.101	-255.266	0.131	1134.77	0.00113	-0.00580	-0.01712	-0.03796
68	84.45	1.4739	-43.806	-137.073	-336.199	0.097	1372.59	0.00137	-0.00582	-0.01820	-0.04463
69	81.59	1.4240	-29.887	-118.042	-283.581	0.146	1376.45	0.00138	-0.00602	-0.02376	-0.05709
70	75.36	1.3153	-23.527	-82.847	-169.788	0.253	900	0.00090	-0.00535	-0.01885	-0.03862
71	68.69	1.1989	-32.862	-94.482	-201.830	0.363	1436.22	0.00144	-0.01245	-0.04931	-0.10534
72	67.44	1.1771	-16.858	-51.047	-105.469	0.384	993.79	0.00099	-0.00643	-0.01946	-0.04021
73	89.79	1.5671	-35.550	-104.741	-218.994	0.004	370.19	0.00037	-0.00005	-0.00014	-0.00030
74	89.19	1.5567	-36.566	-106.504	-224.347	0.014	402.4	0.00040	-0.00021	-0.00061	-0.00128
75	88.78	1.5495	-38.054	-115.105	-250.905	0.021	402.4	0.00040	-0.00033	-0.00099	-0.00215
76	89.19	1.5567	-37.016	-111.221	-239.932	0.014	664.68	0.00066	-0.00035	-0.00105	-0.00225
77	81.37	1.4202	-33.055	-108.325	-233.630	0.150	321.19	0.00032	-0.00159	-0.00522	-0.01126
78	82.6	1.4416	-35.183	-107.730	-230.131	0.129	384.56	0.00038	-0.00174	-0.00534	-0.01140
79	82.88	1.4465	-35.176	-110.464	-250.895	0.124	384.56	0.00038	-0.00168	-0.00527	-0.01196
80	83.93	1.4649	-33.173	-102.892	-237.203	0.106	837	0.00084	-0.00294	-0.00911	-0.02099
81	82.75	1.4443	-33.287	-101.967	-217.234	0.126	1529.96	0.00153	-0.00643	-0.01969	-0.04194
82	79.81	1.3929	-27.760	-71.933	-160.234	0.177	1211.17	0.00121	-0.00595	-0.01541	-0.03433
83	72.75	1.2697	-24.576	-70.566	-150.065	0.297	1715.32	0.00172	-0.01250	-0.03589	-0.07633
84	69.1	1.2060	-23.043	-67.998	-149.509	0.357	1402.18	0.00140	-0.01153	-0.03401	-0.07479
85	-116.18	-2.0277	-22.705	-64.529	-134.931	-0.441	847.9	0.00085	0.00849	0.02414	0.05048
86	-124.26	-2.1687	-23.771	-83.877	-183.650	-0.563	986.9	0.00099	0.01321	0.04660	0.10203
87	-124.58	-2.1743	-24.072	-84.645	-183.046	-0.568	574	0.00057	0.00784	0.02758	0.05963
88	-103.6	-1.8082	-32.560	-95.224	-185.938	-0.235	310.97	0.00031	0.00238	0.00696	0.01360
89	-103.09	-1.7993	-32.954	-96.645	-182.098	-0.226	345.83	0.00035	0.00258	0.00757	0.01426
90	-105.36	-1.8389	-33.102	-102.692	-141.390	-0.265	345.83	0.00035	0.00303	0.00941	0.01295
91	-97.1	-1.6947	-33.303	-81.341	-127.940	-0.124	748.52	0.00075	0.00308	0.00753	0.01184
92	-98	-1.7104	-30.472	-74.109	-165.582	-0.139	380	0.00038	0.00161	0.00392	0.00876
93	-107.5	-1.8762	-31.535	-55.363	-110.023	-0.301	353.4	0.00035	0.00335	0.00588	0.01169
94	-107.03	-1.8680	-25.695	-42.034	-82.247	-0.293	333	0.00033	0.00251	0.00410	0.00802
95	-107.1	-1.8692	-23.157	-38.370	-81.531	-0.294	333	0.00033	0.00227	0.00376	0.00798
96	-102.84	-1.7949	-17.969	-47.833	-90.785	-0.222	1296.79	0.00130	0.00518	0.01378	0.02616
97	-122.92	-2.1454	-21.660	-46.131	-56.268	-0.543	2289	0.00229	0.02695	0.05739	0.07000
98	-126.62	-2.2099	-22.263	-46.308	-89.460	-0.597	2342.71	0.00234	0.03111	0.06471	0.12501
99	-132.33	-2.3096	-21.520	-55.268	-116.388	-0.673	1770.76	0.00177	0.02566	0.06590	0.13878
100	-135.37	-2.3627	-25.850	-82.124	-177.571	-0.712	584.9	0.00058	0.01076	0.03418	0.07391
101	-109.8	-1.9164	-12.978	-28.363	-53.621	-0.339	399.15	0.00040	0.00175	0.00383	0.00725
102	-109.46	-1.9104	-12.992	-29.473	-60.386	-0.333	287.45	0.00029	0.00124	0.00282	0.00578
103	-110.29	-1.9249	-13.747	-43.082	-87.194	-0.347	287.45	0.00029	0.00137	0.00429	0.00869
104	-108.82	-1.8993	-12.271	-44.009	-99.396	-0.323	386	0.00039	0.00153	0.00548	0.01238
105	-111.71	-1.9497	-13.366	-43.460	-90.256	-0.370	635.54	0.00064	0.00314	0.01022	0.02122
106	-111.22	-1.9412	-14.816	-45.131	-77.687	-0.362	400	0.00040	0.00215	0.00653	0.01125
107	-136.81	-2.3878	-20.831	-41.469	-73.829	-0.729	1138.8	0.00114	0.01730	0.03443	0.06130
108	-142.72	-2.4909	-20.941	-53.501	-110.698	-0.796	1245.98	0.00125	0.02076	0.05304	0.10975
109	-144.02	-2.5136	-23.256	-66.748	-142.321	-0.809	469.31	0.00047	0.00883	0.02535	0.05405
110	-116.97	-2.0415	-13.588	-39.561	-97.387	-0.454	253.1	0.00025	0.00156	0.00454	0.01118
111	-145.77	-2.5442	-15.928	-46.824	-101.605	-0.827	1091.58	0.00109	0.01437	0.04226	0.09170
112	-145.12	-2.5328	-17.964	-46.436	-86.320	-0.820	838.98	0.00084	0.01236	0.03196	0.05941
113	-150.11	-2.6199	-19.930	-55.009	-118.124	-0.867	772	0.00077	0.01334	0.03682	0.07906
114	-151.33	-2.6412	-21.501	-61.598	-130.087	-0.877	445.51	0.00045	0.00840	0.02408	0.05085
115	-149.45	-2.6084	-19.609	-59.159	-125.341	-0.861	822.47	0.00082	0.01389	0.04190	0.08878
116	-154.39	-2.6946	-19.321	-55.114	-120.432	-0.902	856.25	0.00086	0.01492	0.04256	0.09299
117	-156.93	-2.7389	-20.276	-59.911	-124.447	-0.920	496.19	0.00050	0.00926	0.02735	0.05681
118	-164.57	-2.8723	-18.630	-53.792	-113.335	-0.964	862.7	0.00086	0.01549	0.04473	0.09425
119	-164.88	-2.8777	-19.643	-59.244	-125.421	-0.965	480	0.00048	0.00910	0.02745	0.05812
120	-169.1	-2.9514	-20.230	-56.682	-113.587	-0.982	280.15	0.00028	0.00557	0.01559	0.03125

