



FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

**ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECÁNICA
AUTOMOTRIZ**

**Diseño y construcción de la carrocería para el prototipo de
competencia Shell Eco Marathon**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Autores:

**DIEGO PAÚL CAJAMARCA SUMBA
CHRISTIAN DAVID VÁSQUEZ REMACHE**

Director:

MIGUEL ANDRÉS LÓPEZ HIDALGO

CUENCA, ECUADOR

2016

DEDICATORIA

A mis padres Ángel y Betty que me enseñaron que sin sacrificio no existe recompensa, a mis hermanos Gaby y Oscar que siempre han sido un modelo a seguir, a mi tío Pedro que me dejó sus enseñanzas y consejos.

Paúl.

Dedico este trabajo graduación a mi padre y a mi madre, que gracias a su apoyo incondicional he podido culminar una importante etapa de mi vida, a mi abuela, hermano y hermanas por siempre estar a mi lado apoyándome en cada paso que he dado.

Christian.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis compañeros Pedro Ochoa y Vicente Salamea por su apoyo y paciencia, al Tecnólogo Gustavo Coronel por brindarme su ayuda en el proceso de manufactura.

Paúl

Agradezco en primer lugar a Dios, por haberme regalado salud e inteligencia para culminar mis estudios universitarios. A los profesores que han compartido conmigo sus conocimientos durante mi estancia en la Universidad del Azuay. En especial al Ing. Andrés López, por ayudarme con la dirección del trabajo de titulación.

Christian

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	3
1.1 Introducción	3
1.2. Dinámica de fluidos.....	3
1.2.1. Fluidos compresibles en comparación con los incompresibles.....	3
1.2.2. Propiedades de los fluidos	4
1.2.2.1. Presión	4
1.2.2.2 Densidad	4
1.2.2.3. Viscosidad	5
1.2.3. Ley de los gases ideales.....	7
1.2.4. Número de Reynolds	8
1.2.5. Régimen laminar	9
1.2.6. Flujos estacionarios y no estacionarios	10
1.2.7. Descripción del flujo	10
1.2.7.1. Líneas de corriente	10

1.2.7.2. Líneas de trayectoria.....	11
1.2.7.3. Líneas de traza.....	12
1.2.7.4. Líneas fluidas	13
1.2.8. Capa límite	13
1.2.9. Aerodinámica de los vehículos.....	14
1.2.10. Fuerzas aerodinámicas presentes en el movimiento de un vehículo terrestre	14
1.2.10.1. Fuerza de arrastre	14
1.2.10.2. Coeficiente de arrastre aerodinámico	15
1.2.10.3. Arrastre debido a fricción y presión	17
1.2.10.3.1. Resistencia debido a la fricción	17
1.2.10.3.2. Resistencia debido a la presión.....	19
1.2.10.4. Fuerza de sustentación.....	20
1.2.10.5. Fuerza lateral	21
1.2.11. Ecuaciones presentes en el movimiento de un fluido.....	21
1.2.11.1 Ecuación de Bernoulli	21
1.2.11.2. Ecuaciones de Navier Stokes	23
1.2.11.3. Ecuación de continuidad	24
1.2.11.4. Ecuación de cantidad de movimiento.....	25
1.2.12. Turbulencia.....	26
1.2.12.1. Modelado de la turbulencia	26
1.2.12.1.1 Modelo k-épsilon (k- ϵ)	27
1.2.12.1.2. Modelo RNG	27
1.2.12.1.3. Modelo k-omega.....	28
1.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	28
1.3.1. Pre-proceso	28
1.3.2. Solver.....	29

1.3.3. Post-proceso	29
1.3.4. Discretización	30
1.3.4.1. Discretización espacial	30
1.3.5. Mallado estructurado	30
1.3.6. Mallado no estructurado	31
1.3.7. Convergencia.....	31
1.4 Materiales Compuestos	32
1.4.1. Matriz	33
1.4.1.1. Matriz metálica.....	33
1.4.1.2. Matriz cerámica	33
1.4.1.3. Matriz polimérica	34
1.4.2. Refuerzo	34
1.4.3. Fibras	34
1.4.4. Fibra de Vidrio	35
1.4.5. Tipos de fibra de vidrio	36
1.4.5.1. Vidrio E (Eléctrico)	36
1.4.5.2. Vidrio A (Alto contenido en álcali).....	36
1.4.5.3. Vidrio R o S (Resistencia).....	36
1.4.6. Moldes	37
1.4.6.1. Clases de moldes	37
1.4.6.2. Diseño del molde.....	37
1.4.6.3. Selección del material del molde.....	38
1.4.6.4. Espesor de molde recomendado	38
1.4.6.5. Consideraciones sobre pliegues y cantos	38
1.4.6.6. Gradiente de desmolde	39
1.5. Estado del arte	39

CAPÍTULO II: MODELADO DE CARROCERÍA.....	43
2.1 Requerimientos previos	43
2.2 Condiciones de diseño generales.....	43
2.2.1 Reglamento de Shell Eco Marathon	44
2.2.2 Dimensiones	44
2.2.3 Forma base para carrocería.....	45
2.2.4. Altura con respecto al suelo	47
2.3 Propuesta 1	47
2.3.1 Visibilidad	49
2.3.2 Prueba de visibilidad	51
2.3.3 Retrovisores	53
2.3.4 Accesibilidad	55
2.3.5 Cálculo de masa.....	56
2.4. Propuesta 2	58
2.4.1 Visibilidad	60
2.4.2 Prueba de visibilidad	62
2.4.3 Retrovisores	63
2.4.4 Accesibilidad	63
2.4.5 Cálculo de masa.....	65
2.5 Selección de Carrocería.....	65
2.5.1 Visibilidad	65
2.5.2 Accesibilidad	66
2.5.3 Calculo de masa.....	67

CAPÍTULO III: SIMULACIÓN CFD	68
3.1 Introducción.....	68
3.2 Propuesta 1	69
3.2.1 Pre-proceso	69
3.2.1.1 Importación de la geometría.....	69
3.2.1.2 Dominio.....	69
3.2.1.3 Mallado.....	72
3.2.1.3.1 Elementos de una malla.....	72
3.2.1.3.2 Calidad de la malla	73
3.2.1.3.3 Generación de la malla	74
3.2.1.3.4 Determinación de la calidad de la malla.....	79
3.2.1.3.5 Condiciones de contorno	82
3.2.2 Proceso para el cálculo CFD	82
3.2.2.1 Configuración del programa para el análisis	82
3.2.2.2 Solución.....	84
3.2.2.3 Resultados	86
3.3 Propuesta 2	89
3.3.1 Pre-proceso	89
3.3.1.1 Importación de la geometría.....	89
3.3.1.2 Dominio.....	90
3.3.1.3 Mallado.....	91
3.3.1.3.1 Determinación de la calidad de la malla.....	93
3.3.1.3.2 Condiciones de contorno	96
3.3.2 Proceso para el cálculo CFD	97
3.3.2.1 Configuración del programa para el análisis	97
3.3.3 Solución.....	97

3.3.4 Resultados	97
3.4 Selección de la carrocería	100
3.5 Conclusiones	105
CAPÍTULO IV: CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA.	106
4.1 Molde para Carrocería.....	106
4.2 Manufactura de la Carrocería	107
4.3 Moldes y matrices para ventanas.....	110
4.4 Manufactura de Parabrisas y Ventanas.....	112
CONCLUSIONES.....	115
RECOMENDACIONES.....	117
BIBLIOGRAFÍA.....	118

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura.1.1.1. Esfuerzo cortante: (a) elemento deformándose a una velocidad $\delta\theta/\delta t$, (b) esfuerzo cortante en un fluido newtoniano en la zona cercana a la pared.	5
Figura.1.2. Flujo laminar alrededor de obstáculos con forma diferente.	9
Figura.1.3. Líneas de corriente.....	11
Figura.1.4. Tubos de corriente.	11
Figura.1.5. Línea de trayectoria.	12
Figura.1.6. Línea de traza.....	12
Figura.1.7. Línea fluida.....	13
Figura.1.8. Evolución de la capa límite.	14
Figura.1.9. Coeficientes de arrastre experimentales para diferentes formas con $Re > 104$	17
Figura.1.10. Fuerza tangencial por acción de la fricción.	18
Figura.1.11. Fuerza de sustentación.....	20
Figura.1.12. Regiones válidas de la ecuación de Bernoulli.	22
Figura.1.13. Flujo turbulento.	26
Figura.1.14. Estructura de un código CFD comercial.....	29
Figura.1.15. Discretización de variables.	30
Figura.1.16. Malla estructurada.	31
Figura.1.17. Malla no estructurada.	31
Figura.1.18. Convergencia de la Solución - Evolución del Residuo.	32
Figura.1.19. Configuración básica de un material compuesto.	33
Figura.1.20. Características específicas de diferentes fibras.....	35
Figura.1.21. Tipos de moldes.....	37
Figura.1.22. Consideraciones de pliegues y cantos.....	39
Figura.1.23. Diferencia entre un molde sin gradiente de desmolde y con gradiente de desmolde.	39
Figura.1.24. Prototipo Universidad de Valencia.....	40
Figura.1.25. Prototipo de la Florida International University (2015).	41
Figura.1.26. Prototipo de la Florida International University (2012).	41
Figura.1.27. PAC-CAR II.	42
Figura. 2.1 Emsamble de chasis con sistemas complementarios.	43

Figura. 2.2 Prototipo eLi15.	45
Figura. 2.3 Prototipo electrico ganador de la sede asiatica.	46
Figura. 2.4 Prototipo electrico ganador de la sede americana.....	46
Figura. 2.5 Altura con respecto al suelo.....	47
Figura. 2.6 Perfil de carroceria en vista superior de propuesta 1.	48
Figura. 2.7 Perfil de carroceria en vista lateral de propuesta 1.	48
Figura. 2.8 Modelo final de propuesta 1.	49
Figura. 2.9 Campo de visión horizontal.	50
Figura. 2.10 Campo de vision vertical.	50
Figura. 2.11 Modelado final de parabrisas y ventanas de propuesta 1.	51
Figura. 2.12 Dimensiones de cono para pruebas.....	51
Figura. 2.13 Prueba de visibilidad a 0°	52
Figura. 2.14 Prueba de visibilidad a 60°	52
Figura. 2.15 Difencia entre espejo plano convexo.	53
Figura. 2.16 Espejos convexos.....	54
Figura. 2.17 prueba de visibilidad de retrovisores.	54
Figura. 2.18 Puerta de acceso a cabina de piloto de propuesta 1.	56
Figura. 2.19 Puerta de acceso a tren motriz de propuesta 1.	56
Figura. 2.20 Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 2.	59
Figura. 2.21 Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 2.	59
Figura. 2.22 Modelo final de propuesta 2.	60
Figura. 2.23 Campo de visión horizontal de propuesta 2.....	60
Figura. 2.24 Campo de vision vertical de propuesta 2.	61
Figura. 2.25 Modelado final de parabrisas y ventanas de propuesta 2.	61
Figura. 2.26 Prueba de visibilidad a 0° de propuesta 2.	62
Figura. 2.27 Prueba de visibilidad a 62° de propuesta 2.	62
Figura. 2.28 Prueba de visibilidad con retrovisores.	63
Figura. 2.29 Puerta de acceso a cabina de pilota de propuesta 2.	64
Figura. 2.30 Puerta de acceso a tren motriz de propuesta.....	64
Figura. 2.31 Diferencias de visibilidad de propuesta 1y2.....	66
Figura. 2.32 Diferencias de accesibilidad de propuesta 1y2.....	66
Figura 3.1. Geometría importada al software ANSYS R15.0.....	69
Figura 3.2. Sección de un túnel de viento.	70
Figura 3.3. Cotas de la carrocería, propuesta 1.	71

Figura 3.4. Dimensiones del túnel de viento.....	71
Figura 3.5. Dominio computacional.	72
Figura 3.6. Tipos de elementos de una malla.....	73
Figura 3.7. Densidad del mallado.	74
Figura 3.8. Valores referenciales de distorsión “skewnes”.....	74
Figura 3.9. Valores referenciales de calidad ortogonal “OQ”	74
Figura 3.10. Parámetros de la malla.....	77
Figura 3.11 Malla del dominio computacional.	78
Figura 3.12. Delimitación de la malla estructurada en la zona considerada para el análisis de la capa límite.	78
Figura 3.13. Valores de distorsión de la malla.....	79
Figura 3.14. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la distorsión.....	80
Figura 3.15. Valores de calidad ortogonal de la malla.....	80
Figura 3.16. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la calidad ortogonal.....	81
Figura 3.17. Condiciones de contorno.	82
Figura 3.18. Malla importada en el Fluent.	83
Figura 3.19. Residuos.....	85
Figura 3.20. Coeficiente de arrastre (Cd).....	85
Figura 3.21. Coeficiente de sustentación (Cl).....	86
Figura 3.22. Cd en función del número de elementos	87
Figura 3.23. Cl en función del número de elementos.	87
Figura 3.24. Resultados gráficos de presión.	88
Figura 3.25. Resultados gráficos de velocidad de flujo.	89
Figura 3.26. Geometría importada al software ANSYS R15.0.....	89
Figura 3.27. Cotas de la carrocería, propuesta 2.	90
Figura 3.28. Dominio computacional.....	90
Figura 3.29. Parámetros de la malla.....	92
Figura 3.30. Malla del dominio computacional.	93
Figura 3.31. Delimitación de la malla estructurada en la zona considerada para el análisis de la capa límite.	93
Figura 3.32. Valores de distorsión de la malla.....	94

Figura 3.33. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la distorsión.	94
Figura 3.34. Valores de calidad ortogonal de la malla.	95
Figura 3.35. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la calidad ortogonal.	96
Figura 3.36. Gráfica de Residuos.	97
Figura 3.37. Cd en función del número de elementos.	98
Figura 3.38. Cl en función del número de elementos.	99
Figura 3.39. Resultados gráficos de presión.	100
Figura 3.40. Resultados gráficos de velocidad de flujo, a 10km/h	100
Figura 4.1 Cortes para construcción.	106
Figura 4.2 Molde en madera.	106
Figura 4.3 Carrocera en forma base.	107
Figura 4.4 Carrocera con cortes de parabrisas y ventanas.	107
Figura 4.5 Cejas de parabrisas y ventanas.	108
Figura 4.6 Acabado final de pintura de carrocería.	108
Figura 4.7 Anclajes de carrocería.	109
Figura 4.8 Mecanismo de puerta de acceso del piloto.	109
Figura 4.9 Ensamblaje de prototipo.	110
Figura 4.10 Molde de parabrisas en acetato.	110
Figura 4.11 Molde de parabrisas en acrílico.	111
Figura 4.12 Matriz de parabrisas.	112
Figura 4.13 Matriz de ventana derecha.	112
Figura 4.14 Aplicación de calor a molde mediante soplete a molde de parabrisas. .	113
Figura 4.15 Resultado final de termo formado de parabrisas.	113
Figura 4.16 Montaje de parabrisas en carrocería.	114

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio	36
Tabla 2-1 Resultados de probetas para el cálculo de la densidad de la fibra de vidrio	57
Tabla 2-2 Calculo de la masa de propuesta 1 con espesores de 1,2 y 3mm de espesor.	58
Tabla 2-3 Calculo de la masa de propuesta 2 con espesores de 1,2 y 3mm de espesor.	65
Tabla 2-4 Comparacion de area y masa de propuesta 1 y 2.....	67
Tabla 3-1. Resultados.....	86
Tabla 3-2. Resultados.....	98
Tabla 3-3. Comparación de Resultados entre carrocerías 1 y 2.....	101

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA PARA PROTOTIPO
DE SHELL ECO MARATHON.**

RESUMEN

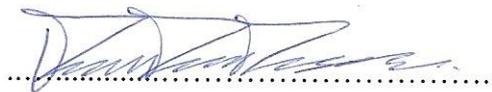
El presente estudio trata sobre el diseño de la carrocería de un prototipo para la competencia Shell Eco Marathon, en primera instancia se realizó una revisión de las diferentes carrocerías con las que han competido otros equipos en años anteriores, de este estudio se presentaron dos propuestas, posteriormente se ejecutó un análisis CFD, del cual se obtuvieron los coeficientes aerodinámicos de arrastre y sustentación. En la tercera parte de la tesis se seleccionó una de las propuestas basándose en criterios de visibilidad, accesibilidad, masa, coeficientes aerodinámicos y consumo energético y en la parte final del trabajo se presenta los diferentes pasos que se realizaron para la construcción del prototipo.

Palabras Clave: diseño, aerodinámica, análisis CFD, consumo energético, Shell Eco Marathon.



Miguel Andrés López Hidalgo

Director del Trabajo de Titulación



Diego Francisco Torres Moscoso

Director de Escuela



Diego Paúl Cajamarca Sumba



Christian David Vásquez Remache

Autores

**DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE BODY FOR SHELL ECO
MARATHON PROTOTYPE.**

ABSTRACT

This study deals with the body design of a prototype for the Shell Eco Marathon competition. First, a review of the different bodies with which other teams have competed in previous years, was carried out. This study presented two proposals; then, a CFD analysis was performed. Subsequently, the aerodynamic drag and lift forces coefficients were obtained from this analysis. In the third part of this study, one of the proposals was selected based on visibility, accessibility, mass, aerodynamic coefficients and energy consumption criteria. The final part of the research paper presents the various steps undertaken for the construction of the prototype.

Keywords: Design, Aerodynamics, CFD Analysis, Energy Consumption, Shell Eco Marathon.



Miguel Andrés López Hidalgo
Thesis Director



Diego Francisco Torres Moscoso
School Director



Diego Paul Cajamarca Sumba



Christian David Vásquez Remache

Authors



UNIVERSIDAD DEL
AZUAY
Dpto. Idiomas



Translated by,
Lic. Lourdes Crespo

Cajamarca Sumba Diego Paúl

Vásquez Remache Christian David

Trabajo de Titulación

Ing. Miguel Andrés López Hidalgo, PhD

Octubre, 2016

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA PARA PROTOTIPO DE SHELL ECO MARATHON

INTRODUCCIÓN

Motivación de la investigación

Existen competencias de ingeniería a nivel internacional, las cuales permiten que estudiantes y profesionales exploten sus habilidades y conocimientos, entre estos eventos se tiene el concurso Shell Eco Marathon, en el cual los participantes desarrollan vehículos con una alta eficiencia energética, en donde, cada detalle de diseño y construcción es importante para obtener mayor kilometraje con menor consumo de energía; por lo tanto, es fundamental diseñar una carrocería cuyas características aerodinámicas y de peso estén destinadas a disminuir el consumo de energía en un vehículo.

Problemática

En el consumo energético de un vehículo intervienen varios factores, siendo uno de los más importantes el peso total del mismo, en donde la carrocería tiene gran relevancia. Con diseños tradicionales no se obtienen carrocerías livianas, lo que representa menor eficiencia en consumo de energía. Por lo tanto, con el fin de lograr ese objetivo se plantea diseños de carrocería con características aerodinámicas y a la vez buscando que sea lo más liviana posible, lo que se transforma en conceptos de mejora, aplicables en vehículos comerciales.

Objetivo General

Diseñar y construir la carrocería para el prototipo de competencia Shell Eco Marathon.

Objetivos Específicos:

- Diseñar la carrocería del prototipo en un programa CAD.
- Realizar la simulación aerodinámica de la carrocería en un Software CFD.
- Construir la carrocería para el prototipo.

Metodología

En primer lugar se realizará una revisión del estado del arte para determinar un modelo de carrocería base, a continuación se estudiará la teoría de la aerodinámica vehicular, enfocándonos en los coeficientes de arrastre y sustentación. Criterios que usaremos para la simulación en el software CFD, el mismo que nos ayudará a seleccionar la carrocería con el coeficiente de arrastre aerodinámico C_d más bajo, y el de sustentación C_l neutro o positivo. Finalmente se buscará los métodos de fabricación locales, así como la disponibilidad de materiales para la carrocería en el medio, buscando un balance entre costo-beneficio.

Alcances y resultados esperados

Diseñar una carrocería que aporte al prototipo de Shell Eco Marathon el menor consumo energético, determinando los coeficientes de arrastre y sustentación a través de un software CFD. Construir la carrocería empleando los materiales disponibles en el medio, utilizando el que permita obtener el menor peso posible

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

1.1 Introducción

En el siguiente capítulo se tratarán conceptos de: dinámica de fluidos, de dinámica de fluidos computacional (CFD), se abordarán los necesarios para facilitar la comprensión de los efectos del viento sobre un vehículo y de los criterios que se deben considerar al momento de ejecutar un análisis CFD. También se estudiará los tipos de materiales existentes al igual que las características de los moldes, conceptos que serán fundamentales para las etapas de diseño y construcción del prototipo. Finalmente se revisará el trabajo realizado por otros equipos participantes en la competencia Shell Eco Marathon, con el objetivo de tener una idea general de la forma que debe poseer la carrocería al igual de los materiales que usan.

1.2. Dinámica de fluidos

A continuación se presentan algunas definiciones importantes dentro del estudio de la dinámica de fluidos. Se mencionan las más importantes para tener un entendimiento de la temática que se desarrollará en el presente trabajo.

1.2.1. Fluidos compresibles en comparación con los incompresibles

Un fluido se clasifica como compresible o incompresible en función de la variación de la densidad del mismo durante el flujo. Un fluido es incompresible si su densidad permanece casi constante a lo largo de todo el flujo, en consecuencia el volumen de todo el fluido no se altera. Los líquidos son sustancias incompresibles, ya que, sus densidades son constantes durante el flujo, como por ejemplo el agua. Lo contrario son los gases, estos son intensamente compresibles, por ejemplo, un cambio de presión de 0.01atm produce la variación de 1 por ciento en la densidad del aire atmosférico. (Cengel & Cimbala, 2006)

1.2.2. Propiedades de los fluidos

1.2.2.1. Presión

Se le conoce como presión a la relación existente entre la fuerza normal (F) aplicada a una superficie y el área de acción (A). Se debe tener en cuenta que cuando se trata de un fluido la fuerza se encuentra perpendicular al plano definido por dicho fluido o a la superficie que se encuentra en contacto. La ecuación de presión es:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ec. (1)}$$

En donde:

P: Presión (Pa)

F: Fuerza (N)

A: Área (m²)

1.2.2.2 Densidad

La densidad está definida como masa por unidad de volumen. Por lo general la densidad de una sustancia va a depender de la temperatura y de la presión. En los gases es proporcional a la presión e inversamente proporcional a la temperatura, mientras que en sólidos y líquidos al tratarse de sustancias incompresibles la variación de su densidad con la presión se asume como despreciable. (Cengel & Cimbala, 2006). Entonces:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde:

ρ : densidad (kg/m³)

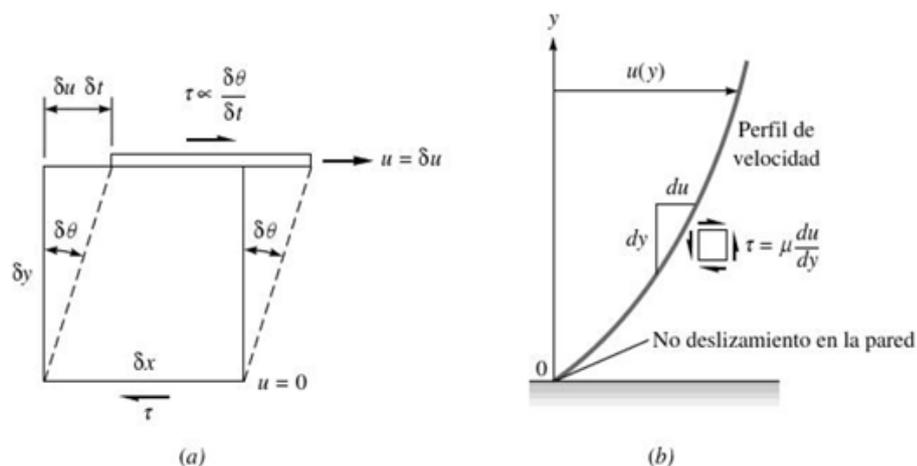
m: masa (kg)

v: volumen (m^3)

1.2.2.3. Viscosidad

Se define a la viscosidad como una medida cuantitativa de la resistencia de un fluido a fluir, la viscosidad se emplea para determinar la velocidad de deformación del fluido cuando se le aplica un esfuerzo cortante dado. (White, 2004)

En la ley de Newton referente a la viscosidad, se establece que para una cierta deformación angular de un fluido (du/dy) considerando que du es la velocidad y dy la distancia, el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la viscosidad. (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014), se tiene:



(a) Elemento deformándose a una velocidad $\delta\theta/\delta t$

(b) Esfuerzo cortante en un fluido newtoniano en la zona cercana a la pared.

Figura.1.1. Esfuerzo cortante.

Fuente: (White, 2004)

En la figura 1.1a se observa una partícula fluida sometida a un esfuerzo cortante (τ) en un plano. El ángulo ($\delta\theta$) de la deformación aumentará continuamente con el

tiempo mientras siga actuando el esfuerzo (τ) y moviéndose la superficie superior con una velocidad (δu) mayor que la de la inferior. (White, 2004)

$$\tau \propto \frac{\delta\theta}{\delta t} \quad \text{Ec. (3)}$$

Considerando el triángulo rectángulo que se forma en la figura 1.1a se tiene:

$$\text{tg } \delta\theta = \frac{\delta u \cdot \delta t}{\delta y} \quad \text{Ec. (4)}$$

Cuando se tiene límite de variaciones infinitesimales, se genera una relación entre la velocidad de deformación y el gradiente de velocidad:

$$\frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{du}{dy} \quad \text{Ec. (5)}$$

En la ecuación (3) se observa que el esfuerzo aplicado es también proporcional al gradiente de la velocidad para fluidos comunes. La constante de proporcionalidad es el coeficiente de viscosidad (μ), por lo tanto:

$$\tau = \mu \frac{\delta\theta}{\delta t} = \mu \frac{du}{dy} \quad \text{Ec. (6)}$$

En donde:

$\delta\theta/\delta t$: Velocidad de deformación.

τ : Esfuerzo cortante (Pa)

μ : Coeficiente de viscosidad absoluta (Pa.s o Kg/m.s)

du/dy : Gradiente de velocidad (1/s)

En la figura 1.4b se aprecia una capa de cortadura llamada capa límite cerca de una pared. El esfuerzo cortante es proporcional a la pendiente de la velocidad y es máximo en la pared. En la pared la velocidad (u) es cero, fenómeno que se conoce como condición de no deslizamiento, siendo común en todos los fluidos viscosos. (White, 2004)

La viscosidad cinemática es el cociente entre la viscosidad y la densidad de un fluido. Entonces:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{Ec. (7)}$$

En donde:

ν : Velocidad cinemática (m^2/s)

μ : Viscosidad absoluta (Pa.s o Kg/m.s)

ρ : Densidad (kg/m^3)

1.2.3. Ley de los gases ideales

En primer lugar se debe tener en cuenta que una ecuación que relacione presión, temperatura, y densidad (o volumen específico) de una sustancia se llama ecuación de estado. La ecuación de estado del gas ideal es la más simple para sustancias en la fase gaseosa. (Cengel & Cimbala, 2006), siendo:

$$P\nu = RT \quad \text{o} \quad P = \rho RT \quad \text{Ec. (8)}$$

En donde:

P: Presión absoluta

v: Volumen específico.

T: Temperatura termodinámica absoluta.

ρ : Densidad

R: Constante del gas.

La constante R es diferente para cada gas y se puede determinar a través de la ecuación:

$$R = \frac{R_u}{M} \quad \text{Ec. (9)}$$

En donde:

Ru: Es la constante universal de los gases siendo $R_u = 8.314 \text{ kJ/kmol.K}$

M: Es la masa molar o conocida como peso molar (dato que se puede obtener en tablas, en función del número y peso atómico)

1.2.4. Número de Reynolds

El movimiento de un fluido puede realizarse de dos formas ya sea en régimen laminar o turbulento, difieren el uno del otro en el comportamiento de las partículas en movimiento.

El número de Reynolds (Re) es un valor adimensional, empleado para identificar el tipo de régimen, Entonces:

$$Re_{\text{laminar}} \ll Re_{\text{crítico}} \ll Re_{\text{turbulento}}$$

Los valores del número de Reynolds fueron obtenidos de manera experimental observando el flujo en una tubería circular. El régimen laminar ocurre para $Re < 2300$, mientras que para el turbulento ocurre para $Re > 4000$. En el intervalo entre 2300 y 4000 se tiene un régimen de transición, es decir se puede encontrar tanto el laminar como el turbulento. (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014), se tiene:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} \quad \text{Ec. (10)}$$

En donde:

Re: Número de Reynolds (adimensional)

V: Velocidad del fluido (m/s)

L: Longitud del campo de flujo (m)

1.2.5. Régimen laminar

Las partículas se mueven describiendo una trayectoria sumamente ordenada, formándose capas o láminas, es decir el fluido se mueve sin que haya una combinación significativa de partículas de fluido vecinas. En la práctica la gran mayoría de flujos son turbulentos, teniéndose laminares en fluidos muy viscosos que fluyen en pequeñas tuberías o pasajes muy estrechos.

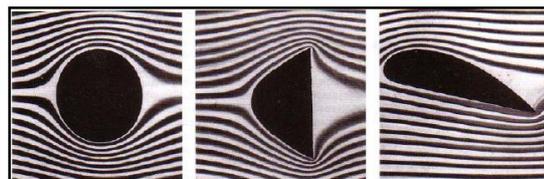


Figura.1.2. Flujo laminar alrededor de obstáculos con forma diferente.

Fuente: (Young & Freedman, 2009)

1.2.6. Flujos estacionarios y no estacionarios

El término estacionario hace referencia a que no existe un cambio en un punto con el tiempo. Es decir características de un fluido como son presión, densidad y velocidad permanecen constantes durante el flujo. Ejemplos de equipos de flujo estacionario son turbinas, compresores, las calderas, condensadores y los intercambiadores de calor, dichos equipos trabajan largos periodos de tiempo en las mismas condiciones. En el flujo estacionario las propiedades de un fluido pueden variar de un punto a otro dentro de un equipo, pero siendo constantes en cualquier punto fijo. En consecuencia el volumen, la masa y la energía total de un equipo de flujo estacionario permanecen constantes durante su operación. (Cengel & Cimbala, 2006)

1.2.7. Descripción del flujo

El flujo puede ser visualizado de distintas maneras, con representaciones gráficas y fotografías se pueden conocer aspectos del mismo. Existen cuatro formas para la descripción de un fluido, las cuales son:

- Líneas de corriente.
- Líneas de trayectoria o senda.
- Líneas de traza.
- Líneas fluidas.

1.2.7.1. Líneas de corriente

Una línea de corriente se puede definir como aquella línea que en un instante dado es tangente al vector velocidad en todo punto. Son empleadas para determinar la dirección instantánea del movimiento del fluido en cualquier parte del flujo. Es difícil producir experimentalmente líneas de corriente en un flujo no estacionario, a menos que se marquen muchas partículas y se pueda conocer la dirección de la velocidad comparando las fotografías tomadas en instantes inmediatos. (White, 2004)

Un tubo de corriente, es aquel, cuyas paredes son líneas de corriente, por lo tanto, nada de fluido atraviesa dichas paredes. (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014)

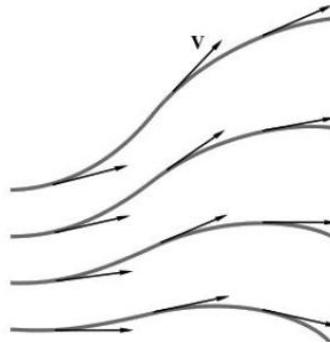


Figura.1.3. Líneas de corriente.

Fuente: (White, 2004)

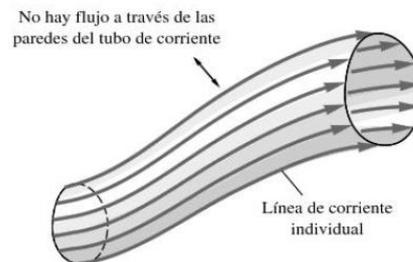


Figura.1.4. Tubos de corriente.

Fuente: (White, 2004)

1.2.7.2. Líneas de trayectoria

“Una línea de trayectoria es la trayectoria real recorrida por una partícula de fluido durante algún periodo.” (Cengel & Cimbala, 2006)

Es uno de los patrones de flujo más simples de comprender, es el camino trazado por la partícula de un fluido al desplazarse por el campo de flujo.

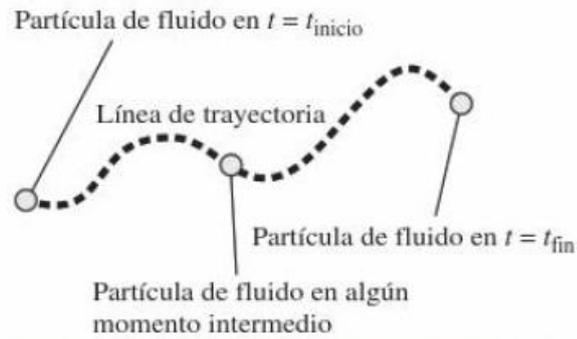


Figura.1.5. Línea de trayectoria.

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

1.2.7.3. Líneas de traza

“Una línea de traza es el lugar geométrico de las partículas que en instantes sucesivos pasaron por un punto dado” (White, 2004)

Las líneas de traza es un patrón de flujo bastante simple de generar en un experimento físico. Por ejemplo se inserta un tubo pequeño en un flujo y se introduce una corriente de un fluido trazador el cual puede ser humo o tinte, el patrón que se observe es una línea de traza.

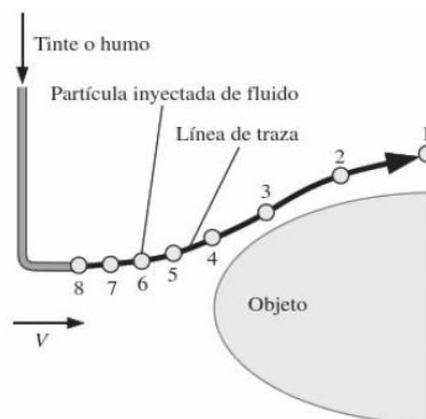


Figura.1.6. Línea de traza.

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

1.2.7.4. Líneas fluidas

“Una línea fluida es un conjunto de partículas fluidas que en un instante dado forman una línea” (White, 2004). Las líneas fluidas se emplean generalmente para observar que tan uniforme es el flujo de un fluido.

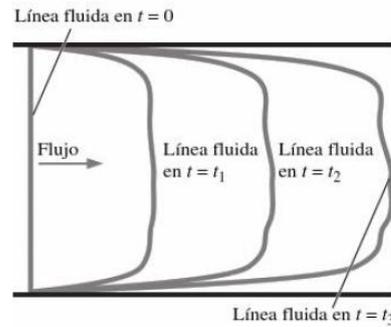


Figura.1.7. Línea fluida.

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

1.2.8. Capa límite

La capa límite es una región de fluido de espesor pequeño (δ) y de gran longitud X , que se encuentra situada alrededor de cualquier cuerpo aerodinámico o en el interior de conductos, en la cual su velocidad es afectada por los esfuerzos cortantes, dicha capa se puede encontrar adherida al cuerpo o separada de él. Dependiendo del número de Reynolds, la capa límite puede ser laminar o turbulenta. (Bergadá Grañó, 2012)

Características generales de la capa límite (Bergadá Grañó, 2012):

- La capa límite es una región muy delgada, su espesor (δ) es menor que la longitud respecto al inicio de la placa.
- Conforme aumenta el flujo, es decir corriente abajo, el espesor de la capa límite aumenta cumpliéndose siempre $(\delta) < X$.
- El perfil de velocidades de la capa límite cumple con la condición de no deslizamiento en la pared.

- Los esfuerzos cortantes sobre la superficie de la pared siempre se consideran.
- En el interior de la capa límite las líneas de corriente del flujo se pueden considerar aproximadamente paralelas a la placa.

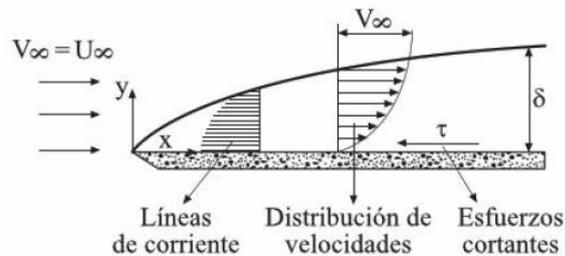


Figura.1.8. Evolución de la capa límite.

Fuente: (Bergadá Grañó, 2012)

1.2.9. Aerodinámica de los vehículos

Hoy en día la aerodinámica es un tema de estudio fundamental en el diseño de vehículos tanto de turismo como de competencia. El flujo de aire que circula alrededor de un vehículo genera fuerzas de arrastre (*Drag*) y sustentación (*Lift*) la misma que puede ser positiva o negativa, además de momentos, fuerzas laterales, ruidos, vibraciones, etc. que afectan el desplazamiento del automóvil.

1.2.10. Fuerzas aerodinámicas presentes en el movimiento de un vehículo terrestre

“La fuerza sobre un cuerpo puede tener tres componentes: resistencia o arrastre, sustentación y fuerzas laterales”. (Bergadá Grañó, 2012)

1.2.10.1. Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre (F_D) es la que el flujo de un fluido ejerce sobre un cuerpo, es decir genera una resistencia al movimiento de dicho cuerpo, en los vehículos esta fuerza es producida por acción del viento.

Normalmente el arrastre es un efecto indeseable y siempre se trata de buscar soluciones para eliminarlo, por ejemplo en vehículos el arrastre se relaciona con el consumo de combustible. Pero en ciertos casos el arrastre es un fenómeno deseable e incluso se trata de maximizarlo como por ejemplo en los frenos de los automóviles, paracaídas, etc.

Ecuación para obtener la fuerza de arrastre:

$$F_D = C_D * \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad \text{Ec. (11)}$$

En donde:

F_D : Fuerza de arrastre (N)

C_D : Coeficiente aerodinámico de arrastre (adimensional)

ρ : Densidad del aire (kg/m^3)

A: Área frontal del cuerpo (m^2)

El término ($\frac{1}{2} \rho V^2$) es conocido como presión dinámica.

1.2.10.2. Coeficiente de arrastre aerodinámico

Es un valor adimensional (C_D), que se emplea para evaluar la calidad aerodinámica del perfil de una carrocería, el coeficiente de arrastre depende de factores como: forma del vehículo, número de Reynolds, y la rugosidad de la superficie.

“En muchas ocasiones el coeficiente de arrastre aerodinámico (C_D) se considera como una constante que depende únicamente de la forma que tiene el cuerpo y de la

dirección de su movimiento en un fluido en reposo” (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014). Ecuación del coeficiente de arrastre aerodinámico:

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 A} \quad \text{Ec. (12)}$$

En donde:

F_D : Fuerza de arrastre (N)

C_D : Coeficiente aerodinámico de arrastre (adimensional)

ρ : Densidad del aire (kg/m^3)

A : Área frontal del cuerpo (m^2)

En la figura 1.9 se presentan coeficientes de arrastre de algunas geometrías.

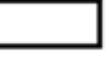
FORMA		COEFICIENTE DE ARRASTRE
Esfera	→ 	0.47
Media esfera	→ 	0.42
Cono	→ 	0.50
Cubo	→ 	1.05
Cubo en ángulo	→ 	0.80
Cilindro largo	→ 	0.82
Cilindro corto	→ 	1.15
Cuerpo aerodinámico	→ 	0.04
Cuerpo semi aerodinámico	→ 	0.09

Figura.1.9. Coeficientes de arrastre experimentales para diferentes formas con $Re > 104$.

Fuente: (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014)

1.2.10.3. Arrastre debido a fricción y presión

Como se mencionó la fuerza de arrastre se origina por los efectos combinados de las fuerzas de fricción y de presión.

1.2.10.3.1. Resistencia debido a la fricción

La viscosidad presente en el aire da lugar al rozamiento entre el fluido y la superficie del cuerpo, lo que genera una fuerza tangencial (τ_s), siendo esta una primera componente de los esfuerzos que el flujo genera sobre un cuerpo.

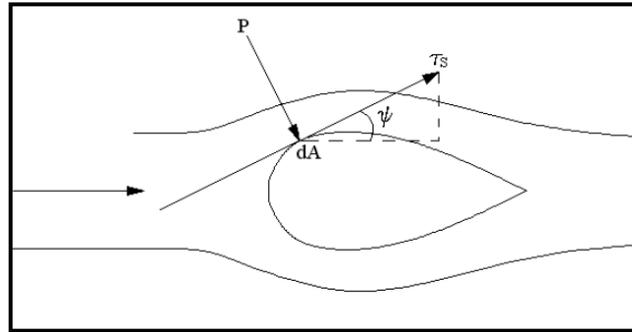


Figura.1.10. Fuerza tangencial por acción de la fricción.

Fuente: (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009)

Entonces:

$$F_{D,fricción} = \int_s \tau_s * \cos\psi. ds \quad Ec. (13)$$

En donde:

$F_{D,fricción}$: Fuerza de arrastre debido a la fricción (N)

τ_s : Fuerza tangencial. (Pa)

Ψ : Ángulo directriz de la fuerza tangencial. (Grados)

“El coeficiente de arrastre debido a fricción es independiente de la rugosidad de la superficie en flujo laminar, pero es una fuerte función de la rugosidad de la superficie en flujo turbulento, debido a los elementos de rugosidad superficiales que sobresalen de la capa límite.” (Cengel & Cimbala, 2006)

Ecuación de la fuerza de arrastre debido a la fricción en función del coeficiente de arrastre:

$$F_{D,fricción} = C_{D,fricción} * \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad Ec. (14)$$

1.2.10.3.2. Resistencia debido a la presión

El flujo laminar y turbulento presentes en la capa límite sobre la superficie del cuerpo, dan lugar a una distribución de presiones a lo largo del cuerpo, al momento de tener un aumento de presiones en la dirección del flujo, la fuerza entre el fluido y el cuerpo aumenta, disminuyendo el flujo. (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014), se tiene:

$$F_{D,presión} = \int_s P * \text{sen}\psi. ds \quad Ec. (15)$$

En donde:

$F_{D, presión}$: Fuerza de arrastre debido a la presión (N)

P: Presión en el contorno de la superficie del cuerpo (Pa)

Ecuación de la fuerza de arrastre debido a la presión en función del coeficiente de arrastre:

$$F_{D,presión} = C_{D,presión} * \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad Ec. (16)$$

Cuando se conoce los coeficientes o las fuerzas de arrastre tanto de fricción como de presión, es posible determinar el coeficiente de arrastre o la fuerza total, entonces:

$$C_D = C_{D,fricción} + C_{D,presión} \quad Y \quad F_D = F_{D,fricción} + F_{D,presión} \quad Ec. (17)$$

1.2.10.4. Fuerza de sustentación

La sustentación es la componente de la fuerza total (debido a fuerzas de fricción y de presión) que actúa de manera perpendicular a la dirección del flujo, es decir tiende a empujar al cuerpo, si la fuerza tiende a levantar al objeto del piso se le conoce como sustentación positiva, por el contrario si el efecto es asentar dicho objeto la sustentación es negativa o anti sustentación.

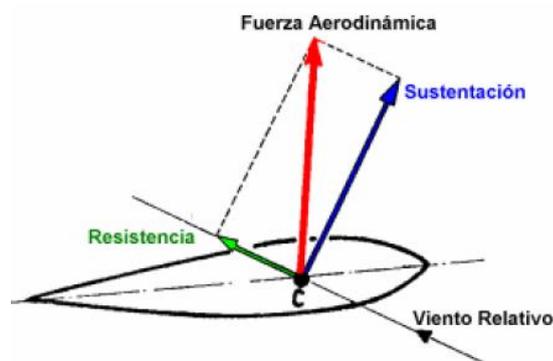


Figura.1.11. Fuerza de sustentación.

Fuente: (Campos López, 2008)

Ecuación para la fuerza de sustentación:

$$F_L = C_L * \frac{1}{2} \rho V^2 A \quad \text{Ec. (18)}$$

En donde:

F_L : Fuerza de sustentación (N)

C_L : Coeficiente de sustentación (adimensional)

V : Velocidad del vehículo. (m/s)

ρ : Densidad del aire (kg/m³)

A : Área frontal del vehículo (m²)

En algunos cuerpos delgados, como por ejemplo superficies de sustentación, el área A es la que se observa desde arriba en dirección normal al cuerpo.

1.2.10.5. Fuerza lateral

Generalmente cuando un vehículo circula a elevadas velocidades, puede estar expuesto a fuertes vientos laterales, a causa de esto el automóvil tiende a desviarse de su trayectoria. En el caso de un golpe repentino de viento lateral, en vehículos mal proyectados, pueden producirse importantes desplazamientos laterales y variaciones de dirección. (BOSCH, 2005)

1.2.11. Ecuaciones presentes en el movimiento de un fluido

1.2.11.1 Ecuación de Bernoulli

Es una relación aproximada entre la velocidad, la elevación y la presión. La ecuación o principio de Bernoulli describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Establece que en un fluido sin viscosidad y sin rozamiento en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee dicho fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. (Ortiz Flórez, 2011)

Por lo dicho anteriormente la ecuación de Bernoulli no puede ser aplicada en cualquier parte de un flujo únicamente en regiones no viscosas, es decir en sectores fuera de las capas límites y estelas, en donde el movimiento del fluido es regido por los efectos de la presión y la gravedad. (Cengel & Cimbala, 2006)

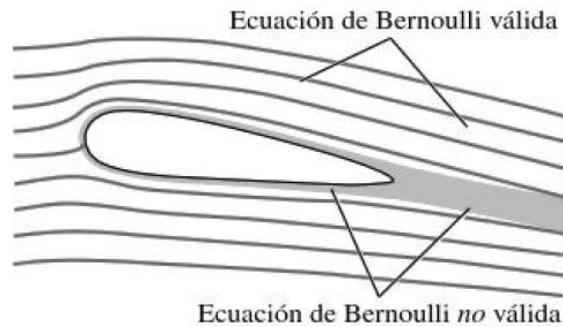


Figura.1.12. Regiones válidas de la ecuación de Bernoulli.

Fuente: (Cengel & Cimbala, 2006)

Teniendo en cuenta que la suma de la energía cinética, la potencial y de flujo de una partícula es constante, en el transcurso de una línea de corriente de un flujo estacionario, cuando los efectos de la compresibilidad y de la fricción son despreciables se tiene:

Energía potencial +Energía presión+Energía cinética = Constante

$$m \cdot g \cdot h + P \frac{m}{\rho} + m \frac{v^2}{2} = C \quad \text{Ec. (19)}$$

En donde: masa $m = \rho \cdot V$ por lo tanto:

$$\rho \cdot V \cdot g \cdot h + P \frac{\rho \cdot V}{\rho} + \rho \cdot V \frac{v^2}{2} = C \quad \text{Ec. (20)}$$

$$V \left(\rho \cdot g \cdot h + P + \rho \frac{v^2}{2} \right) = C \quad \text{Ec. (21)}$$

Como se trata de un fluido incompresible $V = \text{cte}$.

$$\rho \cdot g \cdot h + P + \rho \frac{v^2}{2} = C \quad \text{Ec. (22)}$$

En donde:

$\rho \cdot g \cdot h$: Energía potencial gravitacional.

P: Presión estática.

$\rho \frac{v^2}{2}$: Energía cinética con la que se desplaza el fluido.

C: Constante

1.2.11.2. Ecuaciones de Navier Stokes

“Las ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos, conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, fueron desarrolladas por el francés constructor de puentes Claude-Louis Navier y del matemático irlandés George Stokes.” (Rodríguez Núñez, 2006)

La ecuación de Navier Stokes es el pilar de la mecánica de fluidos, sin embargo es una ecuación que no puede ser aplicada en cualquier geometría. Es aplicable a fluidos newtonianos, es decir fluidos en donde el esfuerzo es directamente proporcional a la razón de deformación. En el movimiento de un fluido aparecen dos tipos de flujo el laminar y el turbulento, en donde empezando en un flujo laminar y aumentando la velocidad se llega a un estado de inestabilidad dinámica. De esta manera la trayectoria de las partículas es desviada de su línea de corriente debido principalmente a la inestabilidad producida por las fuerzas viscosas, las ecuaciones de Navier Stokes permiten estudiar este fenómeno. Entonces:

$$\begin{aligned} \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \nabla^2 \cdot u_x \\ \frac{dv_x}{dt} &= -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \cdot \nabla^2 \cdot u_x \\ \frac{dv_z}{dt} &= -g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \cdot \nabla^2 \cdot u_z \end{aligned} \quad \text{Ec. (23)}$$

En donde:

dv/dt : Tasa de variación de la velocidad con respecto al tiempo (m/s^2)

ν : Viscosidad cinemática (m^2/s)

g : Gravedad ($9.81m/s^2$)

∇^2 : Operador laplaciano

Operador laplaciano:

Coordenadas cartesianas:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{Ec. (24)}$$

Coordenadas cilíndricas:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \quad \text{Ec. (25)}$$

1.2.11.3. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad o de conservación de la masa, establece que la variación de la masa contenida en un volumen fluido es nula con respecto al tiempo. (Barrero Ripoll & Perez-Saborid Sánchez-Pastor, 2005). La ecuación de continuidad es:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{Ec. (26)}$$

En donde:

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$: Variación con el tiempo de la masa contenida en la unidad de volumen ($kg/m^3.s$)

o variación de la densidad con respecto al tiempo.

$\nabla \cdot (\rho v)$: Flujo de masa que abandona la unidad de volumen.

Cuando se trata del movimiento estacionario de gases, la ecuación de continuidad es:

$$\nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad \text{Ec. (27)}$$

Para líquidos al ser fluidos incompresibles en la mayoría de los casos por lo tanto la densidad es constante se tiene:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad \text{Ec. (28)}$$

En donde $(\nabla \cdot v)$ es la velocidad de dilatación cúbica unitaria.

1.2.11.4. Ecuación de cantidad de movimiento

El principio de conservación de la cantidad de movimiento o segunda ley de Newton ($F=m.a$), con aplicación al flujo de un fluido establece que la variación de su cantidad de movimiento con respecto al tiempo es igual a la resultante de todas sus fuerzas tanto de superficie y masa que actúan sobre dicho fluido. (Barrero Ripoll & Perez-Saborid Sánchez-Pastor, 2005). Entonces se tiene:

$$F = \frac{\partial n}{\partial t} + n \quad \text{Ec. (29)}$$

En donde:

$\frac{\partial n}{\partial t}$: Tasa de cambio de la cantidad de movimiento del fluido,

n : Cantidad de movimiento del fluido en un volumen contenido (kg.m/s)

1.2.12. Turbulencia

El régimen turbulento se caracteriza por un campo de velocidades extremadamente irregular y fluctuante, que se origina cuando el número de Reynolds supera un cierto valor crítico. En el flujo turbulento, la velocidad del fluido en un determinado punto está continuamente oscilando. (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014). En la figura 1.13 se observa un ejemplo de flujo turbulento.



Figura.1.13. Flujo turbulento.

Fuente: (González Santander Martínez & Castellano Estornell, 2014)

1.2.12.1. Modelado de la turbulencia

Los modelos de turbulencia son procedimientos numéricos que relacionan los valores medio de las fluctuaciones con los valores promedio de las variables, de tal manera que sea posible resolver las ecuaciones de gobierno. Entonces un modelo de turbulencia será adecuado en un software CFD si posee una alta precisión, sencillez y sobre todo que sea económico. (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009). Se tiene los siguientes modelos:

- Modelo K- ϵ .
- Modelo RNG.
- Modelo K-omega.

1.2.12.1.1 Modelo k-epsilon (k-ε)

Se trata de una alternativa numérica que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes con gran exactitud. El modelo k-ε, es un modelo de viscosidad turbulenta, en donde, el coeficiente de viscosidad turbulenta se modela localmente como una función de la energía cinética turbulenta k, y de la tasa de disipación de energía cinética turbulenta ε. (Barrero Ripoll & Perez-Saborid Sánchez-Pastor, 2005)

Ventajas y desventajas del modelo K-ε: (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009):

Ventajas:

- Es posible obtener resultados bastante exactos para una gran cantidad de flujos.
- En la industria automotriz es el modelo de turbulencia que más se emplea.
- Únicamente es necesario establecer las condiciones iniciales de operación y las de contorno.

Desventajas:

- Se requiere un tiempo de iteración considerablemente mayor.
- Los resultados obtenidos para flujos confinados y flujos con grandes gradientes longitudinales son poco satisfactorios.

1.2.12.1.2. Modelo RNG

Es empleado para determinar la formación de vórtices, comportándose adecuadamente en flujos con gradientes de presión adversos. Además permite tener en cuenta los efectos de un bajo número de Reynolds, presenta el inconveniente de que es necesaria una configuración de leyes de pared, lo que se transforma en un incremento del costo computacional. (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009)

1.2.12.1.3. Modelo k-omega

Se trata de uno de los modelos de turbulencia más empleados. Es un modelo de dos ecuaciones, es decir, trabaja con dos ecuaciones de transporte adicionales para representar las propiedades de turbulencia del flujo. La primera es la energía cinética turbulenta (k) es la ϵ y la segunda es la disipación específica. (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014)

1.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

Tiene como objetivo la simulación del flujo de fluidos y los procesos de transferencia de calor. Se basa en la utilización de métodos numéricos para resolver ecuaciones que describen la conservación de la masa, el momento y la energía en el seno de un fluido (C. A. Barazal, 2002)

Los paquetes comerciales CFD tratan de proporcionar interfaces amigables para el modelado de las geometrías y la introducción de los parámetros de resolución. Habitualmente, suelen incorporar también un módulo adicional para facilitar el análisis y la presentación de resultados, siguiendo una estructura de tres procesos los cuales son: (Fernández, 2012)

- Pre-proceso
- Solver
- Post-proceso

1.3.1. Pre-proceso

Aquí se introducen los datos de entrada para la resolución en donde se puede encontrar:

- Definición de la geometría a modelizar: el dominio computacional

- Generación de la malla o división del dominio en un número suficiente de celdas o elementos que no se superpongan y que cubran toda la geometría
- Identificación de los fenómenos físicos y químicos que pretenden modelarse
- Definición de las propiedades del fluido (o fluidos)
- Especificación de las condiciones iniciales y de contorno del problema

1.3.2. Solver

Constituye la parte central del programa de resolución y es el encargado de resolver de forma iterativa las ecuaciones que se han activado previamente en el pre-proceso (los modelos) (Fernández, 2012)

1.3.3. Post-proceso

Es un módulo que cuenta con herramientas gráficas que permiten analizar los resultados esta incluye:

- Representación gráfica del dominio y la malla
- Mapas de contornos de las variables y plotado de vectores y líneas de corriente
- Gráficas y distribuciones
- Gráficas de superficies bidimensionales y tridimensionales
- Animaciones y exportación e resultados a otros formatos

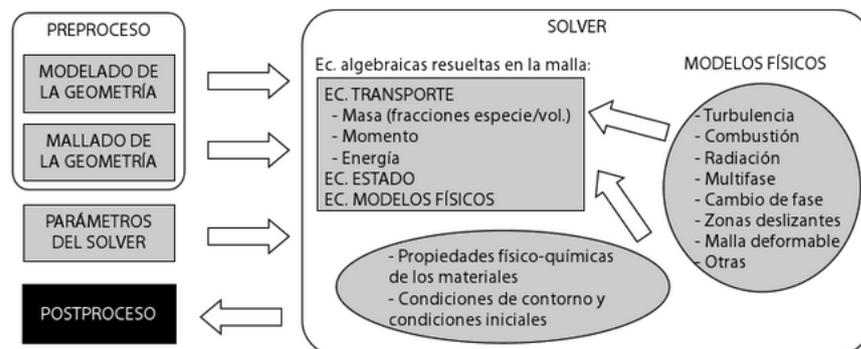


Figura.1.14. Estructura de un código CFD comercial.

Fuente: (Fernández, 2012)

1.3.4. Discretización

La aproximación de una variable continua en un número finito de puntos se llama discretización (Sánchez Vásques, 2004)

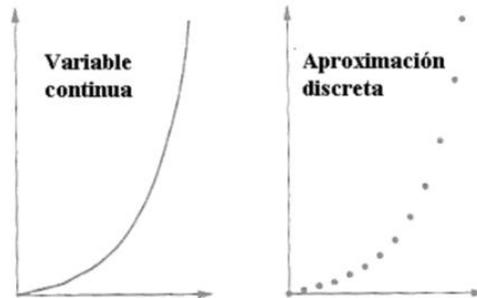


Figura.1.15. Discretización de variables.

Fuente: (Sánchez Vásques, 2004)

1.3.4.1. Discretización espacial

Es el primer paso en la aplicación de la dinámica de fluidos computacional en donde se pueden dividir en tres categorías principales:

- Diferencias finitas
- Volúmenes finitos
- Elementos finitos

1.3.5. Mallado estructurado

Cada punto de la malla esta inequívocamente identificado las celdas de la malla son cuadriláteros en 2-D y hexaedros en 3-D

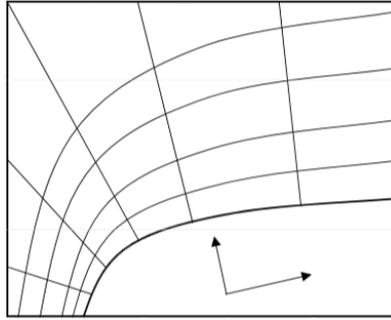


Figura.1.16. Malla estructurada.

Fuente: (Tizón, 2010)

1.3.6. Mallado no estructurado

Las celdas y los nodos de la malla no tienen un orden particular es decir las celdas o nodos cercanos a uno dado, no pueden identificarse directamente, los elementos de malla en este caso son una mezcla de cuadriláteros y triangulares en 2-D y tetraedros y hexaedros en 3-D en la figura 1.16 y 1.17 se puede apreciar la diferencia de una malla estructurada y no estructurada.

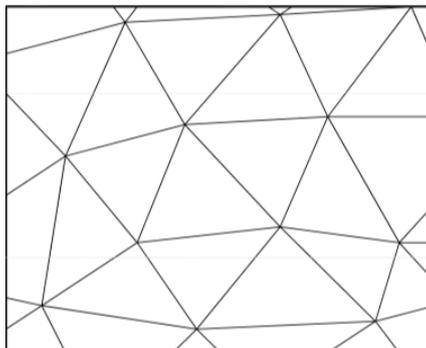


Figura.1.17. Malla no estructurada.

Fuente: (Tizón, 2010)

1.3.7. Convergencia

Se dice que un resultado converge cuando la diferencia de sus iteraciones tienden a cero, dado que nunca se llega a obtener una diferencia de cero, es importante establecer un criterio de convergencia o bien un número máximo de iteraciones, para

optimizar los tiempos de cálculo que se dice aceptable con un valor 10^{-4} , es así que en la figura 1.18a se puede observar que mientras aumenta el número de iteraciones estas se aproximan cada vez más al resultado y que de igual manera en la figura 1.18b. se aprecia que al aumentar las iteraciones el residuo disminuye hasta un valor aceptado. (Del Corral, Trejo, & Valle, 2008)

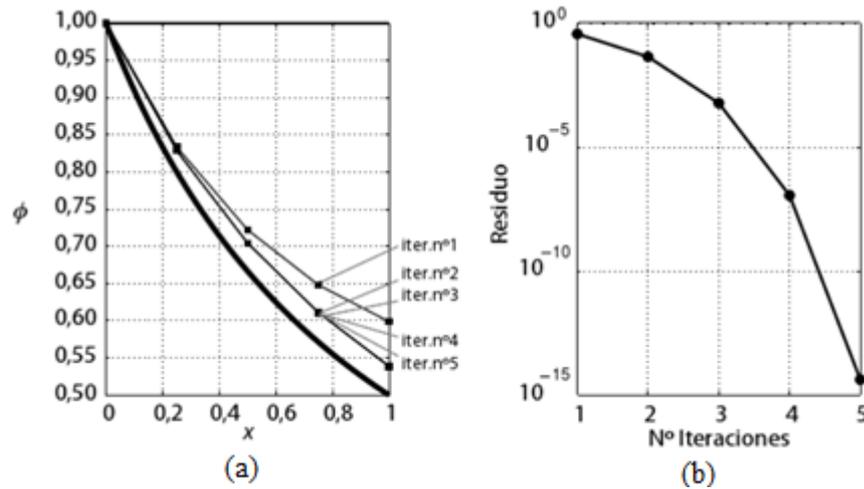


Figura.1.18. Convergencia de la Solución - Evolución del Residuo.

Fuente: (Fernández, 2012)

1.4 Materiales Compuestos

Se define como material compuesto todo sistema o combinación de materiales constituido a partir de una unión (no química, insolubles entre sí) de dos o más componentes, que da lugar a uno nuevo con propiedades características específicas, no siendo estas nuevas propiedades ninguna de las anteriores. (Besednjak Dietrich, 2005)

En la figura 1.19 se puede identificar la composición de un material compuesto que está conformado por dos fases: una continua, constituida por la matriz, y otra fase discontinua denominada refuerzo.

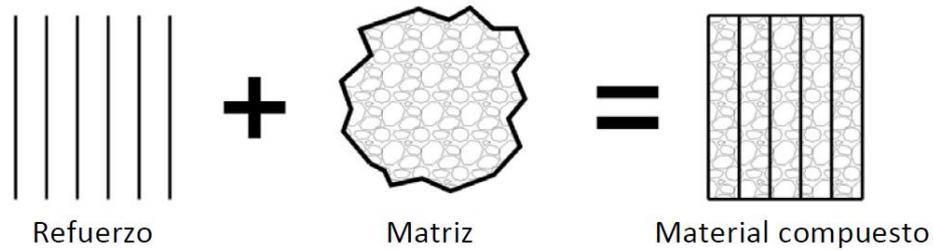


Figura.1.19. Configuración básica de un material compuesto.

Fuente: (Cedeño, y otros, 2011)

1.4.1. Matriz

Es la fase continua la cual engloba y sostiene los elementos de refuerzo otorgando consistencia y continuidad al material además tiene funciones como: (Cedeño, y otros, 2011)

- Aglutinar los refuerzos.
- Transferir las cargas aplicadas sobre la matriz hacia los refuerzos.
- Proteger la superficie de los refuerzos de la abrasión mecánica.
- Proveer al refuerzo de una barrera contra los efectos del medio ambiente.
- Si el refuerzo es de fibras la matriz debe proveer soporte lateral contra la posibilidad de pandeo bajo cargas de compresión.

Existen tres tipos de matriz:

1.4.1.1. Matriz metálica

Han sido desarrollados principalmente para componentes aeroespaciales u motores de automoción, poseen alta resistencia y muy bajo peso. (Cedeño, y otros, 2011)

1.4.1.2. Matriz cerámica

Son más resistentes y mejoran las propiedades mecánicas como la resistencia y tenacidad de los materiales cerámicos tradicionales especialmente a bajas temperaturas. (Cedeño, y otros, 2011)

1.4.1.3. Matriz polimérica

Poseen buenas propiedades mecánicas, resistentes a la corrosión y a los agentes químicos, además pueden ser moldeados con absoluta libertad de formas. (Cedeño, y otros, 2011). Existen tres tipos de matrices poliméricas:

- **Termoplástica:** pasan al estado líquido cuando son calentadas lo que les permite ser recicladas, algunos ejemplos son polietileno (PE), polipropileno (PP), policloruro de vinilo (PVC) y polietilen-tereftalato (PET).
- **Termoestables:** tienen múltiples enlaces entrecruzados en una estructura de red tridimensional, su reacción química generalmente no es reversible, al calentarse estos no se funden, sino que empiezan a degradarse, algunos ejemplos son: resina poliéster, epoxi y fenólicos.
- **Elastómeras:** tienen una zona elástica grande y pueden estirarse hasta cinco o seis veces su longitud original, sin embargo sus módulos de elasticidad son bajos. El caucho pertenece a este grupo.

1.4.2. Refuerzo

Es la fase discontinua su papel es mejorar las características de la matriz, además soporta la carga y que también aporta con propiedades al material compuesto como conductividad eléctrica o aislamiento, estabilidad térmica, propiedades estructurales, además los refuerzos pueden ser partículas, fibras o elementos estructurales. (Cedeño, y otros, 2011)

1.4.3. Fibras

Es un material compuesto presenta dos elementos principales: fibra y matriz. La combinación adecuada de estos componentes origina unos materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. (Miravete, 2012)

La fibra es el compuesto de refuerzo del material compuesto. Aporta resistencia mecánica, rigidez y dureza. (Miravete, 2012)

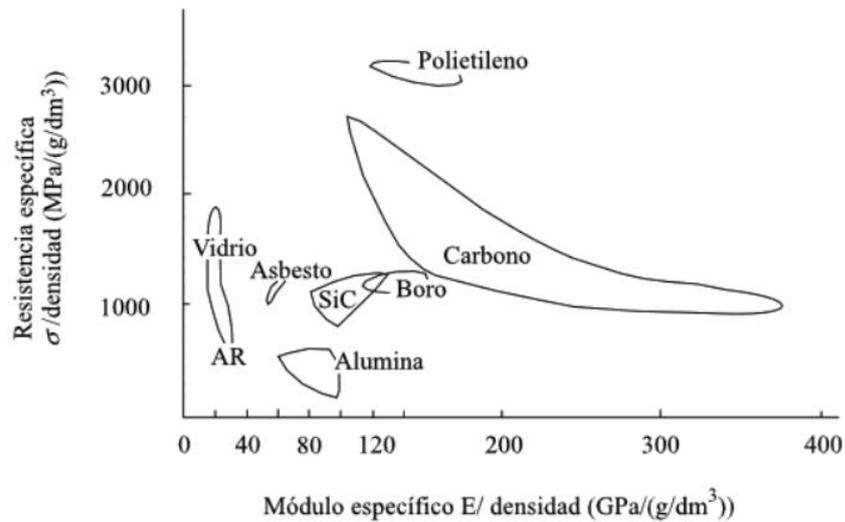


Figura.1.20. Características específicas de diferentes fibras.

Fuente: (Miravete, 2012)

1.4.4. Fibra de Vidrio

Es una fibra de origen mineral además está formada fundamentalmente por sílice, que se asocia a diversos óxidos (alúmina, alcalinos y alcalinotérreos) y se obtiene por fusión de mezcla de la mezcla de estas materias. (Miravete, 2012). Además posee características como:

- Resistencia mecánica, siendo su resistencia específica(tracción/densidad) superior a la del acero
- Incombustibilidad, no propaga la llama ni origina con el calor humos ni toxicidad
- Excesiva flexibilidad
- Bajo coste

1.4.5. Tipos de fibra de vidrio

1.4.5.1. Vidrio E (Eléctrico)

Representa casi la totalidad del vidrio textil utilizado en materiales compuestos con más del 90% utilizado es aislamiento de conductores eléctricos sometidos a altas temperaturas (Miravete, 2012)

1.4.5.2. Vidrio A (Alto contenido en álcali)

Es menos resistente y tiene el módulo de elasticidad más bajo que los otros tipos de vidrios, presenta gran resistencia química. (Miravete, 2012)

1.4.5.3. Vidrio R o S (Resistencia)

Empleado en estructuras de elevadas características mecánicas (aeronáutica sobre todo), tiene una resistencia a la tracción y un módulo de elasticidad muy superior a los otros tipos de vidrio posea buena resistencia a la fatiga, temperatura y humedad. (Miravete, 2012)

Tabla 1-1. Propiedades de distintos tipos de fibra de vidrio

Tipo	Vidrio A	Vidrio E	Vidrio S	Vidrio R
Diámetro de hilo (μm)	5-13	10-20	10	10
Densidad (Kg/m^3)	2500	2580	2480	2590
Módulo de elasticidad (GPa)	69	72,5	86	85
Resistencia a tracción (GPa)	3,1	3,4	4,59	3,4-4,4
Módulo específico	28	28	34	33
Coefficiente expansión térmica ($10^{-6}/^\circ\text{K}$)	8,6	5	5,1	5

Fuente: (Miravete, 2012)

1.4.6. Moldes

Cuando se trabaja con materiales compuestos, la etapa de diseño del molde adquiere una relevancia especial debido a que la eficiencia de la producción dependen los costos de fabricación. Por lo tanto de un acertado diseño del molde dependerá en gran medida el éxito o fracaso del producto. (Besednjak Dietrich, 2005)

1.4.6.1. Clases de moldes

La elección del tipo de molde dependerá de que zona de la pieza sea la que debe recibir un buen acabado, además teniendo en cuenta que los laminados de fibra de vidrio solo tienen una de sus caras con acabado liso y esta será la que permaneció en contacto con el molde durante el proceso de fabricación, atendiendo a una clasificación acerca de cuál superficie debe ser la de acabado superficial los moldes se dividen en dos grandes grupos:

- **Moldes machos:** reproducen superficies lisas en su cara interior
- **Moldes hembras:** reproducen superficies lisas en su cara exterior

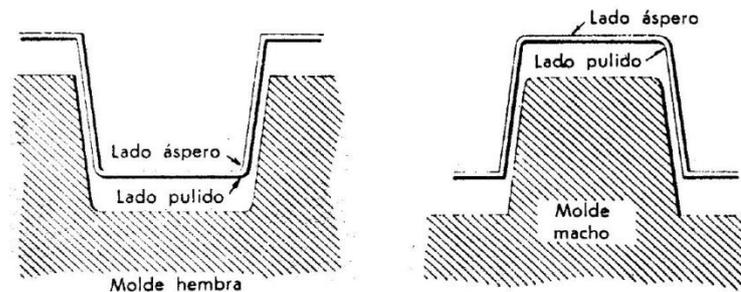


Figura.1.21. Tipos de moldes.

Fuente: (Besednjak Dietrich, 2005)

1.4.6.2. Diseño del molde

Es una tarea sumamente especializada esto supone acciones muy variadas a realizar durante esta etapa y que podría resumirse en:

1.4.6.3. Selección del material del molde

Esto se define por número de unidades a producir, la geometría de la pieza y el coste de los materiales, si se quiere producir en series elevadas normalmente los moldes se realizan en los mismos materiales compuestos que se utilizarán en la construcción de las piezas, en cambio si lo que se desea es una producción bajo o incluso construir una sola unidad, los moldes se pueden construir en madera, las desventajas de este tipo de moldes es que son susceptibles a ser atacados por agentes atmosféricos por lo que su duración es limitada además presentan limitaciones en desarrollar formas complejas. (Besednjak Dietrich, 2005)

1.4.6.4. Espesor de molde recomendado

Los espesores de pared de los moldes deben ser lo más reducidos ya que esto repercute en la cantidad de material a utilizar así como el tiempo de fabricación, no obstante estos deben presentar cierta rigidez evitando así deformaciones en la pieza a fabricar, excesivo espesor en el molde pueden provocar enfriamiento irregular de la pieza debido a la conductividad térmica de los mismos generando distorsiones y alabeos, además deben presentar uniformidad de espesor en el molde caso contrario esto genera marcas de contratación en las piezas o genera tensiones internas debido a la diferencia en los tiempos de enfriamiento en diferentes sectores del molde. (Besednjak Dietrich, 2005)

1.4.6.5. Consideraciones sobre pliegues y cantos

Los pliegues y cantos deben ser de los radios más amplios posibles, siempre y cuando no modifiquen la geometría de la pieza, esto debido a que en dichas zonas se producen concentraciones de tensiones que pueden provocar la rotura de la pieza. (Besednjak Dietrich, 2005)

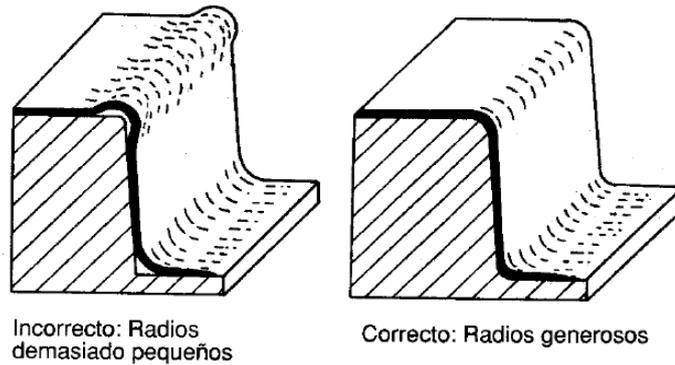


Figura.1.22. Consideraciones de pliegues y cantos.

Fuente: (Besednjak Dietrich, 2005)

1.4.6.6. Gradiente de desmolde

Las contracciones que se producen en las piezas dentro de los moldes suelen ser diferentes a las que sufren los moldes, para evitar que las piezas queden aprisionadas dentro de los moldes, estos deben dotarse con pendientes y conicidades que permitan un desmolde simple sin excesiva fuerza como se puede observar en la figura 1.23. (Besednjak Dietrich, 2005)

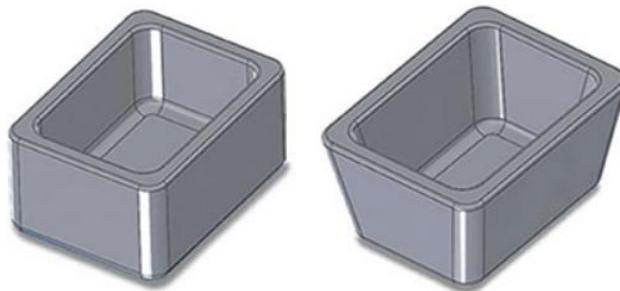


Figura.1.23. Diferencia entre un molde sin gradiente de desmolde y con gradiente de desmolde.

Fuente: (Labs, 2015)

1.5. Estado del arte

A continuación se revisará algunos trabajos realizados sobre la carrocería por equipos participantes en la competencia Shell Eco Marathon en ediciones anteriores.

El equipo de la Universidad de Valencia realizó una carrocería cuyo material fue fibra de carbono, con el objetivo de disminuir peso. La forma geométrica que consideraron fue la de una gota de agua, ya que es, la que mejor características aerodinámicas presenta, sin embargo, mencionan que no posee la forma de gota perfecta, ya que, fue necesario realizar ciertas modificaciones para disponer del espacio necesario tanto para piloto como de elementos internos del vehículo, además las ruedas se encontraban totalmente cubiertas. Realizaron simulaciones con un software CFD para determinar los coeficientes, para esto consideraron dos velocidades diferentes una de 9m/s obteniendo un coeficiente de arrastre $C_d=0.289$ con una fuerza de resistencia al avance de $F=4.27N$ y otra de 14m/s generando un $C_d=0.287$ con una $F=10.29N$. Además verificaron que la diferencia de presión entre la parte alta y baja del vehículo no sea considerable, con el fin de evitar sustentación negativa. (Martínez Sánchez, 2010)



Figura.1.24. Prototipo Universidad de Valencia.

Fuente: (Martínez Sánchez, 2010)

Un equipo de la Florida International University, desarrolló una carrocería en donde no buscaban características aerodinámicas altas, así como tampoco estéticas, simplemente que sea liviana utilizando fibra de carbono para su fabricación y que posea la menor resistencia al viento obteniendo un $C_d=0.15$ y fuerza de resistencia por acción del viento de $F= 1.64N$, análisis realizado con una velocidad de 5m/s. (Cabrera, Francisque, & Synalovski, 2015)



Figura.1.25. Prototipo de la Florida International University (2015).

Fuente: (Cabrera, Francisque, & Synalovski, 2015)

Otro equipo de la Florida International University, trabajó en una carrocería que inicialmente planteaban una geometría en forma de gota de agua, pero que debido a problemas como falta de espacio para el piloto, los elementos del vehículo, e inconvenientes constructivos, como por ejemplo: que las ruedas chocaban con la carrocería al momento del giro, les hizo cambiar la forma prevista. No mencionan el valor de C_d obtenido pero si comentan que el peso total del vehículo fue de 50Kg y todo gracias al empleo de la fibra de carbono. (Acosta, Betancourt, & Pinheiro, 2012)



Figura.1.26. Prototipo de la Florida International University (2012).

Fuente: (Acosta, Betancourt, & Pinheiro, 2012)

El equipo PAC-CAR II, trabajó exhaustivamente en el desarrollo de su carrocería, analizando en profundidad la parte de ergonomía y aerodinámica, empleando un programa CFD y equipos como túnel de viento. Trabajaron en cuatro propuestas hasta alcanzar los resultados deseados, obteniendo una forma de lágrima como lo llama el equipo. En el análisis aerodinámico realizado a una velocidad de 30km/h obtuvieron un $C_d=0.075$ con un área frontal de $0.254m^2$ y un peso total del vehículo

de 32kg gracias al empleo de la fibra de carbono. Cabe mencionar que en el 2007 el valor de C_d obtenido les hizo ganadores al premio ECARA (European car aerodynamics research association) (Santin J.-J. , y otros, 2007)



Figura.1.27. PAC-CAR II.

Fuente: (Santin J.-J. , y otros, 2007)

CAPÍTULO II

MODELADO DE CARROCERÍA.

2.1 Requerimientos previos

Antes de realizar los primeros bosquejos es necesario tener un ensamblaje del chasis con todos los sistemas complementarios, además de contar con un maniquí que simule la posición de conducción del piloto como se observa en la imagen 2.1.

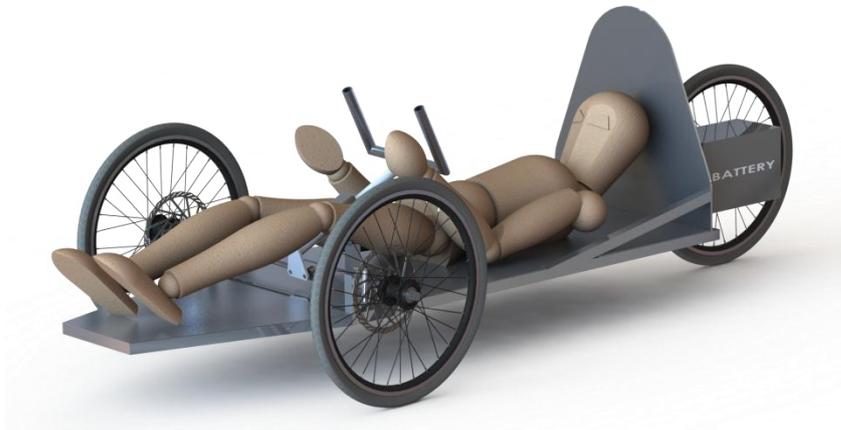


Figura. 2.1 Emsamble de chasis con sistemas complementarios.

2.2 Condiciones de diseño generales

Las condiciones de diseño se enfocan en los siguientes aspectos:

- Cumplir el Reglamento de la competencia Shell Eco Marathon.
- Diseñar una carrocería lo más liviana posible.
- Diseñar una carrocería aerodinámica.
- Diseñar parabrisas y ventanas que permitan al piloto tener una buena visibilidad.
- Diseñar accesos cómodos tanto para el ingreso del piloto así como para la operación de los elementos del tren motriz.

2.2.1 Reglamento de Shell Eco Marathon

Los siguientes enunciados son relacionados con la carrocería en los cuales tratan temas de seguridad, visibilidad, dimensiones, recomendaciones y prohibiciones, entonces:

- Durante el diseño del vehículo y la construcción los equipos deben prestar atención en todos los aspectos de seguridad. (Shell Eco Marathon, 2016)
- Apéndices aerodinámicos los cuales se ajusten o cambien de forma con el viento con el vehículo en movimiento están prohibidos. (Shell Eco Marathon, 2016)
- Las carrocerías no deben poseer ningún apéndice externo que resulte peligrosa para otros miembros del equipo, los puntos afilados deben tener un radio de 5cm o más, alternativamente estos pueden estar hechos de espuma o algún material deformable similar. (Shell Eco Marathon, 2016)
- Los paneles de la carrocería deben tener una rigidez adecuada que no estén propensos a cambiar de forma debido al viento. (Shell Eco Marathon, 2016)
- Las ventanas no deben estar fabricadas de materiales que al romperse deje fragmentos afilados se recomienda materiales de policarbonato. (Shell Eco Marathon, 2016)
- Cualquier tapa del compartimiento del motor, transmisión, batería debe ser fácil de abrir para una inspección rápida. (Shell Eco Marathon, 2016)
- Todos los vehículos deben de ser totalmente cubiertos, vehículos abiertos no están permitidos, vehículos que parezcan bicicletas, triciclos o silla de ruedas no son aceptados

2.2.2 Dimensiones

- La máxima altura tiene que ser menor de 100cm (Shell Eco Marathon, 2016)
- El ancho máximo del vehículo no debe exceder los 130 cm. (Shell Eco Marathon, 2016)
- El radio de la altura máxima dividido para el ancho de vía debe de ser menos que 1.25. (Shell Eco Marathon, 2016)
- El largo total no debe exceder los 350 cm. (Shell Eco Marathon, 2016)

- El peso máximo sin conductor es de 140 Kg. (Shell Eco Marathon, 2016)

2.2.3 Forma base para carrocería

Para la selección de la forma base se realizó un estudio de los equipos ganadores de cada sede buscando una forma base que se acople a nuestros requerimientos.

El Equipo Tu Fast Eco Team fue el ganador de la edición europea 2015 una de sus características principales son chasis en monocasco de fibra de carbono y un peso del prototipo eLi15 de apenas 25 kg sin piloto, como se puede observar en la figura 2.2 la altura de la carrocería con respecto al suelo es elevada, además la cubierta de los neumáticos son un elemento separado de la carrocería.



Figura. 2.2 Prototipo eLi15.

Fuente: (Tu Fast Eco Team, 2015)

El equipo NSTRU Eco-Racing fue el ganador de la edición asiática 2015 al igual que el equipo alemán es un chasis monocasco de fibra de carbono de igual manera las ruedas están dentro de la carrocería y su altura con respecto al suelo es mínima.



Figura. 2.3 Prototipo electrico ganador de la sede asiatica.

Fuente: (NSTRU Eco-Racing, 2015)

El equipo Mater Dei Súper millague fue el ganador de la edición americana 2015 su chasis no es monocasco como de los anteriores equipos y su carrocería es de fibra de vidrio, su altura con respecto al suelo es mínima además sus neumáticos está en el interior de la carrocería



Figura. 2.4 Prototipo electrico ganador de la sede americana.

Fuente: (Mater Dei Super Millague Team, 2015)

Como se pudo observar la forma de la carrocería del equipo europeo y asiático es similar, la gran diferencia se da en la altura del prototipo, en el caso del equipo americano su forma difiere en gran media con la de los otros dos equipos, es así que como se mencionó en el capítulo I en la figura 1.9 se debería intentar diseñar con un perfil de un cuerpo aerodinámico o semi-aerodinámico para intentar obtener un bajo coeficiente aerodinámico.

2.2.4. Altura con respecto al suelo

Este es un aspecto al que hay que tomar muy en cuenta, ya que, una altura muy reducida va a provocar un comportamiento como un tubo Venturi y según la ecuación de Bernoulli la velocidad aumenta en una sección reducida pero a su vez la presión disminuye lo que provoca una sustentación negativa o en su anglicismo *downforce* que es un efecto que no se desea en vehículos de alta eficiencia energética los valores recomendados están entre 0.15m a 0.25m (Santin J. , y otros, 2007), el valor escogido fue de 0.16m (figura 2.5).

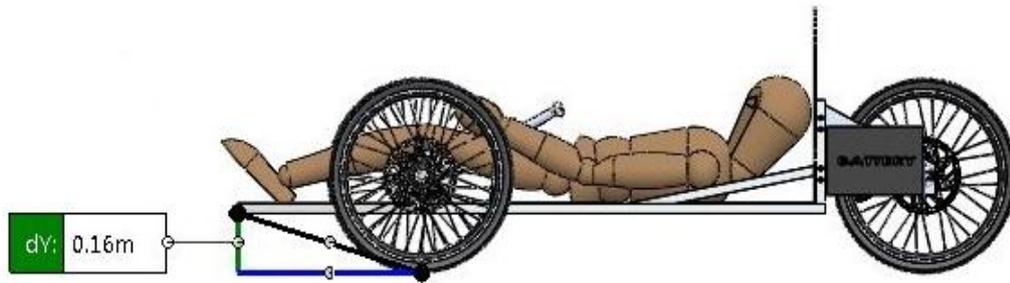


Figura. 2.5 Altura con respecto al suelo.

2.3 Propuesta 1

La primera propuesta es una carrocería que cubra los neumáticos delanteros. En la figura 2.6 se observa el perfil superior que intenta asemejarse a un perfil aerodinámico además su largo total es de 2600mm y su sección más ancha es de 1120mm.

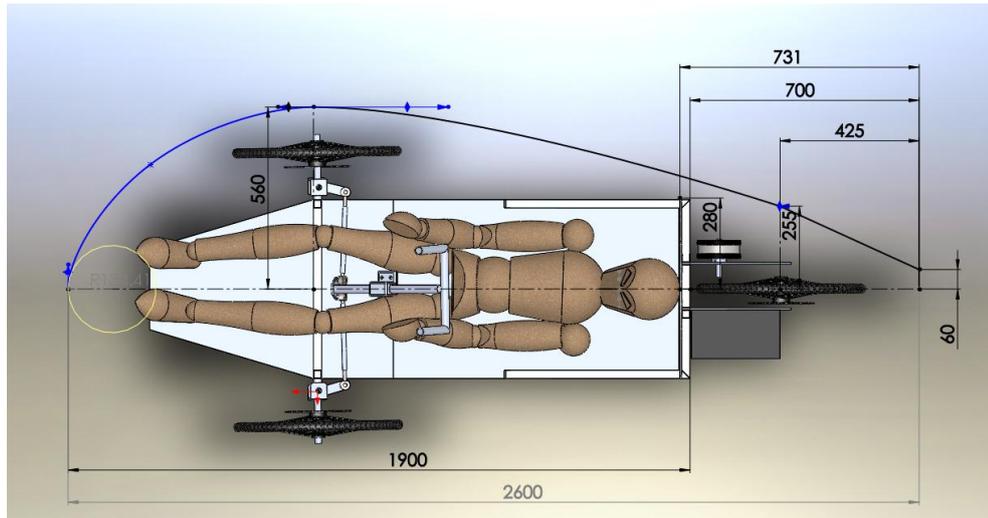


Figura. 2.6 Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 1.

El perfil lateral se intentó asemejar a un cuerpo semi aerodinámico en la figura 2.7 podemos observar el perfil que se plantea y su altura máxima es de 741mm.

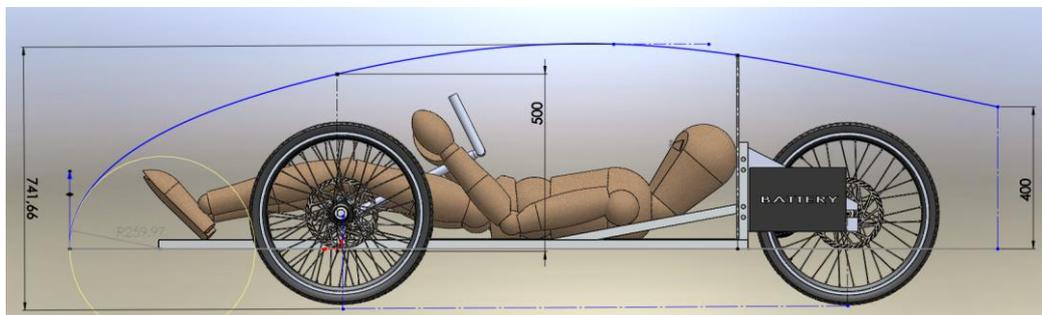


Figura. 2.7 Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 1.

Una vez que se poseen los perfiles que formarán la carrocería se generó el modelo, en la figura 2.8 podemos ver el resultado final.



Figura. 2.8 Modelo final de propuesta 1.

2.3.1 Visibilidad

Para este apartado el reglamento cita lo siguiente: “el piloto debe tener un arco de visibilidad directa hacia adelante y de 90° en cada lado del eje longitudinal del vehículo, este campo de visión se deberá de lograr sin ayuda de ningún dispositivo óptico o electrónico, el movimiento de la cabeza del conductor para lograr un arco de visión completo está permitido”. (Shell Eco Marathon, 2016)

Además en la inspección técnica la visibilidad será evaluada usando conos de 60 cm de alto, los cuales estarán separados cada 30° en un medio círculo que tendrá un radio de 4m en frente del vehículo (Shell Eco Marathon, 2016)

Teniendo en cuenta el reglamento se diseñó un parabrisas delantero y dos ventanas laterales, en la figura 2.9 se observa que desde la línea de los ojos del piloto se trazó líneas separadas 30° esto con el fin de encontrar los puntos de corte con la carrocería para el diseño del parabrisas y las ventanas laterales.

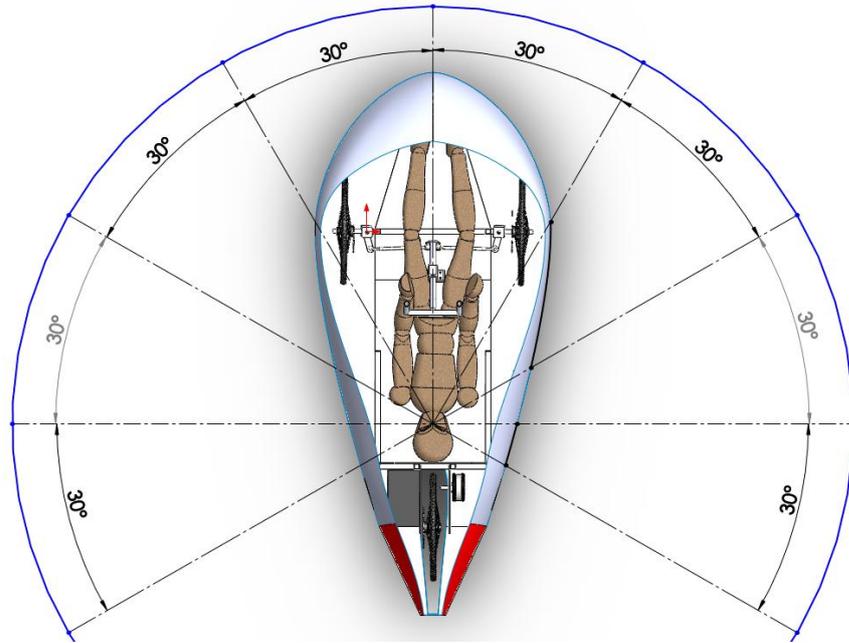


Figura. 2.9 Campo de visión horizontal.

Ademas se considero el campo de vision vertical como se muestra en la figura 2.10 desde la linea de los ojos se trazo dos lineas las cuales son el campo de vision vertical teniendo en cuenta la altura de los conos de la revision tecnica obteniendo finalmente un angulo total de 15°.

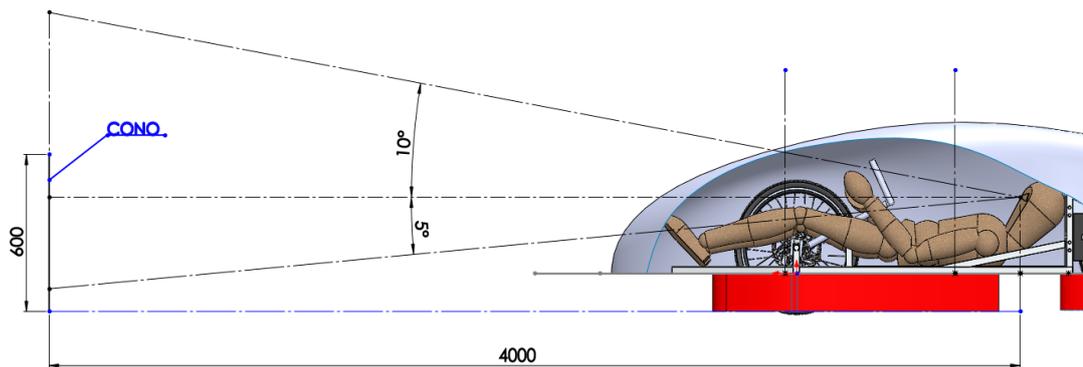


Figura. 2.10 Campo de vision vertical.

Determinado el campo de visión lateral y vertical se procedió al diseño del parabrisas y ventanas laterales, el resultado final se observa en la figura 2.11



Figura. 2.11 Modelado final de parabrisas y ventanas de propuesta 1.

2.3.2 Prueba de visibilidad

Para realizar la prueba se modelo un cono de 600 mm de altura el cual se lo dividió en cuatro secciones de 150 mm, alternando los colores rojo y tomate.

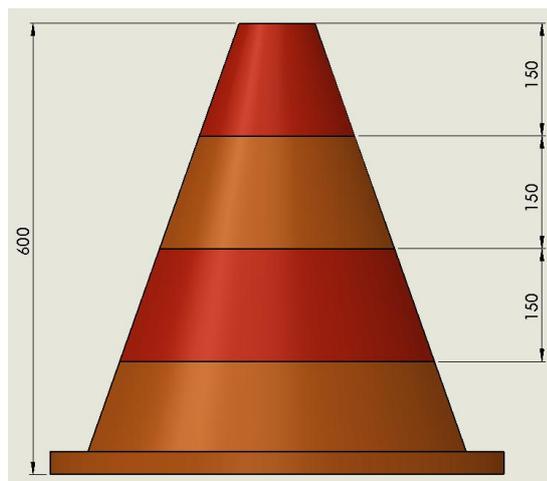


Figura. 2.12 Dimensiones de cono para pruebas.

Se realizó una simulación de la visibilidad poniendo los conos a 30° de separación. En la figura 2.13 se observa la visibilidad desde la cabina del piloto, los conos a 30° son obstaculizados parcialmente por los neumáticos pero no representa mayor inconveniente en la visibilidad.



Figura. 2.13 Prueba de visibilidad a 0°

En la figura 2.14 a la cabeza del piloto se le ha dado un ángulo de 60° teniendo una visibilidad de los conos situados a 30°, 60° y 90°.

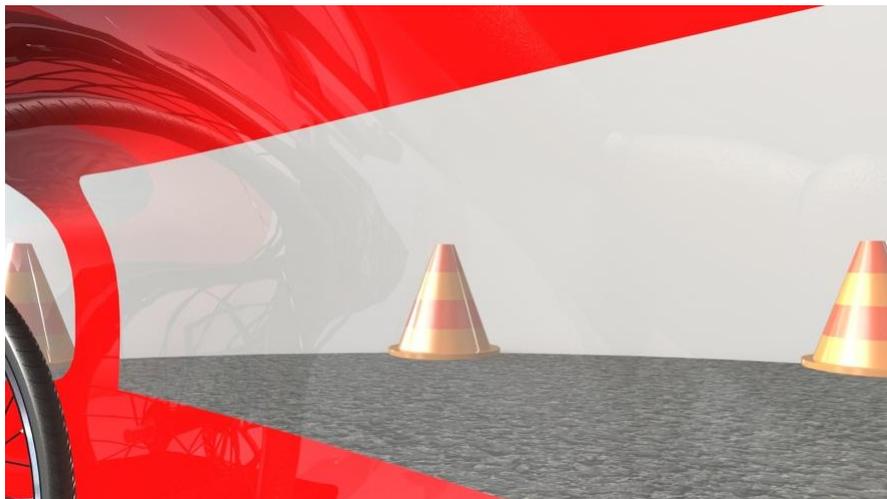


Figura. 2.14 Prueba de visibilidad a 60°.

2.3.3 Retrovisores

La elección de los retrovisores se lo hizo garantizando una buena visibilidad posterior además de cumplir con el reglamento solicita un retrovisor izquierdo y derecho con un área mínima de 25 cm².

Para lo cual se escogió retrovisores con espejos convexos ya que estos brindan un mayor ángulo de visión con respecto a un espejo plano esta diferencia se puede observar en la figura 2.15

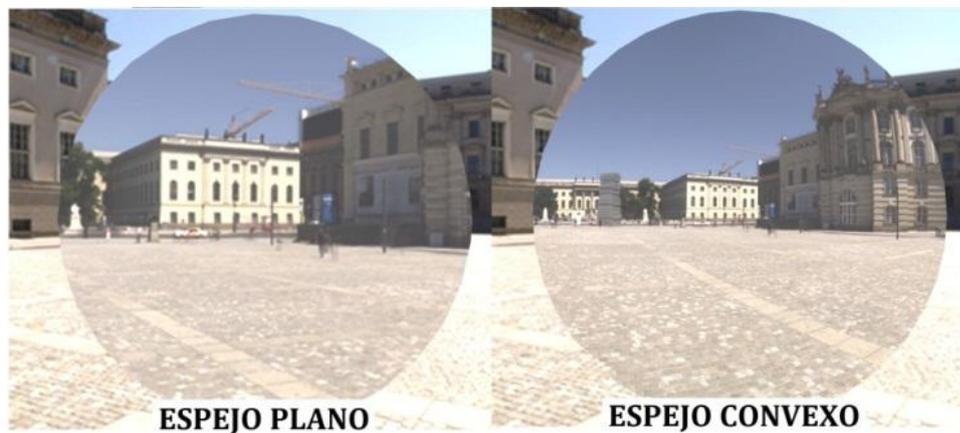


Figura. 2.15 Diferencia entre espejo plano convexo.

Para lo cual se adquirió retrovisores redondos de espejo convexo los cuales tienen una área de visión de 196 cm² (figura 2.16)



Figura. 2.16 Espejos convexos.

La prueba de visibilidad de los retrovisores se lo realizo con conos separados 30° en la parte posterior los cuales en la figura 2.17 son visibles en su totalidad.



Figura. 2.17 Prueba de visibilidad de retrovisores.

2.3.4 Accesibilidad

El reglamento cita los siguientes enunciados:

Es importante que los conductores con los cinturones colocados estén en la capacidad de evacuar el vehículo sin asistencia en menos de 10 segundos. (Shell Eco Marathon, 2016)

La cabina debe de tener una abertura suficientemente grande para la salida del piloto, el puesto de conducción debe diseñarse de manera que los servicios de emergencia pueden extraer fácilmente al piloto si esto fuera necesario. (Shell Eco Marathon, 2016)

Para la categoría prototipo dicha abertura puede estar cerrada en su totalidad o en parte por medio de bisagras desmontables y/o puertas plegables con un mecanismo de liberación que sea de fácil operación desde el interior y exterior, además deberá marcarse con una flecha roja y este no debe de requerir ninguna herramienta para su apertura. (Shell Eco Marathon, 2016)

Está prohibido el uso de cinta adhesiva para asegurar la cabina del conductor desde el exterior. (Shell Eco Marathon, 2016)

Para lo cual se diseñó una puerta que tenga una abertura de 600mm medidos desde el espaldar, en la figura 2.18 podemos observar que la abertura esta por la altura de la cintura la cual da suficiente movilidad al piloto a la hora de evacuar el vehículo.

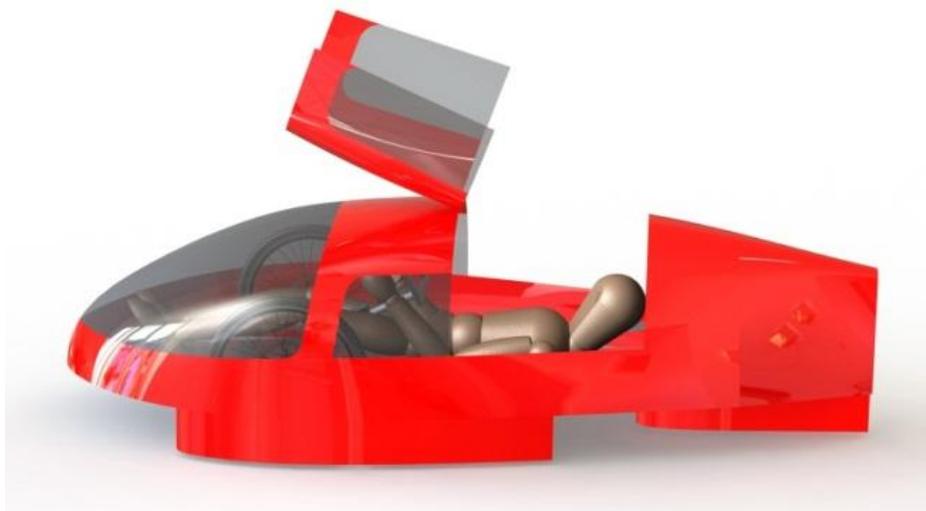


Figura. 2.18 Puerta de acceso a cabina de piloto de propuesta 1.

También se diseñó una puerta de acceso a los componentes del tren motriz en la figura 2.19 proporcionando un fácil acceso a los componentes.

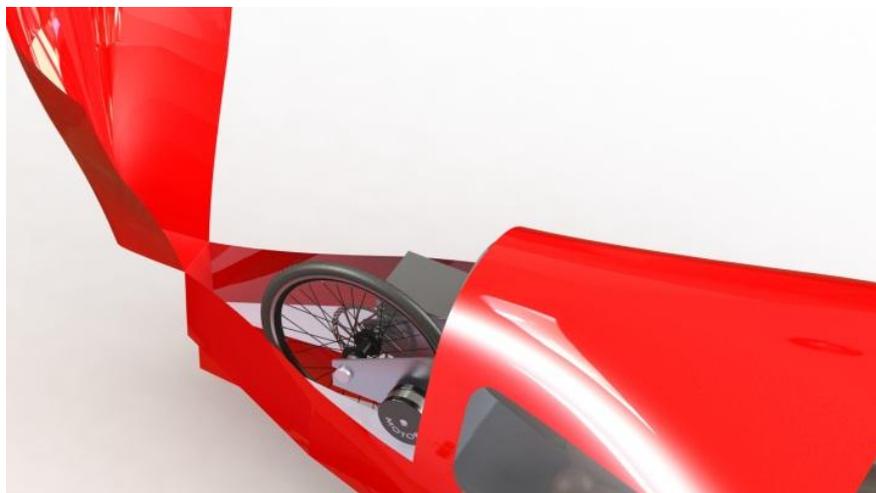


Figura. 2.19 Puerta de acceso al tren motriz de propuesta 1.

2.3.5 Cálculo de masa

Este fue uno de los aspectos más importantes que se tomó en cuenta, el material a elegir es la fibra de vidrio para la carrocería, se determinó la densidad de la misma,

por lo que se realizó 20 probetas de forma cuadrada de 5cm de lado y de 2mm de espesor, con una balanza de precisión se tomó los datos de masa para finalmente calcular la densidad y el valor promedio como se observa en la tabla 2.1

Tabla 2-1 Resultados de probetas para el cálculo de la densidad de la fibra de vidrio .

DENSIDAD FIBRA DE VIDRIO			
Dato	Volumen	Masa	Densidad
#	cm³	g	g/cm³
1	5	7,864	1,573
2	5	7,905	1,581
3	5	7,947	1,589
4	5	7,899	1,580
5	5	7,863	1,573
6	5	7,962	1,592
7	5	7,974	1,595
8	5	7,901	1,580
9	5	7,896	1,579
10	5	7,910	1,582
11	5	7,908	1,582
12	5	7,873	1,575
13	5	7,927	1,585
14	5	7,966	1,593
15	5	7,937	1,587
16	5	7,904	1,581
17	5	7,823	1,565
18	5	7,916	1,583
19	5	7,817	1,563
20	5	7,869	1,574
PROMEDIO			1,581

Para las ventanas y parabrisas se eligió el acrílico al que se lo puede termo formar además de ser translucido y ligero con una densidad de 1.18 g/cm³.

La masa total del vehículo se calculó con el área de la carrocería como de las ventanas las que se obtuvieron del software CAD, se calculó la masa con espesores de 1,2 y 3 mm en la tabla 2.2 se observan los resultados.

Tabla 2-2 Calculo de la masa de propuesta 1 con espesores de 1,2 y 3mm de espesor.

Espesor 1mm					
	Material	Densidad	Área	Espesor	Masa
Elemento	---	kg/m^3	m^2	m	kg
Carrocería	Fibra de Vidrio	1580	4,74	0,001	7,49
Ventanas	Acrílico	1180	1,41	0,001	1,66
TOTAL					9,15
Espesor 2 mm					
Carrocería	Fibra de Vidrio	1580	4,74	0,002	14,98
Ventanas	Acrílico	1180	1,41	0,002	3,33
TOTAL					18,31
Espesor 3mm					
Carrocería	Fibra de Vidrio	1580	4,74	0,003	22,47
Ventanas	Acrílico	1180	1,41	0,003	4,99
TOTAL					27,46

El espesor elegido es de 2mm ya que este brinda una buena resistencia y una masa reducida.

2.4. Propuesta 2

Se propone diseñar una carrocería que sea lo más pegada al contorno del chasis, además de no cubrir las ruedas, como se puede apreciar en la figura 2.20, el perfil de la vista superior con respecto a la primera propuesta es 50 mm más corto, además de ser 560 mm más delgado en relación a 1120mm de ancho del primer modelo.

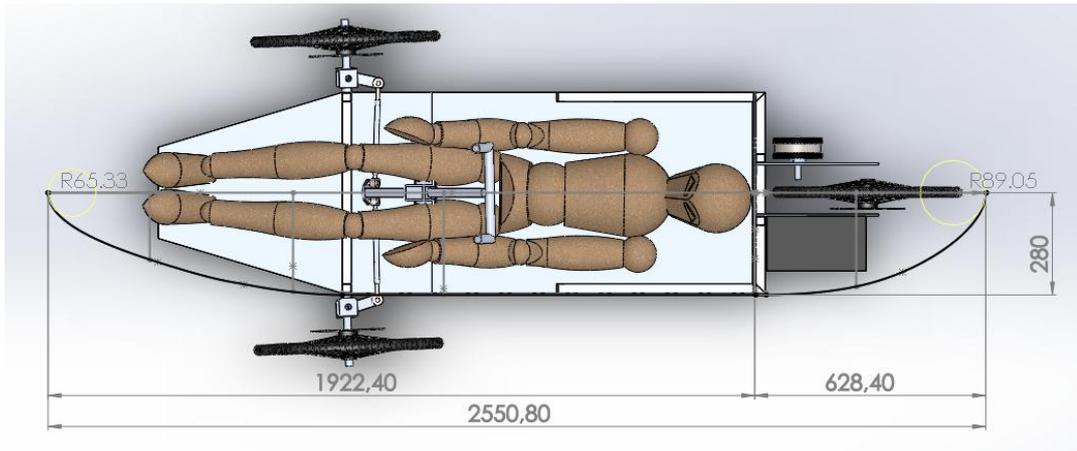


Figura. 2.20 Perfil de carrocería en vista superior de propuesta 2.

En la figura 2.21 observamos el perfil lateral que es 35mm más bajo con respecto a la primera propuesta.

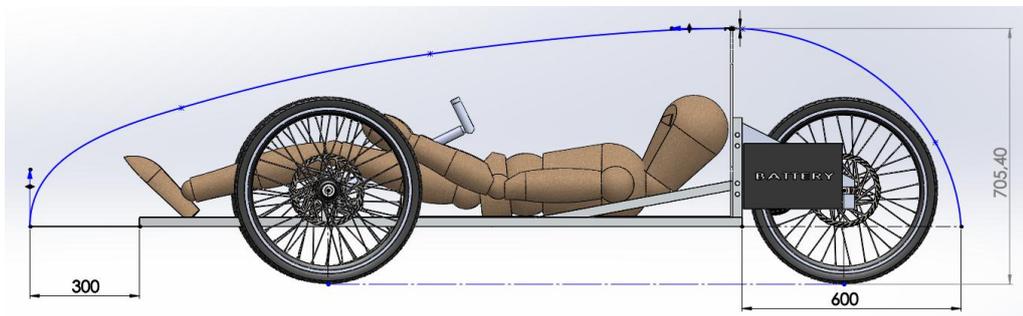


Figura. 2.21 Perfil de carrocería en vista lateral de propuesta 2.

El resultado final se observa en la figura 2.22.



Figura. 2.22 Modelo final de propuesta 2.

2.4.1 Visibilidad

Como en la propuesta 1 se procedió a dividir en 30° como se observa en la figura 2.23 lo cual ayudará para el diseño de las ventanas y el parabrisas.

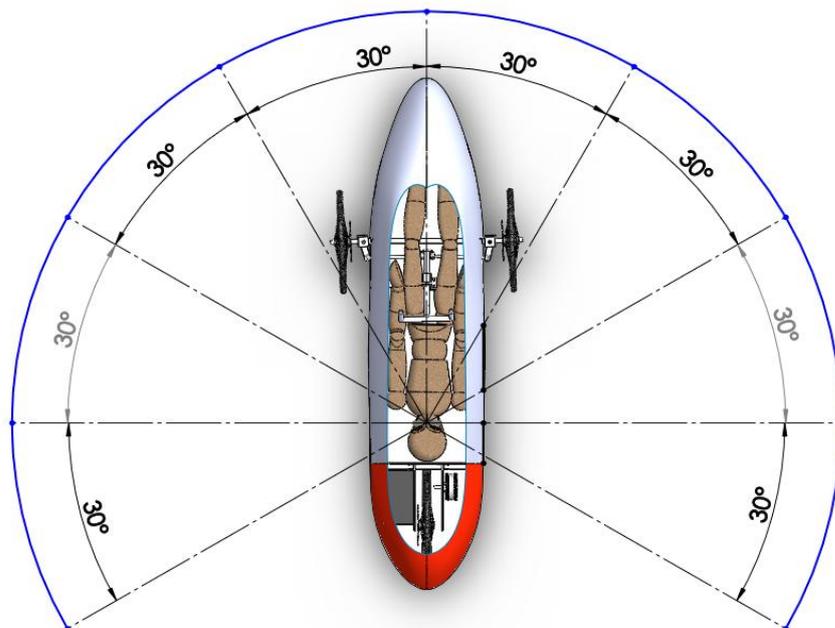


Figura. 2.23 Campo de visión horizontal de propuesta 2.

En la figura 2.24 se observa la visión vertical la cual se optó por un ángulo total de 15° .

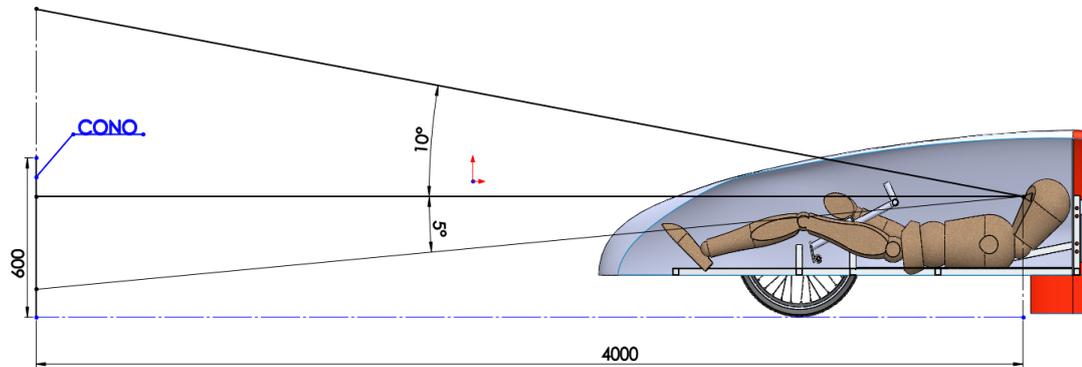


Figura. 2.24 Campo de vision vertical de propuesta 2.

Una vez obtenido los parámetros necesarios se procede al modelado de las ventanas y del parabrisas (figura 2.25)



Figura. 2.25 Modelado final de parabrisas y ventanas de propuesta 2.

2.4.2 Prueba de visibilidad

Se realizó la simulación como en la propuesta 1 en la figura 2.26 se observa que los conos laterales son parcialmente obstruidos por los neumáticos pero no comprometen con la visibilidad y el cono frontal se lo observa prácticamente en su totalidad.

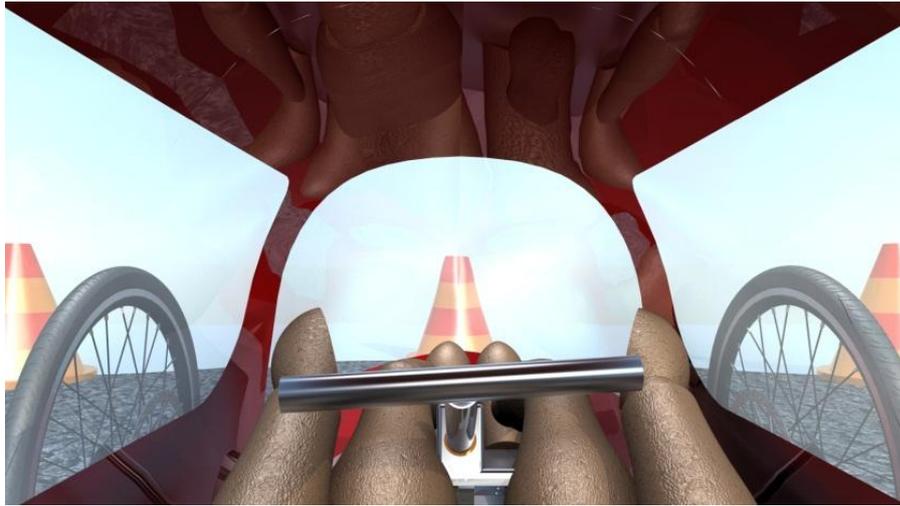


Figura. 2.26 Prueba de visibilidad a 0° de propuesta 2.

En la figura 2.27 se dio a la cabeza del piloto un ángulo de 62° con el cual se obtiene una visibilidad de los conos de 30° , 60° y 90° .

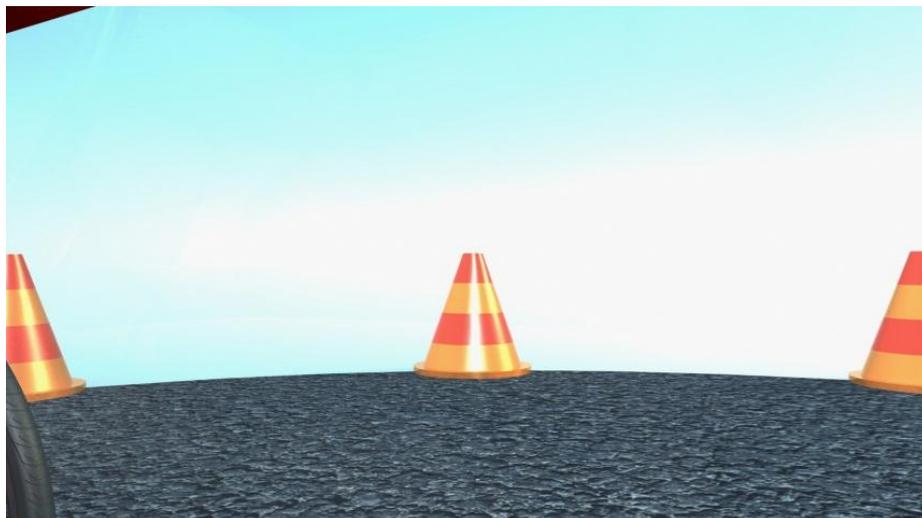


Figura. 2.27 Prueba de visibilidad a 62° de propuesta 2.

2.4.3 Retrovisores

Como en la primera propuesta se optó por retrovisores con espejos convexos, los cuales se los colocaron en el interior del habitáculo, brindando una fácil regulación por parte del piloto, en la figura 2.28 se observa los conos que fueron colocados a 30° en la parte posterior son visibles en su totalidad.

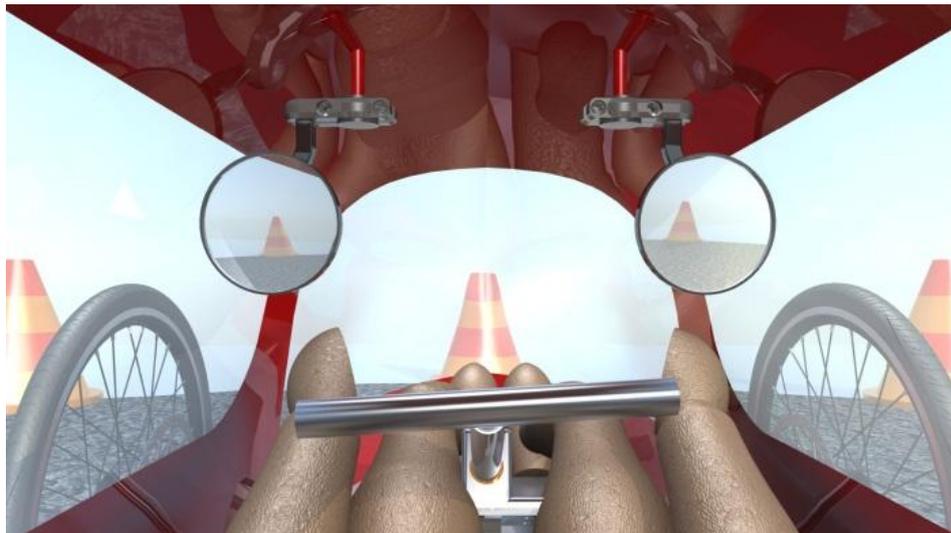


Figura. 2.28 Prueba de visibilidad con retrovisores.

2.4.4 Accesibilidad

Como en la propuesta 1, se diseñó una puerta que tenga una abertura de 600 mm de longitud medidos desde el espaldar, en la figura 2.29 se observa que la abertura llega a cintura del piloto lo cual le da una buena movilidad al piloto para evacuar el vehículo en menos de 10 segundos.

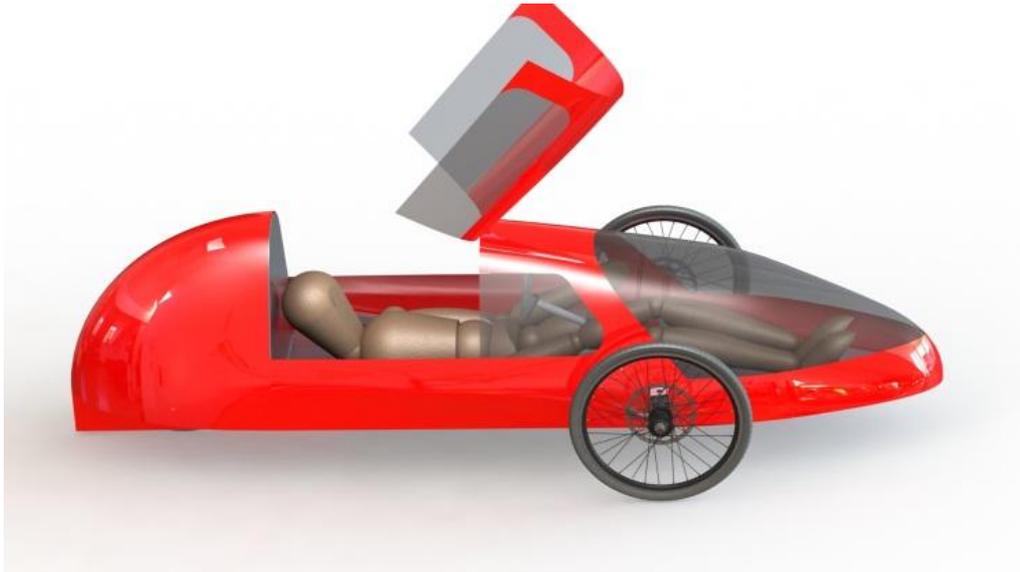


Figura. 2.29 Puerta de acceso a cabina de piloto de propuesta 2.

En la figura 2.30 se observa el diseño de la puerta de acceso al tren motriz.



Figura. 2.30 Puerta de acceso al tren motriz de propuesta.

2.4.5 Cálculo de masa

Con los datos de la propuesta 1 de densidad de la fibra de vidrio y del acrílico y con espesores de 1,2 y 3 mm se calculó la masa total de la carrocería, en la tabla 2.3 se ven los resultados.

Tabla 2-3 Calculo de la masa de propuesta 2 con espesores de 1,2 y 3mm de espesor.

Espesor 1mm					
	Material	Densidad	Área	Espesor	Masa
Elemento	---	kg/m^3	m^2	m	kg
Carrocería	Fibra de Vidrio	1580	2,48	0,001	3,92
Ventanas	Acrílico	1180	0,94	0,001	1,11
TOTAL					5,03
Espesor 2 mm					
Carrocería	Fibra de Vidrio	1580	2,48	0,002	7,84
Ventanas	Acrílico	1180	0,94	0,002	2,22
TOTAL					10,06
Espesor 3mm					
Carrocería	Fibra de Vidrio	1580	2,48	0,003	11,76
Ventanas	Acrílico	1180	0,94	0,003	3,33
TOTAL					15,09

En este caso la selección fue de la carrocería con espesor de 2mm.

2.5 Selección de carrocería

Una vez realizado las simulaciones de visibilidad del piloto, retrovisores, acceso del piloto y tren motriz se procedió a seleccionar la mejor propuesta según los parámetros antes mencionados, en el siguiente capítulo se realizará el estudio CFD lo que permitirá escoger definitivamente una de las dos propuestas.

2.5.1 Visibilidad

Los resultados de las pruebas de la propuesta 1 y 2 son similares pero hay que tomar en cuenta la prueba de los retrovisores que se observa en la figura 2.31 en donde la propuesta 1 quita visibilidad, además el reglamento dice que si los neumáticos se encuentran dentro de la carrocería estos deben ser aislados del cuerpo del piloto por

seguridad lo que resulta en una disminución de visibilidad y aumento de masa, en este apartado la selección sería de la segunda propuesta.

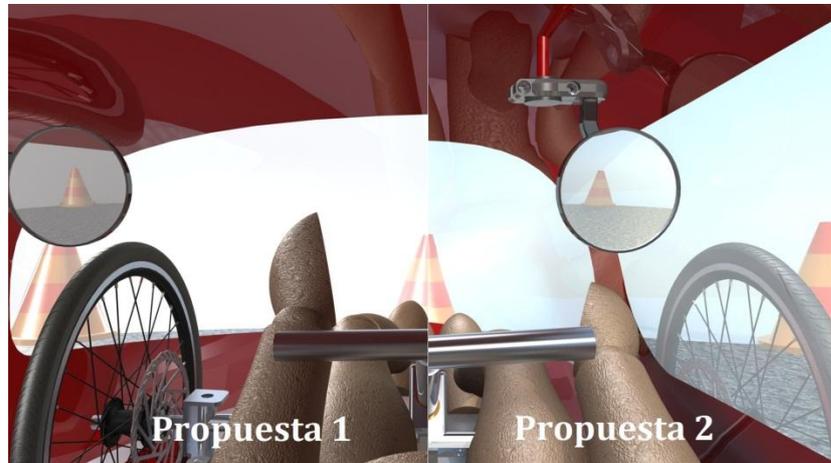


Figura. 2.31 Diferencias de visibilidad de propuesta 1y2.

2.5.2 Accesibilidad

Un enunciado del reglamento dice que el habitáculo del piloto debe ser completamente aislado del compartimiento del tren motriz en este caso la propuesta 1 tiene una abertura considerable el cual se deberá sellar con placas de fibra de vidrio o aluminio lo que conlleva a un aumento de masa en el caso de la propuesta 2 esta abertura es mínima esto se puede observar en la figura 2.32.

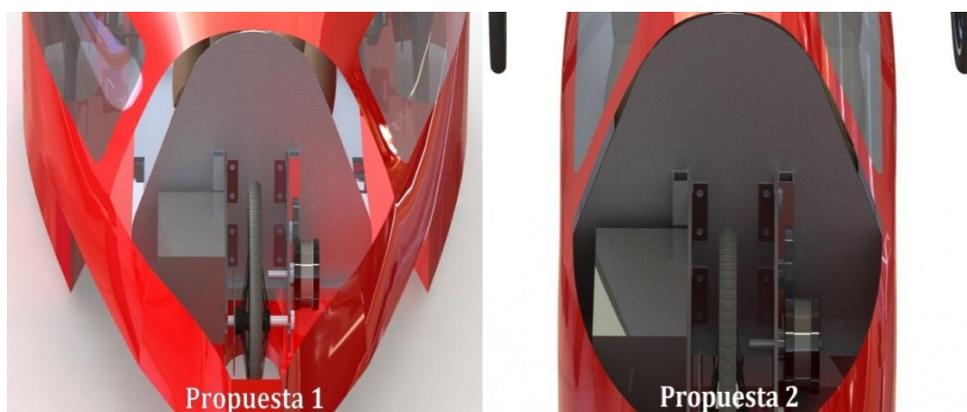


Figura. 2.32 Diferencias de accesibilidad de propuesta 1y2.

2.5.3 Calculo de masa

En el caso de las dos propuestas se seleccionó un espesor de 2mm en la tabla 6 se observa la diferencia de área y masa que es de 2.73m² y de 8.25kg de la propuesta 1

Tabla 2-4 Comparacion de area y masa de propuesta 1 y 2.

Comparación de área y masa de Propuesta 1 y 2			
Propuesta	Área Total	Espesor	Masa Total
---	<i>m²</i>	<i>m</i>	<i>kg</i>
N _o 1	6,15	0,002	18,31
N _o 2	3,42	0,002	10,06
Diferencia	2,73	---	8,25

Según los resultados obtenidos en visibilidad, accesibilidad y masa se decide escoger la segunda propuesta.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN CFD

3.1 Introducción

Una vez que se ha realizado el diseño de las dos propuestas de carrocería para el prototipo Shell Eco Marathon en el software CAD, es necesario evaluar el comportamiento aerodinámico de cada una de ellas, con el objetivo de identificar el perfil que ofrezca la menor resistencia al aire.

En este capítulo se realizará el análisis aerodinámico de cada carrocería, para esto se determinará el espesor de la malla estructurada, la cual se empleará para el análisis de la capa límite, factor importante para la obtención de datos lo más reales posibles, además se analizará la sensibilidad de la malla, con el objetivo de garantizar que los resultados generados sean correctos. Finalmente se hará la selección de la carrocería que pasará al proceso de construcción.

El software seleccionado para el análisis CFD es el ANSYS R15.0, empleando su módulo Fluent. Este programa realiza la solución del problema en tres etapas las cuales son:

- Pre proceso
- Proceso para el cálculo CFD o solver
- Post proceso

Como ya se dijo se han diseñado dos carrocerías, en donde: la primera presenta las tres ruedas que conforman el prototipo, cubiertas, mientras que la segunda opción únicamente la rueda posterior.

3.2 Propuesta 1

3.2.1 Pre-proceso

3.2.1.1 Importación de la geometría

Una vez realizado el diseño en el software CAD, se convierte el modelo en un sólido entero, siendo una de las técnicas para obtener un correcto mallado. El archivo generado debe ser un archivo con una extensión que sea compatible con el programa ANSYS, siendo este el IGES (.igs).¹ Completado lo anterior se importa la geometría al software ANSYS R15.0.

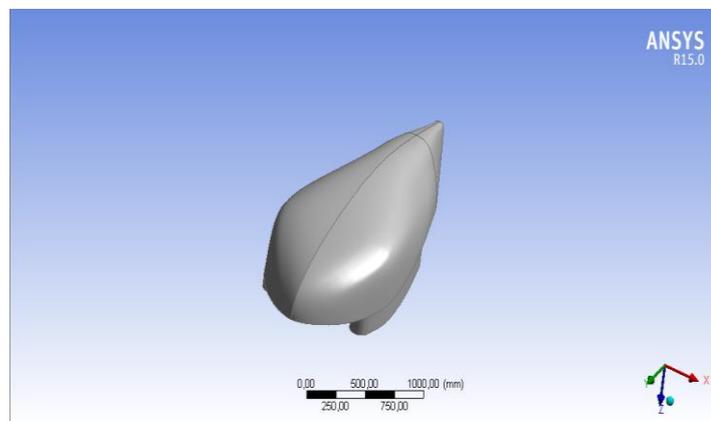


Figura 3.1. Geometría importada al software ANSYS R15.0

3.2.1.2 Dominio

El dominio computacional es la delimitación del espacio en el cual se llevará a cabo el análisis, en este caso particular se utilizan las características de un túnel de viento, como referencia experimental para este tipo de estudios.

El túnel de viento debe poseer las dimensiones adecuadas, de tal manera que el flujo alrededor del vehículo sea el idóneo. Existe un coeficiente que permite dimensionar la sección transversal del túnel, conocido como relación de bloque (ϕ). Este valor es

¹ Initial Graphics Exchange Specification (Especificación de intercambio inicial de gráficos)

una relación entre el área frontal del vehículo y el área de la sección transversal del túnel, y suele de ser de $\varphi=0,10$ a $0,20$. (Hucho & Heinrich, 2013)

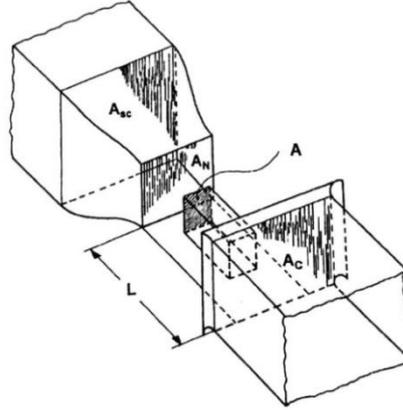


Figura 3.2. Sección de un túnel de viento.

Fuente: (Hucho & Heinrich, 2013)

$$\varphi = \frac{A}{A_N} \quad \text{Ec. (30)}$$

En donde:

φ : Relación de bloque (adimensional).

A: Área frontal del vehículo (m^2).

A_N : Área de la sección transversal del túnel de viento. (m^2).

Entonces tomando $\varphi=0,10$, y con una área frontal de la carrocería de $A= 0,66m^2$, es posible determinar la superficie de la sección transversal del túnel de viento. Utilizando la ecuación (30), se tiene:

$$A_N = \frac{0,66m^2}{0.10} = 6,6m^2$$

A continuación es posible dimensionar el túnel de viento teniendo en cuenta el área calculada y las dimensiones del vehículo que se pueden apreciar en la figura 3.3.

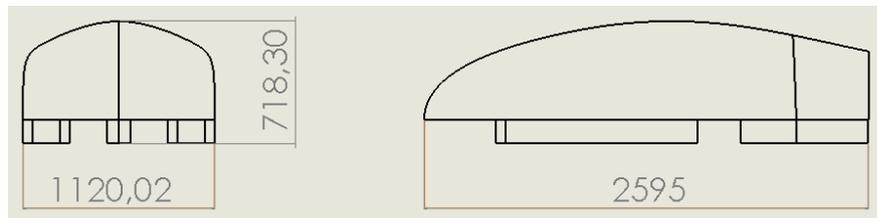


Figura 3.3. Cotas de la carrocería, propuesta 1.

Finalmente las dimensiones del túnel de viento o dominio computacional son ancho $a=3.12\text{m}$, altura $h=2\text{m}$ (sabiendo que $3,12\text{m}\times 2\text{m}=6,6\text{m}^2$), longitud $l=7\text{m}$ (para la longitud no existe valor referencial, únicamente la medida debe ser la suficiente como para que el flujo se desarrolle en todo el vehículo). En la figura 3.4, se aprecia cómo están distribuidas las medidas y en la figura 3.5 se observa el vehículo dentro del túnel.

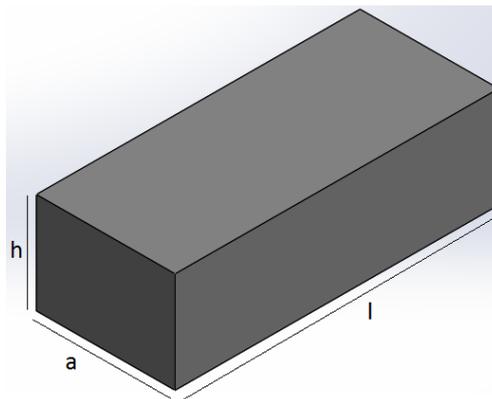


Figura 3.4. Dimensiones del túnel de viento.

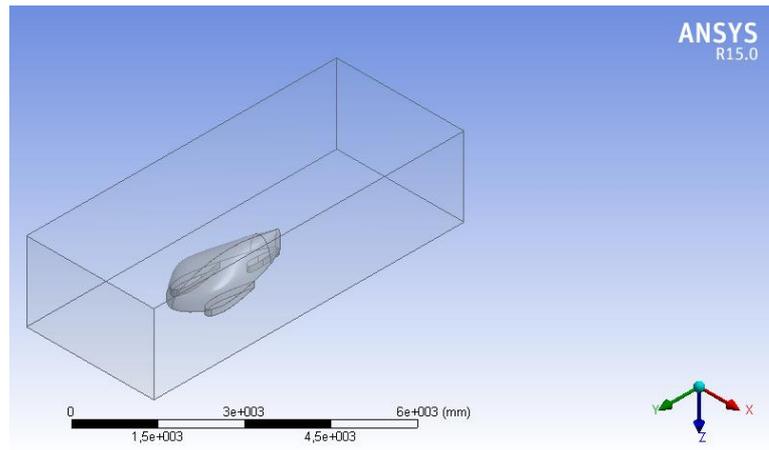


Figura 3.5. Dominio computacional.

3.2.1.3 Mallado

Realizar el mallado consiste en designar los elementos en los que serán resueltas las ecuaciones que rigen el movimiento de un fluido. Generalmente los puntos de una malla se encuentran unidos, de tal manera, que se crea un entramado que se asemeja a una rejilla, de ahí el nombre de malla. Pueden ser mallas estructuradas y no estructuradas, cuyos conceptos se explicaron en el capítulo 1.

3.2.1.3.1 Elementos de una malla

Se puede tener elementos para análisis unidimensional (1D), para análisis de superficies bidimensional (2D), y para volumen tridimensional (3D). Empleando en este caso particular el tipo tridimensional 3D.

Los elementos tridimensionales, son a los que se les da un volumen para el análisis de problemas que posean profundidad. Estos elementos se aplican para el análisis de problemas mediante el método de volúmenes finitos. (Pauta Solano & Sánchez Ramírez, 2014)

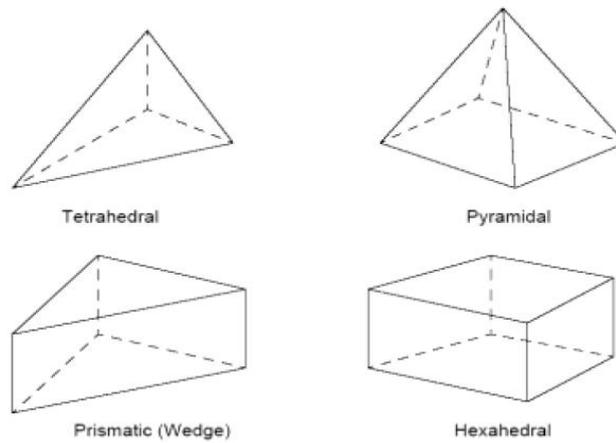


Figura 3.6. Tipos de elementos de una malla

Fuente: (ANSYS, Inc., 2016)

Como se puede apreciar en la figura 3.6, los elementos de una malla tridimensional pueden tener diferente forma como son: tetraédrico, piramidal, prisma con base rectangular y hexaedro. La elección del tipo de elemento va a depender de la forma de geometría y del tipo de análisis a realizar. En este caso se emplea el tetraédrico para la malla en general, ya que son idóneos para trabajar en geometrías complejas, adaptándose mejor al proceso de mallado por el método de volúmenes finitos, además presenta mayor precisión en la resolución de flujos con geometrías estacionarias.

3.2.1.3.2 Calidad de la malla

Es importante tener en cuenta la calidad de la malla, ya que de esto depende la convergencia de resultados y la exactitud del análisis, los parámetros para determinar la calidad de la malla son los siguientes:

- **Densidad:** “El mallado debe ser lo suficientemente denso para capturar las características relevantes de la circulación del fluido. Sobre todo en las zonas adyacentes a los contornos definidos como pared” (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009).

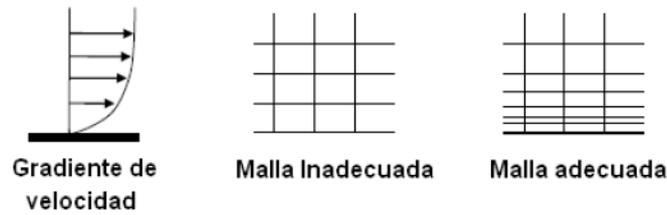


Figura 3.7. Densidad del mallado.

Fuente: (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009)

- **Distorsión “skewnes”:** Hace referencia a la deformación que se genera en las celdas, cuando se adaptan al contorno de la geometría. No es recomendable un alto valor de distorsión, este debe ser menor a 0.95 para ser considerado aceptable.

Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Figura 3.8. Valores referenciales de distorsión “skewnes”.

Fuente: (ANSYS, Inc., 2016).

- **Calidad ortogonal (orthogonal Quality OQ):** Para garantizar una adecuada calidad de la malla, este valor debe ser lo más cercano a 1.

Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Figura 3.9. Valores referenciales de calidad ortogonal “OQ”

Fuente: (ANSYS, Inc., 2016).

3.2.1.3.3 Generación de la malla

Es necesario determinar el espesor de la capa límite (dicho espesor se representa con la malla estructurada), ya que esta es la zona en donde se produce la condición de no

deslizamiento, es decir, la velocidad del flujo tiende a cero, por ende la zona en la que se genera mayor resistencia al avance del vehículo. Por lo tanto la capa límite debe estar delimitada dentro de la malla que se genere. Las ecuaciones para encontrar el espesor de la capa límite son:

$$\delta = x \cdot \frac{5}{Re_x^{1/2}} \quad \text{para régimen laminar } 10^3 < Re_x < 10^6 \quad \text{Ec. (31)}$$

$$\delta = x \cdot \frac{0.16}{Re_x^{1/7}} \quad \text{para régimen turbulento } 10^3 < Re_x < 10^6 \quad \text{Ec. (32)}$$

$$Re_x = \frac{Ux}{\nu} \quad \text{Ec. (33)}$$

En donde:

δ : Espesor de la capa límite.

x = Longitud de la superficie en análisis.

Re_x = Número de Reynolds localizado.

U = Velocidad del flujo.

ν = Viscosidad cinemática.

Entonces se procede al cálculo del espesor de la capa límite:

- **Número de Reynolds:** $U=30\text{km/h}$ (8.33m/s , velocidad de desplazamiento promedio de un prototipo Shell Eco Marathon). $X=2.595\text{m}$ (longitud del vehículo). $\nu=1,470 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$. Empleando la ecuación (33) tenemos:

$$Re_x = \frac{\frac{8.33\text{m}}{\text{s}} * 2.595\text{m}}{1.470 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}}$$

$$Re_x = 1.47 \times 10^6$$

Con el número de Reynolds calculado, se puede establecer que el régimen del flujo es turbulento, por lo tanto seleccionar la ecuación para calcular el espesor de capa límite.

- **Espesor de la capa límite:** Se sabe que el flujo en este caso es turbulento, entonces se selecciona la ecuación (32).

$$\delta = 2.595m \frac{0.16}{(1.47 \times 10^6)^{1/7}}$$

$$\delta = 0.055m = 55mm$$

Una vez delimitado el dominio y calculado el espesor de la capa límite se procede a realizar el mallado del volumen total. Al realizar el análisis se debe asegurar que el resultado obtenido es el correcto y que este no dependerá del número de elementos de la malla con la que se ejecute la solución, por lo tanto es necesario analizar la sensibilidad de la malla, la cual consiste en proponer mallas de diferentes tamaños y observar la variación de los resultados, si dicha variación es mínima, se puede decir que el resultado es adecuado. Además con ese estudio es posible determinar qué malla es la adecuada para disminuir el costo computacional.

Se han propuesto seis mallas de diferente tamaño las cuales se presentarán más adelante en conjunto con los resultados obtenidos del coeficiente de arrastre (C_d) y el coeficiente de sustentación (C_l). A continuación se va a analizar una de las mallas, con el objetivo de mostrar la capa límite y el proceso seguido para establecer la calidad del mallado.

En la figura 3.10 se puede apreciar las características de la malla.

Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	12,0 °
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
<input type="checkbox"/> Min Size	10,0 mm
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	10,0 mm
<input type="checkbox"/> Max Face Size	100,0 mm
<input type="checkbox"/> Max Size	200,0 mm
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	31,2320 mm
Inflation	
Use Automatic Inflation	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	wall-prot.
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	2
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,2
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	55, mm
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Options	No

Figura 3.10. Parámetros de la malla.

En la sección de dimensionamiento (Sizing), en la opción de “Advanced Size Function” se seleccionó el tipo curvatura y proximidad (Proximity and Curvature). “Este tipo de malla es la que mayor precisión presenta en el análisis con respecto a las otras opciones individuales como son: curvatura (Curvature) y proximidad (Proximity).” (Muñoz Mejías, 2012).

La forma de elemento seleccionado fue el tetraédrico, se tiene el suavizado (Smoothing) alto y el centro de relevancia (Relevance Center) fino, el tamaño de los elementos es el mínimo 10mm y el máximo 200mm. En lo que respecta a la tasa de crecimiento (Growth Rate) se trabajó con el valor de 1.2 es decir 20%, el ángulo de curvatura normal es de 12°, lo que permite que la malla se acople mejor a las curvas

del vehículo. Para delimitar la capa límite, en la sección “Inflation”, se establece el espesor total de la capa que es de 55mm (valor calculado).

En la figura 3.11 se presenta el mallado final.

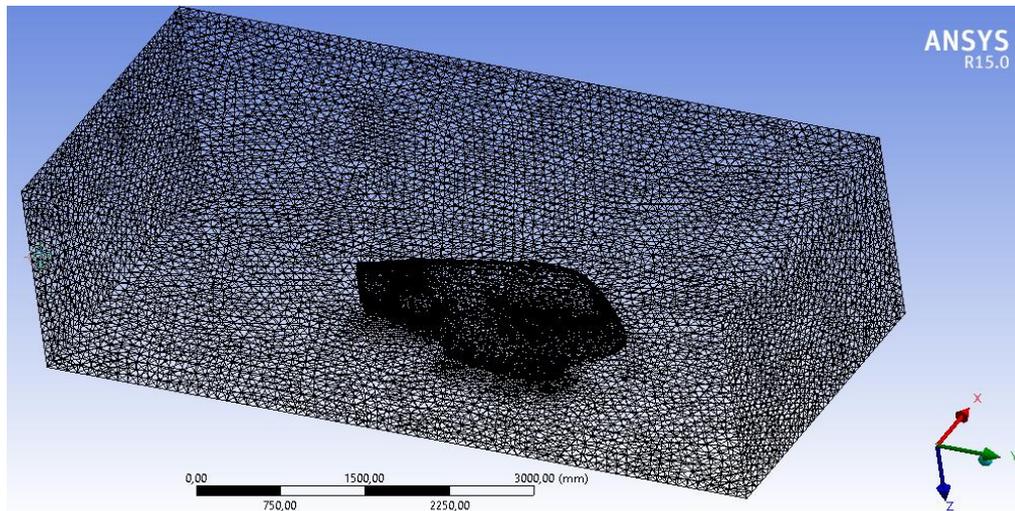


Figura 3.11 Malla del dominio computacional.

Como ya se dijo, la capa límite tiene que estar delimitada dentro del mallado total, en la figura 3.12, se puede apreciar como la malla en general es no estructurada tipo tetraédrica, con la excepción del contorno del prototipo, en donde se observa una malla estructurada. Esta malla estructurada representa la capa límite cuyo espesor es de 55mm.

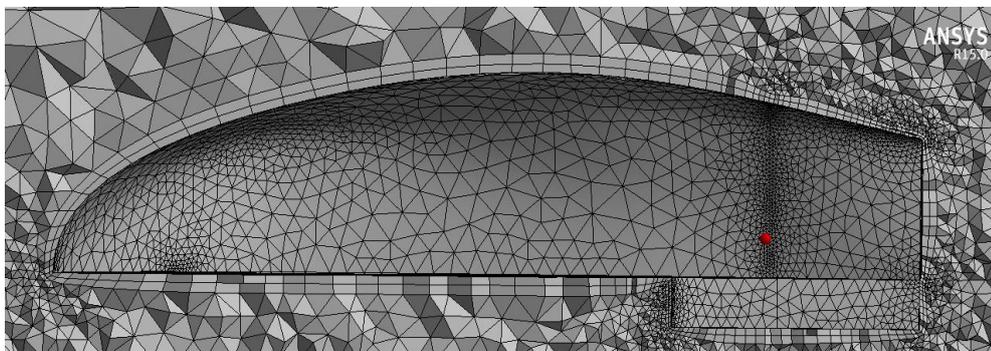


Figura 3.12. Delimitación de la malla estructurada en la zona considerada para el análisis de la capa límite.

3.2.1.3.4 Determinación de la calidad de la malla

Una malla con una calidad adecuada, asegura un correcto análisis del caso en estudio, por lo tanto, la obtención de resultados satisfactorios. Para evaluar el mallado se debe tener en cuenta principalmente: la distorsión (Skewnes), la calidad ortogonal (Orthogonal Quality OQ) y la relación de aspecto. Entonces:

- **Distorsión:** En la malla creada se han generado 78105 nodos y 374105 elementos, el elemento con mayor distorsión presenta un valor de 0.86, que en base de los valores referenciales de la figura 3.8, se considera una malla aceptable para el análisis.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	78105
<input type="checkbox"/> Elements	374105
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	2,05199274674883E-04
<input type="checkbox"/> Max	0,864836986147224

Figura 3.13. Valores de distorsión de la malla.

En la figura 3.14, se puede apreciar la distribución de elementos en función de la distorsión. Es importante recalcar que se puede observar los valores de manera individual tanto para la malla no estructurada (rojo) como para la estructurada (verde). Sin embargo los porcentajes que se presentan a continuación son del total de elementos. Entonces tomando como referencia la figura 3.8 (Skewnes) se tienen:

- En el rango “excelente” (0-0.25), el 58.48% de elementos.
- En el rango “muy bien” (0.25-0.5), el 39.06% de elementos.
- En el rango “bien” (0.5-0.8), el 2.46% de elementos.
- En el rango “aceptable#” (0.8-0.94), el 0.012% de elementos.

Por lo tanto en función de la distorsión, la malla se considera adecuada para ejecutar el análisis.

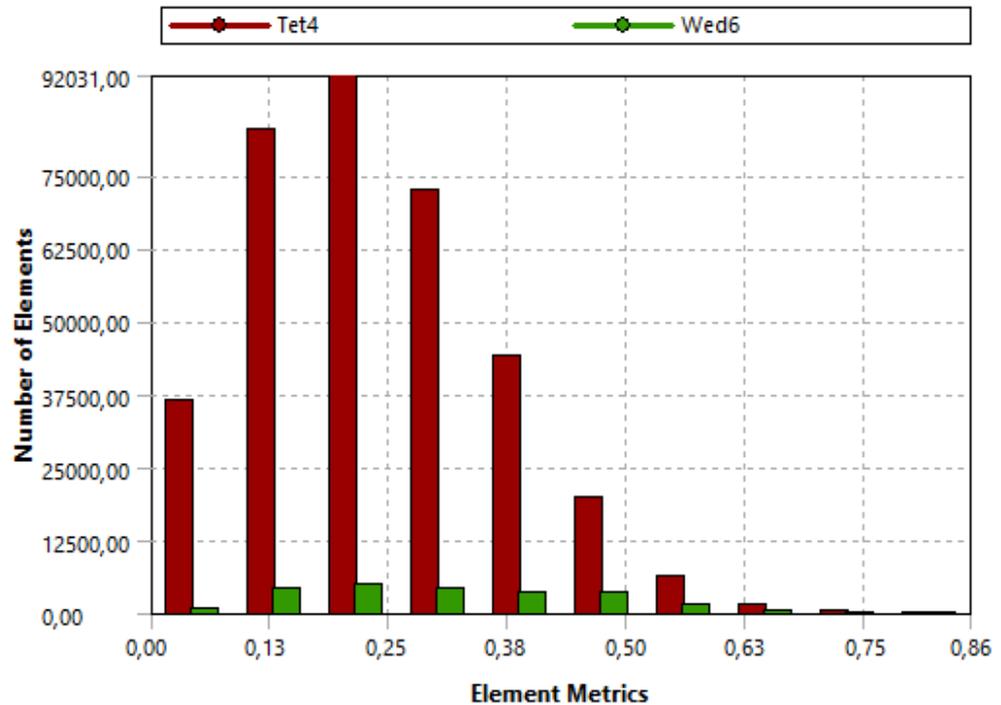


Figura 3.14. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la distorsión.

- **Calidad Ortogonal:** El elemento con la menor calidad ortogonal, tienen un valor de 0.23, comparando con los valores de referencia de la figura 3.9 (calidad ortogonal), se encontraría dentro del rango bien.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	78105
<input type="checkbox"/> Elements	374105
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	0,232144630561261
<input type="checkbox"/> Max	0,999445114348829

Figura 3.15. Valores de calidad ortogonal de la malla.

En la figura 3.16, se puede apreciar la distribución de elementos en función de la calidad ortogonal. Tomando como referencia la figura 3.8, se tienen:

- En el rango “excelente” (0.95-1), el 21,39% de elementos.
- En el rango “muy bien” (0.70-0.95), el 72,03% de elementos.

- En el rango “bien” (0.20-0.69), el 6.47% de elementos.

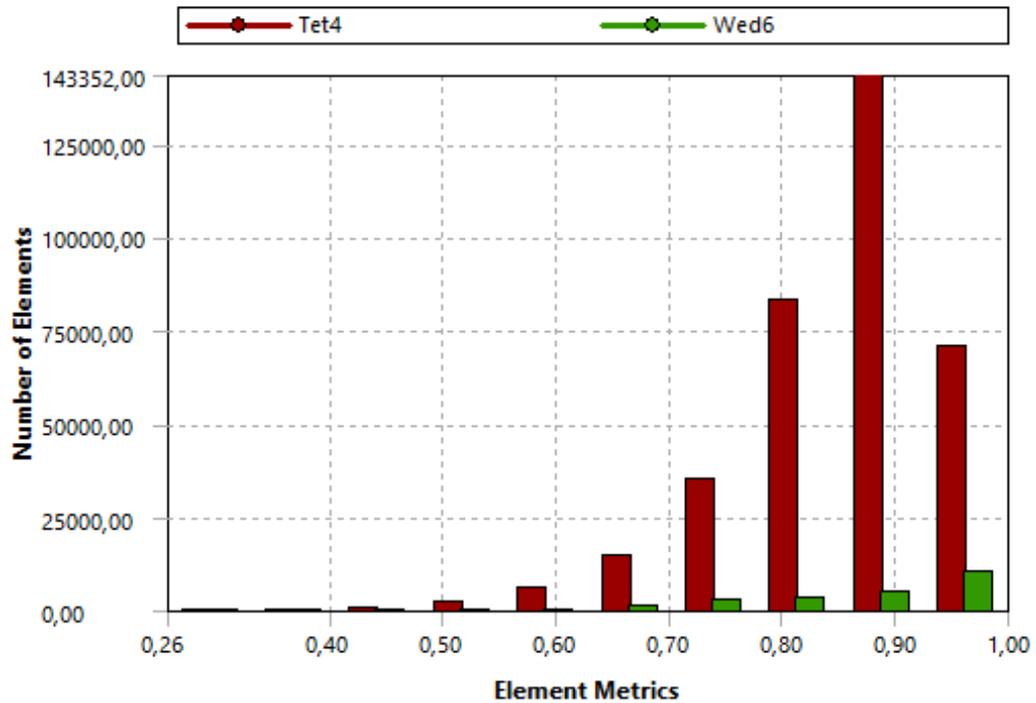


Figura 3.16. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la calidad ortogonal.

- **Relación de aspecto:** Este valor debe encontrarse por debajo del 20%, siendo el valor de la malla en análisis de 17%.

Finalmente considerando los resultados de distorsión, de calidad ortogonal y relación de aspecto se concluye, que la malla presenta una calidad adecuada para ejecutar el análisis.

El estudio de calidad del mallado realizado anteriormente, se ejecutó para las seis mallas propuestas, de esta manera se garantiza que cada una de ellas sea idónea para el análisis CFD.

3.2.1.3.5 Condiciones de contorno

Es necesario identificar las partes del dominio computacional, paso indispensable para la posterior configuración de las características de operación de Fluent. Dichas partes son: Wall-prot (vehículo), entrada y salida, correspondientes al flujo de aire; piso, superficie de asentamiento del prototipo; interior del túnel; finalmente el techo y las paredes laterales del túnel.

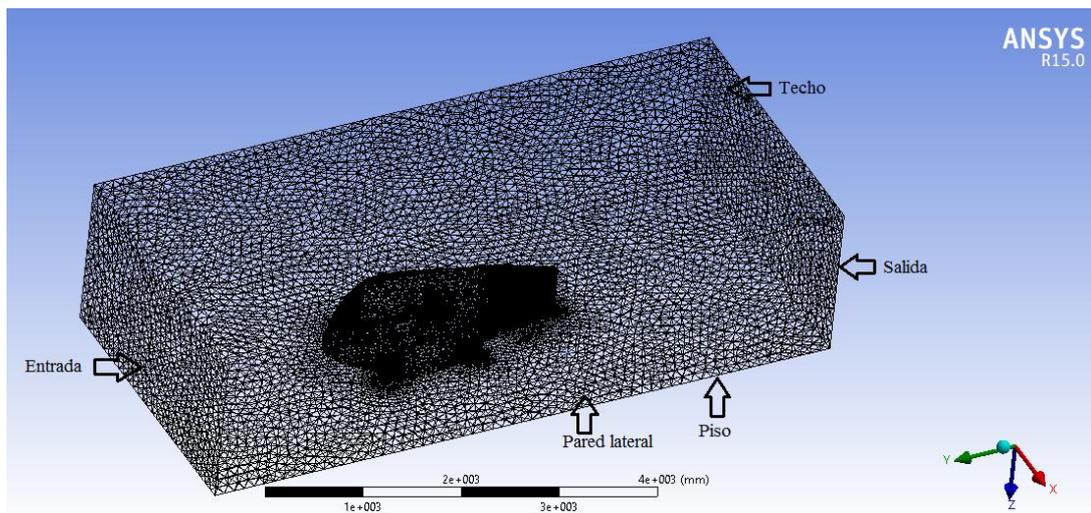


Figura 3.17. Condiciones de contorno.

3.2.2 Proceso para el cálculo CFD

Como ya se mencionó anteriormente el software seleccionado para el análisis aerodinámico del prototipo, es el ANSYS 15, empleando su módulo Fluent. Para el análisis se considera una velocidad de 30km/h (8.33m/s velocidad promedio de un prototipo Shell Eco Marathon)

3.2.2.1 Configuración del programa para el análisis

- **Importación de la malla:** Este proceso es realizado de forma automática, al momento que se ejecuta el Fluent. En esta parte se revisa la calidad de la malla y se selecciona las unidades de medida adecuadas, en este caso milímetros.

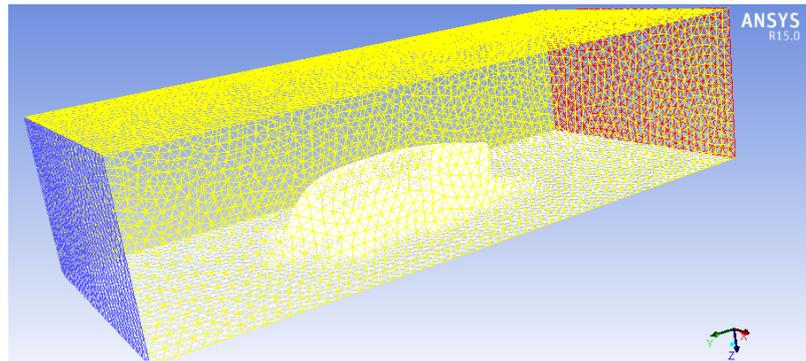


Figura 3.18. Malla importada en el Fluent.

- **Modelo de viscosidad:** En el cálculo realizado para determinar el espesor de la capa límite, se encontró el valor del número de Reynolds, cuyo resultado permitió establecer que el flujo es turbulento. Entonces se puede seleccionar el modelo de viscosidad en el programa, siendo el seleccionado el **k-epsilon (k-ε)**, cuyas características fueron explicadas en el capítulo 1.
- **Materiales:** En este paso se selecciona el material para el análisis en este caso lógicamente el seleccionado es el aire. Se deja las características que el programa presenta por defecto los cuales son: densidad 1.225kg/m^3 y viscosidad de $1.7894\text{e-}05\text{kg/m-s}$, valores con una temperatura del aire a 15°C .
- **Condiciones de contorno:** Se configura las diferentes zonas que posee la malla, las mismas que fueron creadas en la parte de mallado del dominio. Entonces:

Entrada: Se establece la velocidad del flujo de aire en este caso de 30Km/h (8.33m/s) y se selecciona el método “K and Epsilon”.

Piso: En el análisis el vehículo permanece estático, por lo tanto es necesario simular el movimiento del piso en sentido contrario al avance del prototipo, para esto se debe tener cuidado en la posición de la malla con respecto a los ejes del software, dicho movimiento será a la misma velocidad del flujo.

Salida: En esta zona es necesario en el software establecer como “Pressure Outlet” y seleccionar el método “K and Epsilon”, la presión es cero, ya que el túnel es abierto, es decir la salida del flujo de aire es hacia la atmósfera.

Para lo que corresponde a las paredes y techo únicamente se establece estos como simetría. Para la zona del vehículo se deja con las configuraciones que se presentan por defecto.

- **Valores de referencia:** En esta sección se configura el punto de inicio del análisis, en nuestro caso la zona “Entrada”. Se coloca el área frontal del vehículo (porque es el elemento de análisis), siendo esta 0.66m^2 .
- **Métodos de solución:** En esta parte se selecciona la opción “Green Gauss Cell Based” para lo que corresponde a gradiente de velocidad, este modelo proporciona alta fiabilidad en el resultado. Para las otras opciones como son “Pressure”, “Momentum”, “Turbulent Kinetic Energy” y “Turbulent Dissipation Rate”, que son las ecuaciones de discretización, se seleccionan de segundo orden, con el objetivo de aproximar al máximo los resultados. (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009)
- **Monitores:** Esta sección se configura con el objetivo de apreciar los residuos durante la simulación y de esta manera ir verificando la calidad del análisis.
- **Inicialización de la solución:** En esta parte se configura el punto de inicio del análisis, en este caso la zona Entrada, y se carga todos los datos anteriormente establecidos. Finalmente se corre el análisis, para esto se establece el número de iteraciones en este caso de 200.

3.2.2.2 Solución

Durante la ejecución del análisis, es importante observar la gráfica de los residuos, con la finalidad de apreciar si la simulación fue estable.

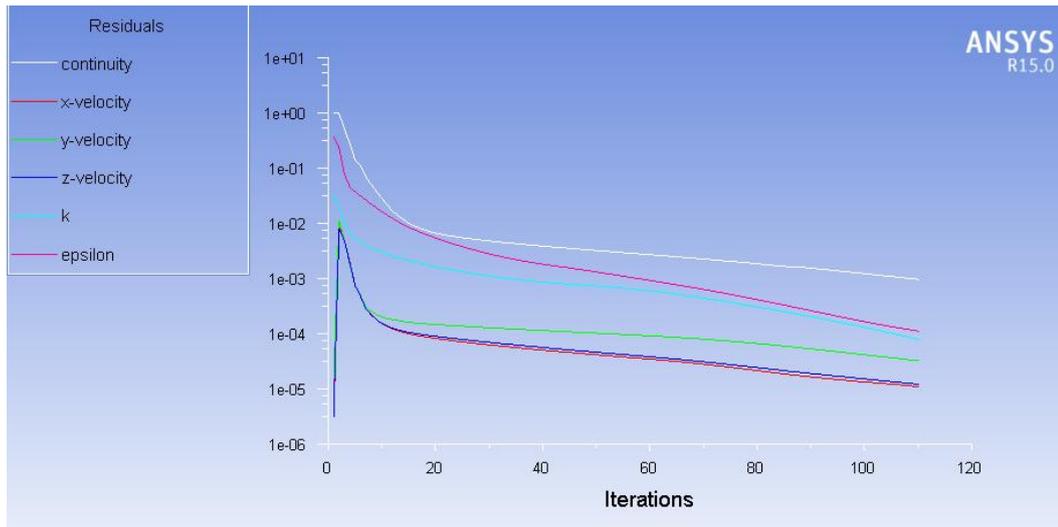


Figura 3.19. Residuos.

En lo que respecta al coeficiente de arrastre y de sustentación el análisis se mantuvo estable, tal como se puede apreciar en la figura 3.20 y 3.21.

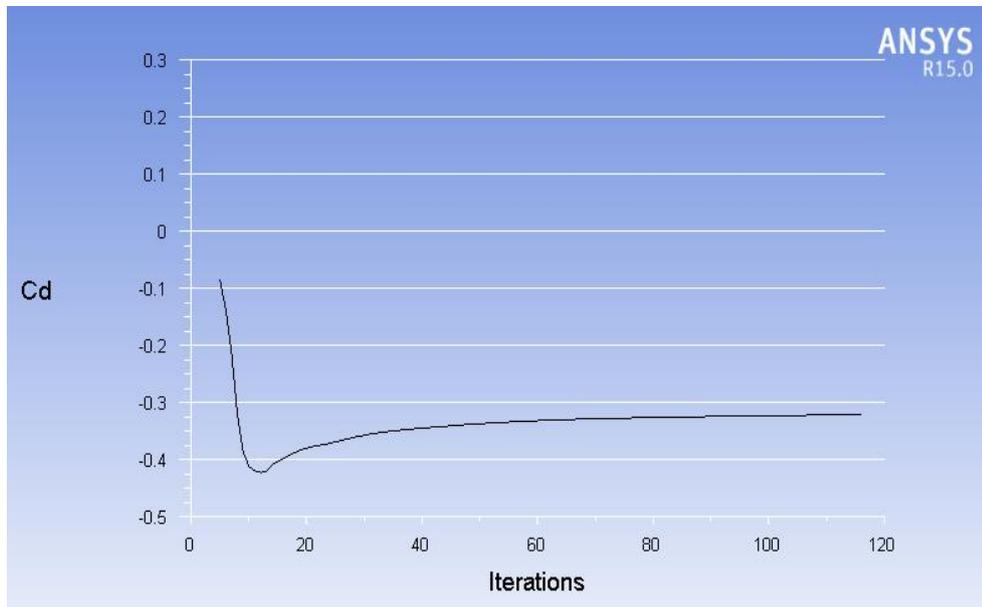


Figura 3.20. Coeficiente de arrastre (Cd).

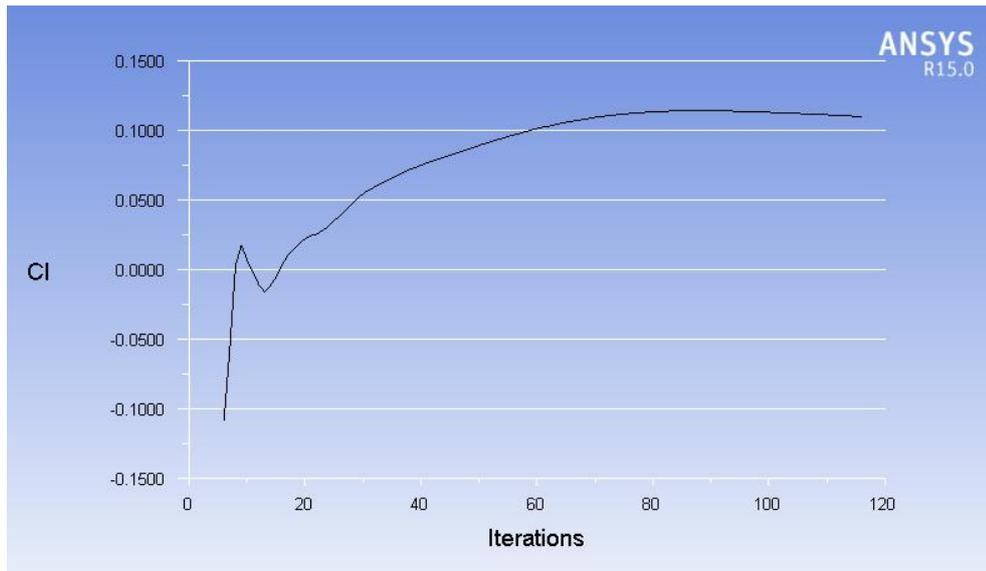


Figura 3.21. Coeficiente de sustentación (Cl).

3.2.2.3 Resultados

Como se había mencionado anteriormente, para verificar que los resultados son correctos, es necesario analizar la sensibilidad de la malla, entonces para esta carrocería se han propuesto 6 mallas diferentes, las cuales se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 3-1. Resultados.

Ítem	Tamaño (mm)	#Nodos	#Elementos	Centro de relevancia	Suavizado	#Capas(capa límite)	Cd	Cl
1	20	65030	311964	Fino	Alto	2	0,3205	0,1104
2	10	78105	374105	Fino	Alto	2	0,3206	0,1084
3	10	83591	384536	Medio	Medio	3	0,3224	0,1074
4	10	83658	384855	Fino	Alto	3	0,3216	0,1079
5	8	83306	398795	Fino	Fino	2	0,3217	0,1097
6	8	83444	399811	Medio	Medio	2	0,3220	0,1097

Como se aprecia la variación entre mallas del valor de Cd es mínima, es decir los resultados son bastante estables tal como se puede observar en la tabla 3.1 y en la figura 3.22. En lo que respecta al CI (todos los valores corresponde a sustentación negativa) igualmente la variación de valores es muy pequeña, como se observa en la tabla 3.1 y la figura 3.23.

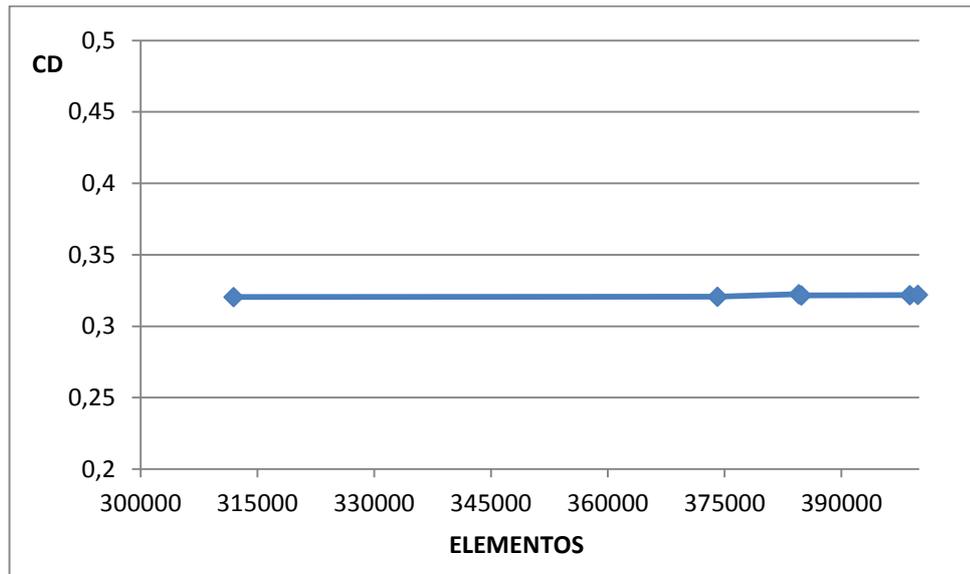


Figura 3.22. Cd en función del número de elementos

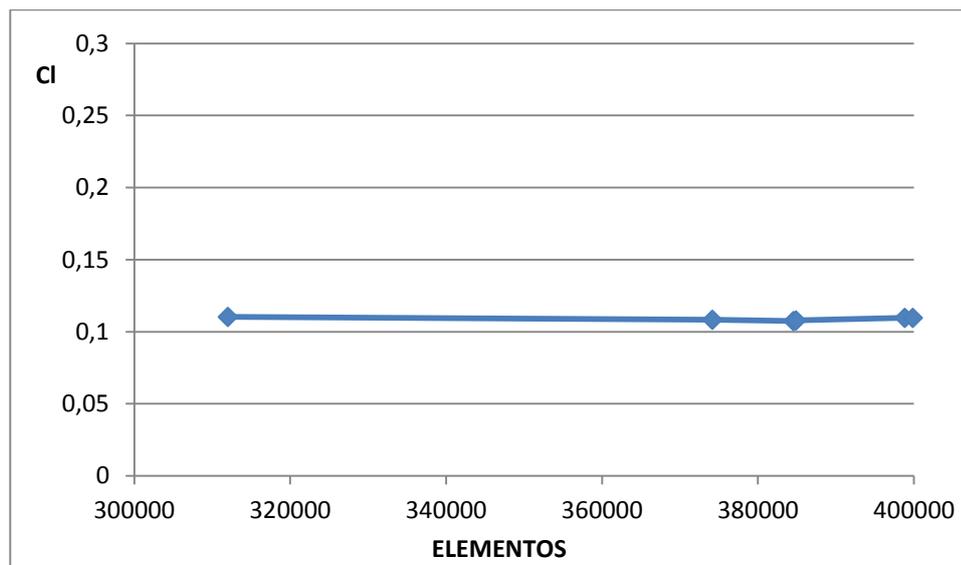


Figura 3.23. CI en función del número de elementos.

Se puede decir que los resultados obtenidos de C_d y C_l son adecuados, además se tiene la opción de seleccionar la malla que represente un menor coste computacional, es decir, la que posea el menor número de nodos y elementos. Por lo tanto se puede trabajar con la malla 1 de la tabla 3.1.

El objetivo de este análisis es principalmente obtener los datos correspondientes a: el coeficiente de arrastre (C_d), el coeficiente de sustentación (C_l), la presión que ejerce el viento sobre el vehículo y la velocidad del flujo de aire sobre la carrocería. Entonces sabiendo que la velocidad de análisis es 30km/h(8.33m/s) se tiene:

- Coeficiente de arrastre (C_d): 0.3205.
- Coeficiente de sustentación (C_l): -0,1104
- Presión máxima ejercida sobre el vehículo: 60Pa.
- Fuerza de arrastre aerodinámica: 8.991N
- Velocidad máxima del flujo de aire: 13m/s.
- Velocidad mínima del flujo de aire: 0.7m/s.

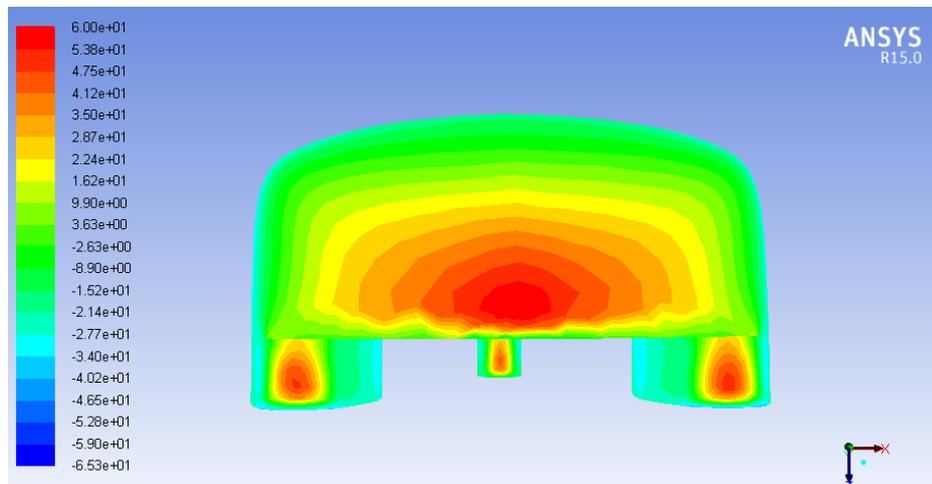


Figura 3.24. Resultados gráficos de presión.

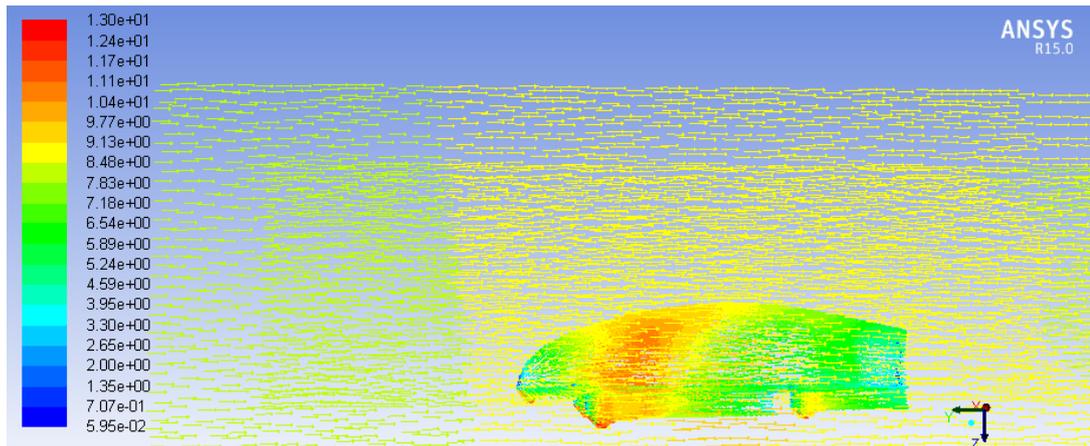


Figura 3.25. Resultados gráficos de velocidad de flujo.

3.3 Propuesta 2

3.3.1 Pre-proceso

3.3.1.1 Importación de la geometría

Como ya se había mencionado anteriormente, el modelo tiene que ser un sólido entero para no tener inconvenientes en la creación de la malla.

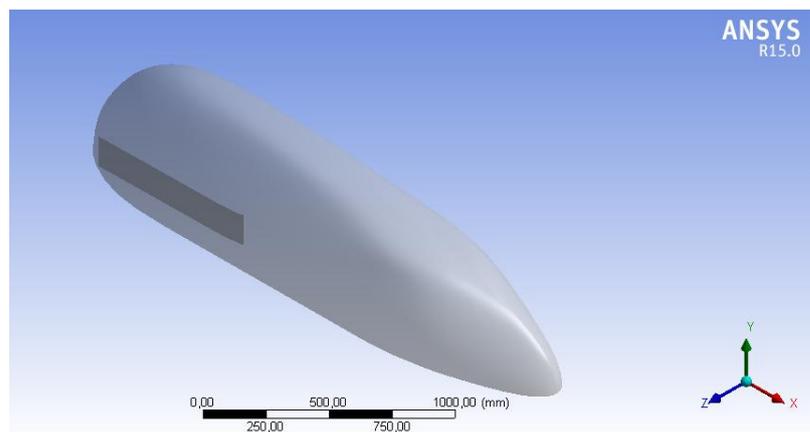


Figura 3.26. Geometría importada al software ANSYS R15.0.

3.3.1.2 Dominio

Es necesario determinar las dimensiones del túnel de viento. Entonces empleando la ecuación $\varphi = \frac{A}{A_N}$ (30), se tiene:

$$A=0.24\text{m}^2 \quad \varphi=0,10$$

Despejando y reemplazando tenemos $A_N= 2.4\text{m}^2$

Teniendo en cuenta las dimensiones de la figura 3.27, se puede determinar las medidas del túnel, como se explicó en el apartado 3.2.1.2.

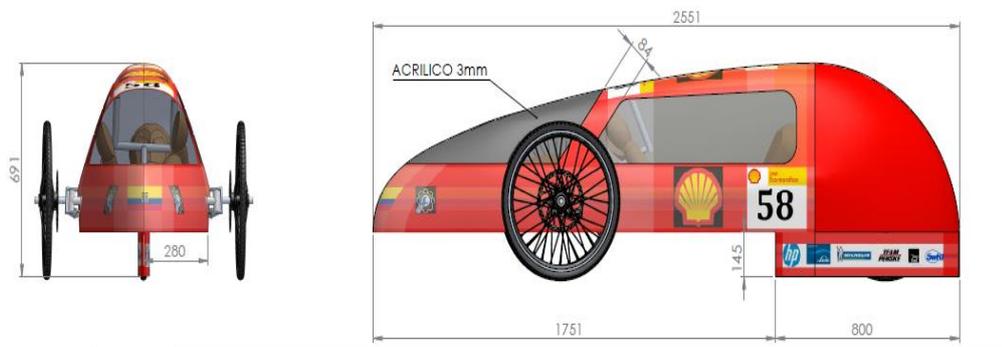


Figura 3.27. Cotas de la carrocería, propuesta 2.

Finalmente las dimensiones del túnel de viento o dominio computacional son ancho $a=1.6\text{m}$, altura $h=1.5\text{m}$ y longitud $l=6\text{m}$.

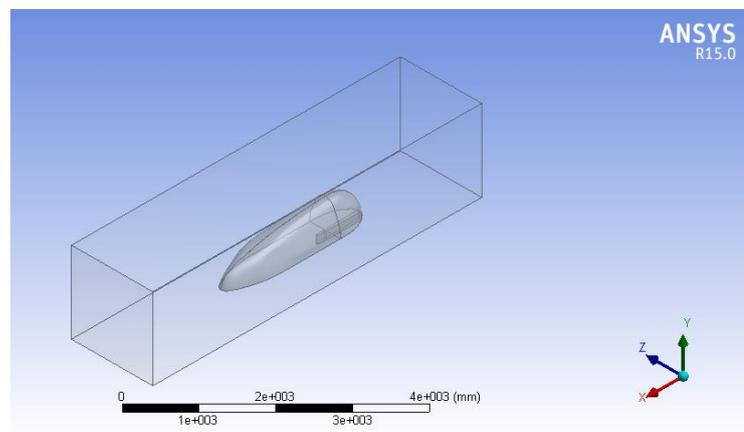


Figura 3.28. Dominio computacional.

3.3.1.3 Mallado

Es necesario determinar el espesor de la capa límite (dicho espesor se representa con la malla estructurada) entonces:

- **Número de Reynolds:** $U=30\text{km/h}$ (8.33m/s , velocidad de desplazamiento promedio de un prototipo Shell Eco Marathon). $X=2.551\text{m}$ (longitud del vehículo). $\nu=1,470 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$. Empleando la ecuación (33) tenemos:

$$Re_x = \frac{\frac{8.33\text{m}}{\text{s}} * 2.551\text{m}}{1.470 \times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}}$$

$$Re_x = 1.44 \times 10^6$$

Se establece que el régimen del flujo es turbulento.

- **Espesor de la capa límite:** Se sabe que el flujo es turbulento, entonces se selecciona la ecuación (32).

$$\delta = 2.551\text{m} \frac{0.16}{(1.44 \times 10^6)^{1/7}}$$

$$\delta = 0.054\text{m} = 54\text{mm}$$

Al igual como se realizó en la propuesta de carrocería 1, es necesario verificar que los resultados de la solución sean correctos, mediante el análisis de la sensibilidad de la malla. Por lo tanto de igual manera se han propuesto seis mallas de diferente tamaño, cuyas características se presentarán más adelante en conjunto con los resultados de C_d y C_l .

A continuación se presenta una de las mallas, con la finalidad, de apreciar la capa límite delimitada en el mallado y el proceso para determinar la calidad.

En la figura 3.29 se presenta las características de la malla.

Details of "Mesh"	
+	Defaults
-	Sizing
	Use Advanced Size Function On: Proximity and Curvature
	Relevance Center Fine
	Initial Size Seed Active Assembly
	Smoothing High
	Transition Slow
	Span Angle Center Fine
	<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle 12,0 °
	<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap Default (3)
	<input type="checkbox"/> Min Size 10,0 mm
	<input type="checkbox"/> Proximity Min Size 10,0 mm
	<input type="checkbox"/> Max Face Size 100,0 mm
	<input type="checkbox"/> Max Size 200,0 mm
	<input type="checkbox"/> Growth Rate Default (1,20)
	Minimum Edge Length 25,3370 mm
-	Inflation
	Use Automatic Inflation All Faces in Chosen Named Sele...
	Named Selection wall-prot.
	Inflation Option Total Thickness
	<input type="checkbox"/> Number of Layers 3
	<input type="checkbox"/> Growth Rate 1,2
	<input type="checkbox"/> Maximum Thickness 54, mm
	Inflation Algorithm Pre
	View Advanced Options No

Figura 3.29. Parámetros de la malla.

En la figura 3.30 se presenta el mallado final.

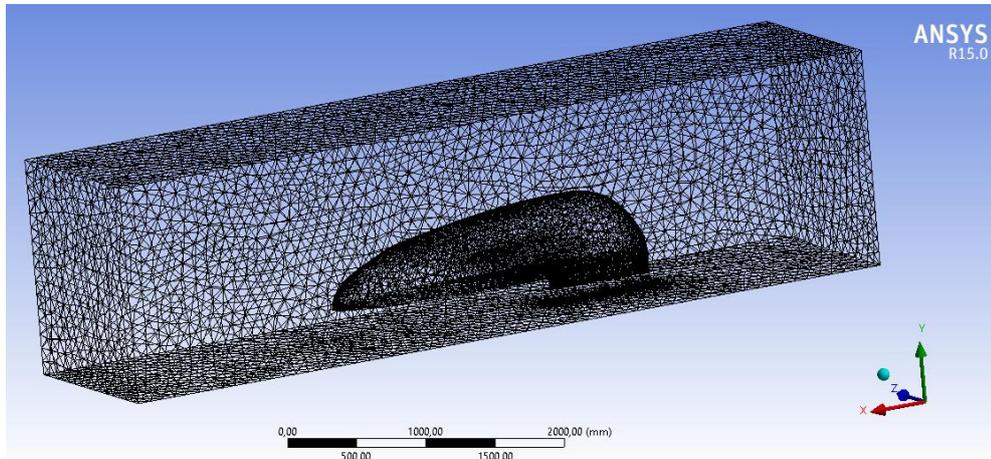


Figura 3.30. Malla del dominio computacional.

La zona de la capa límite de espesor 54mm, se puede apreciar en la figura 3.31.

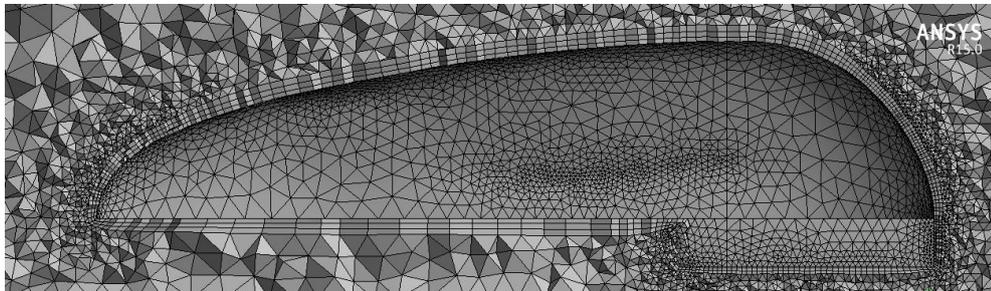


Figura 3.31. Delimitación de la malla estructurada en la zona considerada para el análisis de la capa límite.

3.3.1.3.1 Determinación de la calidad de la malla

- **Distorsión:** La malla posee 60884 nodos 274202 elementos, el elemento con mayor distorsión tiene un valor de 0.86, que en base de los valores referenciales de la figura 3.8, se considera una malla aceptable para el análisis.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	60884
<input type="checkbox"/> Elements	274202
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	3,71407946107016E-04
<input type="checkbox"/> Max	0,866172805771193

Figura 3.32. Valores de distorsión de la malla.

En la figura 3.33, se aprecia cómo están distribuidos los elementos en función de la distorsión. Tomando como referencia la figura 3.8 (Skewnes) se tienen:

- En el rango “excelente” (0-0.25), el 59.66% de elementos.
- En el rango “muy bien” (0.25-0.5), el 37.91% de elementos.
- En el rango “bien” (0.5-0.8), el 2.41% de elementos.
- En el rango “aceptable#” (0.8-0.94), el 0.0065% de elementos.

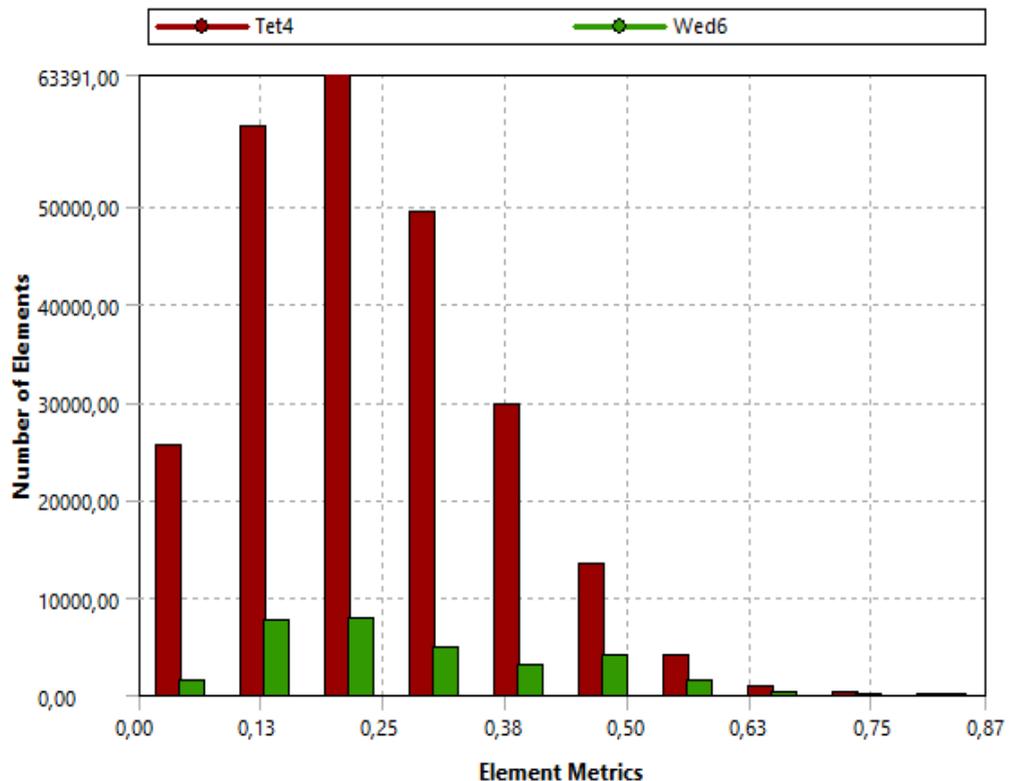


Figura 3.33. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la distorsión.

- **Calidad Ortogonal:** El elemento que presenta la menor calidad ortogonal, tienen un valor de 0.25, teniendo en cuenta los valores de referencia de la figura 3.9 (calidad ortogonal), se encontraría en el rango bien.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	60884
<input type="checkbox"/> Elements	274202
<input checked="" type="checkbox"/> Mesh Metric	Orthogonal Quality ▾
<input type="checkbox"/> Min	0,253626251600527
<input type="checkbox"/> Max	0,99941044123078

Figura 3.34. Valores de calidad ortogonal de la malla.

En la figura 3.35, se puede apreciar la distribución de elementos en función de la calidad ortogonal. Tomando como referencia la figura 3.9 (OQ) se tienen:

- En el rango “excelente” (0.95-1), el 25.5% de elementos.
- En el rango “muy bien” (0.70-0.95), el 69.08% de elementos.
- En el rango “bien” (0.20-0.69), el 6.39% de elementos.

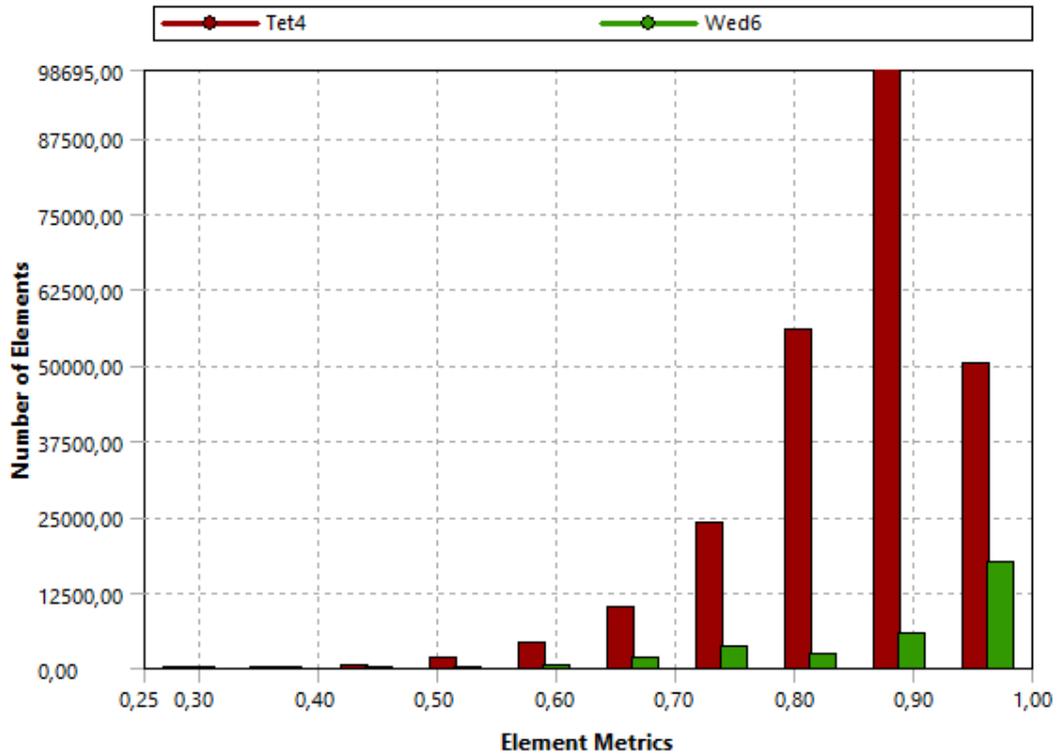


Figura 3.35. Gráfica de la distribución del número de elementos en función de la calidad ortogonal.

- **Relación de aspecto:** Este valor tiene que estar por debajo del 20%, siendo el valor de la malla en análisis de 16.5%.

Entonces por todo lo dicho se concluye que la malla posee una calidad adecuada para ejecutar el análisis. El mismo proceso fue realizado para las ocho mallas propuestas, de esta manera se garantiza un mallado adecuado para el análisis.

3.3.1.3.2 Condiciones de contorno

Es necesario determinar las zonas del dominio, es decir: Wall-prot. (Vehículo), entrada, salida, piso, techo, paredes, ya que, esto es necesario para la correspondiente configuración en el Fluent.

3.3.2 Proceso para el cálculo CFD

Para el análisis se considera una velocidad de 30km/h (velocidad promedio de un prototipo Shell Eco Marathon)

3.3.2.1 Configuración del programa para el análisis

La configuración realizada en el Fluent, es exactamente la misma al del análisis de la carrocería anterior, con la única diferencia que en la zona de valores de referencia el área es de 0.24m^2 .

3.3.3 Solución

Observando la gráfica de residuos, el análisis fue estable.

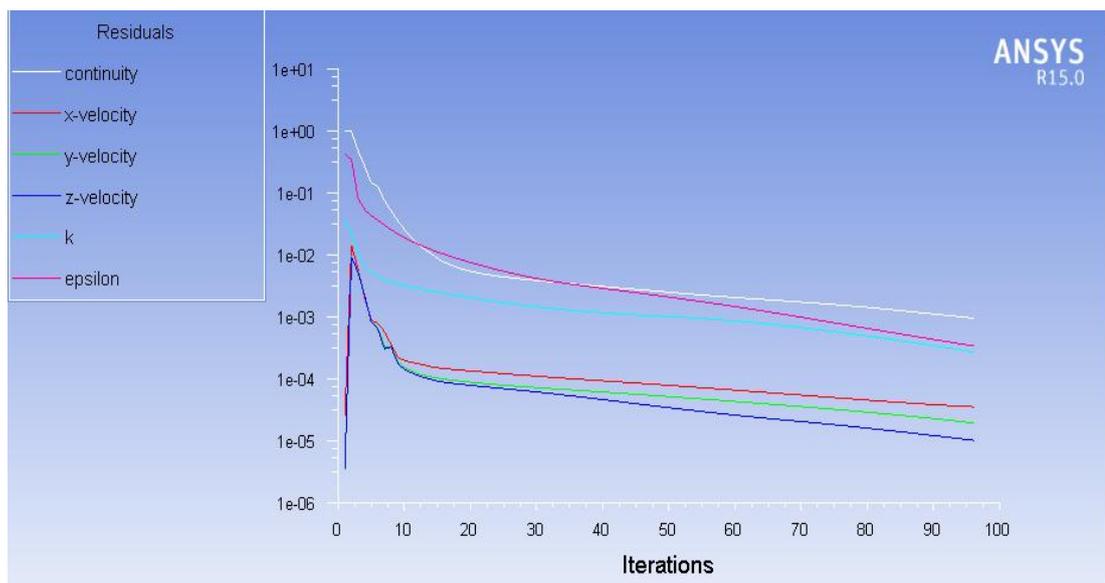


Figura 3.36. Gráfica de Residuos.

3.3.4 Resultados

Igual que como se realizó en la carrocería anterior es necesario verificar que los resultados son correctos, haciendo un análisis de sensibilidad de la malla, entonces

para esta carrocería se han propuesto 6 mallas diferentes, las cuales se puede apreciar en la tabla 3.2.

Tabla 3-2. Resultados.

Ítem	Tamaño (mm)	#Nodos	#Elementos	Centro de relevancia	Suavizado	#Capas(capa límite)	Cd	Cl
1	30	34154	161874	Medio	Medio	2	0,3567	0,0567
2	30	34212	162215	Fino	Alto	2	0,3570	0,0562
3	30	36684	166861	Fino	Alto	3	0,3687	0,0752
4	20	48067	218342	Medio	Medio	3	0,3698	0,0708
5	20	48067	218346	Fino	Alto	3	0,3698	0,0707
6	10	60884	274202	Fino	Alto	3	0,3689	0,0711

En la tabla 3.2 y en la figura 3.37, se aprecia que los valores de Cd, se mantienen estables desde la malla 3, al igual que los resultados de Cl (los datos corresponden a sustentación positiva), que se pueden observar en la imagen 3.38.

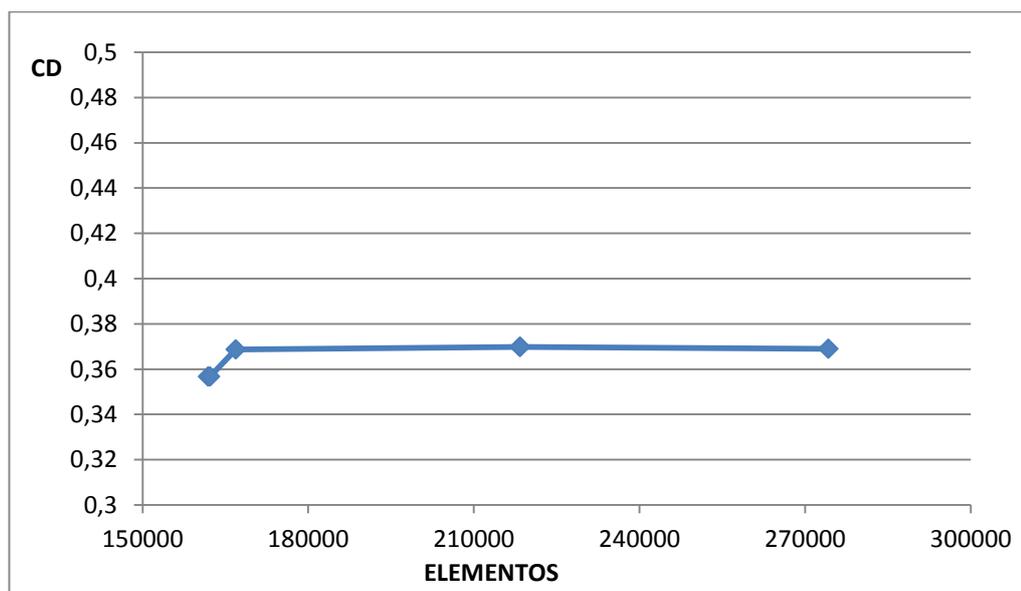


Figura 3.37. Cd en función del número de elementos.

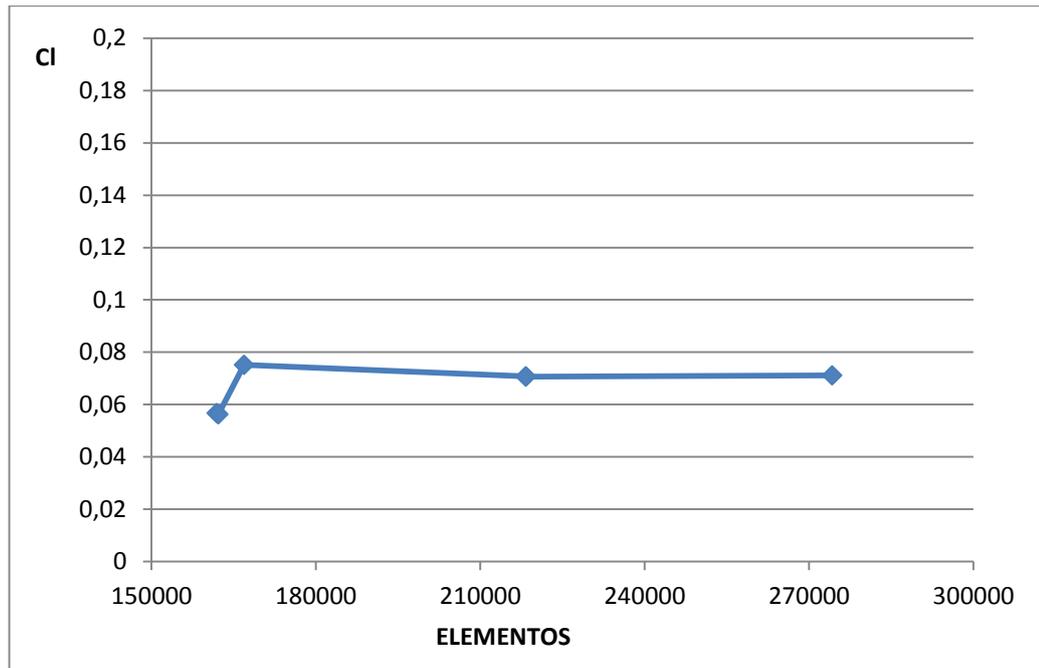


Figura 3.38. Cl en función del número de elementos.

Finalmente con el objetivo de reducir el coste computacional, la opción 4 de la tabla 3.2 sería la más adecuada. Entonces los valores de: coeficiente de arrastre (C_d), coeficiente de sustentación (C_l), presión que ejerce el viento sobre el vehículo y la velocidad del flujo de aire sobre la carrocería. A una velocidad de análisis de 30km/h(8.33m/s) es:

- Coeficiente de arrastre (C_d): 0.3698
- Coeficiente de sustentación (C_l): +0,0708
- Presión máxima ejercida sobre el vehículo: 60.73 Pa.
- Fuerza de arrastre aerodinámico: 3.772N
- Velocidad máxima del flujo de aire: 11.63m/s.
- Velocidad mínima del flujo de aire: 0.4m/s.

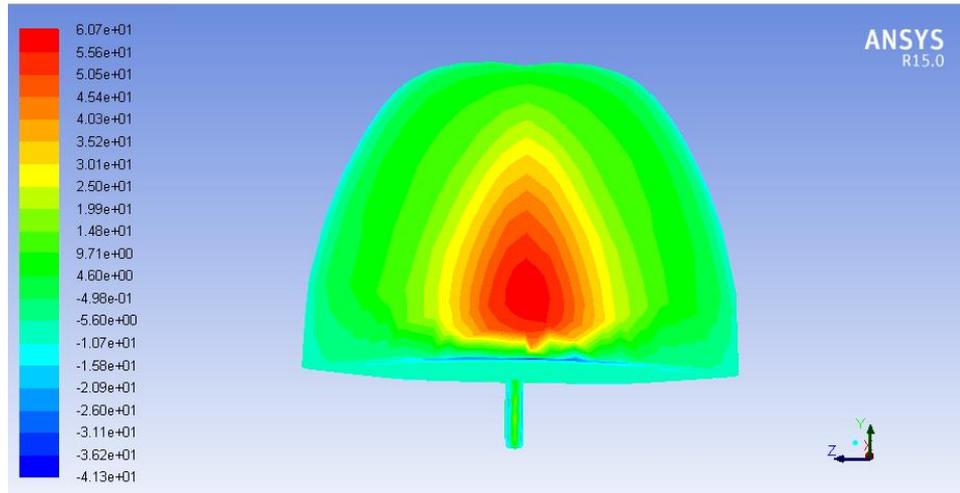


Figura 3.39. Resultados gráficos de presión.

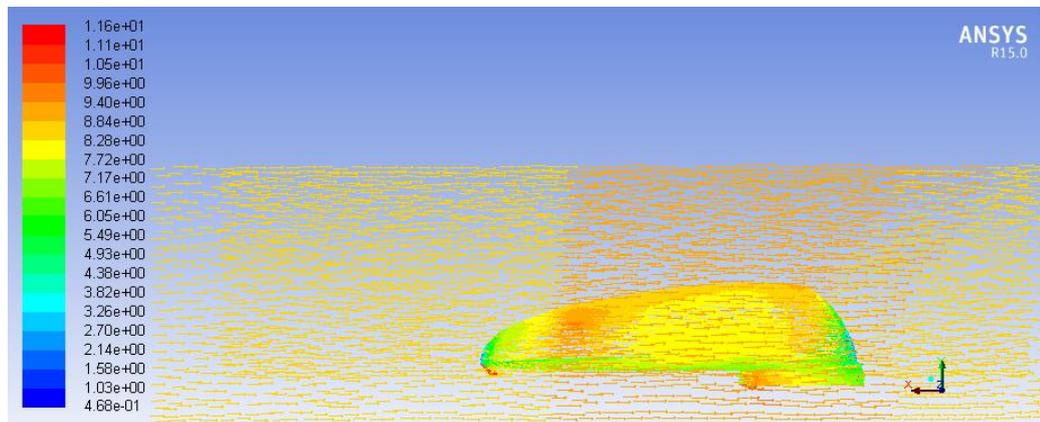


Figura 3.40. Resultados gráficos de velocidad de flujo, a 10km/h

3.4 Selección de la carrocería

Con el análisis realizado tanto en el capítulo 2 como en el 3 se llegó a determinar lo siguiente:

Tabla 3-3. Comparación de Resultados entre carrocerías 1 y 2.

Carrocería	Masa (kg)	Cd	Cl	Presión Max (pa)	Velocidad min (m/s)	Velocidad max (m/s)
Propuesta 1	18.31	0.3205	-0.1104	60	0.7	13
Propuesta 2	10.06	0.3698	0.0708	60.73	0.4	11.63

La propuesta 2 presenta mejores resultados en cuanto a visibilidad, accesibilidad y sobre todo es más liviana, su masa es 8.25kg menos en relación a la otra opción, en lo que respecta a características aerodinámicas los resultados no difieren en mayor medida.

Un prototipo Shell Eco Marathon, es un vehículo, cuyo consumo de energía debe ser el menor posible, en donde cada sistema contribuye a tener una buena o mala eficiencia energética. Por lo tanto la selección de la carrocería es de suma importancia, tomar una decisión en función de la tabla 3.3, no nos garantiza que sea la correcta. Entonces en este trabajo se ha utilizado la ecuación de movimiento de un vehículo, la cual permite conocer la fuerza total que el prototipo tiene que vencer para desplazarse. Se tiene:

$$FT = F_D + Fr + Fp + Fj \quad Ec. (34)$$

En donde:

FT: fuerza total a vencer por el vehículo.

F_D : resistencia por acción del viento.

Fr: resistencia por rodadura.

Fp: resistencia por pendiente.

Fj: resistencia por inercia.

- **Resistencia por acción del viento:** empleando la ecuación (11) $F_D = C_D * \frac{1}{2} \rho V^2 A$:

Propuesta 1

$$F_D = 0.3205 * \frac{1}{2} 1.225 \frac{kg}{m^3} \left(8.33 \frac{m}{s}\right)^2 0.66m$$

$$F_D = 8.99N$$

Propuesta 2

$$F_D = 0.3698 * \frac{1}{2} 1.225 \frac{kg}{m^3} \left(8.33 \frac{m}{s}\right)^2 0.24m$$

$$F_D = 3.77N$$

Los valores calculados coinciden, con los determinados en el análisis CFD.

- **Resistencia por rodadura:** Para determinar la resistencia por rodadura se tiene la siguiente ecuación:

$$Fr = f_R * G \quad \text{Ec. (35)}$$

En donde:

f_R : coeficiente de resistencia a la rodadura (para este caso particular se emplea el $f_R=0.0025$ que es el coeficiente para ruedas destinadas a la competencia Shell Eco Marathon)

G: peso total del vehículo (m.g)

Propuesta 1

Masa total (vehículo + piloto)= 115.31kg

$$Fr = 0.0025 * 115.31kg * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$Fr = 2.82N$$

Propuesta 2

Masa total (vehículo + piloto)= 107kg

$$Fr = 0.0025 * 107\text{kg} * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$Fr = 2.62N$$

- **Resistencia por pendiente:** Para el cálculo de esta resistencia se tiene la ecuación:

$$Fp = m * g * \text{sena} \quad \text{Ec. (36)}$$

En donde:

m: masa total del vehículo.

g: aceleración por efecto de la gravedad (9.81m/s^2)

En este caso se asume que el vehículo se encuentra en una superficie plana, sin inclinación por lo tanto los valores de esta resistencia son cero para ambos casos.

- **Resistencia por inercia:** Se tiene la siguiente ecuación:

$$Fj = m.a \quad \text{Ec. (37)}$$

Para determinar este valor es necesario realizar pruebas de conducción en el vehículo, pero por obvias razones eso no es posible. Por lo que se plantea la siguiente suposición, que para ambos casos de carrocería el prototipo recorre 500m en línea recta en una superficie sin inclinación, partiendo desde el reposo con una velocidad inicial cero y alcanzando en dicha distancia 30km/h.

Entonces empleando la ecuación de velocidad para el movimiento rectilíneo uniformemente variado, se tiene:

$$V^2 = V_o^2 + 2a \cdot e \quad \text{Ec. (38)}$$

$$a = \frac{V^2 - V_o^2}{2e}$$

$$a = \frac{\left(8.33 \frac{m}{s}\right)^2 - 0}{2(500m)}$$

$$a = 0.069m/s^2$$

Empleando la ecuación (37)

Propuesta 1

Masa total (vehículo + piloto)= 115.31kg

$$Fj = 115.31kg * 0.069 \frac{m}{s^2}$$

$$Fj = 7.95N$$

Propuesta 2

Masa total (vehículo + piloto)= 107kg

$$Fj = 107kg * 0.069 \frac{m}{s^2}$$

$$Fj = 7.38N$$

Finalmente la fuerza total que tiene que vencer el vehículo, empleando la ecuación (34) es:

Propuesta 1

$$FT = 8.99N + 2.81N + 7.95N$$

$$FT = 19.75N$$

Propuesta 2

$$FT = 3.71N + 2.62N + 7.38N$$

$$FT = 13.71N$$

Por los resultados obtenidos, se puede apreciar que empleando la carrocería de la propuesta 2, el prototipo tiene que vencer una menor fuerza de desplazamiento, por lo tanto el consumo de energía es menor.

3.5 Conclusiones

La carrocería seleccionada para pasar al proceso de construcción es la propuesta 2, ya que, como se dijo presenta mejores características en cuanto a visibilidad, accesibilidad, peso y sobre todo esta opción ofrece una menor resistencia el desplazamiento del vehículo, lo que significa un menor consumo de energía, objetivo principal de un prototipo Shell Eco Marathon.

CAPÍTULO IV

CONSTRUCCIÓN DE LA CARROCERÍA.

4.1 Molde para carrocería

Con ayuda del software CAD se obtuvo la vista lateral y superior la cual será la base del molde además se realizó cortes en la vista lateral estos se muestran en la figura 4.1 posteriormente se los transfirió a madera MDF para su corte y armado que se observa en la figura 4.2

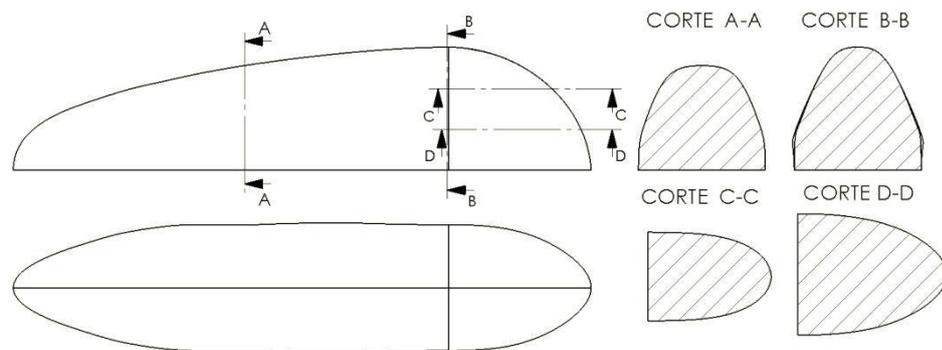


Figura 4.1 Cortes para construcción.



Figura 4.2 Molde en madera.

4.2 Manufactura de la carrocería

Una vez que se armó el molde; este fue enviado al taller de fibra de vidrio, Ecuafibra ubicado en la ciudad de Cuenca, al cual fue encargado el trabajo. Primero realizaron la forma de la carrocería base como se indica en la figura 4.3, para un proceso posterior de corrección de forma y detalles ya que fue un trabajo artesanal.



Figura 4.3 Carrocera en forma base.

Además, se realizaron cortes de ventanas y parabrisas como se muestra en la figura 4.4



Figura 4.4 Carrocera con cortes de parabrisas y ventanas.

Una vez realizado los cortes se continuó con la fabricación de las cejas en donde se ubican las ventanas y parabrisas (figura 4.5). Posteriormente se realizaron los cortes de acceso del piloto, del tren motriz y zonas para desmontar la carrocería.



Figura 4.5 Cejas de parabrisas y ventanas.

Con todos los cortes realizados se procedió a preparar la carrocería para la personalización, el cual se desarrolló mediante tres procesos:

- Proceso de acabado superficial; el cual consiste en aplicar masilla en las superficies irregulares.
- Proceso de imprimación; en la que se utilizó un fondo de color gris
- Proceso de personalización; se utilizó pintura protectora automotriz de color rojo

El resultado final del proceso de personalización se observa en la figura 4.6



Figura 4.6 Acabado final de pintura de carrocería.

Una vez terminado el proceso de personalización, se continuó con el montaje de los puntos de anclaje para el ensamblaje de la carrocería, para lo cual se seleccionaron uniones de aluminio adheridos con fibra de vidrio (figura4.7)



Figura 4.7 Anclajes de carrocería.

También, para el anclaje de la carrocería al chasis se utilizaron pernos M6x1 y para el mecanismo de apertura de la puerta del piloto se ensambló un sistema mecánico de cuarto de vuelta (figura4.8), siendo operable desde el interior y exterior del prototipo.



Figura 4.8 Mecanismo de puerta de acceso del piloto.

Una vez que se fijaron los puntos de anclaje, se ensambló el prototipo completo (figura4.9) con el objetivo de obtener los moldes para las ventanas y el parabrisas.



Figura 4.9 Ensamblaje de prototipo.

4.3 Moldes y matrices para ventanas

Los moldes de las ventanas se realizaron mediante un acetato transparente (figura 4.10) el cual es de fácil manipulación



Figura 4.10 Molde de parabrisas en acetato.

Una vez con el molde en acetato se procedió a escanearlo ya que los cortes se realizaron con una fresadora CNC, por lo tanto, era necesario transferir la información escaneada a un software para la posterior programación del equipo de corte. El resultado final se observa en la figura 4.11

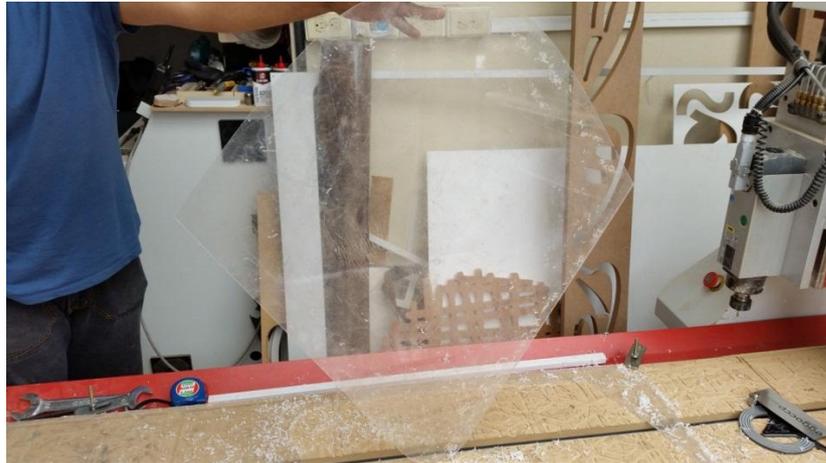


Figura 4.11 Molde de parabrisas en acrílico.

El proceso de manufactura de ventanas y parabrisas fue mediante termo formado para lo cual se necesitó la matriz y los moldes para poder realizar este proceso, las matrices se las fabrico de láminas de acero (figura 4.12 y 4.13)



Figura 4.12 Matriz de parabrisas.



Figura 4.13 Matriz de ventana derecha.

4.4 Manufactura de parabrisas y ventanas

Con los moldes y las matrices listas se inició el proceso de termo formado, el cual en una primera etapa se elevó la temperatura del acrílico mediante un soplete hasta el punto de que estos sean flexibles como lo indica en la figura 4.14



Figura 4.14 Aplicación de calor a molde mediante soplete a moldede parabrisas.

En una segunda etapa se montó el acrílico, en la matriz, con recortes de cartón se ejerció presión para que el acrílico tome la forma base (figura 4.15)



Figura 4.15 Resultado final de termo formado de parabrisas.

Una vez que se terminó con el proceso de termo formado se realizó el montaje en la carrocería verificando que se acoplen correctamente (figura 4.16)



Figura 4.16 Montaje de parabrisas en carrocería.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- Para entender los efectos que el flujo de aire produce al circular sobre un vehículo, es necesario conocer los conceptos de la dinámica de fluidos. Además es fundamental comprender los criterios que se emplean al realizar un análisis de dinámica de fluidos computacional (CFD). Para esto se realizó un estudio de la teoría relacionada
- De las dos alternativas de carrocería presentadas, las mismas que fueron diseñadas en un software CAD, siguiendo el reglamento establecido por la competencia Shell Eco Marathon. Se determinó que la propuesta 2 es la más adecuada para equipar el prototipo final. Para llegar a esta conclusión se evaluó las carrocerías en dos partes.
 - En primer lugar se consideró visibilidad, accesibilidad y peso, en donde el análisis realizado en el software CAD, ha permitido determinar que la propuesta 2 tiene una masa de 10.06kg a diferencia de la propuesta 1 que cuenta con una masa de 18.31kg. Durante la competencia en la que se participó con el prototipo en Estados Unidos en la ciudad de Detroit en Abril del 2016 se pudo validar la visibilidad en donde los pilotos fueron capaces de observar todos los puntos que el inspector solicitaba, de igual manera la prueba de accesibilidad fue superada sin mayor inconveniente, los conductores lograron salir del prototipo en un tiempo de 4.7s y 5.7s respectivamente, debajo del límite máximo de 10s.
 - En segundo lugar se realizó el análisis aerodinámico de cada carrocería, empleando un software CFD, obteniéndose un coeficiente de arrastre (C_d) de 0.32 para la propuesta 1 y de 0.36 para la propuesta 2, que en conjunto con los datos obtenidos de masa y de área frontal de cada alternativa y empleando las ecuaciones de dinámica longitudinal de un vehículo, para encontrar la fuerza total que debe vencer el prototipo para desplazarse, se llegó a determinar que la propuesta 2 presenta una menor resistencia al avance con un valor de 13.71N en relación a la otra opción de 19.75N.

- El uso de programas computacionales ayudan a diseñar y simular de tal forma que se puede hacer mejoras, corregir errores todo esto antes de pasar al proceso de manufactura lo que es un ahorro considerable de tiempo y dinero.
- La carrocería fue construida con fibra de vidrio ya que tiene características como: maniobrabilidad, bajo costo, disponibilidad y bajo peso, para las ventanas y parabrisas, se usó acrílico, un plástico con una excelente transparencia, bajo peso, facilidad de termo formado y disponibilidad.
- Uno de los mayores inconvenientes de la carrocería en fibra de vidrio fue que no se contó con un espesor constante por lo que se tuvo que realizar una operación de desbaste con el fin de obtener un espesor uniforme y disminuir el peso.
- La manufactura del parabrisas fue uno de los elementos en lo que más se invirtió tiempo, esto debido primeramente a la fabricación del molde que se lo realizó con lamina de acero, ya que optar por un método de maquinado CNC era demasiado costoso y el tiempo de entrega era elevado, en el proceso de termo formado se realizó a base de prueba-error ya que en el medio local la fabricación de piezas con curvas complejas no se lo realiza habitualmente.
- Para vehículos de alta eficiencia energética con formas poco convencionales, no hay información de la influencia de factores de diseño que comúnmente se analizan en el desempeño aerodinámico de un vehículo como son: ángulos de ataque frontales (superior e inferior), ángulo del parabrisas, ángulos de salida (parte posterior del vehículo), etc. En futuros prototipos se debería evaluar la influencia de los factores antes mencionados y determinar cómo afecta en el consumo energético del vehículo.

Recomendaciones:

- Con el objetivo de obtener una validación de datos, en futuros proyectos se puede utilizar túneles de viento a escala, en donde se puede analizar un mayor número de carrocerías con diferentes geometrías, apoyándose en tecnologías actuales como es la impresión 3D.
- Se recomienda que para futuras competencias se investiguen nuevos materiales que sean de origen local como son fibras de cabuya, totora, abacá, coco, palmas, paja toquilla, etc. Ya que dichas investigaciones podrían dar como resultado un material compuesto que pueda ser una alternativa a las fibras de vidrio y carbono, obteniendo similares propiedades físicas a un menor costo.
- En lo que respecta a ventanas y parabrisas para futuros prototipos, se recomienda que no tengan curvas complejas ya que en el medio local se lo realiza por métodos artesanales lo que conlleva a un elevado costo de manufactura y tiempos de entrega.
- Se recomienda implementar laboratorios para el estudio de materiales compuestos además de equipos CNC, impresoras 3d, plotters, túneles de viento a escala, esto con el fin de no depender de terceros a la hora de manufacturar futuros prototipos reduciendo los costos de fabricación y entrega.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, B., Betancourt, M., & Pinheiro, F. (2012). Shell Eco-Marathon 100% of Final Report. Estados Unidos.
- ANSYS, Inc. (10 de Mayo de 2016). *ANSYS Customer Portal*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de ANSYS Customer Portal: <https://support.ansys.com/portal/site/AnsysCustomerPortal>
- Barrero Ripoll, A., & Perez-Saborid Sánchez-Pastor, M. (2005). Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de fluidos. En A. Barrero Ripoll, & M. Perez-Saborid Sánchez-Pastor, *Fundamentos y aplicaciones de la mecánica de fluidos* (pág. 577). España: McGraw-Hill.
- Bergadá Grañó, J. (2012). Mecánica de fluidos: breve introducción teórica con problemas resueltos. En J. Bergadá Grañó, *Mecánica de fluidos: breve introducción teórica con problemas resueltos* (pág. 719). España: Universitat Politecnica de Catalunya.
- Besednjak Dietrich, A. (2005). *Materiales compuestos: procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Univerdidad Politécnica de Catalunya.
- BOSCH, R. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. España.
- C. A. Barazal, I. F. (6 de Mayo de 2002). *CásBil*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2015, de <http://www.casbil.com/documentacion/Technical%20Articles/INTERESCFD.pdf>
- Cabrera, R., Francisque, C., & Synalovski, L. (2015). *Shell Eco-Marathon: Electric Car Prototype*. Estados Unidos.
- Campos López, R. (2008). *Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental*. España.

- Cedeño, E., Álvarez, R., Cobos, O., Mejía, O., Montalvo, F., Ponce, S., y otros. (2011). *Nuevos Materiales: Aplicaciones estructurales e industriales*. Quito: imprefepp.
- Cengel, Y., & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones*. En Y. Cengel, & J. Cimbala, *Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones* (pág. 997). España: McGraw-Hill.
- Cumbe Fárez, E. S., & Rockwood Iglesias, R. E. (2009). Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional-CFD-. En E. S. Cumbe Fárez, & R. E. Rockwood Iglesias, *Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional-CFD-* (pág. 218). Cuenca-Ecuador.
- Del Corral, F., Trejo, I., & Valle, J. (Octubre de 2008). *CÁLCULO CON CFD VISCOZO DE UN SISTEMA DE UN SISTEMA DE PROPULSIÓN ELÉCTRICA AZIMUTAL TIPO POD, Y POSTERIOR VALIDACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES*. Recuperado el 3 de diciembre de 2015, de CANAL DE EXPERIENCIAS HIDRODINÁMICAS, EL PARDO: http://www.cehipar.es/_files/users/publicaciones/210.pdf
- Fernández, O. J. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por método de volúmenes finitos*. España: Reverté.
- González Santander Martínez, J. L., & Castellano Estornell, G. (2014). Fundamentos de mecánica de fluidos. En J. L. González Santander Martínez, & G. Castellano Estornell, *Fundamentos de mecánica de fluidos* (pág. 522). España: ECU.
- Hucho, I., & Heinrich, W. (2013). *Aerodynamics of road vehicles*. EEUU: Elsevier.
- Labs, P. (Julio de 2015). *Proto Labs*. Recuperado el 2016 de Febrero de 22, de http://www.protolabs.es/resources/design-tips/spain/2015-07/?utm_source=CentroEspañolPlastico

- Martínez Sánchez, J. I. (2010). *Diseño, desarrollo y fabricación de la carrocería monocasco de un vehículo prototipo para la European Shell Eco-Marathon*. España.
- Mater Dei Super Millague Team. (24 de Mayo de 2015). Recuperado el 20 de Febrero de 2016, de https://www.flickr.com/photos/shell_eco-marathon/16915484518/in/album-72157651862180405/
- Miravete, A. (2012). *Materiales Compuestos I*. Barcelona: Reverté.
- Muñoz Mejías, A. (2012). *Diseño y análisis computacional para túnel de viento de baja velocidad*. España.
- NSTRU Eco-Racing. (27 de Febrero de 2015). Recuperado el 20 de Febrero de 2016, de https://www.flickr.com/photos/shell_eco-marathon/16473463550/in/album-72157651051425165/
- Ortiz Flórez, R. (2011). *Hidráulica: generación de energía*. Colombia: Ediciones de la U.
- Pauta Solano, J. F., & Sánchez Ramírez, M. L. (2014). Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo Formula SAE. En J. F. Pauta Solano, & M. L. Sánchez Ramírez, *Diseño y construcción de la carrocería de un vehículo de competencia tipo Formula SAE* (pág. 210). Cuenca.
- Rodríguez Núñez, Y. (2006). *Ecuaciones fundamentales de la dinámica de fluidos*. La Habana.
- Sánchez Vásques, J. (Septiembre de 2004). *Universidad de Sevilla*. Recuperado el 26 de Noviembre de 2015, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>
- Santin, J., Onder, C., Bernard, J., Isler, D., Kobler, P., Kolb, F., y otros. (2007). *The World's most fuel efficient vehicle desing and development of PAC CAR II*. Zurich: vdf Hochschulverlag AG an der Zurich.
- Santin, J.-J., Onder, C., Bernard, J., Kobler, P., Isler, D., Kolb, F., y otros. (2007). *The world's most fuel efficient vehicle* . Zürich.

Shell. (28 de Diciembre de 2015). *Shell*. Recuperado el 28 de Diciembre de 2015, de Shell: <http://www.shell.es/future-energy/ecomarathon.html>

Shell Eco Marathon. (2016). *Shell Eco Matarhon 2016 Oficial Rules Chapter I*. Recuperado el 16 de Diciembre de 2015, de Shell: <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/americas/for-americas-participants/competition-overview.html>

Tizón, P. J. (30 de Diciembre de 2010). *Universidad Politécnica de Madrid*. Recuperado el 27 de Noviembre de 2015, de http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/Members/jmtizon/libre-eleccion/curso_actual/30_Mallas.pdf

Tu Fast Eco Team. (24 de Mayo de 2015). *Tu Fast Eco Team*. Recuperado el 2017 de Febrero de 2016, de <http://tufast-eco.de/en/media-2/pictures/eli15-pictures/>

White, F. (2004). *Mecánica de fluidos (5a.ed)*. En F. White , *Mecánica de fluidos (5a.ed)* (pág. 850). España: McGraw-Hill.

Young, H., & Freedman, R. (2009). *Física universitaria*. En H. Young, & R. Freedman, *Física universitaria* (pág. 760). México: Pearson Educación.