

# Universidad del Azuay

# Facultad de Ciencia y Tecnología

# Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

# Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional –CFD-

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecánica Automotriz

Autores

Edisson Santiago Cumbe Fárez

Robert Esteban Rockwood Iglesias

Director:

Ing. Hernán Viteri C.

Cuenca, Ecuador

2009

# **DEDICATORIA.**

Dedico esta tesis a mis padres que me ayudaron en todos los sentidos, me aconsejaron y alentaron durante mis estudios universitarios, de igual forma a mis familiares y amigos que estuvieron presentes y me apoyaron en momentos difíciles.

Edisson.

A mi madre, por su sacrificio e infinito apoyo.

Robert.

# AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación pudo ser realizado gracias a los conocimientos impartidos por parte de todo el personal docente de la Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz, de forma particular al Ingeniero Hernán Viteri nuestro director de tesis, quien estuvo pendiente del avance del mismo aclarando todas las inquietudes que presentaron durante su desarrollo. Expreso un agradecimiento especial a mi compañero de tesis Sr. Robert Rockwood pues puso toda su dedicación y seriedad para que esta monografía culmine de forma exitosa.

# Edisson.

A Rosalba por ser la razón de todo, a Johnpaul por tus consejos; a Edisson por tu aliento. Expreso además mi sincero agradecimiento al Ing. Hernán Viteri C. por su apoyo y confianza.

Robert.

### RESUMEN

En este estudio se realiza exitosamente la simulación computacional del comportamiento aerodinámico de un vehículo Toyota Corolla 2005, utilizando los mismos parámetros que se emplearían experimentalmente en el túnel de viento. En primer lugar se presentan los conceptos teóricos referentes a mecánica de fluidos y las técnicas numéricas empleadas por este tipo de programas. Luego se detalla la configuración de los mismos para realizar la simulación aerodinámica en dos y tres dimensiones, así se obtienen resultados de velocidad y presión del aire en las zonas adyacentes al vehículo. Además se obtienen los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre; este último presenta un error del 1.54% con respecto al valor presentado por el fabricante.

#### ABSTRACT

This study has successfully performed a computational simulation of the aerodynamic behavior of a Toyota Corolla 2005 vehicle, using the same parameters that would've been used experimentally into a wind tunnel. At first step, this work approaches the theoretical concepts related to fluids mechanics and the numerical models used by computational simulators. The configuration of these software is then detailed in order to perform aerodynamical simulations in two and three dimensions, this simulation gives results of speed and pressure in the adjacent zones of the vehicle, lift and drag aerodynamical coefficients are also obtained, the last one shows an error of 1.54 % in comparison to the value presented by the manufacturer.

# **INDICE DE CONTENIDOS**

Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	v
Índice de contenidos	vi
Índice de gráficos	xii
Índice de cuadros	xxi
INTRODUCCION	1
CAPITULO I: DINÁMICA DE FLUIDOS	3
1.1 GENERALIDADES	3
1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	4
1.2.1 Presión	4
1.2.2 Compresibilidad	5
1.2.3 Viscosidad	6
1.2.3.1 Viscosidad cinemática	7
1.3 REGIMEN LAMINAR Y REGIMEN TURBULENTO	8
1.3 1. Número de Reynolds	8
1.3.2 Régimen laminar	9
1.3.2.1 Ley de Poiseuille	9
1.3.3 Régimen turbulento	10
1.3.4 Fluidos estacionarios o no estacionarios	11
1.3.4.1 Trayectoria de una corriente	11
1.3.5 Fluidos rotatorios o no rotatorios	12
1.4 ECUACIONES ELEMENTALES EN MECANICA DE FLUIDOS	13
1.4.1 Conceptos generales del movimiento de los fluidos	13
1.4.2 Principio de continuidad	13
1.4.3. Ecuación de la fuerza y cantidad de movimiento	16
1.4.4 Principio de Bernoulli	18
1.4.5 Ecuaciones de Navier Stokes	19
1.4.6 Teoría de la capa límite	19

2.3.5.2 Barra de operaciones	58
2.3.5.3 Barra de control global	61
2.3.5.4 Ventana de texto –descripción- "description"	63
2.3.5.5 Ventana de texto de los procesos	63
2.3.5.6 Barra de tareas	63
2.3.5.7 Zona gráfica	63
2.4 PROCESO CFD.	64
2.4.1 Modelos de simplificación	64
2.4.1.1 Modelos de flujo potencial	64
2.4.1.2 Ecuaciones para flujo ideal	65
2.4.1.3 Solución directa de las ecuaciones de Navier – Stokes	65
2.4.1.4 Modelo parabólico de las ecuaciones de Navier – Stokes	65
2.4.1.5 Modelo de flujo incompresible	65
2.4.2 Formulación de las ecuaciones	66
2.4.3 Métodos para la simulación de la turbulencia	66
2.4.3.1 Simulación directa de las ecuaciones - "direct simulation", DS	66
	66
2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - "Large Eddy Simulation" LES	00
<ul> <li>2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - <i>"Large Eddy Simulation" LES</i></li> <li>2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier –</li> </ul>	00
<ul> <li>2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - <i>"Large Eddy Simulation" LES</i></li> <li>2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i></li> </ul>	67
<ul> <li>2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - <i>"Large Eddy Simulation" LES</i></li> <li>2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i></li> <li>2.4.4 Modelos de turbulencia</li> </ul>	67 67
<ul> <li>2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - <i>"Large Eddy Simulation" LES</i></li> <li>2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i></li> <li>2.4.4 Modelos de turbulencia</li> <li>2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras</li> </ul>	67 67 68
<ul> <li>2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - <i>Large Eddy Simulation LES</i></li> <li>2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i></li> <li>2.4.4 Modelos de turbulencia</li> <li>2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras</li> <li>2.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k-ε</li> </ul>	67 67 68 68
2.4.3.2 Simulation de grandes vortices - "Large Eddy Simulation" LES2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier -Stokes - RANS2.4.4 Modelos de turbulencia2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo RNG k- $\varepsilon$	67 67 68 68 68
2.4.3.2 Simulation de grandes vortices -"Large Eddy Simulation" LES 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo RNG k- $\varepsilon$	67 67 68 68 69 69
2.4.3.2 Simulation de grandes vortices -"Large Eddy Simulation" LES 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo RNG k- $\varepsilon$ 2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite	67 67 68 68 69 69 70
2.4.3.2 Simulación de grandes vórtices -" <i>Large Eddy Simulation</i> " <i>LES</i> 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo RNG k- $\varepsilon$ 2.4.5 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos de distribución de pérdidas	67 67 68 68 69 69 70 70
2.4.3.2 Simulación de grandes vórtices -" <i>Large Eddy Simulation</i> " <i>LES</i> 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite 2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas 2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura	67 67 68 68 69 69 70 70 70 70
2.4.3.2 Simulation' <i>LES</i> 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas 2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura 2.4.5.3 Modelos de capa límite delgada	67 67 68 68 69 69 70 70 70 70 70
2.4.3.2 Simulation de grandes vortices -" <i>Large Eddy Simulation</i> " <i>LES</i> 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite 2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas 2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura 2.4.5.3 Modelos de capa límite delgada 2.4.6 Leyes de pared	<ul> <li>67</li> <li>67</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>69</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>71</li> </ul>
2.4.3.2 Simulación de grandes vórtices -"Large Eddy Simulation" LES 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite 2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas 2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura 2.4.5.3 Modelos de capa límite delgada 2.4.6 Leyes de pared 2.4.7 Discretización de las ecuaciones	<ul> <li>67</li> <li>67</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>69</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>71</li> <li>71</li> </ul>
2.4.3.2 Simulación de grandes vórtices -" <i>Large Eddy Simulation</i> " <i>LES</i> 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - <i>RANS</i> 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo RNG k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite 2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas 2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura 2.4.5.3 Modelos de capa límite delgada 2.4.6 Leyes de pared 2.4.7 Discretización de las ecuaciones 2.4.7.1 Consistencia, convergencia y estabilidad	<ul> <li>67</li> <li>67</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>69</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>71</li> <li>71</li> <li>71</li> </ul>
2.4.3.2 Simulación de grandes vórtices -"Large Eddy Simulation" LES 2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier – Stokes - $RANS$ 2.4.4 Modelos de turbulencia 2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras 2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ 2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k- $\varepsilon$ realizable 2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite 2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas 2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura. 2.4.5.3 Modelos de capa límite delgada 2.4.6 Leyes de pared. 2.4.7.1 Consistencia, convergencia y estabilidad 2.4.8 Métodos de discretización empleados	<ul> <li>67</li> <li>67</li> <li>68</li> <li>69</li> <li>69</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>70</li> <li>71</li> <li>71</li> <li>71</li> <li>72</li> </ul>

2.4.9 Opciones de gradiente	74
2.4.9.1 Adaptaciones de gradiente por el método de mínimos cuadrados	75
2.4.9.2 Adaptaciones de gradiente por el método de Green-Gauss	75
2.4.10 Porosidad de superficies	75
2.4.11 Entorno del programa de proceso CFD Fluent 6.3.26	76
2.4.11.1 Menú principal	77
2.5 CONCLUSIONES	82
CAPITULO III: SIMULACION EN DOS DIMENSIONES	83
3.1 GENERALIDADES	83
3.2 PREPARACION DE LA GEOMETRIA	83
3.2.1 Objeto de análisis	83
3.2.2 Información del vehículo	84
3.2.3 Creación del plano de estudio	85
3.2.4 Cálculo del área frontal del vehículo	86
3.2.5 Calculo del área transversal del vehículo	87
3.3 PRE PROCESO CFD	88
3.3.1 Importación del objeto de estudio	88
3.3.2 Delimitación del dominio	89
3.3.3 Mallado del dominio	91
3.3.4 Condiciones del contorno	96
3.3.5 Exportación del mallado	98
3.4 PROCESO DE CALCULO CFD	99
3.4.1 Importación de la malla	100
3.4.2 Adaptación del dominio computacional	101
3.4.3 Modelos matemáticos a considerar	102
3.4.3.1 Algoritmos de resolución "solver"	102
3.4.3.2 Modelo de multifase	104
3.4.3.3 Ecuación de la energía	104
3.4.3.4 Modelos de viscosidad	104
3.4.4 Designación de los materiales	106
3.4.5 Condiciones de operación	106
3.4.6 Condiciones de contorno	107

3.4.6.1 Configuración de la zona –auto-:	107
3.4.6.2 Configuración de la zona –piso	108
3.4.6.3 Configuración de la zona –entrada	109
3.4.6.4 Configuración de la zona –salida	110
3.4.6.5 Configuración de la zona –techo	111
3.4.6.6 Configuración de la zona –" <i>fluid</i> "	111
3.4.6.7 Configuración de la zona –"default interior"	111
3.4.7 Parámetros de cálculo y resolución	112
3.4.7.1 Discretización y relajación	112
3.4.7.2 Monitor de Residuos	113
3.4.7.3 Monitor del coeficiente aerodinámico de arrastre "Cd"	114
3.4.7.4 Inicio de la solución	116
3.4.7.5 Proceso de iteración	116
3.4.7.6 Visualización de monitores	117
3.5 POS PROCESO CFD	120
3.5.1 Resultados numéricos	121
3.5.2 Resultados gráficos	122
3.5.2.1 Representación de vectores	122
3.5.2.2 Contornos gráficos	126
3.5.2.3 Líneas de Corriente	128
3.6 CONCLUSIONES	131
CAPITULO IV: SIMULACIÓN EN TRES DIMENSIONES	132
4.1 GENERALIDADES	132
4.2 PREPARACIÓN DE LA GEOMETRIA	133
4.3 PRE PROCESO CFD	134
4.3.1 Importación del objeto de estudio	134
4.3.2 Adaptación de la geometría	135
4.3.2.1 Corte simétrico del vehículo	135
4.3.2.2 Eliminación de agujeros y hendiduras	136
4.3.2.3 Eliminación de grietas	139
4.3.2.4 Construcción de superficies	142
4.3.3 Delimitación del dominio	144

4.3.4 Mallado del dominio	152
4.3.5 Condiciones de contorno	156
4.4 PROCESO DE CALCULO CFD	157
4.5 POS PROCESO	160
4.5.1 Resultados numéricos	160
4.5.2 Resultados gráficos	163
4.5.2.1 Vectores de velocidad absoluta	165
4.5.2.2 Contornos gráficos	168
4.5.2.3 Líneas de trayectoria	169
4.6 ANALISIS DE RESULTADOS	170
4.6.1 Fuerzas y coeficientes de arrastre	170
4.6.2 Fuerzas y coeficientes de sustentación	171
4.6.3 Momentos aerodinámicos	172
4.6.4 Contornos gráficos	173
4.6.4.1 Contorno de velocidad absoluta del fluido	173
4.6.4.2 Contornos de presión	176
4.7 CONCLUSIONES	183
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	186
BIBLIOGRAFIA	188
ANEXOS	191

# **INDICE DE GRAFICOS**

Gráfico 1.1 Gradiente de velocidad en un fluido confinado entre dos placas	6
Gráfico 1.2 Relación t=f(a) Para diferentes tipos de fluidos	7
Gráfico 1.3 Régimen laminar de un fluido, alrededor de diferentes obstáculos	9
Gráfico1.4 Gradiente de velocidad de un fluido dentro de un tubo de sección	
circular	10
Gráfico 1.5 Régimen turbulento	10
Gráfico 1.6 Flujo estacionario	12
Gráfico 1.7 Volumen de control, limitado por una superficie de control	17
Gráfico 1.8 Flujo alrededor de una esfera y formación de la capa límite	20
Gráfico 1.9 Influencias aerodinámicas en las funciones del vehículo	21
Gráfico 1.10 Visualización de líneas de corriente en un ensayo en túnel de	
viento	22
Gráfico 1.11 Sistema de vórtices que sigue la marcha del vehículo	23
Gráfico 1.12 "valores referenciales del coeficiente aerodinámico de arrastre -	
C <sub>D-</sub> para diferentes carrocerías"	25
Gráfico 1.13 Influencia de la resistencia del aire en el consumo de	
combustible	26
Gráfico 1.14 Tensión tangencial debido al rozamiento	27
Gráfico 1.15 Evolución del perfil de velocidad en torno a una placa plana, con	
un gradiente de presión adverso	28
Gráfico 1.16 Curvas de potencia aerodinámica resistente para un mismo	
vehículo con coeficientes de arrastre "C <sub>D</sub> " diferentes	30
Gráfico 1.17 Requerimientos de potencia para diferentes morfologías de	
vehículos	30
Gráfico 1. 18 Influencia de algunas formas delanteras sobre el coeficiente	
aerodinámico de arrastre –C <sub>D</sub>	32
Gráfico 1.19 Influencia del diseño del capot, sobre el coeficiente aerodinámico	
de arrastre –C <sub>D</sub>	33
Gráfico 1.20 Influencia de la inclinación del parabrisas delantero, sobre el	
coeficiente aerodinámico de arrastre –C <sub>D</sub>	33
Gráfico 1. 21 Coeficientes aerodinámicos de arrastre –C <sub>D</sub> - y sustentación del	
frontal – C <sub>LF</sub> - para la configuración básica delantera	34

Gráfico 1.22 Deflector de aire en la zona del radiador	34
Gráfico 1.23 Deflector de aire en el frontal de un vehículo	35
Gráfico 1.24 Spoiler que reduce el arrastre subterráneo	35
Gráfico 1.25 Coeficientes $C_D$ , $C_{LF}$ y $C_{LT}$ en función de la altura del spoiler,	
para un vehículo modelo	36
Gráfico 1.26 Fondos arqueados	37
Gráfico 1.27 Fondos planos	38
Gráfico 1.28 Reducción del coeficiente aerodinámico de arrastre en función del	
diseño del maletero	38
Gráfico 1.29 Influencia del diseño de la inclinación del perfil trasero de la	
carrocería	39
Gráfico 1.30 Influencia de la altura y longitud del maletero, sobre el	
coeficiente aerodinámico de sustentación del eje trasero - $C_{LT}$ - y total - $C_{L}$	40
Gráfico 1.31 Terminología de un perfil de alerón	40
Gráfico 1.32 Coeficiente de sustentación en función de diferentes ángulos de	
ataque, para un alerón "NACA 0012"	41
Gráfico 1.33 Efecto del alerón sobre los coeficientes aerodinámicos C <sub>D</sub> , C <sub>LF</sub> , y	
C <sub>LT</sub>	42
Gráfico 1.34 Ubicación de los faldones laterales	42
Gráfico 1.35 Reducción del coeficiente aerodinámico de arrastre CD en	
función del número y tipo de aristas que son redondeadas en la carrocería de un	
automóvil	43
Gráfico 1.36 Momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo	43
Gráfico 2.1 Elementos que componen una malla	48
Gráfico 2.2 Ejemplo de una malla estructurada	49
Gráfico 2.3 Ejemplo de una malla no estructurada	50
Gráfico 2.4 Tipos de elementos en una malla no estructurada	50
Gráfico 2.5 Alineación de elementos cuadrangulares en un mallado no	
estructurado	51
Gráfico 2.6 Orientación de celdas hexaédricas, con modo Cooper	51
Gráfico 2.7 Mallado no estructurado de volúmenes con elementos	
"Tetra/hybrid" alineado de modo TGrid	52
Gráfico 2.8 Densidad del mallado en función del gradiente de velocidad del	53

fluido	
Gráfico 2.9 Vista principal del software de pre proceso Gambit 2.3.30	54
Gráfico 2.10 Visualización de la ventana –archivo- "file"	55
Gráfico 2.11 Ventana de configuración de las opciones por defecto	56
Gráfico 2.12 Funciones en la barra de operaciones	58
Gráfico 2.13 Botones que conforman la barra de control global	61
Gráfico 2.14 Visualización de la ventana de texto –descripción	63
Gráfico 2.15 Visualización de la ventana de texto de los procesos	63
Grafico 2.16 Visualización de la zona gráfica, con fondo modificado	64
Gráfico 2.17 Formación de grandes vórtices "large Eddy" en una estela	
turbulenta	67
Gráfico 2.18 Esquema de discretización empleado en el método de volúmenes	
finitos	73
Gráfico 2.19 Adaptación de una función por el método de mínimos cuadrados	75
Gráfico 2.20 Ventana principal del programa Fluent 6.3.26	76
Gráfico 2.21 Visualización de las funciones en la ventana –archivo- "file"	77
Gráfico 2.22 Visualización de las funciones en la ventana –malla- "grid"	78
Gráfico 2.23 Visualización de las funciones en la ventana –definir- "define"	78
Gráfico 2.24 Visualización de las funciones en la ventana –resolver- "solve"	79
Gráfico 2.25 Visualización de las funciones en la ventana –adaptar- "adapt"	79
Gráfico 2.26 Visualización de las funciones en la ventana -superficie-	
"surface"	80
Gráfico 2.27 Visualización de las funciones en la ventana –mostrar- "display"	80
Gráfico 2.28 Visualización de las funciones en la ventana –ilustrar- "plot"	80
Gráfico 2.29 Visualización de las funciones en la ventana –reporte- "report"	81
Gráfico 2.30 Visualización de las funciones en la ventana -paralelo-	
"parallel"	81
Gráfico 2.31 Visualización de las funciones en la ventana –ayuda- "help"	81
Gráfico 3.1 Dibujo en tres dimensiones del objeto de análisis	84
Gráfico 3.2 Dimensiones características del vehículo	85
Gráfico 3.3 Contorno longitudinal del vehículo	85
Gráfico 3.4 Región longitudinal del vehículo	86
Gráfico 3.5 Contorno frontal del vehículo	86

Grafico 3.6 Región frontal del vehículo, y sus atributos	87
Gráfico 3.7 Contorno transversal del vehículo	87
Gráfico 3.8 Región transversal del vehículo y sus atributos	88
Gráfico 3.9 Ventana de importación de archivos ACIS	89
Gráfico 3.10Contorno longitudinal del vehículo importado en el programa	
Gambit 2.3.30	89
Gráfico 3.11 Creación del plano rectangular correspondiente al túnel de	
viento	90
Gráfico 3.12 Ajuste dimensional entre el túnel de viento y el vehículo	91
Gráfico 3.13 Sustracción de la superficie del vehículo en el túnel de viento	92
Gráfico 3.14 Fusión virtual de los lados del contorno del vehículo	93
Gráfico 3.15 Creación de la función de tamaño	93
Gráfico 3.16 Ventana de configuración del mallado de superficies	94
Gráfico 3.17 Mallado del modelo de análisis	94
Gráfico 3.18 Detalle del tramado de la malla en la parte frontal del vehículo	95
Gráfico 3.19 Detalle del tramado de la malla en la parte posterior del	
vehículo	95
Gráfico 3.20 Revisión de la distorsión de los elementos de la malla	96
Gráfico 3.21 Ventana de configuración de las condiciones de contorno	97
Gráfico 3.22 Condiciones de contorno para el objeto de análisis	98
Gráfico 3.23 Ventana de exportación de archivos de malla	99
Gráfico 3.24 Ventana de selección de la versión del programa Fluent	99
Gráfico 3.25 Ventana del programa Fuent 6.3.26	100
Gráfico 3.26 Información desplegada durante la importación del archivo	100
Gráfico 3.27 Revisión de la calidad del mallado	101
Gráfico 3.28 Ventana de conversión de unidades en la malla importada	101
Gráfico 3.29 Visualización del objeto importado en el proceso de cálculo	102
Gráfico 3.30 Ventana de selección de los modelos de resolución "solver"	103
Gráfico 3.31 Ventana de modelos de multifase	104
Grafico 3.32 Ventana de activación de la ecuación de la energía	104
Gráfico 3.33 Ventana de los modelos de viscosidad	105
Gráfico 3.34 Ventana de designación de los materiales	106
Gráfico 3.35 Ventana de Condiciones de operación	107

Gráfico 3.36 Ventana de configuración de las condiciones de contorno	107
Gráfico 3.37 Ventana de configuración de las propiedades de la zona	
–auto	108
Gráfico 3.38 Ventana de configuración de la zona –piso	109
Gráfico 3.39 Ventana de configuración de la zona –entrada	110
Gráfico 3.40 Ventana de configuración de la zona –salida	110
Gráfico 3.41 Ventana de configuración de la zona –salida	111
Gráfico 3.42 Ventanas de configuración de la zona –"fluid"	111
Gráfico 3.43 Ventana de configuración de la zona -"default interior"	112
Gráfico 3.44 Ventana de configuración de los métodos de solución	112
Gráfico 3.45 Ventana de configuración del monitor de residuos	113
Gráfico 3.46 Ventana de configuración de los valores de referencia	114
Gráfico 3.47 Configuración del monitor de fuerzas y coeficientes de arrastre	115
Gráfico 3.48 Ventana de ajuste de los límites del monitor	115
Gráfico 3.49 Ventana de configuración del inicio de la solución	116
Gráfico 3.50 Ventana de configuración de los intervalos de iteración	116
Gráfico 3.51 Visualización del proceso iterativo	117
Gráfico 3.52 Visualización de los residuos	117
Gráfico 3.53 Monitor del coeficiente de arrastre –C <sub>D</sub>	118
Gráfico3.54 Configuración del monitor de fuerzas y coeficientes	
de sustentación	119
Gráfico 3.55 Ventana de ajuste de los límites del monitor	119
Gráfico 3.56 Monitor del coeficiente de sustentación –Cl	120
Gráfico 3.57 Ventanas de configuración del reporte de fuerzas	121
Gráfico 3.58 Reporte de fuerzas y coeficientes de arrastre	121
Gráfico 3.59 Reporte de fuerzas y coeficientes de sustentación	121
Gráfico 3.60 Ventana de configuración de vectores	122
Gráfico 3.61 Vectores de velocidad absoluta	125
Gráfico 3.62 Vectores de velocidad absoluta, detalle de la parte frontal del	
vehículo	125
Gráfico 3.63 Vectores de velocidad absoluta, detalle de la parte posterior del	
vehículo	126
Gráfico 3.64 Ventana de configuración de los contornos gráficos	127

Gráfico 3.65 Contorno de presión absoluta	128
Gráfico 3.66 Ventana de configuración de las líneas de corriente	128
Gráfico 3.67 Visualización de las líneas de corriente	130
Gráfico 4.1 Limpieza preliminar el objeto de estudio	133
Gráfico 4.2 Visualización del objeto de estudio en el programa "mesh to solid	
3.0"	134
Gráfico 4.3 Ventana de importación de archivos ACIS	134
Gráfico 4.4 Contorno del automóvil, importado en el programa Gambit	
2.2.30	135
Gráfico 4.5 Selección de superficies a eliminar	136
Gráfico 4.6 Corte simétrico del vehículo	136
Gráfico 4.7 Detalle de las zonas en las que se eliminarán hendiduras o	
agujeros	137
Gráfico 4.8 Eliminación de superficies irregulares en el guardachoque	
delantero	137
Gráfico 4.9 Proceso de creación de superficies de relleno	138
Gráfico 4.10 Adaptación del guardachoque delantero	139
Gráfico 4.11 Grietas existentes entre los componentes de la carrocería	139
Gráfico 4.12 Eliminación de superficies que delimitan la profundidad de las	
grietas	140
Gráfico 4.13 Construcción de segmentos de recta, que unen los componentes	
de la carrocería	141
Gráfico 4.14 Proceso de construcción de superficies de enlace	141
Gráfico 4.15 Eliminación de la discontinuidad entre las puertas	142
Gráfico 4.16 Eliminación de la discontinuidad entre los componentes de la	
carrocería	142
Gráfico 4.17 Proceso de creación de superficies	143
Gráfico 4.18 Finalización del proceso de limpieza y adaptación de la	
geometría	144
Gráfico 4.19 Construcción del paralelepípedo correspondiente al túnel de	
viento	144
Gráfico 4.20 Ajuste dimensional entre el túnel de viento y el	
vehículo	145

Gráfico 4.21 Construcción de vértices mediante el corte del borde inferior del	
plano de simetría	146
Gráfico 4.22 Construcción de líneas desde el borde inferior del plano de	
simetría, hasta el vehículo	147
Gráfico 4.23 Selección de bordes que definen las dos superficies de enlace	147
Gráfico 4.24 Configuración del vector que define la proyección del objeto	148
Gráfico 4.25 Proyección ortogonal del vehículo y túnel de viento	148
Gráfico 4.26 Conexión entre los bordes que comparten las superficies del auto	
y el plano de simetría	149
Gráfico 4.27 Selección de superficies, previo a la construcción de	
volúmenes	150
Gráfico 4.28 Visualización del boquete formado en el volumen	150
Gráfico 4.29 Fusión entre los dos volúmenes virtuales	151
Gráfico 4.30 Visualización del dominio computacional terminado	151
Gráfico 4.31 Mallado del contorno del vehículo	152
Gráfico 4.32 Revisión de la distorsión de los elementos bidimensionales	153
Gráfico 4.33 Ventana de configuración de la función de tamaño	154
Gráfico 4.34 Ventana de configuración del mallado del volumen	154
Gráfico 4.35 Visualización del mallado realizado en el dominio	
computacional	155
Gráfico 4.36 Revisión de la distorsión de los elementos tridimensionales	155
Gráfico 4.37 Ventana de configuración de las condiciones de contorno	156
Gráfico 4.38 Condiciones de contorno para el objeto de análisis	157
Gráfico 4.39 Revisión de la calidad del mallado en el programa procesador	157
Gráfico 4.40 Visualización de la malla importada	158
Gráfico 4.41 Visualización del proceso iterativo	158
Gráfico 4.42 Monitor de residuos	159
Gráfico 4.43 Monitor del coeficiente de arrastre –C <sub>D</sub>	159
Gráfico 4.44 Monitor del coeficiente de sustentación –Cl	160
Gráfico 4.45 Ventana de configuración del reporte de fuerzas	161
Gráfico 4.46 Reporte de fuerzas y coeficientes de arrastre	161
Gráfico 4.47 Reporte de fuerzas y coeficientes de sustentación	161
Gráfico 4.48 Ventana de configuración del reporte de momentos	162

Gráficos 4.49 Coordenadas del punto de referencia para el cálculo de los	
momentos aerodinámicos principales -A	162
Gráfico 4.50 Reporte de los momentos aerodinámicos principales	163
Gráfico 4.51 Ventana de creación de superficies dentro del dominio	
computacional	163
Gráfico 4.52 Visualización del plano longitudinal construido	164
Gráfico 4.53 Visualización del plano transversal construido	165
Gráfico 4.54 Ventana de configuración de las opciones de visualización del	
mallado	165
Gráfico 4.55 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plan	
longitudinal	166
Gráfico 4.56 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plano	
transversal	167
Gráfico 4.57 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plano	
longitudinal y en el contorno frontal del vehículo	167
Gráfico 4.58 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plano	
longitudinal y en el contorno posterior del vehículo	168
Gráfico 4.59 Contorno de presión absoluta	169
Gráfico 4.60 Líneas de corriente, matizadas en función de la velocidad	
absoluta	169
Gráfico 4.61 Líneas de corriente coloreadas en función de la presión	
dinámica	173
Gráfico 4.62 Zonas de medición	173
Gráfico 4.63 Contorno de velocidad absoluta del fluido -2D	174
Gráfico 4.64 Contorno de velocidad absoluta del fluido -3D- parte	
frontal	174
Gráfico 4.65 Contorno de velocidad absoluta del fluido -3D- parte	
posterior	176
Gráfico 4.66 Contorno de presión dinámica 2D	177
Gráfico 4.67 Contorno de presión dinámica 3D parte frontal	177
Gráfico 4.68 Contorno de presión dinámica 3D parte posterior	179
Gráfico 4.69 Contorno de presión estática. 2D	179
Gráfico 4.70 Contorno de presión estática. 3D parte frontal	180

Gráfico 4.71 Contorno de presión estática. 3D parte posterior	181
Gráfico 4.72 Contorno de presión total 2D	182
Gráfico 4.73 Contorno de presión total 3D parte frontal	182
Gráfico 4.74 Contorno de presión total 3D parte posterior	184

# **INDICE DE CUADROS**

Cuadro 1.1 Influencia sobre el C <sub>D</sub> de algunas modificaciones en el	
vehículo	26
Cuadro 1.2 Fuerzas que componen los momentos aerodinámicos	44
Cuadro 2.1 Calificativo de la calidad de una malla en función de la distorsión	
de sus celdas	53
Cuadro 2. 2 Opciones de configuración del programa Gambit 2.2.30	57
Cuadro 2.3 Función de los botones en la barra de operaciones	58
Cuadro 2.4 Modelos de turbulencia	68
Cuadro 2.5 Proceso de discretización de las ecuaciones en un programa CFD	71
Cuadro 2.6 Métodos de discretización utilizados por los programa CFD	73
Cuadro 3.1 Dimensionamiento e información general del vehículo	84
Cuadro 3.2 Esquema de las variables según las cuales se expresan los	
resultados	124
Cuadro 4.1 Análisis de Fuerzas y coeficientes de arrastre	170
Cuadro 4.2 Análisis de fuerzas y coeficientes de sustentación	171
Cuadro 4.3 Análisis de momentos aerodinámicos en la simulación	
bidimensional	172
Cuadro 4.4 Análisis de momentos aerodinámicos en la simulación	
tridimensional	172
Cuadro 4.5 Análisis de la velocidad del aire	175
Cuadro 4.6 Análisis de resultados para los contornos de presión dinámica	178
Cuadro 4.7 Análisis de resultados para los contornos de presión estática	180
Cuadro 4.8 Análisis de resultados para los contornos de presión total	183

Cumbe Fárez Edisson Santiago Rockwood Iglesias Robert Esteban Trabajo de Graduación Ing. Hernán Viteri C. Noviembre de 2009

# Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional –CFD-

## **INTRODUCCION**

El estudio aerodinámico de los automóviles resulta indispensable para el diseño del mismo, ya que influye directamente sobre los siguientes aspectos: la estabilidad y seguridad de marcha, seguridad de percepción, funcionamiento de ciertos conjuntos mecánicos, potencia de marcha y consumo de combustible, y en el confort de los ocupantes.

El presente trabajo de investigación surge de la necesidad de conocer y evaluar la efectividad de un programa de dinámica de fluidos computacional para el estudio de la aerodinámica de automóviles, éste se plantea como una alternativa viable para realizar estudios y desarrollo en este campo de la Ingeniería Mecánica Automotriz. Con el fin de evaluar las prestaciones de este software se comparará el valor del coeficiente aerodinámico de arrastre presentado por el fabricante del vehículo Toyota Corolla CE modelo 2005, con el calculado mediante esta simulación.

En el primer capítulo se presentan los conceptos básicos de mecánica de fluidos, los cuales son el fundamento teórico que permitirá entender los fenómenos aerodinámicos que experimenta un automóvil; luego se compilan diferentes criterios que se deben considerar en el diseño de la carrocería del vehículo en pos de un rendimiento aerodinámico eficiente, entre ellos: diseño de la parte frontal, posterior y fondo, así como la influencia que tienen diferentes apéndices aerodinámicos.

En el segundo capítulo se estudia la dinámica de fluidos computacional; en primer lugar se establecen las ventajas y desventajas que su uso conlleva, luego se detallan las características más relevantes de un pre-proceso correctamente configurado, para ello se explican las propiedades de las mallas que se pueden generar y la forma de evaluar la calidad de las mismas, posteriormente se describe el entorno del programa pre-procesador utilizado. A continuación se presenta la información que se requiere para realizar el proceso de configuración de las variables del problema planteado, como: los modelos de simplificación y formulación de las ecuaciones de gobierno y el proceso de discretización de las mismas. Luego se presenta el entorno del programa de proceso y pos-proceso utilizado.

En el tercer y cuarto capítulos, se detalla el procedimiento para realizar la simulación por ordenador de los fenómenos aerodinámicos que experimenta la carrocería del automóvil especificado, en dos y tres dimensiones respectivamente. Estas son expuestas de forma explícita y secuencial, con el propósito que sirvan como tutorial de entrenamiento en el uso de los programas empleados. Al concluir el cuarto capítulo se comparan los resultados obtenidos tanto en la simulación bidimensional como tridimensional con los datos disponibles del vehículo.

# **CAPITULO I**

# **DINÁMICA DE FLUIDOS**

### **1.1 GENERALIDADES**

Normalmente la materia se presenta en los estados líquido, gaseoso o sólido, la experiencia diaria permite distinguir que un sólido tiene una forma y un volumen definidos, mientras que un líquido mantiene su volumen pero adopta la forma del recipiente que lo contiene, mostrando una superficie libre y, finalmente, un gas no tiene ni forma ni volumen propio. Se puede justificar este comportamiento en función de la estructura atómico-molecular de la materia: las fuerzas de atracción entre las moléculas de un sólido son tan grandes que éste tiende a mantener su forma, pero éste no es el caso de los fluidos -líquidos y gases-, donde la fuerza de atracción entre las moléculas es más pequeña.

Una distinción entre sólidos y fluidos queda establecida por su diferente respuesta frente a la acción de un esfuerzo: los sólidos se deformarán al ser sometidos a uno, y tienden a recuperar su forma primitiva, total o parcialmente cuando cesa el mismo, ya que oponen una fuerza de sentido contrario a la aplicada, sin embargo, en los fluidos por pequeño que sea el esfuerzo aplicado, estos cambiarán continuamente de forma, mientras persista dicho esfuerzo, ya que no presentan una fuerza que se oponga a la aplicada, lo que indica que no hay tendencia a recuperar la forma primitiva.

La mecánica de los fluidos es la ciencia de los líquidos y de los gases, y está basada en los mismos principios que la mecánica de los sólidos. En esta ciencia se combinan los principios fundamentales con los datos experimentales, siendo utilizados éstos para confirmar la teoría o para dar información complementaria al análisis matemático. El resultado es un cuerpo unificado de principios básicos de mecánica de fluidos que se puede aplicar a la solución de problemas de importancia en la ingeniería.

Puesto que los fenómenos considerados en la mecánica de fluidos son macroscópicos, un fluido se considera como un medio continuo. Esto significa que se

supone que cualquier elemento de volumen, por pequeño que sea, contiene un número muy elevado de moléculas. De acuerdo con ello, cuando se hable de elementos de volumen infinitesimalmente pequeños, se entiende que son muy pequeños comparados con el volumen del cuerpo, pero grandes comparados con las distancias entre las moléculas.

### **1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.**

El origen de la diferencia entre líquidos y gases está en la magnitud de sus fuerzas cohesivas. En un líquido la distancia intermolecular es menor, por tanto, las fuerzas cohesivas son mayores. Esto se traduce en el campo macroscópico a que los líquidos tienden a conservar su volumen. Sin embargo, un gas es libre de expandirse hasta que encuentre paredes que lo confinen. A continuación se enuncian algunas propiedades básicas de los fluidos.

**1.2.1 Presión.** La presión es una magnitud física escalar que mide la fuerza aplicada por unidad de superficie, cuando sobre una superficie plana se aplica una fuerza normal de manera uniforme y perpendicularmente a la superficie, la presión se expresa simplemente como:

$$P = \frac{F}{A}$$
[1-1]

En donde:

P: Es la presión –Pa-

F: Es la fuerza aplicada –N-

A: Es el área plana de la superficie  $-m^2$ -

Por otro lado, en un caso general donde la fuerza puede tener cualquier dirección y no estar distribuida uniformemente en cada punto, y la superficie de referencia tiene una forma arbitraria; la presión se define como:

$$P = \frac{dF}{dA} \cdot \vec{n}$$
 [1-2]

En donde:

 $\vec{n}$ : Es un vector unitario y normal a la superficie en el punto donde se pretende medir la presión.

Además, en determinadas aplicaciones la presión se mide no como la presión absoluta sino como la presión por encima de la presión atmosférica, denominándose como: presión relativa, presión normal, presión de gauge o presión manométrica. Consecuentemente, la presión absoluta es la suma de la presión atmosférica -101325 Pa- y la presión relativa.

**1.2.2 Compresibilidad.** Un fluido es compresible cuando experimenta variación espontanea de su densidad; esto al aplicar la ley de conservación de la masa. En otras palabra; al ser la densidad función de la masa y el volumen, y al suponer que la masa permanece constante para un elemento de fluido, cualquiera que sea la condición en la que se encuentre, el cambio en la densidad depende exclusivamente de variaciones producidas en su volumen.

En los gases se pueden distinguir dos tipos de compresión: una compresión a temperatura constante o isotérmica y una compresión en un recinto aislado sin intercambio de calor o adiabática. Se incluyen en este último las compresiones rápidas, ya que en ellas no hay tiempo para que se produzcan intercambios de calor. En una compresión isotérmica, el volumen –V- ocupado por una determinada masa gaseosa es inversamente proporcional a la presión -P-, es decir, el producto  $P \cdot V$  permanece constante. En una compresión adiabática es el producto  $P \cdot V^g$  el que permanece invariable, donde –g- es una constante característica del gas y siempre es mayor que la unidad.

Cuando un fluido se encuentra en estado líquido, su compresibilidad es mucho más baja que cuando se encuentra en estado gaseoso, por esta razón es común considerar a los líquidos como incompresibles a temperaturas y presiones ordinarias. El cociente entre el cambio de presión y la disminución relativa al volumen se denomina módulo de compresibilidad y se puede expresar como:

$$B = -\frac{\Delta P}{\Delta V/V}$$
[1-3]

En donde:

B: Es el modulo de compresibilidad de un fluido -Pa-

ΔP: Es la variación de presión -Pa-

 $\Delta V/V$ : Es la disminución relativa al volumen. -m<sup>3</sup>-

**1.2.3 Viscosidad.** Cuando se aplica un esfuerzo de corte a un sólido éste se deforma un cierto ángulo. Si se aplicara el mismo esfuerzo a un fluido en reposo, por definición, no podrá soportar un esfuerzo de corte, se deformará un ángulo que aumentará indefinidamente con el tiempo, en otras palabras fluirá. De ahí que en el caso de los fluidos la magnitud relevante no sea el ángulo de deformación sino la velocidad de deformación al estar sometido a un esfuerzo cortante.

Al considerar un fluido en contacto con una superficie sólida que ejerce sobre él un esfuerzo de corte en la dirección x. El movimiento del fluido -en dicha direcciónserá tal que las partículas en contacto con la superficie sólida tendrán su misma velocidad, mientras que las más alejadas tendrán velocidades menores. Si se denota como "y" la dirección perpendicular a la superficie, la velocidad del fluido en la dirección "x" varía con la distancia -gráfico 1.1- y de acuerdo con la expresión:

$$\tau_x = \mu \frac{dV_x}{dy}$$
[1-4]

En donde:

 $\mu$ : Es el coeficiente de viscosidad -Pa.s- o -kg/m.s-

 $\tau_x$ : Es el esfuerzo cortante -Pa-

 $dv_x / dy$ : Es el gradiente de velocidad -1/s-

Para efectos de cálculo, El coeficiente de viscosidad se suele expresar con la unidad llamada "Poise"; 1Poise =  $1 \times 10^{-1}$  Pa.s



Gráfico 1.1 Gradiente de velocidad en un fluido confinado entre dos placas.

Fuente: Autores.

Hay fluidos para los que la relación entre el esfuerzo de corte y el gradiente de velocidad no es tan simple. Así se puede dividir a los fluidos en dos grandes grupos,

un primer grupo serían los fluidos en los que el esfuerzo es proporcional al gradiente de velocidades, son los llamados fluidos newtonianos que cumplen la ecuación 1.4, un ejemplo de estos fluidos son el aire, agua, aceite, etc. El segundo grupo son los fluidos en los que el esfuerzo ya no es proporcional al gradiente de velocidades y se denominan fluidos no-newtonianos los cuales se los puede subdividir en: fluidos plásticos, fluidos dilatantes y fluidos pseudo plásticos -gráfico 1.2-

Gráfico 1.2 Relación  $\tau = f(\alpha)$  Para diferentes tipos de fluidos.



Fuente: ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p. 1a edición. Página 20

Los fluidos plásticos requieren un esfuerzo inicial para empezar a fluir como por ejemplo la pasta de dientes. En los fluidos dilatantes el ángulo de deformación aumenta al incrementarse el esfuerzo aplicado, este comportamiento lo tienen las suspensiones concentradas por ejemplo, disoluciones de almidón y arena en agua. En los fluidos pseudo-plásticos el ángulo de deformación disminuye al aumentar el esfuerzo, tienen este comportamiento las disoluciones moderadamente concentradas como la leche y la sangre. Por último la suposición de un fluido ideal o inviscido en los que no se realiza ningún esfuerzo para conseguir su deformación angular.

**1.2.3.1 Viscosidad cinemática.** Para ciertas aplicaciones es útil emplear una expresión equivalente al cociente entre la viscosidad y la densidad de un fluido, a esta expresión se la conoce como viscosidad cinemática -v-, por tanto:

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-5}$$

En donde:

v: Es la viscosidad cinemática -m<sup>2</sup>/s-

 $\rho$ : Es la densidad –kg/m<sup>3</sup>-

"La viscosidad de todos los fluidos dependen mucho de la temperatura, aumentan para los gases y disminuyen para los líquidos al subir la temperatura"<sup>1</sup>

#### 2.3 REGIMEN LAMINAR Y REGIMEN TURBULENTO.

Cuando un fluido se mueve, lo puede hacer en régimen laminar o en régimen turbulento. La diferencia entre estos dos radica principalmente en el comportamiento de las partículas en movimiento que a su vez depende del balance entre las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas o de rozamiento. El número de Reynolds es el parámetro que expresa la relación entre las fuerzas de inercia y las viscosas en el interior de una corriente, por lo que el régimen va a depender de su valor.

**1.3.1** Número de Reynolds. Este número adimensional puede usarse para caracterizar el movimiento de un fluido en laminar o turbulento, ya que en general, el flujo se vuelve más turbulento con el aumento de la velocidad, así como con el incremento de la longitud del campo de flujo; en cambio mientras mayor sea su coeficiente de viscosidad menor probabilidad de que el movimiento del fluido sea turbulento. El número de Reynolds se expresa como:

$$\operatorname{Re} = \frac{\rho.\nu.L}{\mu}$$
[1-6]

En donde:

Re: Es el número de Reynolds -adimensional-

- v: Es la velocidad del fluido -m/s-
- L: Es la longitud del campo de flujo. -m-

"Los resultados experimentales más recientes indican que, en condiciones habituales, el flujo turbulento se inicia cuando el número de Reynolds alcanza un valor aproximado de 2000, sin embargo, si se toman medidas muy especiales, ha saber, reposo inicial absoluto del fluido, eliminación de vibraciones y de cambios de temperatura, etc. Este valor crece enormemente"<sup>2</sup>.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> SEARS Francis y ZEMANSKY Mark. Física Universitaria. México. Pearson Education. 2004. Vol I. 11a ed. Página 533.

 <sup>&</sup>lt;sup>2</sup> ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p.
 1a. edición. Página 343

De otra forma un régimen será laminar si Re<2000, en cambio si 2000 <Re< 4000 no se sabe con seguridad su régimen, por lo que no se puede afirmar de forma categórica si es laminar o turbulento, y se denomina como régimen de transición; para Re>4000 se considera el régimen como turbulento.

**1.3.2 Régimen laminar.** Las partículas se desplazan siguiendo trayectorias paralelas, formando así en conjunto capas o láminas, el fluido se mueve sin que haya mezcla significativa de partículas de fluido vecinas. La viscosidad del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a ser turbulento.

Gráfico 1.3 Régimen laminar de un fluido, alrededor de diferentes obstáculos.



Fuente: SEARS Francis y ZEMANSKY Mark. Física Universitaria. México. Pearson Education. 2004. Vol I. 11 a edición. Página 527.

**1.3.2.1 Ley de Poiseuille.** La Ley de Poiseuille se aplica sólo al flujo laminar de un fluido de viscosidad constante que es independiente de la velocidad del fluido.

Esta ecuación permite determinar el caudal laminar estacionario "Q" de un fluido Newtoniano a través de un tubo cilíndrico de sección circular constante.

$$Q = \frac{dV}{dt} = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P}{8 \cdot \mu \cdot L}$$
[1-7]

En donde:

Q: Es el caudal que atraviesa una determinada sección de la tubería. -m<sup>3</sup>/s-

dV/dt: Es la tasa de variación de volumen en función del tiempo . -m<sup>3</sup>/s-

r: Es el radio interno del tubo o sección de análisis -m-

L: Es la longitud entre las dos secciones de análisis.-m-

En el flujo laminar la velocidad del fluido es menor cerca de las paredes del tubo que del centro, debido a la fricción entre las paredes y el fluido, la gradiente de velocidad en este caso es una parábola. -Gráfico 1.4-



Gráfico1.4. Gradiente de velocidad de un fluido dentro de un tubo de sección circular.

Fuente: Autores

**1.3.3 Régimen turbulento.** "Las partículas se mueven siguiendo trayectorias erráticas, desordenadas, con formación de torbellinos. Cuando aumenta la velocidad del flujo, la tendencia al desorden crece. Ninguna capa de fluido avanza más rápido que las demás, y sólo existe un fuerte gradiente de velocidad en las proximidades de las paredes sólidas, ya que las partículas en contacto con la pared han de tener forzosamente velocidad nula"<sup>3</sup>.





Fuente: UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL DE ARGENTINA [En línea]. Hidrodinámica-generalidades.Argentina.<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/ind ustrial/InstalacionesIndustriales/Art\_Interes /Tema3.pdf> [consulta: 02 Marzo 2009].

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL DE ARGENTINA [En línea] Hidrodinámicageneralidades. Argentina.<http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/ Art\_Interes/Tema3.pdf> [consulta: 02 Marzo 2009].

"Diferentes teorías han tratado de explicar el origen y la estructura de la turbulencia, algunas explican que la turbulencia es debida a la formación de vórtices en la capa límite<sup>4</sup>, como consecuencia de los disturbios que se generan cuando el fluido se separa de esta; mientras que otras atribuyen la turbulencia a la influencia del esfuerzo cortante cuando se presenta un gradiente de velocidades con discontinuidades bruscas. Sin embargo a pesar de las múltiples investigaciones, los resultados obtenidos sobre el desarrollo de la turbulencia no son totalmente satisfactorios, ya que solo pueden estudiarse experimental y teóricamente como un fenómeno estadístico".<sup>5</sup>

**1.3.4 Fluidos estacionarios y transitorios.** Al describir al flujo en términos de los valores de variables tales como la presión, densidad, y velocidad en cada punto del fluido. Si estas variables son constantes en el tiempo, se dice que el flujo es estacionario. Los valores de estas variables cambian por lo general de un punto a otro, pero no cambian con el tiempo en cualquier punto en particular. A menudo puede conseguirse esta condición a velocidades de flujo bajas; una corriente que fluye continuamente es un ejemplo de fluido estacionario. En cambio un fluido transitorio se presenta en el desplazamiento de una ola debido a la marea ya que la velocidad varía en función del tiempo.

**1.3.4.1 Trayectoria de una corriente.** "En el flujo estacionario la velocidad –v- en un punto dado es constante en el tiempo. Consideramos al punto- P- dentro del fluido. Puesto que –v- en –P- no cambia con el tiempo en el flujo estacionario, cada partícula del fluido que llegue a –P- pasará con la misma velocidad y la misma dirección. El movimiento de cada partícula que pase por –P- sigue entonces la misma trayectoria llamada línea de corriente. Cada partícula del fluido que pase por –P- pasará más tarde por puntos más a lo largo de la línea de corriente, tal como –Q- y –R-, además cada partícula de fluido que pase por –R- debe haber pasado previamente por –P- y –Q-.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> La teoría sobre la "capa límite" se estudia en el apartado 1.4.6

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>AGUILAR, Juliana. ESCUELA DE INGENIERIA DE ANTIOQUIA. [En línea] Flujo turbulento. Colombia. <a href="http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articuloses/conceptosbasicosmfluidos/flujotturbulento/flujoturbulento.html">http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articuloses/conceptosbasicosmfluidos/flujotturbulento/flujotturbulento.html</a> [consulta: 17 Marzo 2009]

La magnitud del vector velocidad de la partícula del fluido cambiará, al moverse a lo largo de la línea de corriente. La dirección del vector de la velocidad en cualquier punto a lo largo de la línea de corriente es siempre tangente a ella"<sup>6</sup>





Fuente: RESNICK Robert, ét al. Física. México. Editorial Continental .1996. Vol I. 4a edición. Página 442.

Dos líneas de corriente no pueden cruzarse entre sí ya que, si lo hicieran, una partícula de fluido que llegue podría seguir un camino u otro, y el flujo no podría ser estacionario. En el flujo estacionario el patrón de las líneas de corriente no cambia con el tiempo.

**1.3.5 Fluidos rotatorios y no rotatorios.** Un fluido real se mueve en forma laminar o turbulenta, como se presentó en los apartados 1.3.2 y 1.3.3. Existe sin embargo una distinción mucho más sutil y difícil de captar físicamente, que tiene que ver con la deformación de los elementos del fluido durante su movimiento. Al considerar un pequeño elemento cubico de un fluido. Durante el movimiento el elemento se deforma de muchas maneras, y por consiguiente gira, en general alrededor de su centro de gravedad con cierta velocidad angular. Se tiene entonces el caso general de un flujo rotacional. Por otro lado, un elemento en particular del fluido puede moverse en una trayectoria circular y experimentar también un flujo no rotatorio, un ejemplo de esta clase de flujo no rotatorio es el agua que fluye por el drenaje del inodoro.

Para simplificar la descripción matemática del movimiento de un fluido, se puede considerar al flujo como: estacionario, incompresible, no viscoso, y no rotatorio. Sin embargo, se corre el riego de que con tantas suposiciones simplificantes, ya no se

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> RESNICK, Robert ét al. Física. México. Editorial Continental. 1996. Vol I. 4a edición. Página442.

esté estudiando un fluido real. Además a veces es difícil decidir si una propiedad determinada de un fluido puede ser despreciada en una situación particular.

#### **1.4 ECUACIONES ELEMENTALES EN MECANICA DE FLUIDOS**

**1.4.1 Conceptos generales del movimiento de los fluidos.** "Una manera de describir el movimiento de un fluido consiste en dividirlo en elementos de volumen infinitesimal, y seguir el movimiento de cada partícula. Si se conocen las fuerzas que actúan sobre cada partícula del fluido, se puede entonces resolver para las coordenadas y velocidades de cada partícula en función del tiempo. Este procedimiento, que es una generalización directa de la mecánica de partículas sólidas, fue desarrollado por primera vez por Joseph Louis Lagrange -1736-1813-. Puesto que el número de partículas de fluido es generalmente muy grande, el uso de este método es una tarea compleja.

Existe otro tratamiento distinto, desarrollada por Leonard Euler -1707-1783- que es más conveniente en la mayoría de los casos. En él se abandona el intento de especificar la historia de cada partícula del fluido y, en cambio se especifica la densidad y la velocidad del fluido en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo; mediante la utilización del cálculo vectorial. Así cualquier cantidad empleada para describir el estado del fluido, por ejemplo, la presión tendrá un valor definido en cada punto del espacio y en cada instante de tiempo. Si bien, esta descripción del movimiento del fluido centra la atención sobre un punto en el espacio en lugar de sobre la partícula del fluido, no se puede evitar seguir a las partículas del fluido en sí mismas, cuando menos a intervalos de tiempo cortos. Después de todo las leyes de mecánica se aplica a partículas y no a puntos en el espacio"<sup>7</sup>.

**1.4.2 Principio de continuidad.** Al suponer condiciones ideales del fluido, es decir: régimen estacionario, fluido incompresible, no viscoso e irrotacional y teniendo en cuenta que las partículas del fluido siguen la trayectoria de una corriente, en donde no se crea ni se destruye masa, ni puede haber concentración de esta en ninguna

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup> RESNICK, Robert ét al. Física. México. Editorial Continental. 1996. Vol I. 4a edición. Página 441.

sección del mismo, la masa que entra en el tubo infinitesimal es igual a la masa que sale. Por tanto

$$m_1 = m_2$$
  
$$\rho.v_1.A_1.\Delta t = \rho.v_2.A_2.\Delta t = C \qquad [1-8]$$

En donde:

m: Es la masa -kg-

A: Sección del conducto -m<sup>2</sup>-

C: Constante -Kg-

Δt: Variación de tiempo -s-

Por otro lado, si se considera la compresibilidad del fluido, se puede expresar esta ecuación de la siguiente manera:

"Tomando en cuenta la ecuación [1-8], y al considerar dA como un elemento de área, el caudal -masa por unidad de tiempo- que atraviesa en esta forma toda una superficie, cerrada o no, esta dado por:

$$m = \int_{A} \rho \cdot \mathbf{v} \cdot N \cdot d\mathbf{A} = \int_{A} \rho \cdot \mathbf{v} \cdot d\mathbf{A}$$
[1-9]

En donde:

N: Es el vector normal de la superficie dA -adimensional-

dA: Es un elemento diferencial de una superficie -m<sup>2</sup>-

Utilizando el concepto de velocidad media -valor que tendría la velocidad si el mismo caudal que atraviesa una superficie dada, fuera producido por una velocidad uniforme  $v_m$ - perpendicular a dicha superficie se tiene que:

$$\int_{A} \rho \cdot v_m \cdot dA = \int \rho \cdot v \cdot dA$$
[1-10]

De donde:

$$v_m = \frac{\int \rho \cdot v \cdot dA}{\int A \rho \cdot dA}$$
[1-11]

Y suponiendo que el fluido sea de densidad constante -incompresible- se puede simplificar  $\rho$  y se tiene

$$v_m = \frac{\int v \cdot dA}{\int A} = \frac{V}{A}$$
[1-12]

Donde:

V: Es el volumen -m<sup>3</sup>-

Así:

$$V = \int_{A} v \cdot dA \tag{1-13}$$

Donde V representa el caudal en volumen"8

Ahora, al suponer que el fluido puede ser compresible, se puede decir que si hay un caudal neto hacia afuera, la masa de fluido que estaba incluido dentro de una superficie cerrada –A- habrá disminuido en función de un volumen constante. Esto por aplicación del hecho físico de que la masa de cualquier sustancia se conserva. Así el caudal neto es igual a la disminución de masa de fluido en el volumen –V-interior a la superficie –A-. Así:

$$-\frac{\partial}{\partial t}\int_{V} \rho \cdot dV = m \qquad [1-14]$$

Al comparar esta expresión con la ecuación [1-9] se tiene:

$$-\frac{\partial}{\partial t}\int_{V} P \cdot dV = \int_{A} \rho \cdot v \cdot dA \qquad [1-15]$$

Denominada ecuación de continuidad en forma integral. Es fácil observar que corresponde al principio de conservación de masa. Ahora al aplicar el teorema de la divergencia al segundo miembro, se tiene:

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p. 1a. edición. Página 83
$$\int_{V} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} + div \rho \cdot v \right) \cdot dV = 0$$
[1-16]

"Como la superficie A se tomó de forma arbitraria, para que esta ecuación se cumpla, ha de ser cierto que:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0$$
[1-17]

En donde:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}$$
 : Es la tasa de variación temporal de la densidad -kg/m<sup>3</sup>.s

 $\nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0$  : Es el gasto másico neto.

Esta es la forma diferencial de la ecuación de continuidad y probablemente la más usada."<sup>9</sup>

**1.4.3. Ecuación de la fuerza y cantidad de movimiento.** Al aplicar la segunda ley de Newton -F=m.a-, a un elemento de volumen  $-V_o-$  de un fluido en movimiento, limitado por una superficie  $-A_o-$  la cantidad de movimiento que el fluido contenido en  $V_o$  -gráfico 1.7- posee es:

$$n = \int_{V} \rho \cdot v \cdot dV \qquad [1-18]$$

En donde:

n: Es la cantidad de movimiento del fluido contenido en V -kg.m/s-

Por otra parte, el caudal neto en masa del fluido que sale del volumen es dado por la ecuación [1-9], y el flujo de la cantidad de movimiento de un fluido que atraviesa la superficie se expresa como:

$$n = \int_{A} v\rho \cdot v \cdot dA \qquad [1-19]$$

De manera que:

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p. 1a. edición. Página 84



Gráfico 1.7. Volumen de control, limitado por una superficie de control

Fuente: ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p. 1a edición. Página 207.

Ya que la ecuación de la cantidad de movimiento es otra manera de enunciar la ley de Newton, se tiene que:

$$F = \frac{dmv}{dt} = \frac{dn}{dt}$$
[1-21]

Esta ley se refiere a una masa bien definida de materia. Si se la requiere aplicar al fluido en movimiento, es necesario seguir una masa dada del fluido, que un instante -  $t_o$ - se encontraba en  $-v_o$ - cuando esta se mueve y pasa a una posición vecina en el instante  $t_o + \Delta t$ .

Como función del tiempo, la cantidad de movimiento de aquella masa de fluido que en  $-t_{o}$  se encontraba en  $-v_{o}$ , es:

$$n = \int_{V} \rho \cdot v \cdot dV \qquad [1-22]$$

Siendo V`el volumen ocupado de un instante cualquiera por dicha masa de fluido según esta ecuación, la ley de Newton se traduce en:

$$F = \frac{\partial n}{\partial t} + n \tag{1-23}$$

Esta propiedad se enuncia como: La suma de todas las fuerzas que actúan sobre un volumen cualquiera - $V_0$ - de fluido en movimiento es igual a la tasa de cambio de la

cantidad de movimiento del fluido en -V<sub>o</sub>- más el flujo de la cantidad de movimiento del fluido que atraviesa el contorno -A<sub>o</sub>-de -V<sub>o</sub>-.

**1.4.4 Principio de Bernoulli.** Este principio se basa en la ley de la conservación de la energía, el cual constituye un principio básico de la dinámica de partículas y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema aislado -sin interacción con ningún otro sistema- permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía si puede transformarse en otra forma de energía.

Así: 
$$E_{TOTAL} = C$$

Expresando la energía total como la suma de todas las energías que actúan en un sistema aislado se tiene que:

 $E_{POTENCIAL} + E_{PRESION} + E_{CINETICA} = C$ 

$$m.g.h + P\frac{m}{\rho} + m\frac{v^2}{2} = C$$
 en donde:  $m = \rho.V$ , o sea:

$$\rho.V.g.h + P\frac{\rho.V}{\rho} + \rho.V\frac{v^2}{2} = C$$

 $V\left(\rho.g.h + P + \rho \frac{v^2}{2}\right) = C$  Al considerar el fluido como incompresible, o sea V= cte

$$\rho.g.h + P + \rho \frac{v^2}{2} = C \qquad [1-24]$$

 $\rho$ .g.h es la energía potencial gravitacional, P es la presión estática, mientras que  $\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2$  es la presión dinámica y corresponde a la energía cinética con la que se desplaza el fluido.

En sistemas no conservativos, como es el caso de flujos turbulentos se puede expresar la energía absorbida por la turbulencia como, la diferencia de energía en una línea de corriente entre dos puntos, esto de acuerdo a las nociones elementales de la dinámica Newtoniana de partículas. Esta expresión es conocida como Energía cinética turbulenta -k-

**1.4.5 Ecuaciones de Navier Stokes** La característica más importante del movimiento de un fluido real es la aparición de dos tipos de flujo completamente distintos, laminar y turbulento descritos en los apartados 1.3.2 y 1.3.3, para los cuales físicamente lo que ocurre es que, partiendo de un flujo laminar y aumentando paulatinamente su velocidad, se alcanza un estado de inestabilidad dinámica. Así las partículas ya no son estables y su trayectoria, es desviada de su línea de corriente en forma creciente con el tiempo debido principalmente a la inestabilidad producida por las fuerzas viscosas, el modelo matemático que involucra este fenómeno, son las llamadas ecuaciones de Navier – Stokes.

Una deducción laboriosa que implica los aportes de: Navier -1822-, Cauchy -1828-, Poisson -1829-, St Venant -1843- y Stokes -1845- lleva a las conocidas ecuaciones de Navier – Stokes las cuales se expresan de la siguiente manera:

$$\frac{d\upsilon_x}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial x} + v \cdot \nabla^2 \cdot \upsilon_x$$

$$\frac{d\upsilon_y}{dt} = -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial y} + v \cdot \nabla^2 \cdot \upsilon_y$$

$$\frac{d\upsilon_z}{dt} = -g - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial P}{\partial z} + v \cdot \nabla^2 \cdot \upsilon_z$$
[1-25]

Donde:

dv/dt: Es la tasa de variación de velocidad por unidad de tiempo -m/s<sup>2</sup>-

v: Es la viscosidad cinemática -m<sup>2</sup>/s-

g: Es la aceleración de la gravedad -g=9.8m/s<sup>2</sup>-

 $\nabla^2$ : Es el operador de Laplace, cuya expresión es:  $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$  [1-26]

**1.4.6 Teoría de la capa límite.** El movimiento de un fluido viscoso solo es conocido exactamente en un limitado número de casos, es muy común la utilización de esta teoría, con la cual se pueden realizar las siguientes simplificaciones:

- Lejos de los sólidos se supone que el flujo es inviscido.

- En contacto con el sólido existe una capa muy delgada de fluido -capa límiteen la cual las fuerzas de inercia y las viscosas son del mismo orden.
- El fluido cumple la condición de velocidad cero sobre la superficie del sólido y se desliza sin roce en la superficie exterior de la capa límite.
- El espesor de la capa límite se define como la distancia desde la pared del sólido hasta el punto donde la velocidad del fluido difiere en un 1% del valor de la velocidad lejos del sólido.
- Puesto que la región donde ocurren los fenómenos de fricción se ha restringido a la capa límite y como esta es de muy pequeño espesor pueden realizarse aproximaciones que simplifican la resolución del sistema.

CAPA LIMITE FLUJO IDEAL ESTELA

Gráfico 1.8. Flujo alrededor de una esfera y formación de la capa límite.

Fuente: ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p. 1a edición. Página 173.

## **1.5 AERODINAMICA DE VEHICULOS.**

La interacción que surge entre el aire y el vehículo cuando este se desplaza, repercute en su movilidad y manejabilidad. El flujo de aire que transita alrededor del auto ocasiona una serie de fuerzas y momentos que afectan de forma directa al movimiento, en forma de resistencia al avance o de inestabilidad de marcha. Igualmente el diseño de la carrocería afectará a aspectos como la acumulación de polvo y agua de lluvia en los faros y ventanas, así como el ruido y vibraciones ocasionadas por el flujo de aire. Por otro lado este es utilizado además para refrigerar diferentes elementos mecánicos del vehículo y para la circulación de aire en el habitáculo. Gráfico 1.9



Gráfico 1.9 Influencias aerodinámicas en las funciones del vehículo

Fuente: SCHUC, Wólfram; ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. España. Editorial Reverte. 1999. 893p. 3a edición. Página 682

El flujo de aire que incide sobre el automóvil es viscoso, turbulento, y presenta importantes vorticidades localizadas que se mueven sobre un contorno fuertemente irregular y con el único atenuante de ser incomprensible, además el flujo de aire está influenciado por los fenómenos asociados con el desprendimiento de la capa límite, la cual se produce tanto en el contorno de la carrocería como en accesorios que no forman parte esencial de la misma, -espejos retrovisores, manijas de las puertas, antenas, etc.- y en lugares donde el flujo de aire es perturbado por elementos mecánicos, características que realzan la complejidad del problema a tratar.

**1.5.1 Comportamiento aerodinámico generalizado de un automóvil.** El flujo sobre el cuerpo de un automóvil está gobernado por la relación entre la velocidad y la presión del fluido en las zonas adyacentes al mismo, la cual se expresa en la ecuación de Bernoulli [1-24], sin considerar la energía potencial gravitacional.



Gráfico 1.10. Visualización de líneas de corriente en un ensayo en túnel de viento.

Fuente: URBANPOWER [en línea]. Líneas de trayectoria del aire a través de un vehículo. Chile. <a href="http://static.urbanpower.cl/images/2008/06/header.jpg">http://static.urbanpower.cl/images/2008/06/header.jpg</a>>. [Consulta: 23 Junio de 2009]

Antes de aproximarse al vehículo la presión estática del fluido es simplemente la ambiental. La presión dinámica es producida por la velocidad relativa, que es constante para todas las líneas de corriente aproximándose al vehículo. Por lo tanto la presión total es la misma para todas las líneas de corriente. Al aproximarse el fluido al vehículo, las líneas de corriente se dividen, algunas van a la parte de arriba y otras a la parte de abajo del vehículo. Por interferencia, una línea de corriente debe ir directo al cuerpo y estancarse -generalmente en el parachoques-, con lo cual la velocidad relativa tiende a cero y la presión dinámica observada en ese punto debe ser cero.

En el gráfico 1.10 se observa que las líneas de corriente que se aproximan al vehículo se doblan hacia arriba antes de encontrarse con el capot y el parabrisas delantero, la presión estática en estas zonas debe ser mayor que la ambiental para así proveer la fuerza necesaria para doblar el fluido. Este se desplaza sobre el techo con mayor velocidad, debido a la baja presión que existe, luego si no existiera fricción, el aire bajaría por la parte de atrás, intercambiando presión por velocidad como lo hizo en la parte delantera. Para este caso las fuerzas de presión en esta zona se contrarrestaría con la existente en el frente del automóvil, en otras palabras no se produciría arrastre de presión. En cambio lo que sucede es que el flujo de aire se

desprende fuera de la capa límite, el cual ocasiona la formación de vórtices, estos crean una zona de baja presión inferior a la frontal en magnitud, pero con mayor alcance, de esta forma la estela turbulenta dificulta el desplazamiento del vehículo

Si los vórtices que se generan en la parte trasera del vehículo tienden a girar hacia fuera, la resistencia al avance aumenta en función de la magnitud de esta. Para conseguir, por tanto, un coeficiente de arrastre más bajo, los ingenieros de estilo y diseño se esfuerzan en conseguir que los vórtices giren hacia dentro, como se muestra en el gráfico 1. 11, en este caso la estela formada es menor que la sección frontal y el arrastre es menor.



Gráfico 1.11 Sistema de vórtices que sigue la marcha del vehículo

Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 271.

"La elección de la longitud del techo y de los ángulos que forman la parte trasera del vehículo tiene un impacto directo sobre las fuerzas aerodinámicas ya que determina el punto de separación del flujo. La separación debe ocurrir siempre en el mismo punto, intentando abarcar un área de contacto flujo-vehículo menor, que normalmente implica menor arrastre".<sup>10</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup> MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 271.

1.5.2 Fuerzas aerodinámicas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo terrestre.

**1.5.2.1 Fuerza de arrastre.** Cuando un automóvil se mueve a través de un fluido, como lo es el aire, aparece una fuerza sobre el mismo que se opone a dicho movimiento. Esta fuerza  $-F_D$ -, que recibe el nombre de fuerza de arrastre, tiene su origen en los esfuerzos tangenciales y normales que ejerce el flujo sobre la superficie del cuerpo, se lo considera en dirección paralela al movimiento del fluido y en sentido contrario a este.

Al utilizar la ecuación de Bernoulli para fluidos ideales; ecuación [1-24], en los extremos de un cuerpo que se desplaza en un fluido y siendo 1 el punto frontal y 2 el posterior del cuerpo, al suponer que el fluido se mueve a una velocidad horizontal constante, y que la diferencia de altura entre los puntos 1 y 2 es cero -no se considera la energía potencial gravitacional-, además que la velocidad del fluido en el punto 2, -v<sub>2</sub>- es mayor que la velocidad del fluido en el punto 1 -v<sub>1</sub>-, ya que en el punto 1 se produce un denominado punto de estancamiento, producto del choque frontal del fluido contra el cuerpo, es decir un punto donde la velocidad del fluido es prácticamente cero. La ecuación de Bernoulli es:

$$P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$
[1-27]

Y si  $v_2 > v_1$  por la condición anteriormente mencionada, la ecuación anterior se expresa como:

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2) > 0$$
[1-28]

Lo cual significa que la presión en el punto 1 es mayor a la del punto 2, y la fuerza de resistencia viene dada por el producto de la diferencia de presiones por el área transversal en la dirección de flujo, es decir:

$$F_D = (P_1 - P_2)A_x = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)A_x$$
[1-29]

En esta ecuación, la diferencia de velocidades entre los puntos 1 y 2, con respecto a la variación de presión, depende de la forma del objeto, y por supuesto, de la velocidad del fluido alrededor del cuerpo, estas características se asocian en un solo factor, denotado como  $-C_D$ -, así se tiene:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot Ax \cdot v^2 \qquad [1-30]$$

En donde:

F<sub>D</sub>: Es la fuerza de arrastre o "Drag" -N-

CD: Es el coeficiente de arrastre -adimensional-

Ax: Es el área transversal a la dirección de flujo -m<sup>2</sup>-

**1.5.2.2 Coeficiente aerodinámico de arrastre.** Denominado coeficiente  $-C_{D-}$ , depende de la forma del objeto pero también de las condiciones de flujo, es decir del número de Reynolds. Este coeficiente se utiliza frecuentemente como el índice de la calidad aerodinámica de un automóvil, en el gráfico 1.12 se muestra algunos valores referenciales para diferentes vehículos.

Gráfico 1.12. "valores referenciales del coeficiente aerodinámico de arrastre - $C_{D-}$  para diferentes carrocerías".



MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 283.

Ciertamente cuanto menor sea este coeficiente, menor será la fuerza de resistencia que ha de vencer el motor del automóvil y, por tanto, menor será la potencia necesaria para vencer la fuerza de resistencia. Con respecto al consumo de combustible, el coeficiente aerodinámico de arrastre tiene vital importancia sobre todo cuando el vehículo se desplaza a velocidades altas, así en el gráfico 1. 13 se observa el consumo de combustible para un vehículo de clase media, en función de la velocidad del mismo.



Gráfico 1.13 Influencia de la resistencia del aire en el consumo de combustible.

Fuente: SCHUC, Wólfram; ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. España. Editorial Reverte. 1999. 893p. 3a edición. Página 683

- Influencia sobre el coeficiente de resistencia aerodinámica al avance de algunas modificaciones en el vehículo. las modificaciones que se realicen sobre la carrocería de un vehículo repercutirán de forma positiva o negativa en su comportamiento aerodinámico. Cuadro 1.1

Modificación	ΔCD		
Nivel rebajado en 10mm	-0.003 a -0.008		
Bajos, carenado completo -revestimiento del fondo-	-0.010 a -0.040		
Alerones en ruedas -tapacubos lisos-	-0.002 a -0.010		
Refrigeración de frenos	+0.001 a +0.005		
Retrovisor exterior	+0.004 a +0.020		
Flujo de paso en radiador y vano motor	+0.010 a +0.025		
Ventanas laterales abiertas, -delanteras-	+0.010 a +0.020		
Techo solar abierto	+0.005 a +0.010		
Capota plegada -vehículos convertibles-	+0.040 a +0.060		
Tabla de surf en la parrilla	+0.100 a +0.120		

Cuadro 1.1. Influencia sobre el C<sub>D</sub> de algunas modificaciones en el vehículo

Fuente: DIETSCHE, Karl-Heinz, ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. España. Editorial Reverte. 2005. 1233p. 4ª edición. Página 889 **1.5.2.3 Factores que intervienen en la formación de la fuerza de arrastre.** La fuerza de arrastre es la suma de las fuerzas generadas por la resistencia de presión, y las fuerzas de rozamiento. "Normalmente, la resistencia aerodinámica de presión es mayor que la de rozamiento"<sup>11</sup>

- **Resistencia debido al rozamiento.** Uno de los efectos de la viscosidad es el rozamiento entre el fluido y la superficie, el cual produce una tensión tangencial cuya acción sobre la superficie representa una primera componente de los esfuerzos que produce el flujo sobre el cuerpo. Gráfico 1.14

Gráfico 1.14 Tensión tangencial debido al rozamiento.



Fuente: IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España.Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2ª edición. Página 127

La componente horizontal del tensor tangencial, ocasiona resistencia al avance, en cambio la vertical ocasiona sustentación.

Así:

$$F_r = \int_A \tau_A \cdot \cos\psi \cdot dA \qquad [1-31]$$

En donde:

Fr = Fuerza de arrastre debida al rozamiento -N-

 $\tau$ A= Tensión tangencial -Pa-

 $\psi$ = ángulo directriz del vector tensión -Grados-

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España. Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 129

- **Resistencia de presión.** Cuando una corriente de fluido se mueve alrededor de un cuerpo, tiende a adherirse a la superficie. Después de cierto punto la capa límite delgada se separa del contorno. Gráfico 1.15

Gráfico 1.15. Evolución del perfil de velocidad en torno a una placa plana, con un gradiente de presión adverso.



Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 268.

En este gráfico, se muestra la capa límite existente en una pared, sobre la que se presentan los gradientes de velocidad -dv/dy-, para diferentes puntos. El perfil de velocidad en cada uno de estos puntos depende del gradiente de presión -dp/dx- que existe en el sentido de avance del flujo.

Si el gradiente de presiones es mayor que cero, se tendrá un gradiente de presiones adverso, consecuencia del cual el flujo es obligado a frenarse notablemente, -puntos A y B-,la disminución de velocidad ocasiona incremento de presión, así el fluido disminuye su velocidad aún más,-punto C-, aquí el gradiente de velocidades  $-dv_c/dy$ -, es igual a cero para más líneas de corriente en la proximidad del contorno, luego en el punto -D- la alta presión ocasiona que el flujo sea invertido con la consiguiente aparición de vorticidades, las cuales se extienden fuera de la capa límite.

Al liberarse, el flujo no aumenta significativamente su velocidad, contrario a la afirmación de Bernoulli, ya que la energía necesaria para transformar presión por velocidad, es absorbida por la estela turbulenta, la energía sobrante se transforma ahora en baja presión en esta zona.

En el automóvil, el desprendimiento de las líneas de corriente fuera de la capa límite, se produce mayoritariamente en la parte trasera del mismo, en la zona del parabrisas posterior y al final de la cajuela, de esta forma se crea una estela turbulenta con baja presión, la cual tiende a absorber al vehículo desde la parte de atrás, ocasionando el fenómeno de arrastre de presión.

La resistencia de presión -gráfico 1.14 – corresponde a la componente horizontal de la presión en un punto y puede expresarse como:

$$F_p = \int_A P \cdot sen\psi \cdot dA \qquad [1-32]$$

En donde:

F<sub>p</sub>: Es la Fuerza de arrastre debido a la presión. -N-

En cambio la componente vertical de la presión genera anti-sustentación.

- Efecto de la rugosidad. La calidad de la superficie del cuerpo, en términos de rugosidad es otro factor que contribuye a la resistencia aerodinámica, esta aumenta los efectos viscosos del flujo sobre el cuerpo, así crece significativamente la influencia de la fricción, y favorece el desprendimiento del fluido fuera de la capa límite, por ello incrementa el arrastre de presión. "En el caso particular de los automóviles el 9% de la fuerza de arrastre que se produce es debida a la rugosidad".<sup>12</sup>

**1.5.2.4 Potencia aerodinámica resistente.** La potencia que hay que vencer para compensar la fuerza de resistencia, viene dada por la ecuación:

Na= 
$$C_D \left(\frac{1}{2}\rho . v^3\right) A \cdot (0.736)$$
 [1-33]

Donde:

Na: Es la potencia aerodinámica resistente. -Kw-

La potencia aerodinámica resistente, influye directamente sobre la eficacia de un vehículo sobre todo cuando este circula a velocidades superiores a los 60 km/h. En el gráfico1.16 se muestra la curva de potencia aerodinámica resistente para un mismo

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> Introducción al diseño de un automotor. Módulo I. Curso de graduación.

vehículo, con dos factores de resistencia al avance "CD" diferentes. Para el uno se ha considerado un  $C_D=0,6$  y para el otro un  $C_D=0,3$ 



Gráfico 1.16. Curvas de potencia aerodinámica resistente para un mismo vehículo

con coeficientes de arrastre "CD" diferentes

Fuente: Autores

En el gráfico 1.17 se muestra el valor de la potencia aerodinámica resistente para vehículos con diferentes coeficientes de arrastre -CD-

Gráfico 1.17. Requerimientos de potencia para diferentes morfologías de vehículos.

	Coeficiente de arrastre	Potencia de arrastre en kW – valores medios para A = $2m^2$ a diferentes velocidades ( $v_0 = 0$ ) –			
	(C <sub>D</sub> )	40 Km/h	80 Km/h	120 Km/h	160 Km/h
	0.15 a 0.02	0.29	2.3	7.8	18
	0.23	0.38	3.0	10	24
	0.2 a 0.25	0.37	3.0	10	24
<b></b>	0.3 a 0.4	0.58	4.6	16	37
	0.4 a 0.55	0.78	6.3	21	50
	0.5 a 0.6	0.91	7.2	24	58
	0.5 a 0.7	1	7.9	27	38
Camiones, combinaciones	0.8 a 0.15				
Motocicletas	0.6 a 0.7				
Autobuses Autobuses con	0.6 a 0.7				
líneas aerodinámicas	0.3 a 0.4				

Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 283.

1.5.3 Fuerza de sustentación. La carga aerodinámica de sustentación -F<sub>L</sub>- es la fuerza que empuja a un cuerpo perpendicularmente al sentido del movimiento del

fluido en cualquier dirección, si esta tiende a despegar al objeto del suelo se le conoce como sustentación positiva, en cambio si esta tiende a fijar o asentar el mismo hacia el suelo se le conoce como sustentación negativa o anti sustentación.

Al utilizar la ecuación de Bernoulli, para fluidos ideales y al hacer consideraciones de análisis similares a la deducción de la ecuación 1-37, se concluye que la fuerza de sustentación es igual a la variación de presión entre dos puntos, por el área transversal a la perpendicular del sentido de flujo, en este caso Ay. Expresándose como:

$$F_L = \frac{1}{2}\rho \cdot A_y \cdot C_L \cdot v^2$$
[1-34]

En donde:

- FL: Es la carga aerodinámica de sustentación (+) o anti sustentación (-) -N-
- C<sub>L</sub>: Es el coeficiente aerodinámico de sustentación (+) o anti sustentación (-) -Adimensional-
- Ay: Es el área transversal del cuerpo en sentido perpendicular al flujo. -m<sup>2</sup>-

En el estudio de las prestaciones aerodinámicas que posee un vehículo, con respecto a la fuerza de sustentación, es común analizar por separado el comportamiento del eje delantero del trasero, para ello se utiliza la notación  $C_{LF}$  y  $C_{LT}$ , respectivamente.

**1.5.3.1 Efecto suelo.** En el diseño de un automóvil se busca, al contrario que en aeronáutica, crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una de baja presión por debajo, los cuales provocan empuje y succión respectivamente, mejorando el agarre de los neumáticos en la calzada, lo que se traduce en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad y con mejor estabilidad.

Todos los coches experimentan el llamado -efecto suelo-, el cual influye directamente sobre la sustentación del vehículo. Es ocasionado por el flujo de aire que circula por la parte inferior de la carrocería, como consecuencia de la proximidad del vehículo al pavimento.

**1.5.4 Fuerza lateral.** Cuando un vehículo circula por carretera debe enfrentarse de forma continua a las condiciones climatológicas. El viento puede actuar de forma lateral sobre el vehículo, intentando cambiar la dirección del desplazamiento. El efecto final depende del vehículo y de la naturaleza del viento. Con fuertes vientos

cruzados, la fuerza lateral es normalmente más grande que la fuerza de arrastre. La forma aerodinámica del vehículo y las características del sistema de dirección afectan, en este sentido, al comportamiento dinámico del vehículo ante el viento lateral.

**1.5.5 Factores de diseño de carrocerías en función del comportamiento aerodinámico.** A continuación, se establecen diferentes formas para mejorar el comportamiento aerodinámico de un automóvil, en función del diseño de la carrocería y mediante la instalación de diferentes accesorios que se utilizan con este fin.

Es necesario recalcar que estos parámetros han sido validados mediante estudios empíricos realizados en túneles de viento para los modelos citados, y sirven como guía básica de diseño para la construcción de carrocerías de automóviles.

**1.5.5.1 Diseño de la parte frontal del automóvil.** El diseño del frontal del automóvil tiene mucha importancia en el comportamiento aerodinámico del vehículo, es conveniente que las aristas que componen esta zona sean redondeadas, además mientras más bajo sea el punto de estancamiento, menor será el coeficiente de arrastre. Gráfico 1.18.

Gráfico 1. 18. Influencia de algunas formas delanteras sobre el coeficiente



aerodinámico de arrastre -CD-

Fuente: IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España.Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 146

Otro parámetro que tiene incidencia directa sobre el coeficiente de arrastre son los ángulos de inclinación del capot y parabrisas delantero. -Gráficos 1.19 y 1.20-.



Gráfico 1.19. Influencia del diseño del capot, sobre el coeficiente aerodinámico de

Fuente: IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 147

Para el diseño del capot, se observa que al aumentar el ángulo de inclinación, con respecto a la horizontal, mejora el desempeño aerodinámico del vehículo en cuanto a coeficiente de arrastre se refiere. No obstante, incrementar significativamente el valor de este ángulo disminuiría el volumen del compartimiento del motor.

Gráfico 1.20. Influencia de la inclinación del parabrisas delantero, sobre el coeficiente aerodinámico de arrastre –C<sub>D</sub>-



Fuente: SCHUC, Wólfram; ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. España.Editorial Reverte. España. 893p. 3a edición. Página 683

Para el parabrisas delantero, se observa que ángulos de inclinación pronunciados, con respecto a la vertical, disminuyen el coeficiente de arrastre; no obstante, en la práctica esta consideración complicaría el diseño del vehículo pues se induce un mayor calentamiento del habitáculo y se incrementa la distorsión óptica.

Por último, para seleccionar el diseño base del frontal de un automóvil, resulta de mucha ayuda considerar algunos preceptos básicos; el diseñador puede partir de ellos y realizar las adaptaciones que considere necesarias. Gráfico 1.21.



Gráfico 1. 21. Coeficientes aerodinámicos de arrastre  $-C_D$ - y sustentación del frontal

Fuente: IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 174

- **Deflectores de aire.** El sistema de refrigeración, con el aire pasando a través del radiador, impactando el motor y frente de la cabina, produce presión que actúa como arrastre en esa zona. Un diseño cuidadoso puede dirigir el flujo de tal forma que este se desplace sin general zonas de estancamiento.

Una forma de encaminar el flujo de aire es mediante la utilización de deflectores, los cuales suelen instalarse en el perímetro del radiador para mejorar el paso del flujo a través de él cuando el vehículo circula a bajas velocidades. La mejora se denota en el decremento de presión detrás del radiador lo que reduce el arrastre. Gráfico 1.22.





Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 278.

El gráfico 1.23 muestra la forma de la parte delantera de un vehículo, cuyo deflector permite que a altas velocidades el aire se desvíe por debajo del mismo, reduciendo así la resistencia al avance y mejorando la anti sustentación; mientras que a bajas velocidades este se introduce en el compartimiento del motor a través del radiador con mayor facilidad, mejorando así la refrigeración del motor.



Gráfico 1.23. Deflector de aire en el frontal de un vehículo

Fuente: WIDOWINDUSTRIES [En línea] Ford Mustang Mach 3. EEUU. <http:// www.widowindustries.net/images/ gallery/Ford%20Mustang%20 Mach%20III% 20.jpg> [Consulta: 2 de junio de 2009]

- **Spoilers delanteros.** Los spoilers<sup>13</sup> son superficies aerodinámicas que modifican el diseño original del frontal, su función es redirigir el flujo de aire cortante que interacciona con los componentes del fondo del vehículo, es decir, reducir el arrastre subterráneo. Gráfico 1.24.



Gráfico 1.24. Spoiler que reduce el arrastre subterráneo.

Fuente: Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 278.

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> Anglicismo utilizado en aeronáutica para referir a elementos mecánicos que sirven para modificar la incidencia las fuerzas aerodinámicas.

La altura del spoiler afecta tanto a la resistencia del avance como a las fuerzas de sustentación en cada eje. En el Gráfico 1.25 se muestra a manera de ejemplo la influencia de la altura de un spoiler sobre los coeficientes aerodinámicos  $C_D$ ,  $C_{LF}$  y  $C_{LT}$ ; para un vehículo modelo.

Gráfico 1.25. Coeficientes  $C_D$ ,  $C_{LF}$  y  $C_{LT}$  en función de la altura del spoiler, para un vehículo modelo.



Fuente: IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 158.

**1.5.5.2 Diseño del fondo del automóvil.** Un automóvil normal de pasajeros tiene un fondo muy tosco, con elementos tales como: suspensión, transmisión, semiejes, depósito de combustible, sistema de escape, etc, aparte de cavidades como las de alrededor del motor y las ruedas; estas condiciones tienden a crear un ensanchamiento de la capa límite, la cual puede llegar inclusive hasta el suelo. Esto ocasiona la disminución de la velocidad del flujo de aire por debajo de la carrocería, por ende zonas de alta presión estática, la cual favorece la sustentación positiva. Por esta razón no es aconsejable en vehículos turismo, cuyo fondo es tosco e irregular, el disminuir su altura libre con respecto al suelo; contrario a lo que sucede en vehículos de competición cuyo fondo es plano y muy regular.

Es por esta razón que el fondo de un automóvil debe ser diseñado en función de favorecer al máximo el flujo de aire, para ello además de considerar la altura del automóvil con respecto al suelo, se debe tener en cuenta la forma y tosquedad del fondo.

Con respecto a la forma, existen básicamente dos modelos referenciales; fondos arqueados y fondos inclinados. Los fondos arqueados tienen curvaturas hacia los extremos del vehículo, de esta forma se consigue suavizar el flujo, retrasando la formación de la capa límite y por ende aumentar la velocidad del flujo hacia la parte central del vehículo. Esto debido a la disminución de la sección entre el fondo y el suelo; Subir la sección trasera del fondo permite que la baja presión que existe en la estela turbulenta del coche ejerza una fuerza importante en el flujo, con lo cual esta disminuye, además aumenta la velocidad del fluido cuando la líneas de corriente se acercan a esta zona, manteniendo la baja presión por debajo de la parte trasera del vehículo.





Fuente: McBEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. España. Editorial Ceac. 2001. 247p. 1a edición. Página.118

Algunos vehículos que tienen fondos planos, son diseñados de tal forma que la distancia al suelo en la parte frontal de la carrocería, es menor que en la parte posterior; así se evita la acumulación de aire en la zona frontal del vehículo y por ello la sustentación positiva. El aumento paulatino de la sección entre el fondo y el suelo permite que el aire continúe fluyendo rápidamente, aunque perdiendo velocidad, convirtiéndose en un largo difusor. Aquí la inclinación del fondo permitirá la interacción entre la estela turbulenta y el flujo, lo que servirá de ayuda para garantizar que la presión continua siendo relativamente baja en la parte trasera del coche, esto si se quiere mejorar la anti sustentación del eje trasero, aumentando la fuerza de arrastre. La inclinación de la parte delantera no deberá afectar la capa límite ya que de esta forma se impediría el paso del aire.



Gráfico 1.27 Fondos planos

Fuente: McBEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. España. Editorial Ceac. 2001. 247p. 1a edición. Página.118

**1.5.5.3 Diseño de la parte posterior del automóvil.** La influencia del diseño de la parte posterior del vehículo es significante tanto como la parte frontal del mismo, puesto que los fenómenos asociados con el desprendimiento de la capa límite y la formación de turbulencia tras el vehículo dependen de él.

- Diseño del parabrisas posterior y maletero. El diseño del acople entre el parabrisas posterior y el maletero, tiene vital importancia en la incidencia de la formación de la estela turbulenta, por ende sobre la fuerza de arrastre.





Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 284.

En el gráfico 1.28 se aprecia que el menor coeficiente de arrastre  $-C_D$ - se consigue cuando el maletero se desplaza hasta la posición 2C, es decir al aumentar la longitud y la altura del mismo. De esta manera se disminuye el tramo de la carrocería en la cual se producen desprendimientos de la capa límite, disminuyéndose la magnitud de la estela turbulenta.

En cambio, en los gráficos 1.29 y 1.30 se observa la influencia de la inclinación del parabrisas posterior y el dimensionamiento del maletero, sobre el coeficiente aerodinámico de sustentación  $-C_{L}$ -, y sobre el coeficiente de sustentación del eje trasero  $-C_{LT-}$ .

Gráfico 1.29. Influencia del diseño de la inclinación del perfil trasero de la carrocería



Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 293.

Según este ensayo se establece que los vehículos de corte posterior plano, ofrecen mejor anti sustentación en el eje trasero, por ende en la total; en función de este parámetro de diseño.



Gráfico 1.30. Influencia de la altura y longitud del maletero, sobre el coeficiente aerodinámico de sustentación del eje trasero - $C_{LT}$ - y total - $C_{L}$ -

Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 293.

Nótese que para reducir el coeficiente de sustentación, tanto del eje trasero  $-C_{LT}$ como del total del vehículo  $-C_{L}$ - es conveniente incrementar la longitud y altura del maletero, para vehículos tipo sedán.

- Alerones. Los alerones están compuestos de uno o varios perfiles alares similares a los que se utilizan en aeronavegación, solo que estos son dispuestos de forma invertida. Gráfico 1.31.



Gráfico 1.31. Terminología de un perfil de alerón

Fuente: CAMPOS, Rubén. Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental. España. Universidad de Oviedo. 2008. 69p. Trabajo Final de Carrera. página 14. La mayoría de alerones que se utilizan en automovilismo, son normalizados en base a la regularización Norteamericana, NACA -"*National Advisory Comitee for Aeronautics*"-, la cual fue implementada en la década de los años 20 y 30, a inicios del siglo XX en la post Guerra. Si bien NACA fue reemplazada por la agencia aeroespacial NASA, la designación realizada para los perfiles se sigue usando hoy en día.

Un factor crítico de análisis y diseño, es la correcta selección del ángulo de incidencia con el que el aire atraviesa un alerón, generalmente a mayor ángulo de ataque se consigue mayor anti sustentación, solo hasta cierto límite, conocido como punto o ángulo de pérdida. Gráfico 1.32.

Gráfico 1. 32 Coeficiente de sustentación en función de diferentes ángulos de ataque, para un alerón "NACA 0012"



Fuente: McBEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. España. Editorial Ceac. 2001. 247p. 1a edición. Página.79

En este gráfico se observa que el ángulo de pérdida para un perfil NACA 0012 corresponde a 16°.

No es posible generalizar criterios sobre la adaptación de un alerón para un tipo de vehículo en particular, ya que siempre será necesario considerar los fenómenos aerodinámicos experimentados por el auto y su entorno. A manera de ejemplo se ilustra en el gráfico 1.33, el comportamiento aerodinámico de un automóvil modelo, en función de la longitud del alerón.



Gráfico 1.33. Efecto del alerón sobre los coeficientes aerodinámicos C<sub>D</sub>, C<sub>LF</sub>, Y C<sub>LT</sub>

Fuente: IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España. Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 161

**1.5.5.4 Influencia de los faldones laterales.** Son utilizados para incrementar la anti sustentación del vehículo, ya que poseen canales en donde la velocidad del aire aumenta por la disminución de la sección transversal, así la presión disminuye absorbiendo hacia abajo al vehículo. Además su instalación evita que interactúen flujos de distinta presión y velocidad, ya que el flujo de aire que circula por debajo de la carrocería, tiene menor presión que el flujo de aire externo, lo que evita la formación de turbulencia en esta zona.



Gráfico 1.34. Ubicación de los faldones laterales

Fuente: KPTUNING. Taloneras, faldones, laterales, kit bmw e87. [En línea]. España. <http://www.kptuning.com/images/taloneras%20faldones%20laterales%20kit%20 sport%20bmw%20e87%20serie%201.jpg> [consulta: 4 de junio de 2009]

**1.5.5.5 Curvatura de aristas relevantes.** En el gráfico 1.35 se observa un método para disminuir el coeficiente aerodinámico de arrastre de un vehículo, en función de las aristas curvas que se estipulen en su diseño.

Gráfico 1.35. Reducción del coeficiente aerodinámico de arrastre CD en función del número y tipo de aristas que son redondeadas en la carrocería de un automóvil.



Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 284.

**1.5.6 Momentos aerodinámicos.** El cálculo de los momentos aerodinámicos principales en un automóvil, tiene su aplicación en el análisis de la dinámica de marcha y la estabilidad del mismo. Los momentos que actúan son: sobre el eje transversal -Z-: momento de cabeceo, en l eje vertical -Y-: momento de guiñada- y en el eje longitudinal -X-: momento de balanceo. -Gráfico 1.36-.

Gráfico 1.36 Momentos aerodinámicos que actúan sobre el vehículo.



Fuente: MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia. 2007. Tomo IV. 1a edición. Página 306.

"Los momentos aerodinámicos, se calculan tomando en cuenta el valor de las fuerzas que ocasiona cada uno, -cuadro 1.2-.La ubicación de las mismas corresponde al punto en el cual actúa la resultante de estas para cada sentido, este punto es llamado -centro de presión-. Para el análisis de la dinámica del vehículo, se debe incluir la acción de estas fuerzas con respecto al centro de gravedad del automóvil.

Fuerzas	Momentos
Fuerza de arrastre y Fuerza de sustentación	Cabeceo –My-
Fuerza de sustentación y Fuerza lateral	Balanceo-Mx-
Fuerza de arrastre y Fuerza lateral	Guiñado –Mz-

Cuadro 1.2 Fuerzas que componen los momentos aerodinámicos.

Fuente: Autores.

#### **1.6 CONCLUSIONES.**

Mediante el desarrollo de este primer capítulo se pone en manifiesto la importancia que tiene el estudio de los principios físicos y matemáticos que describen el comportamiento de los fluidos, así se han detallado las ecuaciones que gobiernan este fenómeno, llegándose a explicar a cabalidad, estas constituyen el sustento teórico que permitirán estudiar el comportamiento aerodinámico de un automóvil, mediante su simulación en ordenador.

El estudio de dinámica de fluidos resulta aún hoy en día, un campo en el que se pueden realizar muchas investigaciones y desarrollo, ya que no se han establecido modelos matemáticos que describan a cabalidad la naturaleza del flujo de un fluido, sobre todo en los turbulentos, no estacionarios y no Newtonianos. No obstante existen teorías que caracterizan estos fenómenos con un rango de precisión bastante aceptable inclusive en flujos a través de geometrías complejas. Por otro lado en la práctica se permiten hacer simplificaciones notables para el estudio de un problema en particular, esto si se tiene un alto conocimiento de causa; así se podrán omitir algunas variables como: la compresibilidad, viscosidad, rotación o régimen. En cuanto al estudio de las fuerzas que actúan sobre un sólido que se desplaza en un fluido, particularmente el caso de un automóvil, este resulta técnicamente imposible de realizar el contorno del mismo utilizando un estudio analítico convencional. Es por esta razón que se prefiere realizar ensayos empíricos en túneles de viento, en donde se obtienen los coeficientes aerodinámicos de arrastre  $-C_{D}$ - y de sustentación  $-C_{L}$ -, los cuales simplifican notablemente los cálculos, con el único inconveniente de que para lograr fiabilidad en los resultados, el grado de control y calibración de los instrumentos debe ser sumamente preciso, lo que encarece notablemente su uso limitando el desarrollo de este tipo de investigaciones en países en vías de desarrollo.

Los fenómenos aerodinámicos que experimenta un automóvil, tienen influencia directa sobre su estabilidad y maniobrabilidad, por esta razón el estudio de su comportamiento aerodinámico y la evaluación de las fuerzas aerodinámicas principales, resultan de vital importancia para garantizar la seguridad de marcha del automóvil.

# **CAPITULO 2**

## PROCESO DE LA SIMULACIÓN NUMERICA EN UN ORDENADOR

#### **2.4 GENERALIDADES**

La utilización de las técnicas computacionales en ingeniería, tiene su origen en los años 60 al inicio de la industria aeroespacial, aún antes de la invención del transistor; así las primeras computadoras utilizaban tarjetas perforadas para ingresar datos, grandes tambores magnéticos que servían como medio de almacenamiento de información y tubos de vacio para procesar la misma. Evidentemente las capacidades eran restringidas y realizar las más simples operaciones matemáticas era todo un desafío; no obstante se comprobó su utilización como medio efectivo de procesamiento automático de grandes cantidades de información. Hasta nuestros días la capacidad de procesamiento de un ordenador se ha incrementado de forma exponencial, lo que ha motivado a la creación e implementación de las técnicas computacionales para diferentes campos de la ingeniería; los cuales constituyen hoy en día una herramienta que no puede faltar en el diseño de los más ambiciosos proyectos.

### 2.5 DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL

La dinámica de fluidos computacional o CFD<sup>14</sup> consiste en el análisis del movimiento de los fluidos mediante simulaciones en ordenador. Su objetivo es la búsqueda de una solución aproximada de las ecuaciones que gobiernan el movimiento de los fluidos; discretizando o dividiendo el dominio de cálculo en pequeños elementos y resolviendo allí dichas ecuaciones.

A lo largo de los veinte últimos años, las técnicas CFD han evolucionado, mejorando los programas comerciales e introduciéndose en las distintas áreas de la ingeniería, hasta poder solventar las necesidades reales de la industria. Dichos programas se vienen usando de manera creciente; paralelamente a la mejora de los sistemas informáticos que les sirven de soporte. Desde su concepción inicial, las técnicas numéricas CFD se han extendido a un número creciente de aplicaciones en

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup> Acrónimo de las palabras en inglés "Computational Fluid Dynamics"

un amplio espectro de industrias, desde la automovilística hasta las nuevas aplicaciones en biomedicina.

En la industria automovilística, las aplicaciones típicas son: el estudio de la aerodinámica de vehículos, la climatización del habitáculo, el enfriamiento del bloque motor, el flujo a través de los múltiples dentro y fuera de la cámara de combustión, el diseño de filtros y elementos de control, etc. Las ventajas que proporciona el análisis con programas CFD se pueden resumir en las siguientes:

- Reducción sustancial de tiempos y costos en los nuevos diseños.
- Posibilidad de analizar sistemas y condiciones muy difíciles de simular experimentalmente: velocidades supersónicas, temperaturas extremas y elementos en movimiento relativo.
- Capacidad de estudiar sistemas bajo condiciones peligrosas o más allá de sus condiciones límite de funcionamiento.
- Nivel de detalle ilimitado, los métodos experimentales son tanto más caros cuanto mayor es el número de puntos de medida, mientras que los programas CFD pueden generar un gran volumen de resultados sin costo añadido.
- Facilidad para generar gráficos fácilmente interpretables.

En cambio los inconvenientes que se presentan son:

- Se generan errores importantes si el modelo de simplificación escogido no es adecuado para la hipótesis del problema. En algunas ocasiones, estas simplificaciones son realizadas en función de la capacidad de procesamiento del computador, así se realizan simplificaciones que afectan directamente al resultado.
- La existencia de insuficientes e incompletos modelos para la simulación del efecto de la turbulencia, los flujos multifásicos o la combustión, entre otros.
- La tendencia humana de asimilar como verdadero los resultados obtenidos en el ordenador, sobre todo cuando estos son presentados de forma atractiva.

# 2.3. PREPROCESO CFD.

Se entiende como pre-proceso, la configuración inicial del problema que involucra: generación o importación de la geometría, operaciones de limpieza y simplificación

de la misma, delimitación del dominio computacional, mallado, análisis de la calidad de la malla, asignación de las condiciones de los contornos y exportación del archivo a un programa procesador CFD. El programa pre procesador que se emplea en esta simulación es GAMBIT 2.2.30

La serie de operaciones que se realizan en el pre-proceso serán detalladas en los capítulos III y IV de forma práctica

**2.3.1. Mallado del dominio computacional.** La construcción de la malla se realiza para designar los elementos en los que se resolverán las ecuaciones diferenciales que definen el comportamiento del fluido, ya que es la representación discretizada de la geometría del problema. Por otro lado las celdas son agrupadas dentro de una zona de contorno en donde se especifican los atributos físicos que estas poseen.

### 2.3.2 Elementos que componen una malla





## Fuente: Autores

En función de los métodos que se utilizan para linealizar las ecuaciones dentro de las celdas, las mallas se dividen en dos tipos; las mallas estructuradas y las no estructuradas.

**2.3.3 Mallas estructuradas**. Una malla estructurada se define como aquella donde cada elemento de control tiene el mismo número de elementos vecinos. Estas ofrecen las siguientes ventajas.

- Es más sencillo de crear -menor costo computacional-.
- cada vértice de la malla excepto en las fronteras, tiene un vecino isomorfo, por lo que su implementación es simple y muy conveniente para la solución de diferencias finitas.
- Requieren menos memoria de cómputo y ofrecen la posibilidad de controlar directamente la forma y el tamaño de cada elemento.

Por otro lado, la desventaja que se presenta al utilizar este tipo de malla es que debido a su estructura rígida se hace imposible su adaptación a geometrías complejas.



Gráfico 2.2 Ejemplo de una malla estructurada

Fuente: JOÃO M. Baltazar y LUÍS R. Eça. Generación de mallas estructuradas para superficies. Portugal. Instituto superior técnico Maretec. Publicación. 2006. 224p. Página 114

**2.3.4 Mallas no estructuradas.** Una malla no estructurada tiene diferente números de elementos vecinos. La solución de las mallas no estructuradas se realiza mediante los métodos de elementos y volúmenes finitos ya que los mismos permiten fácilmente refinamientos locales para dar resoluciones altas en regiones de interés, sin perder precisión en el resto del dominio. La ventaja de utilizar mallas no estructuradas es que se pueden adaptar fácilmente a contornos geométricos complejos. En cambio las desventajas que se presentan en este tipo de mallado, se relacionan directamente con el encarecimiento del costo computacional, ya que por un lado necesitan mayor memoria de cálculo debido a que la conexión, y el cálculo de los volúmenes para las celdas requiere de modelos matemáticos más complejos, además la creación de una malla de alta calidad resulta bastante laboriosa y requiere mucho tiempo.



Gráfico 2.3 Ejemplo de una malla no estructurada

Fuente: TIZÓN, Juan. Generación de mallas. España. Universidad politécnica de Madrid. Publicación. Parte IV. Página 7.

**2.3.4.1. Tipos de elementos en una malla no estructurada.** En el gráfico 2.4 se muestra la forma de los elementos con los que se puede construir mallas no estructuradas en el programa preprocesador Gambit 2.2.30





Fuente: Autores.

Las mallas que se pueden generar a partir de estos elementos difieren en su uso, ya sea para superficies o para volúmenes:

- *"Tri mesh"*. Se utiliza para mallar superficies, es conformada exclusivamente por elementos triangulares.

- "*Quad mesh*". Es otro tipo de mallado superficial. Este tipo de malla está formada por elementos cuadrangulares, no obstante su alineación puede variar en función de los siguientes subtipos. Gráfico 2.5



Gráfico 2.5 Alineación de elementos cuadrangulares en un mallado no estructurado

Fuente: Autores

- "quad/tri". Es un modelo de malla hibrido que se compone de elementos cuadrangulares y triangulares, se utiliza en superficies, además su alineación puede ser configurada de los modos: map, pave y wedge primitive, este último se utiliza en geometrías sumamente irregulares.
- "*Hex mesh*". Es una malla conformada enteramente por elementos hexaédricos y sirve para configurar volúmenes sencillos. Es posible alinearla de los modos: "*map*", "*submap*", "*tet primitive*", "*Cooper*" y "*stairstep*", estas últimas permiten adaptar el mallado de forma gradual con respecto a una superficie que sirve de referencia, mediante el barrido de la geometría hacia una zona definida como objetivo. Gráfico 2.6

Gráfico 2.6 Orientación de celdas hexaédricas, con modo Cooper.



Fuente: ANDREW COMPUTING SERVICES [En Línea].Orientación de celdas hexaédricas, con modo Cooper. EEUU. http://www.andrew.cmu.edu /user/sowen/survey/ sweep.jpg [Consulta: 4 de julio de 2009.]
- *"Hex/wedge"* Es una malla que se utiliza para definir volúmenes, está formada por elementos hexaédricos con elementos tipo cuña.
- *"tet/hibrid"* Esta formada por elementos: tetraedros, prismas y piramidales, pueden ser alineados de modo: *"TGrid"* y *"hex core"*. Estos métodos son utilizados para crear una malla no estructurada en geometrías sumamente complejas, "son empleados en la industria automotriz y aeroespacial, en los que este tipo de técnica avanzada es requerida"<sup>15</sup>. Gráfico 2.7

Gráfico 2.7 Mallado no estructurado de volúmenes con elementos "*Tetra/hybrid*" alineado de modo TGrid



Fuente: ANSYS [En línea]. Mallado T-Grid. EEUU. <http://www.ansys.com /products /tgrid/ tgrid-spec-brochure.pdf> [Consulta 4 de Julio de 2009]

**2.3.4.2 Calidad del mallado no estructurado.** La calidad del mallado tiene vital importancia sobre la convergencia del proceso iterativo y la exactitud de la solución, además del tiempo que se requiere para realizar el proceso y pos-proceso CFD. Existen cuatro parámetros esenciales para definir la calidad del mallado no estructurado, estos son:

- **Densidad del mallado**. 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. Gráfico 2.8

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>ANSYS [En línea]. Mallado T-Grid. EEUU. http://www.ansys.com/products/tgrid/ tgrid-specbrochure.pdf [Consulta 4 de Julio de 2009]

Gradiente de Malla Inadecuada Malla adecuada velocidad

Gráfico 2.8 Densidad del mallado en función del gradiente de velocidad del fluido



- Distorsión de los elementos "*skewnes*". Este parámetro refiere a la deformación que sufren las celdas cuando se adaptan al contorno de la geometría. A continuación se explica la manera de valorar la misma en una celda tetraédrica "*tet*".

- Se calcula el volumen de una celda tetraédrica óptima, la cual está conformada por triángulos equiláteros. En función del tamaño asignado para ese elemento.
- A continuación se calcula el volumen de una celda deformada.
- La distorsión es el error generado al relacionar el volumen de la celda deformada con respecto a la celda óptima para ese tamaño de elemento, es decir:

$$d = \left| \frac{V_o - V_d}{V_o} \right|$$
[2-1]

En donde:

d: Es la distorsión de una celda deformada -adimensional-

Vo: Es el volumen de una celda óptima -u<sup>3</sup>-

Vd: Es el volumen de una celda deformada -u<sup>3</sup>-

Según el valor de la distorsión de los elementos que forman la malla, estas se pueden calificar según se muestra en el cuadro 2.1

Cuadro 2.1 Calificativo de la calidad de una malla en función de la distorsión de sus celdas.

Distorsión	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Calidad	Excelente	Bueno	Aceptable	Pobre	Deficiente	Degenerado

Fuente: BAKKER, André. Dinámica de fluidos computacional aplicada. EE.UU. Fluent Inc. 2002. Lectura 7. Página 27. - **Proporción de aspecto** *"aspect ratio"*: Es la razón de longitud entre los bordes de mayor y menor longitud dentro de una celda, expresado como porcentaje. *"*Una optima proporción de aspecto se consigue con un porcentaje menor al 20%,"<sup>16</sup>.

- Factor de aplastamiento "*Cell Squish*": El factor de aplastamiento mide la divergencia angular entre el vector que parte del centroide de la celda hacia el centro de cada superficie de la misma, con respecto a la superficie normal al centroide. En el mejor de los casos el factor de aplastamiento se aproxima al valor de cero, en cambio si este se aproxima a 1, la celda se considera deformada.

**2.3.5 Entorno del programa Gambit 2.3.30.** Para realizar el pre-proceso CFD en este estudio se emplea el software comercial Gambit 2.3.30, la ventana principal se muestra en el gráfico 2.9; aquí se distinguen las siguientes zonas: -1- menú principal, -2- barra de operaciones, -3- barra de control global, -4- ventana de texto descripción, -5- ventana de texto de los procesos, -6- barra de tareas y -7- zona gráfica.



Gráfico 2.9 Vista principal del software de pre-proceso Gambit 2.3.30

Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> BAKKER, André. Dinámica de fluidos computacional aplicada. EE.UU. Fluent Inc. 2002. Lectura 7. página 27.

**2.3.5.1 Menú principal.** En el menú principal existen tres ventanas; -archivo- "*file*", -edición- "*edit*" y –solucionador- "*solver*"

- Ventana – Archivo- *"file"*. En esta ventana -gráfico 2.10- se establecen todas las funciones referentes a la manipulación de archivos, al abrir este menú, se despliegan las siguientes opciones.

CAMBIT Solver: FLUENT 5/6 ID: default_id3708	
File Edit Solver	Help
New	
Open	ACIS
Save	Parasolid
Save As	IGES
Print Graphics	STEP
Bun Journal	Catia V4
Clean Journal	ICEM Input
View File	Vertex Data
Import	CAD
Export	Mesh
ACIS	Turbo
Parasolid	Plug-in
IGES	
STEP	
Catia V4	
Z X Mesh	
Township	the Description
Generations 1988-2000 - Bluers Tee - Bill of	Description
http://www.fluent.com	gnts reserved.
	17
Command:	

Gráfico 2.10 Visualización de la ventana -archivo- "file"

Fuente: Autores

- **Nuevo** "*New*": Crea una nueva sesión de trabajo, asignar un nombre y un titulo al fichero.
- Abrir "Open": Abre una sesión de trabajo previamente guardada.
- Guardar "Save": Guarda los cambios efectuados en el fichero asignado.
- **Guardar como** "*Save as*": Guardar los cambios efectuados en un diferente fichero, asignándole un nuevo nombre y título.
- Imprimir gráficos "Print graphics". Imprime el contenido de la zona gráfica, ya sea en una impresora o guarda la configuración necesaria en un archivo de impresión en los siguientes formatos: TIFF, PS, EPS, BMP, SGI RGB, TARGA, y PICT.
- Abrir sesión "*Run journal*": Abre una sesión de trabajo previamente configurada y guardada.
- **Limpiar sesión "Clean journal"**: Edita la sesión actual y se establecen condiciones para realizar cambios en la misma.
- Ver archivo "view file": Muestra archivos en forma de texto.

- Importar "Import": Importa archivos de los siguientes formatos: Acis, Parasolid, Iges, Step, Catia V4, Icem input, Vertex data, Cad, Mesh, Turbo, y plug-in
- Exportar "export" Exporta una sesión de trabajo en los siguientes formatos:
   Acis, Parasolid, Iges, Step, Catia V4 y Mesh.
- Salir "Exit": Abandona la sesión de trabajo y cierra el programa.

- Ventana editar "*edit*". En esta ventana se establecen las funciones que permiten modificar los parámetros de configuración de la sesión de trabajo. En esta se distinguen las siguientes opciones:

- **Título "title":** Asigna un nombre al archivo, para que pueda ser guardado como texto.
- Archivo "file": Se especifica el programa editor en el cual se guarda una copia del fichero en modo texto.
- **Parametros -Parameters-**: En esta ventana se permite la programación de funciones adicionales a las existentes, estas pueden se formuladas para escalares y vectores.
- Opciones por defecto "Defaults": Esta ventana -gráfico 2.11- permite revisar y si es el caso modificar los parámetros con los que el programa realiza las distintas operaciones.

Gráfico 2.11 Ventana de configuración de las opciones por defecto.

Edit Defaults GRAPHICS	FILE_IO ) GEOMETRY )	CAD ) GLOBAL )	TOOLS ) GUI	TURBO LABEL
◆ INTERVAL	↓ FACE	↓ PAVER	∲ NODES	Ę
Variable	Valu	le Descr	iption	
COUNT MATCH_LOWER SIZE	10 0 1	Mesh 0 = A Mesh	interval count utomated inter interval size	val assig
Modify Reset	Personal	Value	The second secon	<u> </u>
oad [~\GAMBIT.ini	i			Browse
Save				Browse
	[	Close		

Fuente: Autores

Para configurar esta ventana se presentan las siguientes opciones. -Cuadro 2.2-

	-GRAFICOS:       Muestrala configuración establecida para la manipula- "GRAPICHS" ción y visualización de las imágenes.         -ARCHIVO IO:       Expone la configuración con la "FILE IO" cual se manejan los siguientes archivos:       Iges, Step, Catia Parasolid, Ansys Translator, Mesh Fidap, Fluent 5         -CAD:       Establece la configuración con la cual un archivo Cad puede ser importado, en este casola única variable es el comando de inicio del programa "prœngineer"
_TS"	-HERRAMIENTAS: Presenta la configura- "TOOLS": ción de las siguientes herramientas:
PCIONES POR DEFECTO "DEFAUL	<ul> <li>-MALLA: Muestra la configuración con "MESH" la cual el programa realiza el mallado para las siguientes entidades</li> <li>-GEOMETRIA: Expone la configuración "GEOMETRY" de las operaciones que realiza el programa para los siguientes entes geo- métricos</li> <li>-Inverval o "Interval" -Caras "Face" -Modificar "Modify" -Nudos "Nodes" -Nudos "Nodes" -Referencia "Flags" -Volumen "Volume"</li> <li>-Vértice "Vertex" -Cara "Face" -Grupo "Group" -Bordes "Edges" -Volumen "Volume"</li> </ul>
0	<ul> <li>-GLOBAL: Establece la configuración para las siguientes operaciones: deshacer "undo", imprimir "print", base de datos "data- base" y editor.</li> <li>-GUI: Presenta la configuración para operaciones de carácter general</li> <li>-GUI: Presenta la configuración para operaciones de carácter general</li> </ul>
	-ETIQUETA: Exhibe la configuración "LABEL" de las operaciones que realiza el programa par a asignar nombres y pro- piedades de los siguientes entes geométrico. -Vértice "Vertex" -Cara "Face" -Grupo "Group" -Bordes "Edges" -Volumen "Volume" -Contorno de capas "Blayer" -F. de tamaño "SFunction" -Coordenadas "Coord"

Cuadro 2.2 Opciones de configuración del programa Gambit 2.2.30

- Ventana –procesador- "*solver*". En esta ventana se elige el programa que realizará el proceso analítico CFD. Los programas a los cuales se puede exportar un archivo, son: FIDAP, FLUENT/UNS, FLUENT 5/6, FLUENT 4, RAMPANT, NEKTON, POLYFLOW, FLOWIZARD, ANSYS, GENERIC. Por defecto el programa se ejecuta para el modo compatible con el procesador FLUENT 5/6, si se elige otro; el entorno de Gambit puede variar.

**2.3.5.2 Barra de operaciones.** Aquí se muestran los botones que ejecutan las operaciones relacionadas con: geometría, mallado, zonas y herramientas disponibles para el pre-proceso. –Gráfico 2.12-

	Operation		
$\begin{array}{c} Geometry \\ \hline $		Zones 	
			<u>3</u>

Gráfico 2.12 Funciones en la barra de operaciones.

Fuente: Autores

Cuadro 2.3 Función de los botones en la barra de operaciones.

Pos	Descripción	Botones adicionales <sup>17</sup>
1	Geometría de vértices	
1A	Crear vértices	Х
1B	Mover-copiar vértices	Alinear vértices
1C	Desplazar vértices	Х
1D	Convertir vértices virtuales en reales	Х

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup> Para acceder a los botones adicionales se debe pulsar el botón derecho del ratón sobre el ícono.

1E	Conectar vértices	Desconectar vértices
1F	Resumen de vértices	Subrayar, sumatoria, inspección
1G	Color de vértices	Etiqueta de vértices
1H	Borrar vértices	X
2	Geometría de bordes	
2A	Crear líneas rectas	Arcos, circunferencias, etc
2B	Mover-copiar bordes	Alinear bordes
2C	Romper bordes	Unión virtual de bordes
2D	Suavizar bordes	Convertir bordes virtuales en
2E	Conectar bordes	Desconectar bordes
2F	Resumen de bordes	Subrayar, sumatoria, inspección
2G	Color de bordes	Etiqueta de bordes
2H	Borrar bordes	X
3	Geometría de superficies	
3A	Crear superficie a partir de un marco	Polígonos, círculos, elipses, etc
3B	Mover-copiar superficies	Alinear superficies
<u>3C</u>	Crear superficies rectangulares	Círculos, elipses
3D	Romper superficies	Unión virtual de superficies
3E	Unir superficies reales	Sustraer e intersecar superficies
3F	Suavizar superficies	Convertir superficies virtuales
<u>3G</u>	Conectar superficies	Desconectar superficies
<u>3H</u>	Resumen de superficies	Subrayar, sumatoria, inspección
31	Color de superficies	Etiqueta de superficies
3J	Borrar superficies	X Descharge states and finite states
4	Geometria de volumenes	Desplazar y rotar superficies para
4A 4P	Mover Conjer volúmenes	
4D 4C	Crear Volúmanas ractangularas	Cilindros prismos pirémidos etc.
4C 4D	Romper volúmenes	Unión virtual de volúmenes
4D 4E	Unir volúmenes reales	Sustraer e intersecar volúmenes
4 <u>L</u> 4 <u>F</u>	Sugvizar volúmenes	Convertir volúmenes virtuales
4 <u>1</u> 4 <u>G</u>	Crear Chaflán	
40 4H	Resumen de volúmenes	Subrayar sumatoria inspección
41	Color de volúmenes	Etiqueta de volúmenes
4J	Borrar volúmenes	x
5	Geometría de grupos	
5A	Crear grupos	x
5B	Mover-copiar grupos	Alinear grupos
5C	Modificar grupos	X
5D	Resumen de grupos	Subrayar, sumatoria, inspección
5E	Color de grupos	Etiqueta de grupos
5F	Borrar grupos	X
6	Mallado por capas del contorno	
6A	Crear una capa de contorno	X
6B	Modificar capa de contorno	X
6C	Resumen de capas de contorno	X
6D	Etiqueta de capas de contorno	X
6E	Borrar capas de contorno	X
7	Mallado de bordes	

7A	Crear malla en un borde	Х
7B	Enlazar bordes mallados	Desenlazar bordes mallados
7C	Ruptura de bordes mallados	х
7D	Resumen de la malla de bordes	х
7E	Configurar elementos de malla del borde	Х
7F	Borrar mallado de bordes	Х
8	Mallado de superficies	
8A	Crear malla en superficies	х
8B	Enlazar superficies malladas	Desenlazar superficies malladas
8C	Mover nodos en la malla de superficies	Romper nodos en mallas "quad"
8D	Modificar mallas de superficies	Romper mallas de superficies
8E	Suavizar mallas de superficies	Х
8F	Configurar tipo de vértices en superficies	X
8G	Resumen de mallas de superficies	Revisar distorsión de mallas sup.
8H	Configurar elementos de mallas de sup.	Х
8I	Borrar mallado de superficies	Х
9	Mallado de Volúmenes	
9A	Crear malla de volúmenes	Х
9B	Enlazar volúmenes mallados	Desenlazar volúmenes mallados
9C	Modificar geometría de mallas	X
9D	Suavizar malla de volúmenes	Х
9E	Resumen de mallas de volúmenes	Revisar distorsión de mallas vol.
9F	Configurar elementos de malla de vol.	X
9G	Borrar mallas de volúmenes	X
10	Mallado de grupos	
10A	Crear malla de grupos	X
10B	Resumen de mallas de grupos	Revisar distorsión mallas en grup.
10C	Borrar mallas de grupos	X
11	Configurar condiciones de contorno	
12	Configurar condición medio continuo	
13	Sistemas coordenados	
13A	Crear sistema coordenado	X
13B	Modificar tipo y etiqueta de sist. coord	X
13C	Activar sistema coordenado existente	X
13D	Mostrar mallado	X
13E	Resumen de sistemas coordenados	X
13F	Mostrar escala gradual	X
13G	Borrar sistema coordenado	X
14	Funciones de tamaño	
14A	Crear función de tamano	X
14B	Modificar función de tamano	X
14C	Ver comportamiento de funcion tamano	X
14D	Resumen de funciones de tamano	X
14E	Dontar functiones de tamano	X
15	Crear un parfil de turbo	
13A 15D	Pompar bordes	X Dompor superfunit herdes etc.
150	Doplozor vártico virtual	Komper superi., unit bordes etc
15U	Crear ages de contorne	X Modificar cons de conterne
1 1 3 1 1	Crear capa de contorno	wouncar capa de contorno

15E	Crear el volumen de un turbo	Х
15F	Mallar bordes	Mallar superficies. y volúmenes
15G	Definir zonas del turbo	Х
15H	Enlazar vértices y superficies	Desenlazar vértices y superficies
15I	Descomponer volumen de turbos	Х
15J	Ver comportamiento de turbo	Х
16	<b>Operaciones de limpieza</b>	
16A	Eliminar bordes pequeños	х
16B	Eliminar superficies pequeñas	
16C	Limpiar hoyos	Borrar superf., capas superf. etc
16D	Eliminar bordes grandes	Х
16E	Eliminar grietas	Х
16F	Eliminar franjas	Х
16G	Eliminar ángulos afilados	х
16H	Eliminar volúmenes duplicados	Vértices, bordes, superficies
16I	Eliminar ángulos muy grandes	Х
16J	Limpiar el dominio de forma automática	Х
17	Funciones programadas	
17A-J	Botones disponibles – programación-	Х

Fuente: Autores

**2.3.5.3 Barra de control global.** En esta barra se disponen de una serie de botones cuya función se relaciona directamente con el modo de presentación del problema y sus atributos en la zona gráfica, los cuales se detallan en función del gráfico 2.13



Gráfico 2.13 Botones que conforman la barra de control global

Fuente: Autores.

- 1. Adaptar a ventana "*fit to window*": Adapta el tamaño de la geometría para que se pueda visualizar completa en la zona gráfica.
- 2. Seleccionar apoyo "Select pivot": Especifica un punto de giro, alrededor del cual la geometría rota.

- Seleccionar configuración preestablecida "Select preset configuration": Al pulsar el botón derecho del ratón, se despliega un submenú con las opciones de representación de la zona gráfica.
- 4. Modificar iluminación "Modify light": Permite la configuración de una fuente de iluminación, lo cual mejora la presentación de los objetos en la zona gráfica. Al pulsar el botón derecho se muestran dos botones adicionales: -texto- "text" y etiqueta "label" las cuales sirven para introducir texto y modificar la etiqueta de los objetos, respectivamente.
- **5.** Habilitar/deshabilitar zona gráfica *"Enable/disable graphic zone"*: Habilita o deshabilita los diferentes cuadrantes de la zona gráfica.
- 6. Desahacer "undo": Anula la última operación realizada; al pulsar el botón derecho del ratón se muestra el botón –rehacer- "redo" el cual restablece la operación previamente anulada.
- Examinar la malla "Examine mesh": Despliega la ventana de configuración de las opciones de visualización detallada de la malla.
- 8. Especificar el modo de color "Specify color mode": Intercambia el modo de asignación de colores en la zona gráfica de: diferenciación entre entes geométricos: vértices, bordes, superficies o volúmenes; ó representación de colores para identificar la conectividad entre los mismos.
- **9.** Modo de representación "*Render mode*": Al pulsar el botón derecho del ratón, se despliegan tres botones: -estructura-"*wireframe*": muestra únicamente las líneas que componen superficies o volúmenes; –sombrear-"*shaded*": muestra superficies y volúmenes llenos; y -representación de ocultos- "*hidden rendering*" especifica la apariencia del modelo mediante líneas ocultas.
- 10. Atributos de representación del modelo "model display attributes": Abre la ventana de configuración de la apariencia del modelo, en ella se puede configurar los atributos de visibilidad, sombreado y etiqueta para los diferentes entes geométricos.
- **11. Orientar modelo** *"Orient model"*: Abre un menú de las opciones de visualización disponibles, en función de la ubicación del plano cartesiano.

**2.3.5.4 Ventana de texto –descripción-** *"description*". En esta ventana se muestra de forma textual la función que desempeña cada uno de los botones de la barra de operaciones y de la barra de control global, basta con ubicar el puntero del ratón en dicho botón. -Gráfico 2.14-

Gráfico 2.14 Visualización de la ventana de texto -descripción-



Fuente: Autores

**2.3.5.5 Ventana de texto de los procesos**. Esta ventana sirve de vínculo de comunicación para el programa, en ella se muestra la secuencia de comandos realizados, advertencias e información relevante para cada proceso. –Gráfico 2.15-

Gráfico 2.15 Visualización de la ventana de texto de los procesos.

					Transc	rip	t			•
Command>	> face	create	width	12	height	3	xyplane	rectangle		í
Created	face:	face.1							F	ł

## Fuente: Autores

**2.3.5.6 Barra de tareas.** Mediante el ingreso de diferentes comandos de texto se realizan los procesos sin necesidad de utilizar los botones de la barras de operación y control global, esta función permite economizar tiempo si se conocen todos los comandos y se tiene mucha práctica.

**2.3.5.7 Zona gráfica.** Es aquí en donde el programa muestra los contornos geométricos. Por defecto la zona gráfica se muestra de color negro, no obstante es posible asignar cualquier tonalidad de color para ella y para gráficos en general; mediante la configuración de las opciones por defecto, resumidas en el apartado 2.4.2.1 en la opción: Gráficos "graphics"  $\rightarrow$ general "general"  $\rightarrow$ color de fondo "background color". Gráfico 2.16



2.16 Visualización de la zona gráfica, con fondo modificado.

Fuente: Autores.

#### 2.4 PROCESO CFD.

El proceso analítico CFD utiliza diferentes modelos matemáticos para resolver un problema de mecánica de fluidos en particular, estos son simplificados en función del tipo de flujo que se desea modelar, además de las características intrínsecas del problema. Seleccionar los modelos matemáticos adecuados resulta de vital importancia, si se desea aproximar los resultados a la realidad. Por otro lado es importante conocer los procesos elementales de operación de este tipo de programas, con ello se podrá realizar la configuración de un problema de forma exitosa. A continuación se especifican los modelos matemáticos más comunes en esta rama de la ingeniería mecánica computacional.

**2.4.1 Modelos de simplificación.** Existen varias posibles simplificaciones en cuanto a la definición del modelo matemático que describe el movimiento de las partículas de un fluido. Normalmente cada una de las estrategias han sido desarrolladas para un tipo particular de flujo.

**2.4.1.1 Modelos de flujo potencial.** "Describen el comportamiento de flujos irrotacionales de fluidos ideales, desarrollados en los albores de las técnicas numéricas. La teoría básica para el cálculo consiste en partir de la definición del concepto de potencial de velocidades. Constituye una simplificación adicional muy

aplicada para el cálculo de flujos estacionarios. Conceptualmente es de gran interés, pero está cayendo en desuso"<sup>18</sup>

**2.4.1.2 Ecuaciones para flujo ideal.** Cuando el número de Reynolds es elevado, es decir en régimen turbulento, los efectos viscosos podrían ser despreciables para la mayoría del dominio, solo se considerarán en la proximidad de las paredes de los cuerpos sólidos, en donde su influencia no se puede omitir. Así las ecuaciones de Navier Stokes no incluyen la viscosidad ni la transferencia de calor; es decir quedan reducidas a las ecuaciones diferenciales de Euler [1-17] con las cuales se especifican la continuidad del caudal en una línea de corriente.

**2.4.1.3 Solución directa de las ecuaciones de Navier – Stokes.** Las ecuaciones de Navier-Stokes, constituyen una modelización correcta del flujo de un fluido Newtoniano, incluyendo todos los efectos viscosos y térmicos. Resueltas adecuadamente incluyen los efectos de la turbulencia y de la capa límite. La resolución de estas ecuaciones es posible si se utilizan modelos adecuados para simular el efecto de la turbulencia y de la capa límite en discretizaciones muy detalladas.

**2.4.1.4 Modelo parabólico de las ecuaciones de Navier** – **Stokes.** Se utilizan cuando no se puede despreciar la compresibilidad del fluido. Este tipo de modelos ha sido desarrollado para el cálculo de flujos supersónicos e hipersónicos, donde la captura de las ondas de choque, gradiente de presión, esfuerzos viscosos superficiales y transferencia de calor son los objetivos más importantes, su aplicación es muy útil sobre todo en el sector aeroespacial.

**2.4.1.5 Modelo de flujo incompresible.** Cuando la densidad del fluido permanece constante e independiente de las variaciones de presión, se dice que no existe compresibilidad del mismo. Además si el flujo es isotermo, las ecuaciones de gobierno se simplifican notoriamente. Al considerar la ecuación de continuidad [1-17]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot v) = 0 \quad \text{en donde}: \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \text{ -fluido incompresible-}$$

<sup>&</sup>lt;sup>18</sup> BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Técnicas numéricas en mecánica de fluidos. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2003. 138p. 1a Edición. Página 13.

Por lo tanto, la ecuación de continuidad para este modelo es:

$$\nabla \cdot (v) = 0 \tag{2-2}$$

Este modelo es adecuado para resolver problemas de aerodinámica de vehículos, en los cuales el flujo de aire se considera incompresible.

**2.4.2 Formulación de las ecuaciones.** Una función y(t) se llama implícita cuando está definida de la forma f(y,t)=0 en lugar de la habitual y=f(t) a la cual se conoce como formulación explícita. En ocasiones, sobre todo al resolver ecuaciones diferenciales con un solo término -caso de las ecuación de continuidad para flujos incompresibles-, la función estará expresada de forma implícita, porque no hay forma posible de despejar la variable y.

**2.4.3 Métodos para la simulación de la turbulencia.** El régimen turbulento, se considera como un estado no estacionario desde el punto de vista macroscópico en el que las distintas variables adoptan valores dependientes tanto de la posición como del tiempo, estos valores varían de una forma aleatoria y desordenada.

Por esta razón su estudio analítico resulta sumamente complejo y constituye un problema aún sin solución dentro del campo de estudio de los métodos numéricos. Sin embargo existen aproximaciones conocidas como los métodos de simulación directa, simulación de los grandes vórtices y promediado temporal de las ecuaciones de Navier-Stokes.

**2.4.3.1 Simulación directa de las ecuaciones** *-"direct simulation", DS*-. Este método no utiliza ningún modelo para la turbulencia. Sino realizar discretizaciones temporales y espaciales que sean capaces de simular el flujo en un determinado problema.

**2.4.3.2 Simulación de grandes vórtices -"Large Eddy Simulation"** *LES***.** Esta técnica numérica reduce la complejidad de las ecuaciones de gobierno, considerando solo parte de los efectos turbulentos del flujo. Se estudia el intercambio de energía entre las denominadas fluctuaciones de gran escala "*large eddies*", y se simula el efecto de las pequeñas escalas de la turbulencia. Gráfico 2.17



Gráfico 2.17 Formación de grandes vórtices "large Eddy" en una estela turbulenta.

Fuente: AGUDELO, María; ét Al, Método de volúmenes finitos, introducción, ejemplos y aplicaciones. Colombia. Universidad de Antioquia. Publicación. 2007.103p. Página 70.

En los modelos de simulación de grandes vórtices, las ecuaciones no estacionarias del flujo se resuelven para el flujo principal y para los vórtices grandes, mientras que se modela el efecto de los vórtices pequeños, solo es posible para problemas de geometría simplificada, y requiere capacidades de cálculo muy elevadas.

**2.4.3.3 Métodos que promedian temporalmente las ecuaciones de Navier** – **Stokes -***RANS*-. Los modelos de promedio de las ecuaciones de Navier-Stokes - Reynolds Averaged Navier-Stokes- han sido muy estudiados y resultan bastante útiles en la mayoría de los problemas. El procedimiento de promediar las leyes que describen el movimiento de una partícula se introducen en las ecuaciones con el fin de obtener los comportamientos promedio y turbulento de las distintas variables.

Habitualmente lo que interesa son los efectos de la turbulencia, y no un análisis en si misma, estos efectos pueden ser sobre la velocidad media, la presión media, la fuerza media de sustentación y arrastre, etc. Para conseguir esto, las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian sobre las escalas de las fluctuaciones de turbulencia - RANS-.

**2.4.4 Modelos de turbulencia.** Un modelo de turbulencia es un procedimiento numérico que permite relacionar los valores medios de las fluctuaciones con los

valores promedio de las variables, de forma que se permita resolver las ecuaciones de gobierno. Utilizando diferentes métodos para ello. Un modelo de turbulencia será útil dentro de un programa CFD de propósito general, si es exacto, sencillo y económico, computacionalmente hablando.

Los modelos para simular flujos turbulentos, se resumen en el cuadro 2.4



Cuadro 2.4 Modelos de turbulencia.



A continuación se definen las características básicas de los modelos más usados, en simulaciones aerodinámicas de automóviles.

**2.4.4.1 Modelo de cero ecuaciones: Spalart-Allamaras.** En este modelo se resuelve una sola ecuación de transporte para la viscosidad turbulenta, esta tiene incidencia en problemas en donde el fluido esté confinado, y exista recirculación; por ejemplo turbomáquinas. Se utiliza sobre todo para fluidos que experimentas bajos números de Reynolds y tiene un buen rendimiento en cálculos en los que la capa límite, está sometida a gradientes de presión adversos. Resulta muy económico, computacionalmente hablando.

**2.4.4.2 Modelos de dos ecuaciones: modelo k-** $\varepsilon$ . Este modelo, consiste en una estrategia numérica que permite resolver las ecuaciones de Navier-Stokes de forma bastante aproximada. En este se desarrollan dos ecuaciones para el transporte de las partículas fluidas, una para la energía cinética turbulenta –k- y otra para la tasa de

disipación de energía cinética turbulenta  $-\varepsilon$  - Las principales ventajas e inconvenientes de este modelo, son las siguientes:

Ventajas:

- Solo se necesita establecer las condiciones iniciales de operación, y las condiciones de contorno.
- Se obtienen resultados muy satisfactorios para una gran cantidad de flujos.
- Es el modelo de turbulencia más utilizado en la mayoría de flujos en aplicaciones de la industria automotriz.
- No es necesario disponer leyes de pared adicionales a las establecidas en las condiciones de contorno.

Inconvenientes:

- Se obtienen resultados poco satisfactorios para flujos confinados y flujos con grandes gradientes longitudinales.
- El ordenador requiere un tiempo de iteración considerablemente mayor.

Existen modelos de turbulencia adicionales que parten del modelo de dos ecuaciones  $k-\varepsilon$  los cuales se describen brevemente a continuación:

**2.4.4.3 Modelos de dos ecuaciones: modelo RNG k-** $\varepsilon$ . Se utiliza para predecir con mayor exactitud la formación de vórtices, por esto se comporta muy bien en flujos con gradientes de presión adversos. Además por su formulación analítica para la viscosidad efectiva, permite tener en cuenta los efectos de un bajo número de Reynolds. El inconveniente que se presenta es que requiere adicionalmente la configuración de leyes de pared, las cuales encarecen notablemente el costo computacional.

**2.4.4.4 Modelos de dos ecuaciones: modelo k-** $\varepsilon$  **realizable.** Este modelo incorpora una nueva formulación de las ecuaciones de la producción de energía cinética turbulenta –k- y la tasa de disipación  $\varepsilon$ , basada en la fluctuación media de la vorticidad. Es ideal para flujos rotacionales, flujos con gradientes de presión adversos, separados y simulaciones en las que existan inyecciones de flujo al torrente.

**2.4.5 Modelos matemáticos para la capa límite.** El problema básico para la modelización numérica del intercambio energético en la capa límite sobre cualquier frontera sólida consiste en la definición correcta de las velocidades de las partículas en una zona muy próxima a dicha frontera. Esto implica una densidad de mallado muy elevada, necesaria para capturar los distintos fenómenos que se producen dentro de la capa límite.

Existen varias aproximaciones que se pueden ejecutar para superar este problema, estas son:

**2.4.5.1 Modelos de distribución de pérdidas.** Es una aproximación muy usada en flujos internos -fluidos confinados en un canal limitado por paredes sólidas-. Supone que el efecto de las tensiones cortantes debidas a la viscosidad es equivalente a una fuerza de rozamiento distribuida a lo largo del canal de paso y definida por valores semi empíricos del problema a resolver.

El inconveniente es que se pierde la definición en zonas cercanas a las superficies sólidas.

**2.4.5.2 Modelos de capa de cortadura.** -*"Boundary layer approximations"*- Se utiliza preferentemente para fluidos con elevados números de Reynolds, en los que el campo de velocidades se puede separar en dos zonas, una de flujo no viscoso alejada de los contornos sólidos y otra denominada por los efectos de la viscosidad, denominada capa limite.

**2.4.5.3 Modelos de capa límite delgada.** -*"Thin Shear Layer, TSL"*-. Son métodos apropiados para flujos con elevados números de Reynolds en los que las zonas de influencia viscosa, estelas o capas de cortadura ocupan una extensión muy reducida dentro de la geometría del problema estudiado. Fuera de estas zonas, resulta suficiente con considerar el modelo de fluido ideal.

Para este tipo de modelos se requiere una discretización espacial muy densa en las zonas en las que se espera influencia de los términos viscosos. Este tipo de modelo ha sido ampliamente difundido y utilizado por los programas CFD comerciales, incluido el software Fluent.

**2.4.6 Leyes de pared.** Otra posibilidad es incluir en los cálculos alguna aproximación para la distribución de velocidades esperada. Con tal fin, se pueden utilizar las distribuciones de velocidad obtenidas experimentalmente, pero la práctica habitual consiste en utilizar los datos de distribuciones teóricas. En el contexto de los métodos numéricos, las funciones o leyes de pared constituyen un conjunto de formulas semi empíricas que relacionan los valores de las distintas variables en las zonas próximas a los contornos sólidos y sobre los mismos.. Normalmente incluyen tanto las relaciones para las variables medias y fórmulas para el tratamiento de la turbulencia en zonas próximas a los contornos sólidos.

**2.4.7 Discretización de las ecuaciones.** A lo largo de la historia de los métodos numéricos aplicados a la mecánica de fluidos muchas han sido aproximaciones o formas de pasar del modelo físico – matemático al modelo numérico discreto, con el cual el ordenador puede procesar la información. Las técnicas modernas se construyen con un requerimiento adicional importante, consistente en la condición de que el resultado final de la discretización sea fácilmente integrable en una arquitectura de cálculo determinada.

La aplicación de las leyes básicas de física permite obtener las relaciones entre las distintas variables a través de un conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales, debido a su gran complejidad, rara vez es posible resolverlas de modo exacto y es necesario buscar métodos alternativos que proporcionen una buena predicción, es decir métodos que proporcionen una solución numérica aproximada. Así la solución numérica aproximada se obtendrá a partir de la resolución de una serie de relaciones algebraicas obtenidas mediante técnicas de discretización de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

Cuadro 2.5 Proceso de discretización de las ecuaciones en un programa CFD.



Fuente: Autores

**2.4.7.1 Consistencia, convergencia y estabilidad.** Ya que el sistema de ecuaciones algebraicas generadas en el proceso de discretización debe ser consistente con el

sistema original si, cuando el espaciado del mallado tiende a cero, el sistema de ecuaciones es equivalente al sistema en derivadas parciales en cada punto.

La comprobación de la consistencia requiere la sustitución de la solución exacta en las ecuaciones algebraicas resultantes de la discretización, y la expansión de todos los términos en torno a un punto. Para obtener consistencia, la expresión resultante debe estar formada por la ecuación en derivadas parciales original más un resto, el cual debe anularse si el mallado se refina.

Se define la convergencia como la capacidad que tiene un conjunto de ecuaciones algebraicas para representar la solución analítica de un conjunto de ecuaciones diferenciales, si esta existe. Las ecuaciones convergen si la solución numérica tiende a la solución analítica cuando el espaciado o mallado o el tamaño del elemento tiende a cero.

Una solución de un sistema de ecuaciones algebraicas que aproxima un sistema de ecuaciones en derivadas parciales es convergente si la solución aproximada es igual a la solución exacta para cada valor de la variable independiente cuando el espaciado en el mallado tiende a cero -numéricamente esto se expresa como: -  $\Delta x$ ,  $\Delta t \rightarrow 0$ -.

Por otro lado la estabilidad de un sistema está relacionado con el crecimiento o atenuación de errores introducidos en la fase de cálculo, pues el ordenador introduce un error redondeado en cada cálculo que realiza. Se utilizan distintos métodos numéricos para obtener una valoración de dicha estabilidad. A continuación se presenta el método de las perturbaciones discretas.

- Método de las perturbaciones discretas: En este método se introduce una perturbación en un punto y se observa su efecto en los puntos vecinos. Si la perturbación se atenúa a medida que la solución procede, es esquema numérico es estable. Pero si la perturbación crece con la solución, el esquema es inestable.

**2.4.8 Métodos de discretización empleados.** El objetivo de la discretización es sustituir el problema continuo con infinitos grados de libertad en espacio y tiempo por un problema discreto con finitos grados de libertad. En función de que la discretización se realice en el dominio temporal o en el dominio espacial, se presentan diferentes métodos de discretización:

	DISCRETIZACIÓN TEMPORAL	{- Diferencias finitas
METODOS DE DISCRETIZACIÓN	DISCRETIZACION ESPACIAL	-Diferencias finitas -Elementos finitos -Volúmenes finitos -Residuos ponderados

Cuadro 2.6 métodos de discretización utilizados por los programa CFD

Fuente: Autores

El método de discretización que utiliza el programa Fluent es el de volúmenes finitos, el cual se detalla a continuación.

**2.4.8.1 Método de los volúmenes finitos.** "Este método consiste, fundamentalmente, en convertir las ecuaciones diferenciales en su análogo numérico, mediante una transformación física de las ecuaciones. Por ejemplo, la ecuación de la cantidad de movimiento puede ser considerada como una serie de flujos dentro de un volumen de fluido, junto con un término de fuente que es el gradiente de presiones. Para mostrar la discretización, se crean volúmenes finitos -particiones del espacio- en la dirección x, y se fija la atención en el volumen enésimo por simplicidad. En el gráfico 2.18 se puede ver un volumen finito o celda, donde el centro del volumen, punto P, es el punto de referencia en el que se quiere hallar el análogo numérico de la ecuación diferencial. Los puntos centrales de las celdas vecinas se denominan W y E -celda oeste y celda este-. Las caras que delimitan la celda a un lado y a otro se denominan *w* y *e* -cara oeste y cara este-."<sup>19</sup>



Gráfico 2.18 Esquema de discretización empleado en el método de volúmenes finitos

Fuente: BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Simulación numérica de flujos CFD con el programa Fluent. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2005. 68p. 1a Edición. Página 9.

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Simulación numérica de flujos CFD con el programa Fluent. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2005. 68p. 1a Edición. Página 9.

Supóngase que se quiere discretizar la derivada segunda siguiente:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}$$
 [2-3]

Hay que hacerlo a partir de las derivadas primeras en las caras que limita la celda:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P = \frac{\left(\frac{\partial U}{\partial x_e} - \frac{\partial U}{\partial x_w}\right)}{x_e - x_w}$$
[2-4]

Estas derivadas se calculan, a su vez, a partir de los valores de la variable U en los centros de las celdas vecinas.

$$\left[\frac{\partial U}{\partial x}\right]_{e} = \frac{U_{E} - U_{P}}{x_{E} - x_{p}}$$
[2-5]

$$\left[\frac{\partial U}{\partial x}\right]_{W} = \frac{U_{P} - U_{W}}{x_{P} - x_{W}}$$
[2-6]

Por lo tanto:

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2}\right)_P = \frac{\left(\frac{U_E - U_P}{x_E - x_p} - \frac{U_P - U_W}{x_P - x_w}\right)}{x_e - x_w}$$
[2-7]

Estas expresiones son utilizadas para implementar las derivadas de las ecuaciones de una celda cualquiera. De esta manera, se puede hallar el análogo numérico de las ecuaciones diferenciales para cada volumen finito, y después resolver el sistema de ecuaciones algebraicas que resulta.

**2.4.9 Opciones de gradiente.** La mayor parte de los esquemas existentes para el cálculo de gradientes utilizan ajustes de la función utilizando el método de mínimos cuadrados o bien reconstrucciones basadas en el teorema de Green-Gauss.

**2.4.9.1 Adaptaciones de gradiente por el método de mínimos cuadrados.** El método de mínimos cuadrados es una técnica de análisis numérico, en la que, dadas la coordenadas de varios puntos dispersos, se intenta encontrar la función que mejor se aproxime para definir su ubicación espacial o temporal. Gráfico 2. 19



Gráfico 2.19 Adaptación de una función por el método de mínimos cuadrados

Fuente: PROGRAMA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO.[En línea]: http://www.cte.edu.uy/cteI/mincuad.pdf. [Consulta: Junio 5 de 2009]

Este método intenta minimizar la suma de los cuadrados de las diferencias ordenadas -llamadas residuos- entre los puntos generados por la función y los correspondientes en los datos.

**2.4.9.2** Adaptaciones de gradiente por el método de Green-Gauss. Este método utiliza el teorema de Green y el teorema de la divergencia de Gauss; para calcular el área de las celdas que componen la malla; para luego establecer una función paramétrica<sup>20</sup> que vincula las celdas con la presión, velocidad y tiempo.

Esta función puede ser expresada en función del tamaño de las celdas o de la ubicación de los nodos que forman la misma.

**2.4.10 Porosidad de superficies.** El caso en que el fluido se encuentre en un medio poroso, los modelos matemáticos que se utilizan para modelar el comportamiento de

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup> Se conoce como Parametrización a la representación de una curva o superficie como imagen de una función vectorial. Su importancia radica en que permite tratar como funciones a curvas que no lo son si se las considera dentro del Sistema de coordenadas clásico,. Aún así, es también utilizable para facilitar cálculos en sistemas de muchas variables, que no poseen representación gráfica.

la capa límite sufren modificaciones importantes. Un medio poroso es un material sólido que tiene agujeros distribuidos en toda su extensión, cuando los poros están llenos de un fluido, se dice que el medio poroso está saturado; La formulación de medios porosos puede ser usada en una variedad de problemas, incluido flujos a través de: elementos filtrantes, platos perforados, hornillas, etc.

**2.4.11 Entorno del programa de proceso CFD Fluent 6.3.26.** Fluent es el programa de mayor preferencia de dinámica de fluidos computacional para una gran variedad de flujos; incompresibles, medianamente compresibles y altamente compresibles. En este programa se dispone de múltiples opciones de solución para mejorar la convergencia, así se obtienen soluciones eficientes y precisas para un amplio régimen de flujos. La variedad de modelos físicos en Fluent permite predecir con gran exactitud flujos laminares y turbulentos, transferencia de calor -radiación, convección, conducción-, reacciones químicas, flujos multifásicos, estimación de fenómenos acústicos y otros fenómenos involucrados; otra característica remarcable es la gran capacidad de adaptación a distintos tipos de mallas estructuradas y no estructuradas, en las que puede realizar cambios automáticamente durante el proceso de solución.

La ventana principal del programa se muestra en el gráfico 2. 20



Gráfico 2.20 Ventana principal del programa Fluent 6.3.26

Así en la ventana principal del programa se distinguen las siguientes zonas:

Fuente: Autores.

- Barra de información : se muestra información relevante a la configuración del problema, y los modelos matemáticos cargados; en este caso se observa: problema tridimensional -3d-, modo de trabajo de doble precisión –dp- -"double precision"-, resolver el problema mediante las ecuaciones de Navier Stokes en un problema basado en la presión del sistema.- pbns- -"pressure based Navier Stokes"- y por último se considera el flujo como laminar –lam-.
- Menú principal: Aquí se encuentran las ventanas de configuración del programa.
- 3. **Zona de los procesos**: Se muestran los procesos realizados por el programa, además de información de carácter general, indicaciones, advertencias, etc.
- 4. Barra de comandos: En esta zona se ingresan comandos en forma de texto.

# 2.4.11.1 Menú principal.

A continuación se muestran las funciones existentes en el menú principal para cada ventana.

- Archivo "*file*": En esta ventana se encuentran diferentes funciones relacionadas al manejo de los archivos. -Gráfico 2.21-



Gráfico 2.21 Visualización de las funciones en la ventana -archivo- "file"

Fuente: Autores

- Malla "*grid*": Se muestran las opciones disponibles para la configuración y si fuese el caso, adaptación y corrección de las mallas importadas. -Gráfico 2.22-



Gráfico 2.22 Visualización de las funciones en la ventana -malla- "grid"

Fuente: Autores.

- **Definir** "*define*": En esta ventana se eligen los parámetros de referencia, como: modelos matemáticos, materiales, condiciones de operación, condiciones de contorno, entre otras. Las cuales se configuran antes de la resolución del problema. -Gráfico 2.23-.



Gráfico 2.23 Visualización de las funciones en la ventana -definir- "define"

Fuente: Autores

- **Resolver** "*solve*": Es aquí en donde se realiza la configuración del proceso de resolución del problema. -Gráfico 2.24-



Gráfico 2.24 Visualización de las funciones en la ventana -resolver- "solve"

Fuente: Autores

- Adaptar "*adapt*": Aquí se especifican las modificaciones más frecuentes que requieren problemas, cuya solución no fue posible ó presentó errores. -Gráfico 2.25-.

|--|

<b>.</b>	LUEN	IT [3d	, dp, p	bns, la	տ]						k
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel	Help	
				Bou Gra Iso- Reg Volu Ypl Mar Cor Geo Dis Sm	ndary dient Value jion jime us/Ystar nage ntrols piay Optic ooth / Sw	 ons					
<										>	

Fuente: Autores.

- **Superficie** *"surface"*: Se establecen diferentes métodos para la creación y manejo de entes geométricos, los cuales pueden ser muy útiles para la presentación de resultados gráficos. -Gráfico 2.26-.



Gráfico 2.26 Visualización de las funciones en la ventana --superficie- "surface".

Fuente: Autores.

- Mostrar "*display*": Se muestran diferentes formas de presentar resultados gráficos, además de la configuración necesaria para ello. -Gráfico 2.27-

-Gráfico 2.27- Visualización de las funciones en la ventana -mostrar- "display".

File       Grid       Define       Solve       Adapt       Surface       Display       Plot       Report       Parallel       Help         Grid       Contours       Vectors       Pathiles       Pathiles       Pathiles       Pathiles       Pathiles       Pathiles       Pathiles       Sweep Surface       Zone Motion       Options       Scene       Scene	FLUENT [3d, dp, pbns, lam]		
Grid       Contours         Vectors       Pathlines         Pathlines       Pathlines         DTRM Graphics       Sweep Surface         Zone Motion       Options         Scene       Scene         Scene       Scene         Scene       Colormaps         Mouse Buttons       Colormaps         Mouse Buttons       PDF Tables/Curves	File Grid Define Solve Adapt Surface	Display Plot Report Parallel Help	
		Grid         Contours         Vectors         Pathlines         Pathilines         DTRM Graphics         Sweep Surface         Zone Motion         Options         Scene         Scene         Scene Animation         Views         Lights         Colormaps         Mouse Buttons         Annotate         PDF Tables/Curves	

Fuente: Autores

- Ilustrar "*plot*": Se establecen los parámetros para representar los resultados mediante cuadros o histogramas. -Gráfico 2.28-

Gráfico 2.28 Visualización de las funciones en la ventana -- ilustrar- "plot".

	LUEN	IT [3d	, dp, p	bns, la	am]							×
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel	Help		
							H Fil Ff	Y Plot istogram le =T esiduals	1 ;			<
<											2	



- **Reporte** "*report*": En esta ventana se configura la obtención de resultados numéricos. -Gráfico 2.29-

💶 i	LUEN	IT [3d	, dp, p	bns, la	um]										×
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel	Help					
								Sumn Flux Forc Proje Surfa Volu Discre S2S	nary es ected Are ace Integ me Integ ete Phase Informal	eas Irals Irals Irals Ion	S H	ample istogram. umman			
<								Refe	erence V:	alues				3	

Gráfico 2.29 Visualización de las funciones en la ventana -reporte- "report".

Fuente: Autores.

- **Paralelo** "*parallel*": Aquí se realiza la configuración necesaria para sincronizar dos o más ordenadores a la resolución de un problema. -Gráfico 2.30-.

💶 F	LUEN	IT [3d	, dp, p	o <mark>bns</mark> , la	am]					
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel Help	
									Auto Partition Partition Load Balance Network Show Connectivity Timer Usage Reset	~
< .										>

Gráfico 2.30 Visualización de las funciones en la ventana -paralelo- "parallel".

Fuente: Autores.

- Ayuda "*help*": Se muestran diferentes enlaces a las cuales se puede referir consultas referentes al uso del programa. -Gráfico 2.31-

Gráfico 2.31 Visualización de las funciones en la ventana -ayuda- "help".

_									-		
•	LUEN	IT [3d	, dp, p	o <mark>bns</mark> , la	am]						
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Report	Parallel	Help	
										User's Guide Contents User's Guide Index More Documentation Using Help User Services Center Online Technical Support License Usage Version	8
<											>

# Fuente: Autores.

### **2.5 CONCLUSIONES**

La dinámica de fluidos computacional se basa en diferentes modelos numéricos que; por un lado discretizan la geometría del problema para ser interpretado de forma numérica por el procesador, y por otro describen el comportamiento del movimiento del fluido en función de las múltiples variables que pueden intervenir en determinado problema.

Uno de los inconvenientes que presentan los programas CFD, es el alto costo computacional que su utilización representa, no obstante es posible reducir sustancialmente los mismos si se tienen en cuenta las siguientes recomendaciones durante el pre-proceso, las cuales facilitarán la convergencia de la solución: simplificar la geometría del problema, eliminar bordes pequeños, conectar vértices cercanos, si se utilizan elementos triangulares en lo posible eliminar ángulos entre aristas inferiores a 135°, seleccionar el tipo y tamaño de elementos que mejor se adapten a los contornos, revisar la distorsión de los elementos que componen la malla, esta debe ser inferior a 0.6 para mallas bidimensionales e inferior a 0.8 para mallas tridimensionales, revisar que la proporción de aspecto entre los elementos sea inferior a 1, y asignar correctamente los atributos y condiciones en los contornos.

La selección de los modelos matemáticos adecuados para el tipo de flujo que se desea modelar durante el proceso CFD, así como especificar las condiciones en las que este se suscita, garantiza la aproximación de los resultados.

## **CAPITULO III**

## SIMULACIÓN EN DOS DIMENSIONES

### **3.1 GENERALIDADES**

El estudio aerodinámico de un sólido puede ser simplificado mediante el análisis bidimensional, con ello se consigue aproximar la resolución numérica y es sumamente útil para analizar el comportamiento de los fluidos cuando este se desplaza a través de planos específicos, trae consigo la ventaja de reducir sustancialmente: el tiempos de configuración de la geometría, pre-proceso, proceso y pos-proceso, en un estudio CFD.

El presente estudio versa sobre la simulación dinámica de un vehículo terrestre en movimiento dentro de un fluido como lo es el aire, para ello se tomarán las condiciones referenciales similares a las utilizadas en el análisis aerodinámico de un automóvil en un túnel de viento.

# **3.2 PREPARACIÓN DE LA GEOMETRIA.**

La preparación de la geometría, ha sido realizada en el programa de dibujo asistido por computador "*Autocad-2005*", y en esta se establecen los parametros iniciales del preproceso.

**3.2.1 Objeto de análisis.** El objeto de análisis en este estudio es un dibujo generado con la ayuda de un escáner tridimensional, este ha sido descargado en formato –*dwg*--Autocad-, el cual es presentado como una serie de caras continuas, -modo "*Multiface*"-, cabe recalcar que este archivo ha sido descargado de la página web del Instituto Nacional Francés para la Investigación en Ciencias de la Computación, - INRIA- y se presenta en el gráfico 3.1

Para comprobar la veracidad de este modelo, se han revisado varias medidas referenciales, en comparación con el dimensionamiento real del vehículo. Las cuales coinciden a cabalidad.



Gráfico 3.1 Dibujo en tres dimensiones del objeto de análisis

Fuente: INRIA [En línea]. http://www.inria.fr/gamma/download/affichage.php?dir= CARS &name= toyotaC. [Consulta 5 de Enero de 2009]

# 3.2.2 Información del vehículo.<sup>21</sup>

Cuadro 3.1	Dimensionar	niento e	informaciór	general	del	vehículo
------------	-------------	----------	-------------	---------	-----	----------

Marca: Toyota	Modelo: Corolla 1.6 vvt-i CE
Año: 2005	Vin: 8XA53ZEC13
Longitud: 4530mm	Ancho: 1700mm
Altura: 1480mm	Batalla: 2600mm
Distancia de la carrocería al suelo:196.2mm <sup>22</sup>	
Coeficiente Aerodinámico de arrastre –CD- : 0.296	

Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> Información tomada del panfleto promocional del vehículo, publicado por el fabricante. –Anexo 1-

 <sup>&</sup>lt;sup>22</sup> Dimensión realizada en el objeto de análisis, y corroborada experimentalmente en función del modelo de la carrocería con neumáticos P185/65R15.



Gráfico 3.2 Dimensiones características del vehículo.

Fuente: Autores

**3.2.3 Creación del plano de estudio.** Para realizar el estudio bidimensional de los fenómenos aerodinámicos que experimenta un vehiculo, es necesario concebir la proyeccion ortogonal del mismo en un plano específico, en este caso se ha construido el contorno total del vehiculo en un plano longitudinal, mediante la creación de una multilínea "*polyline*" alrededor del mismo -gráfico 3.3 -, en esta construcción geométrica no se han tomado en cuenta las ruedas del automovil.



Gráfico 3.3 Contorno longitudinal del vehículo

Fuente: Autores

Este contorno debe ser transformado en una región, para ello simplemente se escribe sobre la barra de tareas el comando "*region*", se selecciona el contorno realizado y se oprime la tecla entrar. El programa validará la operación mostrando el siguiente

mensaje en la barra de procesos: -un bucle extraído, una región creada-, "1 loop extracted. 1 Region created". -Gráfico 3.4-



Gráfico 3.4 Región longitudinal del vehículo



Se debe llevar esta región al origen de coordenadas " $UCS^{23}$ ", de esta manera la región podrá ser manipulada con mayor facilidad en el desarrollo CFD. Luego se exporta esta región con el siguiente procedimiento: Se escribe en la barra de tareas el comando –exportar- "*export*" se designa un nombre al archivo, la ubicación que tendrá, y el formato en el que se desea exportar, -en este caso se seleccionó el formato ACIS .sat-, luego se oprime el botón –guardar- "*save*". Se selecciona la región que se desea exportar y al oprimir la tecla entrar, el archivo es guardado automáticamente.

**3.2.4 Cálculo del área frontal del vehículo.** Para calcular el área frontal del vehículo, se debe construir en primera instancia el contorno frontal del mismo, - gráfico 3.5- y crear una región para este contorno.



Gráfico 3.5 Contorno frontal del vehículo.

Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> "Universal Coordinates System" Sistema universal de coordenadas.

Una vez creada la región, y con la siguiente secuencia de operaciones se calcula el área de la misma, entre otras propiedades<sup>24</sup>: Menú principal  $\rightarrow$  herramientas "*tools*"  $\rightarrow$  consultar "*inquire*"  $\rightarrow$  propiedades de región o masa "*region/mass properties*", luego se selecciona la región creada previamente, al pulsar la tecla entrar aparece en la pantalla información relevante a la misma.-Gráfico 3.6-

1	AutoCAD Text Window	- E: Wocuments and Settings ROBE	RT\ 🔳 🗖 🔀
	Edit		
		REGIONS	-
	Area: Perimeter: Bounding box: Centroid: Moments of inertia: Product of inertia: Radii of gyration:	$\begin{array}{rrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrrr$	53 6
Y X	Principal moments a	Y: 1011.7018 nd X-Y directions about cer I: 2.4938E+11 along [1.0 J: 4.5844E+11 along [-0.	ntroid: 0000 0.0001] 0001 1.0000
	Write analysis to a	file? [Yes/No] <n>:</n>	

Gráfico 3.6 Región frontal del vehículo, y sus atributos



De esta manera se ha calculado el área frontal del vehículo, esta corresponde a un valor de 2' $022.165,4595 \text{ mm}^2$  o sea 2,022m<sup>2</sup>.

**3.2.5 Calculo del área transversal del vehículo.** Siguiendo un procedimiento análogo al de creación de los planos longitudinal y frontal, se construye el contorno transversal del vehículo. Gráfico 3.7





Fuente: Autores.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> Mediante este procedimiento el programa muestra además la siguiente información: Perímetro, Perfil total ortogonal, coordenadas del centroide, momentos de inercia, productos de inercia, radio de giro, y los momentos principales en las direcciones x-y con respecto al centroide.
Este contorno debe ser transformado de igual forma en una región, con ello se podrá consultar las propiedades de la misma. Gráfico 3.8

	🖩 AutoCAD Text Window - E:\Documents and Settings\ROBERT\ 🔳 🗖 🔀
	Edit
	REGIONS
	Area: 7742698.3305
	Perimeter: 11667.8607
	Bounding box: X: -0.0515 4530.7772 V: -7.6730 1777.8685
	Centroid: X: 2276.8502 V: 885.0858
	Moments of inertia: X: 8.0016E+12 V: 5.2545E+13
	Product of inertia: XY: 1.5603E+13
	Radii of gyration: X: 1016.5819
	Y: 2605.0746
ř.	Principal moments and X-Y directions about centroid:
	I: 1.9362E+12 along [1.0000 0.0000]
Z X	3. 1.240/E#13 along [0.0000 1.0000]
	Write analysis to a file? [Yes/No] <n>:</n>

Gráfico 3.8 Región transversal del vehículo y sus atributos.



En este gráfico se observa el valor del área transversal del automóvil, Área=7742698.33mm<sup>2</sup> o sea 7.743 m<sup>2</sup>.

# 3.3 PRE-PROCESO CFD.

El pre-proceso se lo realiza en el programa Gambit 2.3.30 y en él se ejecutan todas las operaciones que permiten crear el mallado de la muestra, y asignar las condiciones de referencia en el túnel de viento.

**3.3.1 Importación del objeto de estudio.** Para importar el objeto de estudio, el cual ha sido previamente preparado en el programa "*autocad 2005*" se sigue la secuencia de operaciones: Menú principal  $\rightarrow$  archivo "*file*"  $\rightarrow$  importar "*import*"  $\rightarrow$  "*ACIS*", el programa muestra una ventana con el título –importar archivo ACIS "*import ACIS file*"-, en ella se escoge el formato del archivo que se desea importar, en este caso "ASCII" y la ubicación del mismo, las funciones -sanar la geometría- "*heal geometry*" y -hacer tolerante- "*make tolerant*" no son seleccionadas, ya que la geometría a importar es relativamente sencilla. A continuación se oprime el botón aceptar "*accept*"

✓ Import ACIS File

 File Name:
 E \Documents and Settings\ROBERT\tesis\c
 Browse...

 Import Options:
 Format:
 ASCII <> Binary

 I Heal Geometry
 Make Tolerant
 Close

Fuente: Autores

El programa tarda algunos segundos y al final muestra el archivo importado en el área gráfica, además en la barra de procesos se muestra el siguiente mensaje: *"imported: 0 ACIS BODY -s-, 1 FACE -s-, 0 EDGE -s-, 0 VERTEX -es-",* lo cual indica que se ha importado una superficie real, en cambio las líneas y vértices mostrados son virtuales. Gráfico 3.10

Gráfico 3.10 Contorno longitudinal del vehículo importado en el programa Gambit 2.3.30



Fuente: Autores.

**3.3.2 Delimitación del dominio.** Una vez importada la región que se desea estudiar, se debe construir los límites físicos que tendrá la simulación, es decir el contorno del túnel de viento, para ello se sigue la secuencia de operaciones: Comando de geometría "geometry command button"  $\rightarrow$  comando de superficies "face command

Gráfico 3.9 Ventana de importación de archivos ACIS

*button*"  $\rightarrow$ , creación de superficies, "*create surface*"  $\rightarrow$  crear rectángulo real "*create real rectangular face*", al abrir la ventana de configuración, -gráfico 3.11- se ingresa la longitud y la altura del plano a crear, en este caso 14000 y 5000mm respectivamente. El sistema de coordenadas ha sido ajustado para que esta superficie coincida su centro con el UCS, al seleccionar la dirección como centrado XY " *XY centered*".

Al oprimir el botón aplicar "*apply*" se crea el plano rectangular, como se muestra en el gráfico 3.11



Gráfico 3.11 Creación del plano rectangular correspondiente al túnel de viento.

Fuente: Autores

Como se observa, el vehículo no se encuentra en una posición adecuada y no corresponde a la ubicación real que tendría en un túnel de viento, para ello se debe desplazar este plano, con el siguiente procedimiento: comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  mover, copiar y alinear superficies "move/copy/align faces", así aparece una ventana en la cual se selecciona el plano correspondiente al túnel, se escoge la acción mover "move" y la operación trasladar "translate", el sistema coordenado debe ser de tipo cartesiano y en las coordenadas se ingresa los valores

de: x=3250, y=1899.765<sup>25</sup>, z=0; de esta forma al presionar el botón aplicar "*apply*" el plano se ubica correctamente, como se indica en el gráfico 3.12



Gráfico 3.12 Ajuste dimensional entre el túnel de viento y el vehículo.

Fuente: Autores

El vehículo ha sido desplazado hacia el frente del túnel de viento, ya que se requiere mayor espacio en la parte posterior del vehículo para poder visualizar los fenómenos aerodinámicos en la estela turbulenta.

**3.3.3 Mallado del dominio.** El proceso de mallado corresponde a la discretización del dominio, es conveniente que este se ajuste adecuadamente al contorno para evitar falsas interpretaciones. Además se debe tomar en cuenta que mientras más fino sea este, mejores resultados se obtendrán, aunque el costo computacional se encarece notablemente. Una opción que resulta práctica y viable es crear un mallado de alta densidad en el contorno del vehículo, donde se necesita un buen ajuste, y lograr que este crezca hasta las paredes del túnel en donde no existen mayores complicaciones geométricas.

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> Este valor ha sido calculado en función de la distancia entre el suelo y carrocería: 196.2mm, las coordenadas del punto inferior de la carrocería -3231.43,-404.03) y las coordenadas del punto inferior del plano rectangular (-7000,-2500)

Existen diferentes métodos para lograr un correcto mallado, el que aquí se explica corresponde a la utilización de una función de tamaño "size functión", para lo cual se requiere sustraer la superficie del vehículo del plano correspondiente al túnel de viento, con la siguiente secuencias: comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  operaciones booleanas "boolean operations"  $\rightarrow$  sustraer superficies reales "subtract real faces", en esta ventana se selecciona la superficie del túnel de viento en la casilla de superficie "face" y la superficie del vehículo en el casillero correspondiente a la superficie a sustraer "subtract faces". Al presionar el botón aplicar "apply" se valida esta operación. -Gráfico 3.13-

Gráfico 3.13 Sustracción de la superficie del vehículo en el túnel de viento.



Fuente: Autores.

A continuación es necesario crear una sola línea para todo el contorno del automóvil, ya que esta sirve de referencia para el mallado del modelo, esto se realiza con el siguiente proceso: comando de geometría de los lados "*edge command button*"  $\rightarrow$  ruptura/fusión de lados "*split/merge edges*"  $\rightarrow$  fusión "*merge*" y se despliega una ventana en la cual se escogen todas las líneas que forman el contorno del automóvil, y se selecciona el casillero -fusión forzada virtual- "*virtual forced merge*", y luego el botón aplicar "*apply*." -Gráfico 3.14 -



Gráfico 3.14 Fusión virtual de los lados del contorno del vehículo.

Fuente: Autores

Ahora se debe crear la función de tamaño que definirá el comportamiento de la malla, para ello se sigue el procedimiento: comando de herramientas "tools command button"  $\rightarrow$  comando de las funciones de tamaño "sizing/function command button"  $\rightarrow$  crear funciones de tamaño "create sizing function", así se despliega la ventana de configuración -gráfico 3.15-, aquí se debe seleccionar en el casillero referencia "source" la línea que define el contorno del vehículo, en cambio en el casillero de anexos "attachments" se debe elegir la superficie que corresponde a la sustracción del vehículo en el túnel de viento, en los parámetros "parameters" de la función se han escogido los siguientes valores: tamaño de inicio "start size" : 20mm; tasa de crecimiento "growth rate" del 20%, es decir un valor de 1.2 y un límite del tamaño "size limit" de los elementos de 200mm, además se debe asignar un nombre a esta función, luego al oprimir el botón aplicar "apply" el programa muestra el siguiente mensaje en la barra de procesos: "size function: name of the function, attached to name of the face", con ello se valida la operación realizada.

Create S	ize Function
Туре:	Fixed 🗖
Entities:	
Source:	Edges 💷 📤
Attachment	Faces 🖃 📤
Parameters:	
Start size	20
Growth rate	1.2
Size limit	200 <u>į</u>
Label funcio	on de mallado
Apply R	teset   Close

Gráfico 3.15 Creación de la función de tamaño

Fuente: Autores

Para realizar el mallado de la superficie, con la secuencia: comando de mallas "*mesh* command button",  $\rightarrow$  comando de superficies "*face command button*"  $\rightarrow$  mallado de superficies "*mesh faces*", se despliega la siguiente ventana. -Gráfico 3.16 -.

Mesh Faces				
Faces	v_face.3	•		
Scheme:	📕 Apply	Default		
Elements	: Tri			
Туре	: Pave _	- <u> </u>		
Spacing:	Apply	Default		
[1	Interv	al size		
Ontional	Mesh			
Options:	Mesh	ve old mes		
Options:	Mesh	ve old mes ve lower m		
Options:	■ Mesh ■ Remo ■ Remo ■ Remo	ve old mes ve kwer m size functi		

Gráfico 3.16 Ventana de configuración del mallado de superficies.

Fuente: Autores

En esta ventana se selecciona la superficie que se va a mallar, se eligen elementos triangulares, ya que estos se ajustan mejor al contorno irregular de la geometría, el tipo de alineación de los elementos por defecto es de tipo –entramado- "*pave*", no hace falta asignar la dimensión de los intervalos "*interval size*" ya que la función de tamaño es la encargada de gobernar el comportamiento de la malla, al presionar el botón aplicar "*apply*" se construye la malla para esta superficie. Gráfico 3.17



Gráfico 3.17 Mallado del modelo de análisis

Fuente: Autores

De esta forma y de acuerdo a lo previsto, la malla en el contorno del vehículo es sumamente fina, con elementos de apenas 20mm de tamaño inicial, en cambio para el resto de la superficie estos crecen uniformemente en intervalos del 20% hasta llegar a un máximo de 200mm, el cual se mantiene en la mayor parte del dominio.

La calidad del mallado tiene una gran importancia para la solución del problema, las celdas deben ser lo más regulares posibles, para este caso las celdas triangulares deben tener sus ángulos internos cercanos a 60°, un mallado con celdas muy deformadas no solo dará malos resultados en su periferia, si no, que se puede dificultar o impedir la convergencia del cálculo durante el proceso de solución. El detalle del mallado se muestra en los gráficos 3.18 y 3.19.



Gráfico 3.18 Detalle del tramado de la malla en la parte frontal del vehículo

Fuente: Autores

Gráfico 3.19 Detalle del tramado de la malla en la parte posterior del vehículo



Fuente: Autores

Se puede comprobar la distorsión de los elementos de esta malla, con la operación revisar "*check*" a la que se accede pulsando el botón derecho del ratón, sobre el ícono de información, al seleccionar la superficie mallada y aplicar esta función, aparece en la barra de procesos la estadística de esta malla. -Gráfico3.20-

Summa	arizing EQUIS Face v_face.3	IZE SKEW of 2 meshed using	D elements measu Triangle scheme	ared for 1 meshed e and size of 1.0	face: 00000.	
F	rom value	To value	Count in range	% of total c	ount (9468	)
	0 0.1	0.1 0.2	8987 377	94.92 3.98		
	0.2 0.3 0.4	0.3 0.4 0.5	90 11 3	0.95 0.12 0.03		
	0.4 0.5 0.6	0.6 0.7	0 0	0.00 0.00 0.00		
	0.7 0.8 0.9	0.8 0.9 1	0	0.00 0.00		
	0.5	1	 9468	100.00		
Me Me	easured minim easured maxim	um value: 7.8 um value: 0.4	865e-007 71169			
0 01	ut of 1 meshe	d face failed	mesh check for	skewed elements	(EQUISIZE	SKEW > 0.97).
0 01	ut of 1 meshe	d face failed	mesh check for	inverted element	s.	

Gráfico 3.20 Revisión de la distorsión de los elementos de la malla.

#### Fuente: Autores

"La distorsión "*skew*" es una medida de la calidad de las celdas. Se le asigna un valor de 0 para celdas muy regulares y 1 para muy deformadas, en casos 2D, es conveniente que las celdas tengan un valor menor a 0.6 y en 3D por debajo de  $0.8^{26}$ 

En este caso se observa que el 94.92% de las celdas tienen una distorsión mínima entre los valores de 0 y 0.1, mientras que el elemento más distorsionado tiene un valor de 0.471. Esta información permite aceptar la calidad del mallado realizado.

**3.3.4 Condiciones del contorno.** Para terminar el pre-proceso hay que demarcar la superficie que se va a considerar como zona de fluido y las líneas donde se va a definir las condiciones de contorno. Al realizar la secuencia: comando de zonas *"zone command button"*  $\rightarrow$  comando de especificaciones de tipos de contornos *"specify boundary types command button"*  $\rightarrow$  especificar tipos de contorno *"specify boundary types"* se despliega la siguiente ventana. -Gráfico 3.21-

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Simulación numérica de flujos CFD con el programa Fluent. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2005. 68p. 1a Edición. Página 27.

Specify Bo	Indary Types			
ELLIENT 5/6				
Action:				
Add 🔍	≻ Modifv			
↓ Delete	> Delete all			
Name	Type			
entrada salida piso auto techo	VELOCITY_I PRESSURE WALL WALL SYMMETRY			
☐ Show labels	Show colors			
Name:				
Түре:				
SYN	IMETRY _			
Entity:				
Edges 🗖	<u> </u>			
Label	Туре			
en er				
Remove	Edit			
Apply Re	eset Close			

Gráfico 3.21 Ventana de configuración de las condiciones de contorno

Fuente: Autores

Se debe revisar que el casillero –entidad- "*entity*" esté seleccionado con la opción – lados- "*edges*". Así al seleccionar la línea vertical izquierda del túnel de viento, se debe cambiar el tipo de contorno "*type*" el cual debe ser una entrada de velocidad "*velocity inlet*", además se le asignará el nombre –entrada-, al presionar el botón aplicar "*apply*" se valida la operación y automáticamente aparece en el recuadro superior. Siguiendo este mismo procedimiento se asignan las siguientes condiciones de contorno para el resto de lados.

Para la línea vertical derecha del túnel de viento se le asigna un tipo de contorno denominado salida de presión "*pressure outlet*" y un nombre de salida.

La línea horizontal inferior del túnel de viento y la línea que forma el vehículo, se les asigna el contorno denominado pared "*wall*" y nombres de piso y auto , respectivamente.

Para la línea horizontal superior del túnel de viento se le asigna un contorno denominado simetría "*simmetry*" y un nombre de techo. -Gráfico 3.22-

- entrada de velocidad: Indica que dicha arista representa el ingreso del fluido al interior del dominio.
- Salida de presión: Se utiliza para designar a esta arista como el fin del dominio en un túnel cerrado, o el contacto del mismo con la atmósfera.
- Pared: Considera a estas aristas como sólidos impenetrables por el fluido y generan interferencia con este debido a los efectos viscosos que producen.
- Simetría: Esta condición es muy parecida a una pared, no deja pasar el fluido a través de él, pero con la diferencia de que no tiene rozamiento.



Gráfico 3.22 Condiciones de contorno para el objeto de análisis.

Fuente: Autores

Ahora se debe especificar si la superficie mallada corresponde a un sólido o a un fluido, para ello se pulsa el botón: comando de especificación del tipo de continuo *"Specify continuum types command button"*, en la ventana de configuración que se despliega, se debe introducir la superficie creada, y asignarle la condición de fluido<sup>27</sup>.

**3.3.5 Exportación del mallado.** Una vez terminado el pre-proceso, se debe exportar el mallado a un fichero específico que será la entrada del programa de cálculo y análisis, para ello se sigue el procedimiento: archivo "*file*"  $\rightarrow$  exportar "*export*"  $\rightarrow$  malla "*mesh*". En la ventana desplegada se debe seleccionar la opción exportar malla 2D "*export 2D mesh*" porque caso contrario la exportación no se realizará. Se asigna

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup> Esta operación puede ser omitida, ya que el programa almacenará por defecto esta superficie como un fluido, asignándole el nombre de *"fluid"* 

un nombre al fichero y se oprime el botón –aceptar- "accept". En la barra de procesos aparece el siguiente mensaje: la malla fue escrita correctamente en el - nombre de archivo- "mesh was succesfully written to- name of file". -Gráfico 3.23-

Gráfico 3.23 Ventana de exportación de archivos de malla

imes Export Mesh F	ile		
File Type: UNS / RAMPANT / FLUENT 5/6			
File Name:	preproceso2dimensio	nes.msh	Browse
📕 Export 2-D	(X-Y) Mesh		
	Accept	Close	

Fuente: Autores.

# 3.4 PROCESO DE CALCULO CFD

El proceso CFD, consiste en todas las operaciones de configuración de las diferentes variables que intervienen en un estudio aerodinámico por ordenador, y la realización del proceso de iteración que permite llegar a los resultados. Es aquí donde se establecen las condiciones de trabajo para el objeto de análisis, constantes características del fluido y del sólido involucrado, métodos de solución, y los modelos matemáticos que permiten aproximar los resultados.

El proceso se lo realiza en el programa CFD Ansys Fluent 6.3.26, el cual se detalla a continuación. Al abrir el programa aparece una ventana en la cual se debe seleccionar la versión que se requiere ejecutar, ya sea bidimensional o tridimensional, las opciones 2ddp y 3ddp se diferencian de las 2d y 3d en que utilizan doble precisión; y requieren mayor tiempo de cálculo. En este caso se selecciona la opción 2ddp y es necesario escoger la opción –simulación completa- *"full simulation"* en la opción de presentación. Gráfico 3.24

Gráfico 3.24 Ventana de selección de la versión del programa Fluent.

FLUENT Version
Versions
2d
2ddp
3d
3ddp
Selection
2ddp
Mode Full Simulation 💌
Run Exit

Fuente: Autores.

Al presionar el botón correr "*run*" se despliega la ventana principal del programa. Gráfico 3.25





Fuente: Autores

En esta ventana se observa como título la siguiente información: FLUENT [2d, dp, pbns, lam], esta información indica que el programa corre por defecto en versión bidimensional con doble precisión, el cálculo se realiza en base a un modelo matemático basado en la presión y el flujo del fluido se lo considera laminar<sup>28</sup>.

**3.4.1 Importación de la malla.** Para leer el mallado previamente generado en el preproceso en el programa Ansys Gambit 2.3.30, se debe seguir el orden de operaciones: archivo "*file*"  $\rightarrow$  leer "*read*"  $\rightarrow$  caso "*case*", luego se elige el archivo a importar, el cual debe tener una extensión .msh, al presionar el botón aceptar "*ok*", se despliega la siguiente información en la zona de procesos:

Gráfico 3.26 Información desplegada durante la importación del archivo

> Re	ading "E:\Documents and Settings\ROBERT\preproceso2dimensiones.msh"
	/9 mixed symmetry faces, zone 3.
	400 mixed wall faces, zone 4.
	108 mixed wall faces, zone 5.
	25 mixed pressure-outlet faces, zone 6.
	25 mixed velocity-inlet faces, zone  7.
1	4923 mixed interior faces, zone 9.
1	0158 triangular cells, zone 2.
Buil	ding
	aríd,
	materials,
	interface,
	domains,
	zones,
	default-interior
	entrada
	salida
	piso
	auto
	techo
	fluid
	shell conduction zones.
Done	

Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup> Estas condiciones son las que el programa toma por defecto, a medida que se realiza la configuración del programa, estas cambiarán.

En este listado aparece entre otros, el número de celdas, y los contornos de la malla que se crearon en el pre-proceso, la zona denominada como fluido "*fluid*" ha sido generada automáticamente por el programa, y corresponde a las líneas del mallado interior, que por defecto son consideradas como zona de fluido.

Para revisar la calidad de la malla importada, se debe escribir en la barra de comandos la función "*grid quality*", a continuación se despliega la siguiente información en la zona de procesos. –Gráfico 3.27-

Gráfico 3.27 Revisión de la calidad del mallado

grid quality	
Grid Quality: Applying quality criteria for triangular/mixed ce Maximum cell squish = 2.37646e-001 Maximum cell skewness = 4.71158e-001 Maximum 'aspect_ratio' = 4.20226e+000	11s.

#### Fuente: Autores

Ya que los parámetros que sirven de referencia para valorar la calidad de la malla se encuentran dentro de los límites permisibles para una simulación bidimensional, se procede con el proceso CFD.

**3.4.2 Adaptación del dominio computacional.** Al abrir la ventana, malla "grid"  $\rightarrow$ revisar "*check*", se despliega información referente a la malla importada y la geometría que esta incluye, pero sobre todo se debe revisar que no existan mensajes que adviertan errores que se pudieron haber generado durante el proceso de importación. En esta misma ventana se debe seleccionar la operación –escala-"*scale*" y luego debe especificar que la malla fue creada en milímetros.-Gráfico 3.28-

💶 Scale Grid		Σ		
Scale Factors Unit Conversion				
× 0.001	Grid Was Created In mm 👻			
Y 0.001	Change Length Units			
Domain Extents				
Xmin (m) -3.75	Xmin (m) -3.75 Xmax (m) 10.25			
Ymin (m) -0.77 Ymax (m) 4.23				
Scale	Jnscale	Close Help		

Gráfico 3.28 Ventana de conversión de unidades en la malla importada

Fuente: Autores

Para comprobar el mallado y las condiciones de contorno previamente asignadas, se puede visualizar el mallado, al abrir la ventana: mostrar "display"  $\rightarrow$  malla "grid"  $\rightarrow$  mostrar "display". -Gráfico 3.29-



Gráfico 3.29 Visualización del objeto importado en el proceso de cálculo.



En este gráfico se puede ver las zonas definidas en el pre-proceso. Por defecto, las líneas tienen asignadas un código de color en función del tipo de zona o condición de contorno, así los colores:

- Azul, Se asigna para el ingreso de velocidad "velocity inlet"
- Rojo, para la salida de presión "pression outlet"
- Blanco, para las paredes "wall"
- Amarillo, para simetría "simmetry"
- Verde, para celdas interiores "fluid"

**3.4.3 Modelos matemáticos a considerar.** Para acceder a la ventana de configuración de los modelos matemáticos disponibles, se realiza la operación: definir "*define*"  $\rightarrow$  modelos "*models*". -Gráfico 3.30-

**3.4.3.1 Algoritmos de resolución "solver".** La opción por defecto es un algoritmo basado en la presión en el dominio, "*pressure based*" que es adecuado para flujos subsónicos en los que se considera el fluido como incompresible, en cambio el algoritmo que se basa en la densidad "*density based*" es útil para flujos supersónicos<sup>29</sup>, en donde la compresibilidad del aire ocasiona variaciones de la misma; ya que un automóvil no supera la velocidad del sonido se elige el algoritmo basado en la presión, -Gráfico 3.30-

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> Son flujos supersónicos lo que alcanzan velocidades superiores a la velocidad del sonido, aproximadamente 340m/s, al contrario flujos subsónicos serán los que no alcancen este límite.

Los métodos implícito y explicito se diferencian en la manera de linealizar las ecuaciones acopladas, ya que se ha dispuesto previamente el algoritmo de resolución que considera al fluido como incompresible, la formulación implícita es activada por defecto. –Gráfico 3.30-

En cuanto al –espacio- "*space*" por defecto el caso se resuelve como bidimensional, considerando un ancho constante, la opción –ejes simétrico- "*axissymetric*" permite resolver de forma bidimensional algunos casos tridimensionales sencillos.

Por otra parte se considera al flujo como estacionario "*steady*", ya que la solución no varía en función del tiempo. -Gráfico 3.30-

"Para la formulación de la velocidad es necesario seleccionar la opción –velocidad absoluta- "*Absolute velocity formulation*", ya que esta es preferida en casos en donde el fluido no es rotacional."<sup>30</sup> -Gráfico 3. 30-

En cuanto al modelo que se debe considerar para el gradiente de velocidades es el denominado "*Green Gauss Cell Based*" ya que este método proporciona alta fiabilidad en el resultado para mallas no estructuradas tipo tetraédricas<sup>31</sup>.

Solver	X
Solver • Pressure Based • Density Based	Formulation Implicit C Explicit
Space © 2D © Axisymmetric © Axisymmetric Swirl © 3D Velocity Formulation © Absolute © Relative	Time
Gradient Option  Green-Gauss Cell Bas Green-Gauss Node Ba C Least Squares Cell Ba	Porous Formulation red sed G Superficial Velocity C Physical Velocity sed
ок с	Cancel Help

Gráfico 3.30 Ventana de selección de los modelos de resolución "solver"

Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> ANSYS.[En línea], Manual del usuario fluent 6.3.26<sup>°</sup>. EEUU. http://venus.imp.mx/ hilarioSuper Computo/Fluent.Inc/manuals/fluent5/ug/html/ node557.htm. [Consulta: Mayo 15 de 2009]

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup> WASSENBERGHH, Sam Van, Ét al. ROYAL SOCIETY [En línea], Details of materials and methods. Inglaterra.http://rsbl.royalsocietypublishing.org/content/suppl/2009 /02/20/rsbl.2008.0765.DC1/rsbl200 80765supp01.pdf. [Consulta: Mayo 24 de 2009]

**3.4.3.2 Modelo de multifase.** Esta función permite modelar flujos que experimentan cambio de fase mientras se mueven, ya que no corresponde con este caso de estudio se acepta la opción presentada por defecto, es decir –modelo de multifase-*"multiphase"* apagado *"off"*. –Gráfico 3.31-

Gráfico 3.31 Ventana de modelos de multifase

💶 Multiphase Model	×
Model	
© Off © Volume of Fluid © Mixture © Eulerian © Wet Steam	
OK Cancel	Help

Fuente: Autores

**3.4.3.3 Ecuación de la energía.** Cuando se selecciona esta opción, se activa la resolución de la ecuación de la energía. Esta debe ser utilizada únicamente cuando la temperatura es una variable a tener en cuenta, si hay transferencia de calor o el flujo es compresible, en este caso se deja sin activar. Gráfico 3.32

Gráfico 3.32 Ventana de activación de la ecuación de la energía.

💶 Energy			
Energy			
Energy Equation			
0K	Cancel	Help	

Fuente: Autores

**3.4.3.4 Modelos de viscosidad.** Para determinar el modelo de viscosidad que se debe utilizar en esta simulación es conveniente calcular el número de Reynolds, con él se puede establecer el régimen del fluido. Así

Al utilizar la expresión [1.6]  $\text{Re} = \frac{\rho .v.L}{\mu}$  y reemplazando por los valores<sup>32</sup>:  $\rho = 1.225 \text{kg/m}^3$  L= 14m v = 40 m/s  $\mu = 1.7894 \text{ x} 10^{-5} \text{ kg/m.s}$ 

<sup>&</sup>lt;sup>32</sup> Valores referenciales para el aire, a una atmosfera de presión y a 20°C de temperatura ambiental.

Se obtiene un número de Reynolds de  $38.34 \times 10^6$ 

De esta manera se establece el régimen del fluido comojo turbulento, en el cual las fuerzas inerciales son dominantes sobre las viscosas, y se caracteriza por producir torbellinos aleatorios, vórtices y otras fluctuaciones de flujo.

Existen varias técnicas para describir y estudiar la dinámica de este tipo de flujo. En el caso del aire, destaca el Método *k-e*, el cual hace uso de la energía cinética, k de la turbulencia del aire, así como de la tasa de disipación  $\varepsilon$ , de dicha turbulencia. Los valores que se muestran por defecto no han sido manipulados. Gráfico 3.33

Viscous Model	X
Model C Inviscid C Laminar C Spalart-Allmaras (1 eqn) • k-epsilon (2 eqn)	Model Constants Cmu 0.09 C1-Epsilon
C k-omega (2 eqn) Reynolds Stress (5 eqn) k-epsilon Model Standard RNG	1.44       C2-Epsilon       1.92       TKE Prandtl Number       1
<ul> <li>Realizable</li> <li>Near-Wall Treatment</li> <li>Standard Wall Functions</li> <li>Non-Equilibrium Wall Functions</li> <li>Enhanced Wall Treatment</li> <li>User-Defined Wall Functions</li> </ul>	Vser-Defined Functions Turbulent Viscosity none Prandtl Numbers
	TKE Prandtl Number
ОК Са	ancel Help

Gráfico 3.33 Ventana de los modelos de viscosidad

Fuente: Autores

Dentro de los modelos que se pueden cargar a la solución de un problema, están disponibles otras funciones que permiten simular flujos más complejos en los que intervengan la radiación, transporte de especies, fases discretas, procesos de solidificación o fundición y fenómenos relacionados a la acústica. Estos no son activados ya que no intervienen en esta simulación.

**3.4.4 Designación de los materiales.** En esta ventana se definen las propiedades de los materiales disponibles, para esta simulación se acepta por defecto al aire como el fluido a estudiar, y las propiedades elementales como densidad y viscosidad son cargadas automáticamente; ya que la ecuación de la energía no fue activada, propiedades como el coeficiente de calor especifico y el coeficiente de conductividad térmica no son mostrados, pues estos no interferirán en los cálculos. Gráfico 3.34

Materials					X
Name		Material Type			Order Materials By
air		fluid		-	• Name
Chemical Formula		Fluent Fluid N	laterials		C Chemical Formula
		air		•	Fluent Database
		Mixture			User-Defined Database
		none		~	
Properties					
Density (kg/m3)	constant		Edit		
	1.225				
Viscosity (kg/m-s)	constant		▼ Edit		
	1.7894e-05				
]			<b>_</b>		
	Change/Create	Delete	Close	Hel	p

Gráfico 3.34 Ventana de designación de los materiales

Fuente: Autores

**3.4.5 Condiciones de operación.** La presión atmosférica es el valor referencial - 101325 Pa-. La casilla –gravedad- "*gravity*" hace que se incluya el término de las fuerzas gravitatorias en la resolución de las ecuaciones. Se activa únicamente cuando se tienen efectos de flotación en el flujo debido a diferencias de densidad por cambios de temperatura o de fase. En esta simulación no hace falta modificar esta sección. En cambio si se elige otro valor de presión, se deberá especificar las coordenadas en las que esta actúa. –Gráfico 3.35-

Operating Conditions	×
Pressure	Gravity
Operating Pressure (pascal)	🗆 Gravity
101325	
Reference Pressure Location	
× (m) 0	
Y (m) 🔋	
OK Cancel H	lelp

Gráfico 3.35 Ventana de Condiciones de operación

Fuente: Autores

**3.4.6 Condiciones de contorno.** Es necesario configurar cada una de las zonas previamente asignadas con un contorno en el pre-proceso, al abrir la ventana: definir *"define"*  $\rightarrow$  condiciones de contorno *"boundary conditions"* se muestra cada zona y el tipo de contorno asignado al mismo. Gráfico 3.36

Gráfico 3.36 Ventana de configuración de las condiciones de contorno

💶 Boundary Con	ditions	×
Zone auto default-interior entrada fluid piso salida techo	Type inlet-vent intake-fan interface mass-flow-inlet outflow outlet-vent pressure-far-field pressure-inlet pressure-outlet symmetry velocity-inlet wall	
ID 4		
Set Copy	Close Help	

Fuente: Autores

**3.4.6.1 Configuración de la zona –auto-:** Al seleccionar la zona –auto- la cual representa el automóvil, se observa el tipo de contorno previamente configurado, o sea –pared- "*wall*", al oprimir el botón –configurar- "*set*" se abre la ventana de configuración de esta zona, y en el menú –momentos- "*momentum*" -Gráfico 3.37- se elige la opción de pared estática "*stationary wall*", en las condiciones de cizalladura "*shear condition*" se escoge la opción –sin deslizamiento- "*no slip*", en la opción –

altura de la rugosidad- "*roughness height*" se ha seleccionado un valor de 0.0001m, debido a la baja rugosidad de la capa de pintura que cubre a los vehículos. La constante de rugosidad por defecto es de 0.5 la cual es adecuada para la mayoría de los casos. Otras ventanas de configuración, que hacen referencia a la transferencia de calor, arrastre de especies, análisis de fase discreta o multifase, no están disponibles ya que no corresponden con los modelos matemáticos previamente configurados para esta simulación.

Gráfico 3.37 Ventana de configuración de las propiedades de la zona -auto-

💶 Wall				×
Zone Name				
auto				
Adjacent Cell Zone				
fluid				
Momentum Therma	al Radiation	Species	DPM	Multiphase UDS
Wall Motion	Motion			
<ul> <li>Stationary Wall</li> <li>Moving Wall</li> </ul>	Relativ	e to Adjace	ent Cel	l Zone
Shear Condition				
<ul> <li>No Slip</li> <li>Specified Shear</li> <li>Specularity Coe</li> <li>Marangoni Stress</li> </ul>	fficient			
Wall Roughness				
Roughness Height (m) 0.0001 constant				
Roughness Cons	tant 0.5		const	ant 🗸
	ОК	Cancel	Help	

Fuente: Autores

**3.4.6.2 Configuración de la zona** –**piso-.** Con el mismo procedimiento se despliega la ventana de configuración de la zona denominada –piso-, la cual corresponde de igual forma a una pared "*wall*", en ella se debe escoger la opción de pared en movimiento "*moving wall*" ya que en términos relativos al vehículo estático, la carretera y el aire se mueven hacia él con la misma velocidad, a la cual se le asigna valores de: 10, 20, 30, 40, 50 y 60m/s, para diferentes simulaciones; hay que especificar que es una velocidad absoluta y traslacional en la dirección x; por otra parte en la altura de rugosidad "*roughness*" se ha seleccionado un valor de 0.005m debido a la consistencia granular del asfalto. –Gráfico 3.38-

💶 Wall		×
Zone Name		
piso		
Adjacent Cell Zone		
fluid		
Momentum Thermal R	adiation Species DPM Multi	phase UDS
Wall Motion Mo	tion	
C Stationary Wall Moving Wall	C Relative to Adjacent Cell Zone • Absolute	Speed (m/s) 40
	• Translational C Rotational C Components	Direction X 1 Y 0
Shear Condition		
<ul> <li>No Slip</li> <li>Specified Shear</li> <li>Specularity Coefficie</li> <li>Marangoni Stress</li> </ul>	nt	
Wall Roughness		
Roughness Height (m) Roughness Constant	0.005 constant 0.5 constant	•
I		
	OK Cancel Help	

Gráfico 3.38 Ventana de configuración de la zona -piso-

Fuente: Autores.

**3.4.6.3 Configuración de la zona** –**entrada-.** Al seleccionar la zona denominada – entrada- y pulsar el botón configurar "*set*" se despliega la ventana de configuración de esta, la cual debe ser un ingreso de velocidad "*velocity inlet*" de acuerdo a la configuración previa realizada en el pre-proceso, al igual que en la ventana de configuración de las zonas designadas como pared, el único menú activo es el de momento "*momentum*" en este, se elige el método de especificación de la velocidad "*velocity especification method*", para esta simulación se ha escogido la opción – magnitud, normal al contorno- "*magnitude, normal to boundary*", aquí se permite especificar la magnitud de la velocidad de ingreso, a la cual se le asigna valores de: 10, 20, 30, 40, 50 y 60m/s, para diferentes simulaciones, además se debe especificar que esta velocidad es absoluta.

Los valores de la energía cinética turbulenta k, y de la tasa de disipación turbulenta  $\varepsilon$ , que definen la turbulencia del flujo de entrada, se dejan por defecto con un valor de 1. –Gráfico 3.39-

Velocity Inlet
Zone Name
entrada
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS
Velocity Specification Method Magnitude, Normal to Boundary
Reference Frame Absolute
Velocity Magnitude (m/s) 40 constant 🗸
Turbulence
Specification Method K and Epsilon
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) 1 constant
Turbulent Dissipation Rate (m2/s3) 1 constant
OK Cancel Help

Gráfico 3.39 Ventana de configuración de la zona --entrada-

Fuente: Autores.

**3.4.6.4 Configuración de la zona** –**salida-.** En esta ventana se configura las condiciones de operación para la salida de presión "*pression outlet*", en la presión de referencia "*gauge pressure*" se asigna el valor de 0 Pa, ya que el túnel es abierto y tiene contacto directo con la atmósfera, el resto de los parámetros son para el caso de que exista un flujo de reverso por este borde, lo cual es imposible debido a la condición previamente establecida. –Gráfico 3.40-

Pressure Outlet
Zone Name
salida
Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase UDS
Gauge Pressure (pascal) g constant
Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary
Target Mass Flow Rate
Turbulence
Specification Method K and Epsilon
Backflow Turbulent Kinetic Energy (m2/s2) 1 constant
Backflow Turbulent Dissipation Rate (m2/s3) 1 constant
OK Cancel Help

Gráfico 3.40 Ventana de configuración de la zona -salida-

Fuente: Autores

**3.4.6.5 Configuración de la zona** –**techo-.** En esta zona se ha impuesto una condición de simetría, y no hay ningún parámetro que fijar. Gráfico 3.41

Symmetry	/			X
Zone Name	:			
techo				
	ОК	Cancel	Help	
	OK	Cancel	Help	

Gráfico 3.41 Ventana de configuración de la zona -salida-

Fuente: Autores

**3.4.6.6 Configuración de la zona** –"*fluid*"-. Esta corresponde a toda la zona mallada, se debe revisar que esta haya sido definida como un fluido y específicamente como aire "*air*", además es posible visualizar las propiedades de este elemento pulsando el botón –editar- "*edit*", en esta ventana se observa que los valores asignados por defecto para la densidad y viscosidad corresponden a los reales. Gráfico 3.42



💶 Fluid 🛛 🔀	💶 Material	X
Zone Name fluid	Properties of air	
Material Name air 🗾 Edit	Density (kg/m3) constant	
□ Porous Zone □ Laminar Zone	1.225	
□ Source Terms □ Fixed Values	Viscosity (kg/m-s)Edit	
Motion Porous Zone Reaction Source Terms Fixed Values	1.7894e-05	
Rotation-Axis Origin		
× (m) g		
Motion Type Stationary		┚
OK Cancel Help	Change Close Help	

Fuente: Autores

**3.4.6.7 Configuración de la zona** – "*default interior*"-. En la lista de condiciones de contorno aparece esta zona, que no se ha definido en el pre-proceso, es creada de forma automática por el programa y está compuesta por todas las líneas interiores del mallado, es útil para la visualización de los resultados. Además es posible configurar a esta zona como un: ventilador "*fan*", salto poroso "*porous jump*", radiador "*radiator*" o pared "*wall*". –Gráfico 3.43-

Boundary Con	ditions 🔀
Zone	Туре
auto	fan
default-interior	interior
entrada	porous-jump
niso	wall
salida	
techo	
·	ID
	9
	J.
Set Copy	y Close Help

Gráfico 3.43 Ventana de configuración de la zona -"default interior"-

Fuente: Autores

# 3.4.7 Parámetros de cálculo y resolución.

**3.4.7.1 Discretización y relajación.** Al seguir la secuencia: resolver "solve"  $\rightarrow$  controles "controls"  $\rightarrow$  solución "solution" se despliega la ventana del control de la solución. -Gráfico 3.44-

Gráfico 3.44 Ventana de configuración de los métodos de solución

Solution Controls			×		
Equations		Under-Relaxation Factors			
Flow Turbulence		Pressure	0.3		
		Density	1		
		Body Forces	1		
		Momentum	0.7		
Pressure-Velocity Coupling		Discretization			
SIMPLE	•	Pressure	Second Order		
		Momentum	Second Order Upwind 👻		
		Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind 👻		
		Turbulent Dissipation Rate	Second Order Upwind		
OK Default Cancel Help					

Fuente: Autores

El tipo de discretización por defecto es estándar en la presión "*pressure*", de primer orden en las variables: momento "*momentum*", energía cinética turbulenta "*turbulent kinetic energy*" y la tasa de disipación de la intensidad de turbulencia "*turbulent*  *dissipation rate*". Esta discretización facilita la convergencia de la solución aunque el resultado final puede tener un error apreciable. Para esta simulación se han escogido discretizaciones de segundo orden, con el fin de aproximar al máximo los resultados cuantificables.

"Los factores de relajación "*under relaxation factors*" indican la importancia de la nueva solución para cada variable en el proceso iterativo, cuanto más pequeños son estos valores más estable es el mismo. Los valores por defecto son adecuados para la mayoría de los casos; si en algún caso no se tiene una convergencia satisfactoria, una de las primeras opciones es utilizar valores de relajación más pequeños"<sup>33</sup>. Para el caso que se está resolviendo se utilizarán estos factores de relajación por defecto.

**3.4.7.2 Monitor de Residuos.** El residuo de cada variable es la diferencia entre el valor de la solución nueva y la anterior durante el proceso iterativo, cuando los residuos toman un valor suficientemente bajo, se considera que la solución ha convergido. Con la secuencia: resolver "*solve*"  $\rightarrow$  monitores "*monitors*"  $\rightarrow$  Residuos "*residual*", se accede a la ventana de configuración del monitor de residuos -gráfico 3.45 - En esta se debe escoger la opción imprimir "*print*" para que los residuos sean escritos en la ventana de comando durante el cálculo, al seleccionar la opción ilustrar "*plot*" estos valores se representan en un gráfico.

🗳 Residual Monitors 🛛 🕅 🗙								
Options	Storage			Plotting				
✓ Print ✓ Plot	lter	ations 10	Window 0					
· ·	Normalization Iterations 1999							
	□ Normalize 🗹 Scale 🛛 Axes Curves							
	Convergence Criterion							
	absolute		-					
Residual	Ch Monitor Ca	ieck invergend	Absolute e Criteria	<u>^</u>				
continuity	•		0.001					
x-velocity	~		0.001					
y-velocity		$\overline{\mathbf{v}}$	0.001					
k		$\overline{\mathbf{v}}$	0.001					
epsilon	~	$\overline{\mathbf{v}}$	0.001	<b>v</b>				
01	OK Plot Renorm Cancel Help							

Gráfico 3.45 Ventana de configuración del monitor de residuos.

#### Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup>. BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Simulación numérica de flujos CFD con el programa Fluent. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2005. 68p. 1a Edición. Página 42.

El criterio de convergencia, que por defecto está fijado en 0.001, detiene el proceso iterativo cuando los residuos escalados de todas las variables han caído tres órdenes de magnitud.

**3.4.7.3 Monitor del coeficiente aerodinámico de arrastre "Cd".** Para obtener resultados verídicos en esta ilustración, es necesario fijar las variables que intervienen en el cálculo de este coeficiente, así al seguir la secuencia: reportar "*report*"  $\rightarrow$  valores de referencia "*reference values*" se abre la ventana de configuración de estos valores. -Gráfico 3.46-

Gráfico 3.46 Ventana de configuración de los valores de referencia.

🗳 Reference Values 🛛 🔀
Compute From
entrada 🗾
Reference Values
Area (m2) 2.022
Density (kg/m3) 1.225
Depth (m) 1
Enthalpy (j/kg) 👔
Length (m) 1
Pressure (atm)
Temperature (k) 288.16
Velocity (m/s) 40
Viscosity (kg/m-s) 1.7894e-05
Ratio of Specific Heats 1.4
Reference Zone
fluid 🗾
OK Cancel Help

Fuente: Autores

Aquí se selecciona la opción de computo "*compute from*", en la cual se elige el contorno –entrada-, así automáticamente se cargan por defecto las propiedades de la misma, en cambio en la ventana –área- se debe introducir manualmente el valor de  $2.022m^2$ , que corresponde al área frontal del vehículo, según se lo determinó en la preparación previa de la geometría. Al oprimir el botón aceptar "*ok*" se guardan estos valores para todos los cálculos relacionados a los coeficientes aerodinámicos.

Para monitorear el valor del coeficiente aerodinámico de arrastre, en función de cada iteración, con la secuencia: resolver "*solve*"  $\rightarrow$  monitores "*monitors*"  $\rightarrow$  fuerzas "*forces*" se accede a la ventana de configuración de este monitor. Gráfico 3.47

Force Monitors					
Options ☐ Print ☐ Plot ☐ Write ☐ Per Zone Coefficient ☐ Drag	Wall Zones 🗐 = auto piso	Force Vector X 1 Y 0 Z 0 About Z-Axis	Plot Window Axes Curves		
File Name cd-history					
Apply Plot Clear Close Help					

Gráfico 3.47 Configuración del monitor de fuerzas y coeficientes de arrastre

Fuente: Autores

Se debe seleccionar el coeficiente de arrastre "*drag*", las coordenadas del vector unitario serán: x=1, y=0, z=0, luego de oprimir el botón –ilustrar- "*plot*" se elige la opción –ejes- "*axes*" con lo cual se despliega la ventana de configuración de los límites que tendrá la ilustración. -Gráfico 3.48 -

Axis C X C Y Label	Number Format Type float	Major Rules Color foreground
	Precision 4	Weight
Options Log Auto Range Major Rules Minor Rules	Range Minimum Ø Maximum 1	Minor Rules Color dark gray - Weight 1

Gráfico 3.48 Ventana de ajuste de los límites del monitor

Fuente: Autores

En esta ventana no hace falta realizar ningún cambio en la configuración del eje -x-, ya que este representa la escala de cada iteración y se ajusta de forma automática en función al número de iteraciones que necesite la solución, en cambio para el eje -y- que representa el valor del coeficiente de arrastre, se debe modificar la opción de ajuste del tamaño de la escala, eligiendo manualmente un rango de 0 para el valor mínimo y un valor de 1 para el valor máximo, ya que este coeficiente no superará estos límites. Al oprimir el botón aplicar "*apply*" se valida la operación realizada.

**3.4.7.4 Inicio de la solución.** Para comenzar el cálculo, el programa necesita el valor inicial de las variables, estos se establecen siguiendo la secuencia: resolver "*solve*"  $\rightarrow$  iniciar "*initialize*"  $\rightarrow$  iniciar "*initialize*", en esta ventana se debe seleccionar al contorno denominado –entrada- como la zona de inicio de cálculo, automáticamente el valor de la velocidad del aire en dirección horizontal –x- aparecerá de 40m/s, no existe componentes de la velocidad en dirección vertical, por ello se deja el valor de 0 en la casilla – velocidad Y- "Y velocity", en cambio el factor de energía cinética turbulenta "*turbulent kinetic energy*" ha sido asignado por defecto con el valor de 1, lo que significa que el flujo en la entrada de velocidad es laminar. -Gráfico 3.49-

Solution Initialization
Compute From Reference Frame
entrada
Initial Values
Gauge Pressure (pascal) 👩
X Velocity (m/s) 40
Y Velocity (m/s) 👔
Turbulent Kinetic Energy (m2/s2)
Init Reset Apply Close Help

Gráfico 3.49 Ventana de configuración del inicio de la solución

Fuente: Autores.

**3.4.7.5 Proceso de iteración.** Al abrir la ventana: resolver "*solve*"  $\rightarrow$  iterar "*iterate*" se establece el número de iteraciones a realizar, además se dispone de los intervalos a los cuales se requiere imprimir en la ventana de comando los residuos del proceso iterativo y el encabezado de cada columna de análisis. -Gráfico 3.50-

Gráfico 3.50 Ventana de configuración de los intervalos de iteración

🖳 Iterate 🛛 🔊
Iteration
Number of Iterations 1999
Reporting Interval 1
UDF Profile Update Interval 1
Iterate Apply Close Help

Fuente: Autores

Al oprimir el botón iterar "*iterate*", empieza el proceso iterativo, en la ventana de procesos aparecen los residuos para: continuidad, velocidad en x, velocidad en y, energía cinética turbulenta -k- y tasa de disipación turbulenta  $\varepsilon$ ; transcurridos algunos minutos el programa converge en una solución. -Gráfico 3.51-

Gráfico 3.51 Visualización del proceso iterativo.

	FLUEN	IT [2d	, dp, p	bns, sl	ke]										
File	Grid	Define	Solve	Adapt	Surface	Display	Plot	Repor	t Paralle	l He	þ				
•	iter 155 156 157 158 158	conti 1.019 1.024 1.007 solut 9.998	.nuity 0e-03 0e-03 7e-03 7e-03 :ion i 9e-04	x-ve 1.59 1.57 1.57 5 cor 1.55	elocity 957e-04 760e-04 775e-04 1verged 545e-04	y-ve 4.72 4.67 4.64 4.59	loci 40e-1 79e-1 57e-1 84e-1	ty 057. 057. 057. 057.	.5643e- .5712e- .5670e- .5214e-	k 04 04 04 04	ep: 8.696 8.629 8.621 8.557	silon 7e-04 9e-04 0e-04 5e-04	time 0:39:45 0:31:48 0:25:26 0:20:21	/iter 9845 9844 9843 9842	~
<															>

Fuente: Autores.

**3.4.7.6 Visualización de monitores.** Además es imprescindible visualizar la gráfica de los residuos en función de cada iteración, con ello se sabe si el proceso fue estable o no<sup>34</sup>. -Gráfico 3.52-





# Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>34</sup>El monitor de residuos se abre automáticamente durante el proceso de iteración conjuntamente con el monitor del coeficiente de arrastre.

Como se observa el proceso iterativo resultó bastante estable a partir de la iteración #50, esta tendencia se mantiene hasta converger en la iteración #158, cuando los residuos alcanzan un valor de 0.001.

Para validar este proceso de cálculo CFD, es necesario por último, visualizar el comportamiento de los coeficientes aerodinámicos de arrastre y sustentación durante el proceso iterativo. –Gráfico 3.53-



Gráfico 3.53 Monitor del coeficiente de arrastre -Cd-

Fuente: Autores.

Según se observa el valor del coeficiente de arrastre permanece constante a partir de la iteración #145.<sup>35</sup>.

Para visualizar el monitor del coeficiente de sustentación "*lift*" es necesario en asignar el área de referencia, según la cual se realiza el cálculo, mediante la secuencia: reportar "*report*"  $\rightarrow$  valores de referencia "*reference values*", se despliega la ventana de configuración de los valores de referencia para el cálculo de fuerzas y coeficientes, en ella se ingresa el área del contorno transversal del vehículo, la cual fue calculada en el apartado 3.2.5 y cuyo valor corresponde a 7.743m<sup>2</sup>; Luego es necesario configurar el monitor para que este muestre el valor del coeficiente a lo

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> El valor exacto del coeficiente aerodinámico de arrastre se visualizará en el post proceso.

largo del proceso iterativo, con la sucesión de comandos: resolver "solve"  $\rightarrow$ monitores "monitors"  $\rightarrow$  fuerzas "forces" se accede a la ventana de configuración de este monitor. -Gráfico 3.54-

💶 Force Monito	rs		X
Options Print Plot Write Per Zone Coefficient Lift File Name	Wall Zones ≡ = F auto piso	orce Vector × 0 Y 1 Z 0 bout Z-Axis	Plot Window 1 Axes Curves
cl-history			
Ар	oly Plot Clear	Close He	elp

Gráfico 3.54 Configuración del monitor de fuerzas y coeficientes de sustentación

Fuente: Autores

Se debe seleccionar el coeficiente de sustentación "*lift*", las coordenadas del vector unitario por tanto son: x=0, y=1, luego de oprimir el botón –ilustrar- "*plot*" se elige la opción –ejes- "*axes*" con lo cual se despliega la ventana de configuración de los límites que tendrá la ilustración. -Gráfico 3.55 -

💶 Axes - Force Monitor I	Plot	
Axis C X G Y Label	Number Format Type float Precision 4	Major Rules Color foreground Weight 1
Options Log Auto Range Major Rules Minor Rules	Range Minimum -0.5 Maximum 0.5	Minor Rules Color dark gray - Weight 1
	Apply Close Hel	р

Gráfico 3.55 Ventana de ajuste de los límites del monitor

Fuente: Autores

El eje –y- que representa el valor del coeficiente de sustentación, debe ser modificado con el propósito de ajustar la escala de este, al valor del coeficiente a calcular; por ello se asigna manualmente un rango de -0.5 para el valor mínimo y un valor de 0.5 para el valor máximo. Al oprimir el botón aplicar "*apply*" se valida la operación realizada.

De esta forma y tras repetir el proceso iterativo se visualiza el monitor del coeficiente de sustentación. -Gráfico 3.56-



Gráfico 3.56 Monitor del coeficiente de sustentación -Cl-

#### Fuente: Autores

Según se observa el valor del coeficiente de sustentación permanece constante a partir de la iteración #135.<sup>36</sup>. Ya que los monitores muestran un comportamiento de la solución estable, se acepta la calidad del proceso CFD.

### **3.5 POS-PROCESO CFD**

La información plasmada en los resultados, tanto numéricos como gráficos de un ensayo CFD bidimensional, tienen como propósito establecer la tendencia de las

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup> El valor exacto del coeficiente aerodinámico de sustentación se visualizará en el post proceso.

propiedades relativas al fluido, y pueden servir para aproximar la magnitud de estas variables.

**3.5.1 Resultados numéricos.** Para conocer el valor de las fuerzas y los coeficiente de arrastre que actúan sobre el automóvil, se despliega la ventana: reportar "*report*"  $\rightarrow$  fuerzas "*forces*", en ella aparecen los contornos definidos como pared "*wall*" es decir el –auto- y –piso-, se debe seleccionar el auto y especificar el vector unitario de la dirección de la fuerza que se desea conocer, es decir fuerza horizontal para el arrastre u-1,0- y fuerza vertical para la sustentación u-0,1- -Gráfico 3.57- Al oprimir la función –imprimir- "*print*" se escriben los resultados en la ventana de comandos. -Gráficos 3.58 y 3.59-.

Gráfico 3.57 Ventanas de configuración del reporte de fuerzas.

Fuerza horizonta	Fuerza vertical (sustentación)				
Force Reports	×	Force Reports		$\mathbf{X}$	
Options     Force Vector       © Forces     X 1       © Center of Pressure     Y 8       Z 8	or Wall Zones I = auto piso	Options © Forces © Moments © Center of Pressure	Force Vector X 8 Y 1 Z 8	Wall Zones ≣ = auto piso	
Wall Name Pattern Match Print Write Close	e Help	Wall Name Pattern Print Write	Match	Help	

Fuente: Autores.

Gráfico 3.58	Reporte de	fuerzas y	coeficientes	de arrastre
--------------	------------	-----------	--------------	-------------

Force vector: (1 0 0) zone name	pressure force n	viscous force N	total force N	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
auto	450.25022	67.789254	518.03947	0.22722007	0.034210042	0.26143011
net	450.25022	67.789254	518.03947	0.22722007	0.034210042	0.26143011

#### Fuente: Autores

Gráfico 3.59 Reporte de fuerzas y coeficientes de sustentación

Force vector: (0 1 0)						
zone name	pressure force n	viscous force n	total force N	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
auto	-584.18702	4.7531579	-579.43386	-0.076986851	0.000626393	-0.076360458
net	-584.18702	4.7531579	-579.43386	-0.076986851	0.000626393	-0.076360458

El signo negativo del vector –fuerza total-, indica que la fuerza de sustentación actúa en dirección opuesta al vector unitario configurado.

### 3.5.2 Resultados gráficos.

**3.5.2.1 Representación de vectores.** El programa permite visualizar únicamente los vectores de velocidad del fluido, para acceder a la ventana de configuración, se sigue la secuencia: mostrar "*display*"  $\rightarrow$  vectores "*vectors*" -gráfico 3.60 - en esta se permite realizar las siguientes operaciones:

En la ventana –opciones- "*options*", se pueden elegir distintos modos de representación del gráfico, como:

- Ajuste automático del rango de valores "global range", "auto range"
- Ajuste automático de la escala "auto scale"
- Mostrar el mallado "draw grid"

Vectors	×			
Options Node Values Global Range Auto Range Clip to Range Auto Scale Draw Grid	Vectors of Velocity Color by Velocity Velocity Magnitude Min Max			
Scale 5 Skip 5 4 Vector Options Custom Vectors	U     U       Surfaces     =       auto     default-interior       entrada     piso       salida     techo			
Surface Name Pattern     Surface Types       axis       clip-surf       Match				
Display Compute Close Help				

Gráfico 3.60 Ventana de configuración de vectores

Fuente: Autores

En la ventana –estilo- "*style*" se eligen diferentes tipos de representación gráfica de los vectores, los cuales son:

- Cono "cone"
- Flecha "arrow"
- Flecha llena "filled arrow"
- Arpón "harpoon"
- Sin cabeza "headless"

En la ventana –escala- "*scale*", se dispone el tamaño de los vectores, y en la ventana –salto- "*skip*" la separación entre los mismos, en esta simulación se han escogido valores de 5 y 5 respectivamente.

Al presionar el botón –opciones de vector- "*vector options*" se despliega una ventana que permite tipificar la representación de vectores. En la ventana –superficies-"*surface*" se elige la zona que se desea visualizar.

Al oprimir el botón –personalización de vectores- "*custom vectors*" se despliega una ventana que permite personalizar la representación de vectores, en función de su dirección, además es posible asignar códigos de color para diferentes variables, como: presión, turbulencia, densidad, etc.

En la ventana de designación de las variables que se pueden visualizar "*vectors of*", solo se pueden representar vectores de velocidad del fluido, no obstante, estos pueden ser mostrados, en distintos rangos de color, en función de la variable deseada, en la opción –por color- "color by" existen las siguientes variables: -Cuadro 3.2-

Es importante aclarar, que no todas estas funciones estarán disponibles, ya que muchas se relacionan con modelos matemáticos diferentes a los escogidos en esta simulación.
	Estática relativa         Dinámica relativa         Coeficiente de presión         Estática Absoluta         Total relativa				
	<ul> <li>Magnitud -absoluta, ó relativa- Horizontal -xabsoluta, ó relativa- Vertical -yabsoluta, ó relativa- Radial -absoluta, ó relativa- Tangencial -absoluta, ó relativa- Der ángulo -absoluta, ó relativa- Definida por una función de flujo En función del número de Reynolds En la malla horizontal -x- En la malla vertical -y-</li> </ul>				
	Energía cinética turbulenta -k- Intensidad de turbulencia Tasa de disipación -e- Producción de -k-TURBULENCIAViscosidad turbulenta Viscosidad efectiva Proporción de viscosidad turbulenta Función "Wall y star" Función "Wall y plus"				
DISPONIBLES	FLUJOS DE PARED FLUJOS DE PARED Esfuerzo cortante horizontal -x- Esfuerzo cortante vertical -y- Coeficiente de rozamiento viscoso.				
	PROPEDADES: Viscosidad molecular				
	TASAS DE VARIACIÓN DENSIDAD Velocidad -x-/dx Velocidad -y-/dy Velocidad -x-/dy Velocidad -y-/dy Funciones de doble precisión				
	INFORMACIÓN DE CELDAS INFORMACIÓN DE CELDAS Fipos de elementos Tipos de zona Indice de zonas Particiones vecinas				
	Coordenas X,Y,Z Coordenas: Axial, Angular, Radial Area de superfícies: X Y Z.				
	INFORMACIÓN DEL MALLADO Distorsión angular de celdas				
	RESIDUOS: Balance de masa Distorsión volumétrica de celdas Indice de aplastamiento				
	FUNCIONES DE ADAPTACIÓN.				

Cuadro 3.2 Esquema de las variables según las cuales se expresan los resultados

Fuente: Autores

## - Vectores de velocidad absoluta.



Gráfico 3.61 Vectores de velocidad absoluta.

Fuente: Autores

En esta representación -gráfico 3.61- se observa la dirección de los vectores de velocidad del fluido, además de la magnitud de su velocidad -representada en el rango de colores-.



Gráfico 3.62 Vectores de velocidad absoluta, detalle de la parte frontal del vehículo

Fuente: Autores.

En el detalle de la parte frontal del vehículo -gráfico 3.62-, se observa como el flujo de aire que impacta de forma directa con el vehículo, lo hace con una velocidad mínima, en cambio el aire que es desviado hacia la parte superior e inferior de la carrocería, incrementa sucesivamente su velocidad.

Analizando el detalle de la parte posterior del vehículo –gráfico 3.63-, y al modificar la escala de los vectores en un factor de 10, se observa que el flujo de aire que se desprende de la capa límite pierde su velocidad; y cuando se separan completamente del vehículo la diferencia de velocidad entre los diferentes hilos de corriente forman vórtices en la estela turbulenta.



Gráfico 3.63 Vectores de velocidad absoluta, detalle de la parte posterior del vehículo

Fuente: Autores.

**3.5.2.2 Contornos gráficos.** Este tipo de representación permite visualizar los resultados numéricos calculados por el programa de forma gráfica, asignando diferentes colores para los intervalos del valor de la magnitud física que se desea conocer. Para acceder a la ventana de configuración de los contornos gráficos - gráfico 3.64 - se sigue la secuencia: mostrar "*display*"  $\rightarrow$  contornos "*contours*".

Contours	
Options	Contours of
🗹 Filled	Pressure 👻
✓ Node Values ✓ Global Range	Static Pressure
Auto Range	Min Max
Clip to Range	0
Draw Profiles	Surfaces 📃 =
Levels Setup	auto default-interior entrada piso
Surface Name Patterr	salida 💌
	Surface Types 📃 📃
Match	axis
	fan 💌
Display Co	mpute Close Help

Gráfico 3.64 Ventana de configuración de los contornos gráficos.

Fuente: Autores

Las opciones de visualización son:

- Mostrar contornos llenos, ó separados mediante líneas "filled"
- Mostrar el valor de los nodos "node values"
- Ajuste automático del rango de valores "global range", "auto range"
- Mostrar Perfiles "draw profiles"
- Mostrar el mallado "draw grid"

En la ventana niveles "*levels*" se determinan los intervalos de visualización de los resultados, mientras que en la ventana configurar "*setup*", se almacenan automáticamente los cambios realizados en la misma, en función del número que a cada contorno se le asigne. Esto mientras dure la sesión de trabajo. En la ventana – superficies "*surface*" se elige la zona que se desea visualizar.

En la opción -contornos de- "*contours of*" se escoge la variable de la cual se desea construir la representación gráfica, se pueden elegir diferentes contornos, los cuales coinciden con las opciones disponibles en la configuración de vectores, estos se muestran en el apartado 3.5.2.1. A manera de ejemplo se muestra el contorno de presión absoluta. -Gráfico 3.65-



Gráfico 3.65 Contorno de presión absoluta

Fuente: Autores

**3.5.2.3 Líneas de Corriente.** Multiples ensayos en túneles de viento, son realizados mediante la aplicación de diferentes tipos de colorante en el fluido, con el fin de visualizar el comportamiento de las líneas de corriente que circulan alrededor del vehiculo. Este tipo de ensayo puede ser simulado mediante la función -lineas de corriente- "*path lines*", a la cual se accede con la secuencia: mostrar "display"  $\rightarrow$  líneas de corriente "*path lines*". -Gráfico 3.66-

Options	Style		Color by	
🗆 Oil Flow	line	•	Velocity	
Reverse     Node Values	Style Attributes		Velocity Magnitude	
Auto Range	Step Size (m) Tolerance	_	Min (m/s) Max (m/s) 0 67.00183	
Accuracy Control     Relative Pathlines     XY Plot	Steps Path Skip		Release from Surfaces	Ξ
Write to File	Path Coarsen		default-interior entrada	
Standard 👻	On Zone		salida techo	
Pulse Mode © Continuous © Single	salida entrada techo piso		I	

Gráfico 3.66 Ventana de configuración de las líneas de corriente.

Fuente: Autores

En la ventana opciones, se eligen las funciones que describen el comportamiento del gráfico, las cuales son:

- Flujo de aceite "*oil flow*": Esta función permite visualizar el comportamiento de las líneas de corriente que experimentan fricción viscosa, cuando se deslizan sobre un sólido.
- Contrario "Reverse" : Al accionar esta casilla, el flujo de aire cambia de sentido, en este caso circularía desde la parte posterior del vehículo, hacia la parte frontal. -esta función se visualiza únicamente en el modo de animación-
- Valores en los nodos "*node values*": Al activar esta función, la gráfica se construye aproximando el valor entre nodo y nodo, caso contrario esta se construye en un contorno definido por el mallado.
- Rango automático: "Auto range": Al accionar esta casilla, el programa ajusta la escala del valor de la magnitud seleccionada, automáticamente. Caso contrario esta deberá ser ingresada manualmente, asignando un valor mínimo y un máximo.
- Mostrar el mallado "*draw grid*": Si se acciona esta casilla, se muestra adicionalmente el tramado de la malla.
- Ilustrar XY "*plot xy*": Al accionar esta casilla se muestra el resultado numérico, en función de la variable escogida.
- Guardar "*Write to file*" : Almacena la información calculada en un archivo, el cual puede ser leído por un pos procesador diferente.

En la ventana –estilo- "*style*" se puede escoger entre varias formas de visualizar las líneas de corriente, las cuales son:

- Líneas "lines"
- Líneas y flechas "line *arrow*"
- Sucesión de puntos "point"
- Sucesión de esferas "sphere"
- Cintas "ribbon"
- Triangulos "triangle"
- Cilindros gruesos "coarse cylinder"
- Cilindros medianos "medium cylinder"
- Cilindros finos "fine cylinder"

Además es posible configurar detalladamente las propiedades de cada uno de los estilos al abrir la ventana de configuración de esta función al presionar el botón – atributos de estilo- "*style atributes*".

La opción –tamaño de paso- "*size step*" permite configurar la longitud de cada segmento de línea de corriente. En cambio en la ventana –número de pasos- "*steps*" se establece la cantidad de pulsaciones que se realizan desde que ingresa una línea de corriente en el dominio, hasta que sale. Esta función es válida únicamente para el proceso de animación de las líneas de corriente.

En la ventana –exceptuar líneas de corriente- "*path skip*" se asigna un factor que determina la cantidad de líneas de corriente a visualizar. Mientras que en la función –espesor de líneas- "*path coarse*" se establece un múltiplo que establece la continuidad de estas líneas de corriente.

Tras definir la variable, según la cual serán coloreadas las líneas de corriente y especificar la zona en la que se desea visualizar las mismas, se dispone de dos tipos de representación de los resultados, la función –pulsar- "pulse" permite realizar la una animación, en función de los parámetros previamente establecidos. En cambio la opción –mostrar- "*display*" ilustra las líneas de corriente en un gráfico no animado. -Gráfico 3.67-



Gráfico 3.67 Visualización de las líneas de corriente

Fuente: Autores

En esta ilustración se observa las líneas de corriente matizadas en función de la magnitud de la velocidad absoluta del fluido.

### **3.6 CONCLUSIONES.**

El estudio bidimensional de la aerodinámica de un automóvil, resulta relativamente sencillo de realizar, esto principalmente porque no se requieren operaciones de limpieza y adaptación de la geometría importada.

Utilizar elementos triangulares en la conformación del mallado del dominio computacional bidimensional, garantizan la buena adaptabilidad de la malla en contornos geométricos complicados e irregulares.

La aplicación de una función de tamaño para gobernar el crecimiento progresivo de los elementos que forman el mallado del dominio computacional, a partir del contorno del automóvil; trae consigo la ventaja de lograr una alta densidad del mallado en el contorno del automóvil y las zonas adyacentes próximas, con esto se garantiza la correcta interpretación del problema por el programa procesador CFD en los puntos que resultan de mayor importancia en este estudio; a la vez que se induce a abaratar el costo computacional del proceso y pos-proceso, al conformar elementos de mayor tamaño en las zonas distantes al vehículo, en donde no se requiere de alta densidad para el mallado.

La convergencia del problema planteado en esta simulación se realiza en aproximadamente 2 minutos de proceso; tras completarse 158 iteraciones, las cuales se ejecutan con suma estabilidad. El bajo costo computacional logrado en esta simulación se relaciona directamente con la alta calidad conseguida para el mallado del dominio computacional, alcanzándose los siguientes parámetros para su valoración: distorsión máxima de los elementos: 0.47, proporción de aspecto: 4.2% y un factor de aplastamiento de 0.237. Todos estos se encuentran dentro de los límites recomendados para este tipo de simulación, cuyo calificativo correspondiente es: bueno.

### **CAPITULO IV**

## SIMULACIÓN EN TRES DIMENSIONES.

### 4.1 GENERALIDADES.

El análisis aerodinámico de vehículos mediante los programas CFD pretende complementar el estudio experimental en túneles de viento, y reducir el tiempo de uso de los mismos; no obstante en los ensayos computacionales se puede acceder a información que de forma experimental resulta muy difícil como: el contorno de presión y velocidad del fluido para las zonas adyacentes al vehículo, visualización de los desprendimientos fuera de la capa límite, trazar las líneas de corriente del fluido; etc. La forma de aproximar al máximo los resultados es mediante la simulación tridimensional, aunque su implementación representa un costo computacional muy elevado, requiriéndose para este mayor tiempo de configuración y procesamiento.

El principal inconveniente que se presenta al realizar la simulación tridimensional, surge de la dificultad de adaptar el mallado para el total del contorno del automóvil, ya que algunos elementos resultan muy pequeños en relación con el tamaño del vehículo, -por ejemplo: retrovisores, manijas de las puertas, antenas, etc- incluirlos significaría reducir el tamaño de los elementos de la malla, por ende los requerimientos de memoria del procesador se incrementan, haciéndose imposible de resolver el problema en un ordenador personal.

Por otro lado, el acople entre las aristas que forman el contorno de la carrocería se mallan sin dificultad solo cuando el ángulo externo entre estas es mayor a 135°, no obstante se puede realizar hasta que este valor sea superior a los 90° pero se corre el riesgo de generar distorsiones en los elementos difíciles de corregir; por esta razón resulta sumamente complicado incluir pequeños cambios en la morfología de un elemento -por ejemplo: hendiduras en las puertas, agujeros y deflectores en el guardachoque delantero, etc-. Por lo tanto es indispensable omitir de la carrocería del automóvil, algunos elementos que impedirían este ensayo, los cuales no afectan de forma significativa al comportamiento aerodinámico del vehículo.

# 4.2 PREPARACIÓN DE LA GEOMETRIA

La preparación de la geometría para esta simulación en tres dimensiones, comprende las operaciones de limpieza preliminar y posterior exportación del archivo, con el fin que este pueda ser leído por el pre procesador "*CFD*" Gambit 2.2.30.

Se debe eliminar todas las superficies que no serán tomadas en cuenta en el estudio, ya que su configuración resulta compleja y requieren un estudio separado del conjunto del automóvil. Por otro lado los elementos internos, no afectan el comportamiento aerodinámico exterior del vehículo, y encarecerían notablemente el costo computacional de este estudio. -Gráfico 4.1-



Gráfico 4.1 Limpieza preliminar del objeto de estudio

Debido a que este objeto fue concebido como una serie de caras continuas "*multiface model*" no es posible para el programa "*autocad 2005*" exportarlo como un archivo de formato "*ACIS*" ya que este se utiliza para definir regiones o sólidos. Por esta razón se utiliza el programa "*mesh to solid 3.0*" el cual cumple la función de transformar estas superficies en un sólido.

Al abrir este programa, y con la secuencia: archivo "file"  $\rightarrow$  abrir "open", se debe escoger la ubicación del fichero que se desea transormar, al validar la operación, el programa muestra en la zona gráfica el modelo especificado. -Gráfico 4.2–

Fuente: Autores.



Gráfico 4.2 Visualización del objeto de estudio en el programa "mesh to solid 3.0"

Fuente: Autores

Para exportar este archivo en formato "ACIS", simplemente se debe guardar una copia con extensión ".sat", de inmediato empieza el proceso de transformación y finalmente se guarda la copia deseada. Es imprescindible que el objeto de estudio se encuentre con el "UCS", en el centro de la carrocería, con ello se hará más fácil su manipulación en el pre-proceso CFD.

# 4.3 PRE-PROCESO CFD.

**4.3.1 Importación del objeto de estudio.** Con la secuencia: archivo "*file*"  $\rightarrow$  importar "*import*"  $\rightarrow$  archivo ACIS "ACIS file", se despliega la ventana de selección de archivos, -gráfico 4.3 -, en ella se escoge la ubicación del fichero a importar, es necesario especificar el formato en la casilla –ASCII-, luego conviene activar las casillas: -arreglar geometría "*heal geometry*" y –hacer tolerante- "*make tolerant*", con ello se corrige automáticamente cualquier defecto que pudiera haber sido generado durante la transformación del archivo.

imes Import ACIS I	File		×
File Name:	ĨE.\Documents and S	ettings\ROBERT\corolla	Browse
Import Opti Format:			
📕 Heal Ge	ometry		
📕 Make To	olerant		
	Accept	Close	

Gráfico 4.3 Ventana de importación de archivos ACIS.

Fuente: Autores.

El programa tarda varios minutos en importar el fichero especificado, y al final muestra el objeto en la zona de visualización. -gráfico 4.4-



Gráfico 4.4 Contorno del automóvil, importado en el programa Gambit 2.2.30

Fuente: Autores

# 4.3.2 Adaptación de la geometría.

**4.3.2.1 Corte simétrico del vehículo.** Con el propósito de abaratar el costo computacional del pre-proceso, y aprovechando que la carrocería del vehículo es completamente simétrica en el plano longitudinal central, es conveniente eliminar todas las superficies que se encuentren en el eje Z negativo, con respecto al UCS, el cual fue previamente centrado en la preparación de la geometría. Para esto se debe visualizar el vehículo desde la vista frontal, se escoge la opción –orientar modelo-"orient model" y en ella elegir la opción –vista –x-, "-x view" -, luego con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  borrar superficies "delete faces", se abre la ventana de este propósito, a continuación se eligen la superficies que se desean eliminar. -Gráfico 4.5-



Gráfico 4.5 Selección de superficies a eliminar.



El casillero –geometría más baja- "*lower geometry*", debe estar activado de esta forma se eliminarán además de las superficies, lados y vértices. Al presionar el botón –aplicar- "*apply*", estas superficies son eliminadas. Gráfico 4.6





Fuente: Autores.

**4.3.2.2 Eliminación de agujeros y hendiduras.** Para realizar la configuración del dominio computacional, y posterior mallado, es preciso eliminar cualquier superficie que no se adapte de forma regular al contorno del vehículo, ya que estas tienden a distorsionar la calidad del mallado. En el modelo de estudio, existen diferentes superficies irregulares, como: orificios en el guardachoque delantero, hendiduras en las puertas -zona de las manijas- y baúl posterior. -Gráfico 4.7-



Gráfico 4.7 Detalle de las zonas en las que se eliminarán hendiduras o agujeros



El proceso de corrección de estas zonas, es de cierta forma similar para todas ellas, a continuación se explica a detalle únicamente el proceso de adaptación del guardachoque delantero, por ser el más complejo.

Con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  borrar superficies "delete faces", se eligen todas las superficies que delimitan los contornos irregulares del guardachoque, el casillero –geometría baja- "lower geometry" no debe estar seleccionado, al presionar el botón –aplicar- "apply" se valida la operación realizada. Luego, y con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  borrar bordes "delete edges", se excluyen los bordes de las superficies previamente eliminadas, dejando únicamente los vértices. Los cuales sirven de referencia para la construcción de las superficies de relleno. Gráfico 4.8a.

Gráfico 4.8 Eliminación de superficies irregulares en el guardachoque delantero.

a) Eliminación de bordes



b- Vértices de referencia



Fuente: Autores.

No todos los vértices, serán utilizados como referencia en la construcción de las superficies de relleno, con la sucesión: botón de comando de geometrías "geometry *command button*",  $\rightarrow$  botón de comando de vértices "vertex command button"  $\rightarrow$ borrar vértices "delete vertices", se borran todos los vértices, con excepción de los mostrados en el gráfico 4.8b

Luego, se deben trazar segmentos de recta que unan los vértices existentes, siguiendo el tramado de las superficies adyacentes, esto para mejorar el contorno del objeto, con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$ botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  crear borde recto "create straight edge" se construyen las líneas mostradas en la figura 4.9a



b.) Construcción de superficies



Fuente: Autores.

Cada uno de los contornos triangulares, debe ser transformado en una superficie, con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$ botón de comando de superficies "surface command button"  $\rightarrow$  crear superficies a partir de un contorno "create face from wireframe", se debe activar el casillero – crear superficie virtual- "create virtual surface", y elegir los tres bordes para cada superficie, en cada aplicación, al final se habrán construido 54 superficies. -Gráfico 4.9b-.

Para finalizar la adaptación del guardachoques delantero, es necesario fusionar todas las superficies que conforman el mismo, con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies *"surface command button"*  $\rightarrow$  fusionar superficies *"merge faces"*, y al seleccionar las mismas, se consigue fusionar las superficies en una sola zona, tras validar la operación oprimiendo el botón aplicar "apply". -Gráfico 4.10-



Gráfico 4.10 Adaptación del guardachoque delantero

Fuente: Autores.

**4.3.2.3 Eliminación de grietas.** En este modelo, los componentes de la carrocería no se ajustan con precisión, dando lugar a la formación de grietas entre los mismos, estas deben ser eliminadas, porque al final del proceso de adaptación de la geometría, debe existir una superficie continua para el contorno de la carrocería del vehículo. Para visualizar la continuidad de las superficies se debe presionar el botón – especificar modo de color- "*specify color mode*", con ello la continuidad entre superficies se designa por defecto con el color naranja. -Gráfico 4.11 -



Gráfico 4.11 Grietas existentes entre los componentes de la carrocería.

Fuente: Autores.

Nótese que no existe continuidad entre los componentes de la carrocería, debido a la existencia de grietas, líneas de color naranja. -Con excepción del contorno exterior del vehículo-.

Ya que el procedimiento que se sigue para acoplar las diferentes zonas de la carrocería, es básicamente similar para todas ellas, a continuación se detalla únicamente el procedimiento de unión entre las puertas. En primera instancia, es necesario eliminar las superficies que delimitan la profundidad de las grietas, con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "surface command button"  $\rightarrow$  borrar superficies "delete surfaces". -Gráfico 4.12-



Gráfico 4.12 Eliminación de superficies que delimitan la profundidad de las grietas.

Fuente: Autores

Es necesario construir segmentos de recta en el mismo sentido del tramado de las superficies, de tal forma que los vértices de un elemento sean desplazados hacia el otro, permitiendo así el acople de las zonas, este procedimiento no distorsiona la geometría original del vehículo. Con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  crear borde recto "create straight edge" se seleccionan vértices de dos en dos y se valida la operación, pulsando el botón aplicar "apply" Gráfico 4.13

Gráfico 4.13 Construcción de segmentos de recta, que unen los componentes de la carrocería.



Fuente: Autores

A continuación se debe eliminar las superficies que quedaron superpuestas por los segmentos de recta construidos, con la sucesión: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "surface command button"  $\rightarrow$  borrar superficies "delete surfaces". Gráfico 4.14a

Gráfico 4.14 Proceso de construcción de superficies de enlace.

a.)Eliminación de superficies superpuestas b.) Creación de superficies acopladas



Fuente: Autores

Se debe construir una superficie para cada perímetro triangular formado, con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "surface command button"  $\rightarrow$  crear superficies a partir de un contorno "create face from wireframe", aquí se debe activar el casillero – crear superficie virtual- "create virtual surface", y elegir los tres bordes para cada superficie, en cada aplicación, al final se habrán construido 30 superficies. -Gráfico 4.14b.-

La línea de color naranja que indicaba la discontinuidad entre estas dos zonas, ha sido reemplazada por una línea de color azul, denotando la conexión entre las dos

puertas. -Gráfico 4.15-. Este procedimiento tiene que ser repetido para el resto de superficies, hasta que la línea de color naranja delimite únicamente el contorno exterior del vehículo.



Gráfico 4.15 Eliminación de la discontinuidad entre las puertas.

Fuente: Autores.

Una vez realizada la eliminación de hendiduras y grietas en este modelo para todas las zonas de la carrocería, es conveniente fusionar las superficies que componen cada zona del vehículo, para disminuir el número de planos, y así facilitar la manipulación de este objeto. Para este propósito se sigue el siguiente procedimiento: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "surface command button"  $\rightarrow$  fusionar superficies "merge faces", en esta ventana se debe configurar este proceso para cada zona del vehículo. Gráfico 4.16

Gráfico 4.16 Eliminación de la discontinuidad entre los componentes de la carrocería y fusión entre superficies.



Fuente: Autores.

**4.3.2.4 Construcción de superficies.** Una vez delimitado el contorno del automóvil, es necesario crear superficies que permitan completar un volumen cerrado, para ello

se debe eliminar las bóvedas que albergan a las ruedas, y crear un piso para la carrocería.

A continuación se detalla el procedimiento de eliminación de la bóveda delantera: en primera instancia es indispensable construir un borde que permita cerrar el contorno de la superficie a crear, con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  crear borde recto "create straight edge". Aquí se eligen los vértices externos de la semicircunferencia que delimita la bóveda en sí, luego se oprime el botón –aplicar- "apply". -gráfico 4.17a-.

Gráfico 4.17 Proceso de creación de superficies

a.- Construcción del borde inferior





Fuente: Autores

Luego, para construir la superficie de relleno se elige la opción: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "surface command button"  $\rightarrow$  crear superficies a partir de un contorno "create face from wireframe", aquí se debe activar el casillero – crear superficie virtual- "create virtual surface", luego seleccionar todos los bordes que delimitan la bóveda delantera, al presionar el botón aplicar, se realiza esta operación. -Gráfico 4.17b -.

Con el mismo procedimiento se debe construir la superficie de relleno para la bóveda posterior, y la zona que corresponde al piso de la carrocería. Con estas operaciones termina el proceso de adaptación del objeto de estudio. -Gráfico 4.18-

Gráfico 4.18 Finalización del proceso de limpieza y adaptación de la geometría.



Fuente: Autores.

**4.3.3 Delimitación del dominio.** Una vez terminado los procesos de limpieza y adaptación de la geometría, se debe construir los límites físicos que tendrá la simulación, es decir el contorno del túnel de viento. Esta vez la delimitación del dominio corresponde a la creación de un paralelepípedo, con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de volúmenes "volume command button"  $\rightarrow$  crear volumen "create volume",  $\rightarrow$  crear un paralelepípedo real "create real brick", se despliega la ventana de configuración, en ella se ingresa la longitud: 14000mm, la altura: 5000mm y la profundidad: 3000mm, que tendrá esta entidad geométrica.<sup>37</sup> -Gráfico 4.19-.



Gráfico 4.19 Construcción del paralelepípedo correspondiente al túnel de viento

Fuente: Autores.

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup> Tanto la longitud, como la altura del túnel de viento, coinciden con las utilizadas en la simulación numérica bidimensional, en el capítulo III

Para desplazar este volumen hasta una posición adecuada, se sigue el proceso: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de volúmenes "volume command button"  $\rightarrow$  mover, copiar y alinear volúmenes "move, copy, align volumes"; así se despliega la ventana de configuración, en la cual se deben seleccionar los casilleros: -mover- "move", y -trasladar- "traslate", de esta forma este volumen puede ser movido en función de las coordenadas cartesianas: x=3250, y=1769.303 y z= 1500<sup>38</sup>. De esta forma el vehículo ha sido desplazado a su posición real con respecto al suelo, y el plano de simetría del vehículo coincide con la arista posterior del túnel de viento. En cambio el desplazamiento horizontal es conveniente, para visualizar los fenómenos aerodinámicos que se producen en la parte posterior al vehículo. -Gráfico 4.20-

Gráfico 4.20 Ajuste dimensional entre el túnel de viento y el vehículo.



Fuente: Autores.

Una vez ubicado el vehículo en la posición adecuada, se debe eliminar el volumen que delimita el contorno del túnel de viento, con la sucesión de comandos: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de volúmenes "volume command button"  $\rightarrow$  borrar volumenes "delete volumes" se selecciona el volumen especificado y se deja el casillero –geometría más baja-"lower geommetry" sin activar, con esto se dejan las superficies, bordes y vértices del túnel sin eliminar.

<sup>&</sup>lt;sup>38</sup> El valor de la ordenada ha sido calculado en función de la distancia entre el suelo y carrocería: 196.2mm, las coordenadas del punto inferior de la carrocería -3879.62,-534.49,748.54) y las coordenadas del punto inferior del paralelepípedo --7000,-2500,-1500) en x,y,z

Para poder realizar la proyección de todas las superficies, y así completar el modelo de estudio tridimensional, es necesario construir superficies intermedias de acople en el plano de simetría.

Este proceso comienza con la creación de dos vértices en el borde inferior del plano de simetría, los cuales deben ubicarse próximos al contorno frontal y posterior del automóvil, esta operación se realiza efectuando cortes en este borde con la secuencia de comandos: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$ botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  cortar y fusionar bordes "Split/merge edges",  $\rightarrow$  cortar bordes "Split edge". Luego, al mantener presionado la tecla –shift- y presionar el botón izquierdo del ratón en el punto del borde en el cual se desea realizar el corte, automáticamente se cargan en la ventana de configuración las coordenadas que tendrá el vértice, las cuales se aceptan al presionar el botón – aplicar- "apply". -Gráfico 4.21-

Gráfico 4.21 Construcción de vértices mediante el corte del borde inferior del plano de simetría.



Fuente: Autores.

Una vez creados los vértices en el borde inferior del plano de simetría, se debe construir segmentos de recta que unan estos con los puntos más cercanos del vehículo, y que pertenezcan además al plano de simetría; mediante la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  crear borde recto "create straight edge". -Gráfico 4.22-

Gráfico 4.22 Construcción de líneas desde el borde inferior del plano de simetría, hasta el vehículo.



Fuente: Autores.

A continuación se deben crear dos superficies virtuales sobre el plano de simetría, las cuales cumplen la función de ser el enlace entre este objeto, y su reflexión ortogonal próxima. Mediante la secuencia de comandos: botón de comando de geometrías "geometry command button",  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  crear superficie "form surface"  $\rightarrow$  crear superficie desde un contorno "create face from wireframe", en esta ventana la opción –crear superficie virtual-"create virtual surface" debe estar activada, luego se escogen los bordes mostrados en el gráfico 4.23 Los cuales están ubicados en el plano de simetría, con esta operación se formarán dos superficies independientes.



Gráfico 4.23 Selección de bordes que definen las dos superficies de enlace.

Posteriormente, se debe realizar la proyección de este objeto con el fin de completar la geometría del vehículo y del túnel de viento, al elegir la secuencia: botón de

Fuente: Autores.

comando de geometrías "geometry command button"  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  mover, copiar y alinear superficies "move, copy, align surfaces" se despliega la ventana de configuración, en la que se eligen las opciones: copiar "copy", y reflectar "reflect", luego se debe seleccionar la opción – definir- "define" en ella se elige la opción -especificar la proyección por medio de un borde- "edge", ahora se escoge cualquier línea de la geometría que se encuentre orientado en la dirección -Z-, es importante que la dirección que asume el programa para esta operación, sea la dirección -Z- positiva. -Gráfico 4.24-, luego se eligen todas las superficies disponibles en el fichero, Al seleccionar el botón –aplicar-"apply", se realiza la proyección deseada. Gráfico 4.25

Gráfico 4.24 Configuración del vector que define la proyección del objeto.

<b>→</b>	۱ ۱	/ector Definiti	on
	Active C	oordinate Sys	tem Vector
	Start: (-	3750, 4269.303	I, O)
	End: (-	3750, 4269.303	8, 3000)
	🔲 Magnit	ude (3000	
	Method:	Edge	-
	Edge	edge.18813	•
	Apply	Reset	Close

Fuente: Autores.

Gráfico 4.25 Proyección ortogonal del vehículo y túnel de viento.



Fuente: Autores.

A partir de estas superficies se debe construir un volumen que contenga al automóvil en su interior a manera de sustracción, para ello es preciso eliminar las superficies duplicadas en el plano de simetría que se crearon durante la proyección del objeto, dejando únicamente las dos superficies de conexión. -gráfico 4.23-.

Ahora es necesario, conectar los bordes que pertenecen al automóvil en el plano de simetría, con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button"  $\rightarrow$  botón de comando de bordes "edge command button"  $\rightarrow$  conectar y desconectar bordes "connect/disconnect edges"  $\rightarrow$  conectar bordes "connect edges"  $\rightarrow$  conectar bordes "connect edges" se seleccionan todos los bordes, segmento por segmento durante cada operación, cuando dos líneas se conectan, estas son mostradas de color violeta. Gráfico 4.26

Gráfico 4.26 Conexión entre los bordes que comparten las superficies del auto y el plano de simetría.



Fuente: Autores.

A continuación se construyen dos volúmenes virtuales, una para cada conjunto de superficies separadas por el plano de simetría, con la secuencia de comandos: botón de comando de geometrías "geometry command button"  $\rightarrow$  botón de comando de volúmenes "volume command button"  $\rightarrow$  formar volumen "form volume"  $\rightarrow$ ensamblar superficies "stitch faces", se seleccionan las superficies, incluidos los planos de conexión, previamente construidos. El casillero –formar volumen virtual-"virtual volume" debe estar activada. -Gráfico 4.27-



Gráfico 4.27 Selección de superficies, previo a la construcción de volúmenes



Al presionar el botón –aplicar- "apply", se crean volúmenes sólidos, que contienen el contorno tridimensional del automóvil, en su interior en forma de boquete. -Gráfico 4.28-



Gráfico 4.28 Visualización del boquete formado en el volumen.

Fuente: Autores

Luego, es necesario fusionar estos dos volúmenes virtuales en uno solo, con la operación: botón de comando de geometrías "geometry command button"  $\rightarrow$  botón de comando de volúmenes "volume command button"  $\rightarrow$  fusionar volúmenes "merge volumes", tras seleccionar los dos volúmenes y validar la operación, se forma un solo cuerpo, las líneas que definen las superficies de conexión, desaparecen automáticamente. -Gráfico 4.29-



Gráfico 4.29 Fusión entre los dos volúmenes virtuales



A continuación se deben fusionar las superficies divididas por el plano de simetría, con la secuencia: botón de comando de geometrías "geometry command button"  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  fusionar superficies "merge faces". Se seleccionan las superficies de dos en dos y se valida cada operación. En el gráfico 4.30 se muestra el dominio computacional listo para ser mallado.

Gráfico 4.30 Visualización del dominio computacional terminado.



Fuente: Autores

**4.3.4 Mallado del dominio.** Para mallar el volumen generado en la delimitación del dominio computacional, es imprescindible mallar las superficies que forman la carrocería del vehículo, ya que a partir de este se construirá el mallado total del volumen.

Con la operación: botón del comando de mallas "mesh command button"  $\rightarrow$  botón de comando de superficies "face command button"  $\rightarrow$  mallar superficies "mesh faces". Se seleccionan todas las superficies que delimitan el contorno del vehículo, se establece la forma de los elementos que delimitarán el tramado de la malla, el cual es de tipo triangular, se selecciona la opción –tamaño del intervalo- "interval size", en el cual se fija el valor de 30mm. Al presionar el botón –aplicar- "apply" comienza el proceso de construcción del mallado, el cual puede tardar varios minutos. -Gráfico 4.31-



Gráfico 4.31 Mallado del contorno del vehículo

Fuente: Autores

Para validar la calidad de este mallado, es necesario revisar la distorsión "*skew*" que poseen las celdas que componen la misma. Al pulsar el botón derecho del ratón sobre el ícono de información, aparece la opción –revisar- "*check*", al seleccionar las superficies malladas y validar la operación, se despliega sobre la zona de procesos los datos solicitados. -Gráfico 4.32-.

	From value	To value	Count in range	% of total count (6074	2)
	0	0.1	59947	98.69	
	0.1	0.2	706	1.16	
	0.2	0.3	62	0.10	
	0.3	0.4	20	0.03	
	0.4	0.5		0.01	
	0.5	0.6	ò	0.00	
	0.6	0.7	ŏ	0.00	
	0.7	0.8	ŏ	0.00	
	0.9	0.0	ŏ	0.00	
	0.0	1	ŏ	0.00	
	0.9	<u>+</u>			
	0	1	60742	100.00	
	Measured minimum Measured maximum	m value: 1.5 m value: 0.4	005e-008 65547		
0	out of 26 meshe	d faces fail	ed mesh check for	skewed elements (EQUISIZ	E SKEW > 0.97).
0	out of 26 meshe	d faces fail	ed mesh check for.	inverted elements.	

Gráfico 4.32 Revisión de la distorsión de los elementos bidimensionales.

#### Fuente: Autores

En este gráfico se observa que el 98.69% de las celdas tiene una distorsión mínima con valores entre 0 y 0.1, en cambio el elemento de menor calidad tiene una distorsión de 0.465; ya que la deformación máxima permisible para el mallado de superficies es de 0.6, se acepta la calidad del mallado presentado.

Para realizar el mallado del volumen, se necesita crear una función del tamaño de la malla, con la operación: comando de herramientas "tools command button"  $\rightarrow$  comando de las funciones de tamaño "sizing/function command button"  $\rightarrow$  crear funciones de tamaño "create sizing function", se despliega la ventana de configuración -Gráfico 4.33 -, aquí se debe seleccionar en el casillero referencia "source" las superficies que forman el contorno del vehículo, en cambio en el casillero de anexos "attachments" se debe elegir el volumen que corresponde al dominio computacional de este estudio, en los parámetros "parameters" de la función se han escogido los siguientes valores: tamaño de inicio "start size" : 30mm; tasa de crecimiento "growth rate" del 20%, es decir un valor de 1.2 y un límite del tamaño "size limit" de los elementos de 1000 mm, además se debe asignar un nombre a esta función, luego al oprimir el botón aplicar "apply" el programa muestra el siguiente mensaje en la barra de procesos: "size function: name of the function, attached to name of the face", con ello se valida la operación realizada.

Create Size Function					
Туре:	Fixed 🗖				
Entities:					
Source:	Faces 🔟 📤				
Attachment	: Volumes 🖬 🛉				
Parameters:					
Start size					
Growth rate 1.2					
Size limit	100Q				
Label malla	do 3d				
Apply F	leset Close				

Gráfico 4.33 Ventana de configuración de la función de tamaño.

Fuente: Autores

Para realizar el mallado del volumen, se sigue la secuencia: comando de mallas "mesh command button",  $\rightarrow$  comando de volúmenes "volume command button"  $\rightarrow$  mallado de volúmenes "mesh volumes", aparece entonces la ventana de configuración. -Gráfico 4.34 -.

Gráfico 4.34 Ventana de configuración del mallado del volumen.

Mesh Volumes					
Volumes	v_volume.4				
Scheme:	F Apply Default				
Elements:	Tet/Hybrid 🗖				
Туре:	TGrid 🗖				
Spacing:	Apply Default				
[1	Interval size				
Options:	Mesh     Remove old mesi     Remove lower me     Ignore size function				
Apply I	Reset Close				

Fuente: Autores

Se escogen los elementos que conformarán el tramado de la malla, en este caso "tet/hybrid" el tipo asignado por defecto es "TGrid", no es necesario realizar ningún otro cambio en esta ventana, ya que la función de tamaño es la encargada de gobernar el comportamiento del mallado. Luego de presionar el botón aplicar "*apply*", comienza el proceso de mallado, el cual tarda varias horas en ser completado. Gráfico 4.35



Gráfico 4.35 Visualización del mallado realizado en el dominio computacional.

Fuente: Autores

Para revisar la distorsión "*skew*" de los elementos tridimensionales del mallado, se oprime el botón derecho del ratón sobre el ícono de información, desplegándose la opción –revisar- "*check*", al elegir el volumen que corresponde al dominio computacional y al oprimir el ícono –aplicar- "*apply*" se despliega en la barra de procesos, la siguiente información:

Su	mmarizing EQUI: Volume v_vol	SIZE SKEW of 3 ume.3 meshed (	3D elements measu using Tetrahedra]	ured for 1 meshed volum l scheme and size of 1.	ne: .000000.
	From value	To value	Count in range	% of total count (	(3339598)
	0	0.1	254403	7.62	
	0.1	0.2	627790	18.80	
	0.2	0.3	904379	27.08	
	0.3	0.4	842041	25.21	
	0.4	0.5	455380	13.64	
	0.5	0.6	195677	5.86	
	0.6	0.7	53357	1.60	
	0.7	0.8	6571	0.20	
	0.8	0.9	0	0.00	
	0.9	1	0	0.00	
	0	1	3339598	100.00	
	Measured minim Measured maxi	mum value: 2.7 mum value: 0.7	'5459e-008 /49991		
0	out of 1 mesh	ed volume fail	led mesh check fo	or skewed elements (EQU	JISIZE SKEW > 0.97
0	out of 1 mesh	ed volume fai]	ed mesh check fo	or inverted elements.	

Gráfico 4.36 Revisión de la distorsión de los elementos tridimensionales

Fuente: Autores

Como se observa, el elemento del mallado con mayor distorsión "*skew*" es de 0.745, mientras que la mayoría de elementos -84.73%- se encuentran en el rango de 0.1 a 0.4, con esta valoración la calidad del mallado es considerada como aceptable.

**4.3.5 Condiciones de contorno.** Con un proceder análogo al explicado en apartado 3.3.4, se despliega la ventana de configuración de las condiciones del contorno del dominio computacional. -Gráfico 4.37-



Gráfico 4.37 Ventana de configuración de las condiciones de contorno

Fuente: Autores

En esta se debe revisar que en el casillero –entidades- "*entities*" esté activada la opción –superficies- "*faces*", luego se asigna el tipo de contorno para todos los planos que forman el objeto de estudio, los cuales coinciden con las condiciones establecidas en el caso bidimensional -Capítulo III-. Solo que en este existen dos superficies adicionales, estas corresponden a las paredes longitudinales del túnel de viento, a estas se les asigna un contorno de –simetría- "*symmetry*", y un nombre de – lado a- y -lado b- como se muestra en el gráfico 4.38.



Gráfico 4.38 Condiciones de contorno para el objeto de análisis.

Fuente: Autores.

Para terminar es necesario exportar esta malla como un archivo de formato –msh-, el cual será leído en el procesador CFD, este procedimiento se diferencia al explicado en el apartado 3.3.5, en que la casilla "*export 2D -X-Y- mesh*" debe estar desactivado.

# 4.4 PROCESO DE CALCULO CFD.

Al iniciar el programa "Fluent 6.3.26" se debe seleccionar la opción "*3ddp*", es decir un estudio tridimensional con doble grado de precisión.

La configuración del programa de proceso "*CFD*", para las operaciones de: importación de la malla, adaptación del dominio computacional, modelos matemáticos a considerar, condiciones de operación, condiciones de contorno, y parámetros de cálculo y resolución; son similares a las explicadas en el apartado 3.4 -estudio bidimensional-. Para validad el mallado importado, es necesario revisar la calidad de la misma, para ello se sigue un procedimiento similar al explicado en el apartado 3.4.1. -Gráfico 4.39-

Gráfico 4.39 Revisión de la calidad del mallado en el programa procesador

gı	id quality
Gr	id Quality:
A I	plying quality criteria for tetrahedra/mixed cells.
Ma	ximum cell squish = 7.26257e-001
Ma	ximum cell skewness = 7.49903e-001
Ma	ximum 'aspect ratio' = 1.71001e+001
>	· -

Fuente: Autores



Gráfico 4.40 Visualización de la malla importada

Fuente: Autores.

Luego de realizar la configuración preliminar en el programa, se ejecuta el proceso iterativo, el cual concluye luego en la iteración # 145 al converger la solución - gráfico 4.41-, este se efectuó de forma estable, de acuerdo a la información mostrada por el monitor de residuos. -gráfico 4.42 -

Gráfico 4.41 Visualización del proceso iterativo.

FLUENT [3d, dp, pbns, ske]				
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help				
133 1.0787e-03 3.4445e-05 1.6964e-05 1.6961e-05 5.6576e-04 8.8995e-04 3:59:5	5890 🔼			
134 1.0708e-03 3.4025e-05 1.6832e-05 1.6766e-05 5.5509e-04 8.7653e-04 4:02:0	6 889			
135 1.0607e-03 3.3576e-05 1.6678e-05 1.6549e-05 5.4411e-04 8.6269e-04 4:00:4	9 888			
136 1.0535e-03 3.3172e-05 1.6551e-05 1.6351e-05 5.3372e-04 8.4966e-04 3:59:4	5 887			
137 1.0446e-03 3.2758e-05 1.6403e-05 1.6163e-05 5.2292e-04 8.3909e-04 3:58:5	0 886			
138 1.0370e-03 3.2362e-05 1.6262e-05 1.5980e-05 5.1337e-04 8.2983e-04 3:55:0	6 885			
139 1.0307e-03 3.1990e-05 1.6116e-05 1.5796e-05 5.0352e-04 8.1865e-04 3:55:0	1 884			
140 1.0268e-03 3.1658e-05 1.5993e-05 1.5627e-05 4.9381e-04 8.0813e-04 3:51:5	7 883			
141 1.0215e-03 3.1323e-05 1.5857e-05 1.5464e-05 4.8543e-04 7.9786e-04 3:58:1	6 882			
142 1.0169e-03 3.0983e-05 1.5723e-05 1.5315e-05 4.7706e-04 7.8673e-04 3:54:2	7 881			
143 1.0122e-03 3.0640e-05 1.5588e-05 1.5179e-05 4.6929e-04 7.7508e-04 3:57:1	3 880			
iter continuitu x-velocitu u-velocitu z-velocitu k epsilon tim	e/iter			
144 1.0061e-03 3.0272e-05 1.5442e-05 1.5020e-05 4.6032e-04 7.6527e-04 3:56:2	6 879			
! 145 solution is converged				
145 9.9848e-04 2.9936e-05 1.5322e-05 1.4861e-05 4.5248e-04 7.5757e-04 3:55:4	6 878 🗖			
	×			

Fuente: Autores



Gráfico 4.42 Monitor de residuos

Fuente: Autores

Es necesario además verificar la estabilidad del proceso de cálculo para los coeficientes de arrastre y sustentación. -Este procedimiento se lo realiza de forma similar al explicado en el apartado 3.4.7.5, en el estudio bidimensional.- Gráficos 4.43 y 4.44.



Gráfico 4.43 Monitor del coeficiente de arrastre -CD-

Fuente: Autores
Como se observa en el gráfico 4.44 el valor calculado del coeficiente de arrastre *"drag"* se estabiliza a partir de la iteración #125.



Gráfico 4.44 Monitor del coeficiente de sustentación -Cl-



En este monitor se observa que el valor del coeficiente de sustentación -Cl-, permanece constante a partir de la iteración #75.

#### **4.5 POS-PROCESO**

**4.5.1 Resultados numéricos.** Para visualizar la magnitud de las fuerzas y el valor de los coeficiente de arrastre y sustentación que actúan sobre el automóvil, se despliega la ventana: reportar "*report*"  $\rightarrow$  fuerzas "*forces*", en ella aparecen los contornos definidos como pared "*wall*" es decir el auto y el piso, se debe seleccionar el auto y especificar el vector unitario de la dirección de la fuerza que se desea conocer, es decir fuerza horizontal para el arrastre u(1,0,0) y fuerza vertical para la sustentación u(0,1,0) -Gráfico 4.45-

Fuerzas y coeficientes de Arrastre	Fuerzas y coeficientes de sustentación
Force Reports	Force Reports
Options     Force Vector     Wall Zones ≣ =	Options     Force Vector     Wall Zones II =
Wall Name Pattern Match Print Write Close Help	Wall Name Pattern       Match       Print     Write       Close     Help

Gráfico 4.45 Ventana de configuración del reporte de fuerzas.

Fuente: Autores

Al oprimir la función –imprimir- "*print*" se escriben los resultados en la ventana de comandos. Gráficos 4.46 y 4.47.

Gráfico 4.46 Reporte de fuerzas	y coeficientes de arrastre.
---------------------------------	-----------------------------

Force vector: (1 0 0)						
zone name	pressure force N	viscous force N	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
auto	451.61595	109.12571	560.74166	0.22790929	0.055070603	0.28297989
net	451.61595	109.12571	560.74166	0.22790929	0.055070603	0.28297989
		Fuente	· Autores			

Fuente: Autores

Gráfico 4.47 Reporte	de fuerzas y	v coeficientes	de sustentación

Force vector: (0 1 0)						
zone name	pressure force n	viscous force N	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
auto	-519.13162	5.1687673	-513.96285	-0.068413551	0.00068116393	-0.067732388
net	-519.13162	5.1687673	-513.96285	-0.068413551	0.00068116393	-0.067732388
		Fuonto	· Autoros			

Fuente: Autores

El signo negativo del vector –fuerza total-, indica que la fuerza de sustentación actúa en dirección opuesta al vector unitario configurado.

Para calcular los momentos principales que generan las fuerzas aerodinámicas; en esta ventana –gráfico 4.45-, se debe seleccionar la opción: momentos, con lo cual se despliegan las siguientes casillas. –Gráfico 4.48-

E Force Reports		X
Options C Forces Moments C Center of Pressure	Moment Center X (m) 2.097 Y (m) -0.7307 Z (m) 0	Wall Zones = = auto piso
Print W	Match /rite	Help

Gráfico 4.48 Ventana de configuración del reporte de momentos.

Fuente: Autores

"El punto de referencia de los momentos aerodinámicos se encuentra en el centro del vehículo, a mitad de la distancia entre ejes y a la altura de la calzada"<sup>39</sup>. Por ello es necesario conocer las coordenadas de este punto –A-, con respecto al UCS, el cual corresponde en esta simulación al centro del plano cartesiano de referencia. –Gráfico 4.49-

Gráficos 4.49 Coordenadas del punto de referencia para el cálculo de los momentos aerodinámicos principales -A-



Fuente: Autores

De esta forma se establece que las coordenadas del punto de referencia para los momentos aerodinámicos son: A(2.097, -0.7307, 0)m para los ejes X,Y,Z respectivamente. Estas deben ser introducidas en la ventana de configuración de los momentos –gráfico 4.48-, luego se selecciona la zona definida como auto, al pulsar

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> DIETSCHE, Karl-Heinz, Ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. Editorial Reverte. España. 2005. 1233p. 4a.edición. Página 889

el botón –imprimir- "*print*", se despliega la siguiente información en la zona de procesos. –Gráfico 4.50-

	EAESI MAMABE
	COLAI MOMENI N-M
auto	(8.0761935 0.36629924 794.68199)

Gráfico 4.50. Reporte de los momentos aerodinámicos principales



En este gráfico se muestran los momentos aerodinámicos generados –N.m-, con una velocidad del aire de 40m/s, para los ejes X,Y,Z respectivamente

**4.5.2 Resultados gráficos.** En una simulación "*CFD*" tridimensional, resulta complejo el visualizar los resultados gráficos debido a que la zona que ocupa el espacio del fluido obstaculiza la visibilidad del resto de componentes, es por ello, y para poder visualizar los fenómenos aerodinámicos que afectan a este vehículo en movimiento, es necesario crear planos rectangulares de referencia, en los cuales se visualizarán las diferentes variables en la atmósfera adyacente al automóvil, para ello con la secuencia: superficie "surface"  $\rightarrow$  plano "plane", se despliega la ventana de creación de superficies adicionales. Gráfico 4.51

💶 Plane Surface			X
Options		Sample Density	Surfaces
<ul> <li>□ Aligned wit</li> <li>□ Aligned wit</li> <li>☑ Point and N</li> <li>□ Bounded</li> </ul>	h Surface h View Plane Iormal	Edge 1 1 Edge 2 1	auto default-interior entrada lado_a lado b
Sample Po	ints	Select Points	piso
		Reset Points	salida 🕑
Points			Normal
×0 (m) 3.25	×1 (m) 3.25	×2 [m] 3.25	i× (m) 0
y0 (m) -0.730697	y1 (m) -0.730697	y2 (m) 4.269303	iy (m) 0
z0 (m) Ø	z1 (m) 3	z2 (m) 3	iz (m) 1
New Surface Na plano-longit	ame udinal		
Cre	ate Manag	je Close	Help

Gráfico 4.51 Ventana de creación de superficies dentro del dominio computacional

Fuente: Autores

En esta ventana, se establecen los siguientes métodos para la creación de planos: planos alineados a otras superficies "*aligned with surface*", superficies alineadas con planos de vista "*aligned with view plane*", y creación de superficies mediante un punto y el vector normal al mismo "*point and normal*", las otras funciones no se encuentran disponibles en una malla tridimensional, y hacen referencia al desplazamiento de bordes y puntos para la creación de superficies.

Al elegir la opción –creación de superficies mediante un punto y el vector normal-*"point and normal"* y al escoger un vector unitario de coordenadas u (0,0,1) para x,y,z, y cualquier punto que se encuentre dentro del dominio computacional en el plano X-Y, se construye un plano longitudinal en la posición Z=0 coincidiendo este, con el plano de simetría longitudinal del objeto. Gráfico 4.52



Gráfico 4.52 Visualización del plano longitudinal construido.

Fuente: Autores

Con el mismo procedimiento, y esta vez asignando un vector normal de coordenadas u(0,1,0) en x,y,z; y un cualquier punto que se encuentre dentro del dominio computacional en el plano X-Z, se construye un plano transversal en la posición Y=-0.5, ya que este plano define el contorno transversal del vehículo. -Gráfico 4.53-



Gráfico 4.53 Visualización del plano transversal construido.

Fuente: Autores

**4.5.2.1 Vectores de velocidad absoluta.** Para mostrar los vectores de velocidad del fluido en los planos previamente configurados, conviene ilustrar el contorno del vehículo tridimensional, para que este sirva de referencia, con el procedimiento: mostrar "*display*"  $\rightarrow$  vectores "*vectors*", se abre la ventana de configuración de las opciones de visualización de los vectores, en esta se elige la opción –dibujar malla-"*draw grid*", con ello se despliega una sub ventana de configuración de esta opción, -Gráfico 4.54-

Gráfico 4.54 Ventana de configuración de las opciones de visualización del mallado



Fuente: Autores

En esta ventana se elige la opción –bordes- "*edges*" y el tipo –características-"*feature*", luego en el casillero –características de ángulo- "*feature angle*" se escoge un ángulo relativamente pequeño, en este caso 9°; ya que la saturación de las líneas del borde de la malla, aumenta mientras menor sea este valor.

Luego, al pulsar el botón –colores- "*colors*" se asignan diferentes tonos a las zonas que forman el dominio computacional, en este caso se asigna un color blanco a las zonas tipo pared y superficies.

De regreso a la ventana de configuración de la visualización de los vectores, se eligen las zonas denominadas auto y plano longitudinal, luego se especifica la magnitud que se desea visualizar, y la coloración, -en este caso vectores de velocidad cuya coloración será mostrada en función de la velocidad absoluta- a continuación se especifica la escala y el espaciado de los mismos<sup>40</sup>, tras validar la operación, se construye la gráfica requerida. -Gráficos: 4.55, 4.56, 4.57, y 4.58-



Gráfico 4.55 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plano longitudinal

Fuente: Autores

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> Valores similares a los mostrados en el apartado 3.5.2.1



Gráfico 4.56 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plano transversal

Fuente: Autores

Gráfico 4.57 Visualización de vectores de velocidad absoluta en el plano longitudinal y en el contorno frontal del vehículo







#### Fuente: Autores.

Como se observa en estos gráficos, la velocidad máxima que alcanza el aire circundante al vehículo, es de 50.84 m/s, en la parte superior de la carrocería, en la parte inferior del guardachoque delantero, y en los contornos laterales. En cambio la velocidad mínima mostrada alcanza valores cercanos a cero en la estela turbulenta formada en la parte posterior del vehículo y en el punto de estancamiento correspondiente a las zonas del auto que impactan de forma frontal con el aire en el guardachoque delantero. En el contorno transversal se muestra como el aire cambia su dirección antes de impactar contra el vehículo, esto debido a la acción del campo de presiones circundantes.

**4.5.2.2 Contornos gráficos.** Con un procedimiento similar al explicado en el apartado 3.5.2.2, solo que en esta simulación se deben escoger las zonas denominadas como –plano longitudinal- y –auto- simultáneamente, se muestran los contornos gráficos, los cuales pueden ser construidos en función de las variables mencionadas en el apartado 3.5.2.1. Como ejemplo se visualiza a continuación el contorno de presión absoluta. -Gráfico 4.59-



Gráfico 4.59 Contorno de presión absoluta

Fuente: Autores

**4.5.2.3 Líneas de trayectoria.** Con un procedimiento similar al indicado en el apartado 3.5.2.3 se muestran las líneas de corriente del fluido sobre el vehículo. Estas han sido matizadas en función de velocidad absoluta del fluido y para el valor de la presión dinámica. –Gráfico 4.60-

Gráfico 4.60 Líneas de corriente, matizadas en función de la velocidad absoluta.



Fuente: Autores

La baja velocidad que se muestra en las líneas de corriente adheridas al automóvil, es ocasionada por la influencia de la capa límite viscosa.

La variación de la presión dinámica mostrada en las líneas de corriente, se debe a la influencia de la presión en las zonas adyacentes al contorno del vehículo.

# 4.6 ANALISIS DE RESULTADOS

# 4.6.1 Fuerzas y coeficientes de arrastre.

Componentes del			2D						3	D		
arrastre	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s	60m/s	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s	60m/s
F <sub>D</sub> presión -N-	38.52	124.14	263.96	450.3	686.7	975.6	31.45	119.3	262.1	451.6	698.9	997.4
F <sub>D</sub> viscosidad -N-	4.08	16.52	37.5	67.79	107.5	156.4	8.256	27.29	60.69	109.1	172.2	250.3
F <sub>D</sub> total -N-	42.6	140.67	307.46	518	794.2	1132	39.71	146.6	322.8	560.7	871.1	1247.7
C <sub>D</sub> presión	0.31	0.25	0.237	0.227	0.22	0.219	0.254	0.241	0.235	0.228	0.226	0.223
C <sub>D</sub> viscosidad	0.03	0.033	0.033	0.034	0.034	0.035	0.066	0.055	0.054	0.055	0.056	0.056
C <sub>D</sub> total	0.344	0.284	0.27	0.261	0.256	0.254	0.321	0.296	0.289	0.283	0.281	0.279
C <sub>D</sub> medio			0.27	82					0.2	915		
C <sub>D</sub> referencia						0.2	96					
					Parái	metros d	e referei	ncia				
Área -m <sup>2</sup> -						2.02	22					
Densidad -kg/ m <sup>3</sup> -						1.23	25					
Error generado en e	ıl cálcul	o del coe:	ficiente a	erodinár	nico de	arrastre	en la sii	nulació	n bidime	ensional	: 6.01%	
Error generado en e	al cálcul	o del coe	ficiente a	erodináı	nico de	arrastre	en la sir	nulació	n tridim	ensiona	l: 1.54%	

Cuadro 4.1 Análisis de Fuerzas y coeficientes de arrastre

# 4.6.2 Fuerzas y coeficientes de sustentación.

Componentes de				2D					(*)	(D		
la sustentación	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s	60m/s	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s	60m/s
$F_L$ presión -N-	-80.96	-329.5	-742.03	-1294.3	-1994.2	-2835.7	-76.6	-163.4	-310	-519.1	-779.4	-1089.9
$F_L$ viscosidad -N-	0.36	1.35	3	5.31	8.29	12.02	0.314	1.282	2.918	5.17	8.148	11.872
$F_L$ total -N-	-80.6	-328.17	-739.03	-1288.9	-1985.9	-2823.7	-76.34	-162.1	-307.1	-514	-771.3	-1078
C <sub>L</sub> presión	-0.171	-0.174	-0.173	-0.17	-0.168	-0.167	-0.162	-0.086	-0.073	-0.07	-0.066	-0.064
C <sub>L</sub> viscosidad	7.6e-4	7.1e-4	7e-4	7e-4	7e-4	7.04e-4	6.6e-4	6.7e-4	6.8e-4	6.8e-4	6.8e-4	6.9e-4
C <sub>L</sub> total	-0.17	-0.173	-0.173	-0.17	-0.167	-0.16	-0.16	-0.085	-0.072	-0.068	-0.065	-0.063
C <sub>L</sub> medio			Ŷ	).168					-0.	0855		
					Parán	ietros de re	eferencia					
Área -m²-						7.743						
Densidad -kg/ m <sup>3</sup> -						1.225						

Cuadro 4.2 Análisis de fuerzas y coeficientes de sustentación

El valor del coeficiente aerodinámico de sustentación  $-C_{L}$ - calculado en esta simulación tiene un valor de -0.168 y -0.085, para las simulaciones en dos y tres dimensiones, respectivamente; lamentablemente no se ha podido realizar la comparación con el valor del coeficiente establecido por el fabricante, ya que este no es presentado normalmente por el mismo. Al parecer existiría un error absoluto considerable, al tener en cuenta que "el valor del coeficiente de sustentación aerodinámica  $-C_{L}$ - suele variar, en turismos entre 0.2 y  $0.5^{,,41}$ ; tal error estará directamente relacionado por la influencia que tienen sobre este coeficiente, el acabado de la parte inferior de la carrocería en donde se experimenta el denominado "efecto suelo" al haberse omitido en este ensayo los elementos que forman los bajos del automóvil.

#### 4.6.3 Momentos aerodinámicos

Momentos				2D		
	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s	60m/s
Cabeceo Mz –N.m-	18.96	167.96	414.92	798.31	1295.88	1891.75

Cuadro 4.3 Análisis de momentos aerodinámicos en la simulación bidimensional<sup>42</sup>

#### Fuente: Autores

Cuadro 4.4 Análisis de momentos aerodinámicos en la simulación tridimensional

Momentos				3D		
	10m/s	20m/s	30m/s	40m/s	50m/s	60m/s
Balanceo Mx –N.m-	-0.064	0.48	2.08	8.08	13.22	14.86
Guiñada My –N.m-	0.36	0.91	1.22	0.37	-0.022	8.06
Cabeceo Mz –N.m-	67.62	230.14	453.55	794.68	1226.61	1734.9

#### Fuente: Autores

El momento aerodinámico de mayor magnitud es el de cabeceo, el cual aumenta proporcionalmente con la velocidad del aire, los momentos de balanceo y guiñada computados en esta simulación permanecen con valores relativamente bajos.

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España. Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición. Página 174

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> En una simulación bidimensional no es posible calcular los momentos que se producen en los ejes: X e Y, -momentos de balanceo y guiñada, respectivamente-

**4.6.4 Contornos gráficos.** Para efectuar el análisis de los resultados obtenidos mediante la visualización de contornos gráficos, es necesario establecer las zonas en las que se realizará la medición. -Gráfico 4.61-



Gráfico 4.61 Zonas de medición

Fuente: Autores

**4.6.4.1 Contorno de velocidad absoluta del fluido.** De acuerdo a la información obtenida en los contornos de velocidad absoluta, tanto para el estudio bidimensional - gráfico 4.62.- y tridimensional -gráficos 4.63 y 4.64-, se muestran los valores para las zonas previamente establecidas, estos han sido calculados en relación a una velocidad de entrada de aire de 40m/s. –Cuadro 4.4-



Gráfico 4.62 Contorno de velocidad absoluta del fluido -2D-

Fuente: Autores



Gráfico 4.63 Contorno de velocidad absoluta del fluido -3D- parte frontal

Fuente: Autores



Gráfico 4.64 Contorno de velocidad absoluta del fluido -3D- parte posterior

## - Resultados computados para los contornos de velocidad absoluta del fluido.

Zona	2D -m/s-	3D -m/s-				
1. Guardachoque delantero	13.49	10.17				
2. Base del parabrisas	40.29	30.51				
3.Techo	67.09	50.84				
4. Zona de desprendimiento	40.29	30.51				
5. Zona posterior al vehículo	4.56	6.78				
6. Piso parte posterior	49.22	40.67				
7. Piso parte delantera	58.16	47.45				

Cuadro 4.5 Análisis de la velocidad del aire

#### Fuente: Autores

Como se aprecia en este cuadro, en el estudio bidimensional la velocidad del aire tiende a ser mayor para todas las zonas, esto debido a que en este análisis no se considera el desplazamiento del aire en sentido transversal, y se supone por tanto un flujo perfectamente longitudinal, lo que ocasionará además falencias en la apreciación de los resultados de presión. Esta consideración no aplica a la zona posterior del vehículo, ya que en esta existe turbulencia.

Además se aprecia que la velocidad del aire en la parte frontal y posterior del vehículo disminuye drásticamente con valores muy cercanos a 0 m/s, la mayor parte del aire es obligado a desplazarse sobre el capot y por debajo de la carrocería, en donde se acelera, debido a la disminución de la sección del conducto formado entre el piso del auto y el suelo, de acuerdo a la ecuación de la continuidad [1-17] ; en cambio el incremento de la velocidad del aire que circula sobre el techo del vehículo, se suscita debido a la transformación de energía potencial -presión estática- en energía cinética -presión dinámica- , sobre este particular se profundizará en el análisis de los contornos de presión.

El fluido permanece adherido al contorno del vehículo gracias a la influencia de la capa límite viscosa, hasta su desprendimiento forzado producido en el parabrisas

posterior en donde su velocidad disminuye paulatinamente. No obstante algunas líneas de corriente continúan adheridas al contorno de la carrocería, las cuales se desprenden una vez superado el vehículo. La diferencia de velocidad entre las líneas de corriente que se desprenden de la capa límite, provoca la formación de vórtices en la estela turbulenta, este comportamiento es análogo al suscitado en la parte inferior del vehículo, así se forman dos vórtices girando en sentido contrario en la parte más próxima al auto, como se observó en el gráfico 4.58

**4.6.4.2 Contornos de presión.** Ya que en esta simulación, al igual a lo que ocurre en los ensayos experimentales en túneles de viento el aire ingresa al dominio con velocidad, por lo que la presión de referencia en este ensayo no es la atmosférica -0 Pa en mediciones relativas-.



Gráfico 4.65 Contorno de presión dinámica 2D



Gráfico 4.66 Contorno de presión dinámica 3D parte frontal

Fuente: Autores



Gráfico 4.67. Contorno de presión dinámica 3D parte posterior

#### - Resultados computados para los contorno de presión dinámica

7						
Zona	2D –Pa-	3D –Pa-				
1. Guardachoque delantero	183.5	107.54				
1						
2. Base del parabrisas	916.69	641.33				
I I I I I I I I I I I I I I I I I I I						
3.Techo	2749.66	1602.14				
4. Zona de desprendimiento	1100	854.84				
1						
5. Zona posterior al vehículo	183.5	107.54				
1						
6. Piso parte posterior	1833.18	1068.35				
7. Piso parte delantera	2016.47	1388.62				
±.						

Cuadro 4.6 Análisis de resultados para los contornos de presión dinámica

## Fuente: Autores

En los contorno de presión dinámica -gráficos 4.65, 4.66, 4.67 - se observa un gradiente de presión que se comporta de forma directamente proporcional a la velocidad del fluido, alcanzando su valor máximo en la parte superior e inferior de la carrocería, y específicamente en las zonas en donde existe desprendimientos del flujo fuera del contorno de la carrocería -parte inferior del guardachoque delantero, punto de inflexión frontal del techo, y partes más salientes del contorno lateral-. Esto debido a la alta velocidad que adquiere el fluido en estos puntos.

La presión dinámica tiene valores muy cercanos a la presión atmosférica en la zona de estancamiento del aire, -parte frontal del guardachoque delantero, y base del parabrisas delantero- y en la estela turbulenta -zona de desprendimiento en el parabrisas trasero y la parte posterior del vehículo-.

En cambio en el contorno de presión estática -gráficos 4.68, 4.69 y 4.70 -, esta resulta inversamente proporcional a la velocidad del fluido, para la mayor parte del contorno adyacente al vehículo, donde se cumple el principio de Bernoulli [1-24] ya que el incremento de presión dinámica es compensada por disminución de la presión estática, con ello la presión total para una línea de corriente, permanece constante. Esto no ocurre en las zonas en donde existe turbulencia, porque la formación de la

misma requiere un gasto energético, el cual es absorbido de la energía cinética del fluido, o sea de la presión dinámica. En estas zonas la presión estática es relativamente baja. -Esta se aprecia con facilidad en la zona posterior al vehículo-



Gráfico 4.68 Contorno de presión estática. 2D

Fuente: Autores.



Gráfico 4.69 Contorno de presión estática. 3D parte frontal



Gráfico 4.70 Contorno de presión estática. 3D parte posterior

Fuente: Autores

## - Resultados computados para el contorno de presión estática

Cuadro 4.7 Análisis de resultados para los contornos de presión estática

Zona	2D -Pa-	3D -Pa-					
1. Guardachoque delantero	1364.36	1108.33					
2. Base del parabrisas	430.36	326.7					
3.Techo	-1437.63	-454.93					
4. Zona de desprendimiento	-270.13	-259.52					
5. Zona posterior al vehículo	-36.63	131.29					
6. Piso parte posterior	-970.63	-259.52					
7. Piso parte delantera	-737.13	-454.93					

## Fuente: Autores

El contorno de presión estática, se relaciona directamente con el coeficiente de arrastre debido a la acción de las fuerzas de presión. Así la zona de mayor presión

estática es la parte frontal del guardachoque delantero, en el punto de estancamiento; esta produce la mayor parte de la fuerza de arrastre.

En la parte superior e inferior del vehículo se producen zonas de baja presión estática. El efecto combinado de la presión estática y dinámica, para estas zonas origina el efecto suelo en un automóvil, cuanto mayor sea la presión dinámica en la parte superior de la carrocería, y menor sea esta en la parte inferior de la misma, mejor será la anti sustentación del vehículo.

Inversamente, cuando la presión estática es menor en la parte inferior del automóvil con respecto a la parte superior, de igual forma mejorará el efecto suelo, siempre y cuando estas produzcan depresión -valores negativos de presión en mediciones relativas.-

Por otro lado, en el contorno de presión total -gráficos 4.71, 4.72 y 4.73 - se percibe la influencia de la energía cinética turbulenta, si esta no existiera la presión total permanecería constante para todas las líneas de corriente.



Gráfico 4.71 Contorno de presión total 2D



Gráfico 4.72 Contorno de presión total 3D parte frontal

Fuente: Autores.



Gráfico 4.73 Contorno de presión total 3D parte posterior

Zona	2D -Pa-	3D -Pa-
1. Guardachoque	1365.3	1109.37
2. Base del parabrisas	834.06	885.36
3.Techo	1046.55	997.37
4. Zona de	515.31	549.35
5. Zona posterior al	-122.18	101.33
6. Piso parte posterior	727.81	773.36
7. Piso parte delantera	834.06	997.37

Cuadro 4.8 Análisis de resultados para los contornos de presión total

#### Fuente: Autores

La baja presión total que existe en la estela turbulenta, ocasiona el fenómeno de succión, el cual es aprovechado en diferentes competencias automovilísticas.

#### **4.7 CONCLUSIONES**

En la simulación CFD tridimensional de los fenómenos aerodinámicos que experimenta un automóvil; el proceso de preparación, adaptación y limpieza de la geometría resulta sumamente laborioso de realizar, en este trabajo se requirieron de aproximadamente veinte horas para este cometido. Por ello el costo computacional que este tipo de simulación requiere es elevado.

El procedimiento empleado para la delimitación del dominio computacional, en el cual se concibe el contorno del automóvil como un agujero en el interior del volumen que representa el túnel de viento, es la forma más fácil de lograr el mallado adecuado para esta simulación; el cual ha sido conformado por elementos triangulares para las superficies que delimitan el contorno del vehículo y elementos tetraédricos híbridos para conformar el mallado tridimensional del dominio, los elementos empleados se adaptan de forma eficiente al contorno geométrico irregular del automóvil.

En cuanto a los parámetros que definen la calidad del mallado, la distorsión en elementos bidimensionales alcanza un factor de 0.465 y en los tridimensionales 0.75, en base a estos valores, el calificativo de la malla configurada es aceptable. El factor de aplastamiento y la proporción de aspecto, para el elemento de peor calidad es 0.72 y 17.1% respectivamente, estos se encuentran dentro del límite permisible en una simulación tridimensional; prueba de ello es el corto tiempo que requiere el

proceso de cálculo CFD, el cual tarda 3 horas para converger en una solución, tras realizar apenas 145 iteraciones.

Al comparar los resultados obtenidos para las fuerzas y coeficientes de arrastre que actúan sobre este vehículo en las simulaciones en dos y tres dimensiones, con respecto al comportamiento real del vehículo -gráfico 4.74-; se aprecia que ambas aproximan los resultados a la realidad.

Gráfico 4.74 Comparación entre la magnitud de las fuerzas aerodinámicas de arrastre obtenidas en las simulaciones en dos y tres dimensiones con respecto a las reales del vehículo



Fuente: Autores

No obstante, en la simulación tridimensional se genera un error de apenas el 1.54%, con respecto al 6.01% que se obtiene en la bidimensional, esto al comparar el coeficiente aerodinámico de arrastre con su valor referencial; por ello para aproximar al máximo los resultados, es indispensable efectuar la simulación en tres dimensiones.

Efectuar la simulación aerodinámica de un automóvil en tres dimensiones, provee además de valiosa información que no es posible en simulaciones bidimensionales, como: aproximar el valor de los momentos aerodinámicos para los tres ejes –X,Y,Z-; y visualizar las diferentes variables del problema para el contorno total del automóvil; por ello se establece que las simulaciones en dos dimensiones son útiles para tener una idea referencial del comportamiento del diseño bruto de una carrocería y puede ser utilizada para observar la tendencia que adquieren las variables involucradas.

Los momentos aerodinámicos principales –cabeceo, balanceo y guiñada- son calculados en un punto referencial del dominio. De estos el más importante en función de la magnitud computada es el de cabeceo, el cual no puede ser omitido en ninguna circunstancia en el estudio del diseño de diferentes sistemas del vehículo, como: suspensión, dirección, bastidor, y frenos, ya que incide directamente en su comportamiento y fiabilidad; por otro lado para realizar el estudio de la dinámica y maniobrabilidad del automóvil la acción de estos momentos debe ser trasladada al centro de gravedad del mismo, lo cual es plenamente posible tomando en cuenta los principios físicos involucrados.

#### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Con la realización de la presente investigación se logró modelar exitosamente el comportamiento aerodinámico de un vehículo Toyota Corolla 2005 mediante la utilización de un programa computacional de dinámica de fluidos. Además se presenta de forma gráfica y explícita el flujo de aire alrededor del vehículo, así como las zonas de alta y baja presión estática que se generan en la carrocería a partir de este.

Para comprender los fenómenos aerodinámicos que experimenta un automóvil es indispensable conocer los principios físicos y matemáticos que define la dinámica de fluidos, así como las diferentes teorías que se usan para su simplificación.

Las técnicas numéricas empleadas por los programas de dinámica de fluidos computacional –CFD- expuestas en este trabajo, resumen los principios básicos en los que estos se basan y su aplicación generalizada; más no se detalla en las funciones matemáticas y los algoritmos que estos emplean.

En base a los resultados obtenidos en las simulaciones en dos y tres dimensiones se pone de manifiesto la utilidad que prestan los programas de dinámica de fluidos computacional –CFD- para aproximar con un grado de precisión aceptable las variables relacionadas; en este estudio el error inducido al calcular el coeficiente de arrastre aerodinámico del vehículo en cuestión es del 1.54%. Por otro lado el costo que se genera es bajo en relación a los ensayos experimentales, demostrándose así la alta eficiencia de estos programas de cálculo y simulación.

Sobre las experiencias suscitadas durante el desarrollo de este trabajo de investigación, es importante mencionar:

La poca experiencia en el uso de programas de cálculo en base a la utilización de técnicas numéricas, así como la falta de conocimiento de la asignatura de dinámica de fluidos, dificultaron la toma de decisiones en cuanto a los modelos matemáticos

que conviene utilizar en este tipo de simulaciones computacionales, requiriéndose investigar a profundidad la aplicación de los mismos.

El tiempo empleado en la realización de este estudio fue de aproximadamente 1000 horas, el cual se considera elevado, esto en gran parte a la falta de bibliografía especializada, así como la carencia de estudios, publicaciones y centros de investigación en nuestro medio en los que se aborden temas afines; de esta manera muchos procedimientos utilizados tuvieron que ser abalados por medio de la técnica de ensayo y error.

Por otro lado, el conocer el manejo del software de dibujo asistido por ordenador *"Autocad"* y tener experiencia en la manipulación de objetos tridimensionales, facilitaron el manejo de archivos de diferente formato, además de la configuración geométrica del problema planteado.

A continuación se enuncian las recomendaciones sugeridas.

El uso de los métodos numéricos, para modelar el comportamiento de los fenómenos físicos, son empleados cada vez con mayor precisión en diferentes ramas de la ingeniería, por ello se recomienda equipar laboratorios de estudio e investigación en este tema, los cuales interactúen con alumnos, docentes y particulares para facilitar el proceso de aprendizaje en las asignaturas relacionadas.

Los programas CFD pueden ser utilizados como medio de validación en estudios futuros relacionados con diferentes sistemas del automóvil, los cuales podrían incluir las siguientes opciones: Transferencia de calor en sistemas de refrigeración, configuración de zonas porosas para determinar la eficiencia de elementos filtrantes, comportamiento de sistemas de alimentación de combustible a alta presión y temperatura, funcionamiento de bombas centrífugas y turbocompresores, comportamiento de flujos a alta velocidad en los múltiples de admisión y escape, simulación de la fase de combustión de un motor Otto y Diesel, estudios de la acústica de diferentes elementos de la carrocería; entre muchas otras.

# **BIBLIOGRAFIA**

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

AGUDELO, María; ét Al, Método de volúmenes finitos, introducción, ejemplos y aplicaciones. Colombia. Universidad de Antioquia. Publicación. 103p. 2007.

BAKKER, André. Dinámica de fluidos computacional aplicada. EE.UU. Fluent Inc. 2002. Lectura 7.

BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Simulación numérica de flujos CFD con el programa Fluent. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2005. 68p. 1a Edición.

BALLESTEROS, Rafael. Ét al. Técnicas numéricas en mecánica de fluidos. España. Universidad de Oviedo, Área de mecánica de fluidos. 2003. 138p. 1a Edición.

CAMPOS, Rubén. Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental. España. Universidad de Oviedo.2008. 69p. Trabajo Final de Carrera.

CONNOR, J.J; BREBBIA C.A. "Finite elements techniques for fluid flow. Inglaterra. Newnes-butterworths, 1976. 162p. 1a. edición.

DIETSCHE, Karl-Heinz, ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. España Editorial Reverte. 2005. 1233p. 4a edición.

GRANVILLE, William "Cálculo diferencial e integral" Editorial Limusa, México. 2003. 686p. 35a edición.

IZQUIERDO, Francisco; et ál. Teoría de los vehículos automóviles. España. Universidad politécnica de Madrid. 2001. 554p. 2a edición

JOÃO M. Baltazar y LUÍS R. Eça. Generación de mallas estructuradas para superficies. Portugal. Instituto superior técnico Maretec. Publicación. 2006. 224p. Página 114

LEITHOLD, Louis. El Cálculo. México. Oxford University Press. 1998. 1360p. 7a edición.

McBEATH, Simon. Aerodinámica del automóvil de competición. España. Editorial Ceac. 2001. 247p. 1a edición.

MEZQUITA Font, DOLS Juan. Tratado sobre automóviles. España. Universidad politécnica de Valencia.2007. Tomo IV. 1a edición

MURRAY Spiegel. Análisis vectorial. Colombia. Mc graw hill. 1969. 222p. 2a edición.

RESNICK Robert, ét al. Física. México. Editorial Continental .1996. Vol I. 4a edición.

ROCA Vila. Introducción a la Mecánica de los fluidos. México. Editorial Limusa. 1980. 495p. 1a edición.

SEARS Francis y ZEMANSKY Mark. Física Universitaria. México. Pearson Education. 2004. Vol I. 11a edición.

SCHUC, Wólfram; ét al. Manual de la técnica del automóvil Bosch. España. Editorial Reverte. 1999. 893p. 3a edición.

TIZÓN, Juan. Generación de mallas. España. Universidad politécnica de Madrid. Publicación. Parte IV. Página 7.

TOALONGO, Manuel. Métodos y técnicas de investigación. Ecuador. Universidad del Azuay. 2004. 2a. edición

VASQUEZ, Juan .Fundamentos matemáticos de la mecánica de fluidos. España. Universidad autónoma de Madrid. 2003. 215p. 1a edición.

## **REFERENCIAS ELECTRONICAS**

ANDREW COMPUTING SERVICES [En Línea].Orientación de celdas hexaédricas, con modo Cooper. EEUU. <a href="http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/survey/sweep.jpg">http://www.andrew.cmu.edu/user/sowen/survey/sweep.jpg</a>> [Consulta: 4 de julio de 2009.]

ANSYS [En línea]. Mallado T-Grid. EEUU. < http://www.ansys.com/products/tgrid/ tgrid-spec-brochure.pdf> [Consulta 4 de Julio de 2009]

ANSYS.[En línea], Manual del usuario fluent 6.3.26<sup>--</sup>. EEUU. <<u>http://venus.imp.mx/hilarioSuperComputo/Fluent.Inc/manuals/fluent5/ug/html/nod</u> e557.htm. > [Consulta: Mayo 15 de 2009]

AGUILAR, Juliana. ESCUELA DE INGENIERIA DE ANTIOQUIA. [En línea] Flujo turbulento. Colombia. <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articuloses /conceptosbasicosmfluidos/flujotturbulento/flujo turbulento.html> [consulta: 17 Marzo 2009]

INSTITUTO NACIONAL FRANCES PARA LA INVESTIGACION EN CIENCIAS DE LA COMPUTACION. INRIA [En línea]. Francia. <a href="http://www-c.inria.fr/gamma/download/affichage.php?dir=CARS&name=toyota-corolla&last\_page=40">http://www-c.inria.fr/gamma/download/affichage.php?dir=CARS&name=toyota-corolla&last\_page=40</a>> [Consulta 5 de Enero de 2009]

KPTUNING [En línea]. Taloneras, faldones, laterales, kit bmw e87.. España. <http://www.kptuning.com/images/taloneras%20faldones%20laterales%20kit%20sport%2 0bmw%20e87%20serie%201.jpg> [consulta: 4 de junio de 2009] PROGRAMA DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL ESPACIO.[En línea] Método de mínimos cuadrados. Uruguay. <a href="http://www.cte.edu.uy/cteI/mincuad.pdf">http://www.cte.edu.uy/cteI/mincuad.pdf</a>>. [Consulta: Junio 5 de 2009]

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA NACIONAL DE ARGENTINA [En línea]. Hidrodinámica- generalidades. Argentina. <a href="http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art\_Interes/Tema3.pdf">http://www.profesores.frc.utn.edu.ar/industrial/InstalacionesIndustriales/Art\_Interes/Tema3.pdf</a>> [consulta: 02 Marzo 2009].

URBANPOWER [en línea]. Líneas de trayectoria del aire a través de un vehículo. Chile. <a href="http://static.urbanpower.cl/images/2008/06/">http://static.urbanpower.cl/images/2008/06/</a> header.jpg>. [Consulta: 23 Junio de 2009]

WIDOWINDUSTRIES [En línea] Ford Mustang Mach 3. EEUU. <a href="http://www.widowindustries.net/images/gallery/Ford%20Mustang%20">http://www.widowindustries.net/images/gallery/Ford%20Mustang%20</a> Mach%20III%20.jpg> [Consulta: 2 de junio de 2009]

WASSENBERGHH, Sam Van, Ét al. ROYAL SOCIETY [En línea], Details of materials and methods. Inglaterra. <a href="http://rsbl.royalsocietypublish">http://rsbl.royalsocietypublish</a> ing.org/content /suppl/2009 /02/20/rsbl.2008.0765.DC1/rsbl20080765supp01.pdf. >[Consulta: Mayo 24 de 2009]

# ANEXOS

# ANEXO I

Extracto del panfleto promocional del vehiculo; incluye: fotografías, caracteristicas y especificaciones.







# CARACTERISTICAS

COROLLA	8	SPORT	Ħ	Ħ	COROLLA	8	SPORT	F	ж		
INTERIOR:					SAFETY:						
AM/FM CD, 4-Speakers, Roof-Mounted Antenna	•				Dual-Stage Driver & Passenger Airbag Supplemental						
AM/FM CD, 6-Speakers, Roof-Mounted Antenna		٠	٠	٠	Restraint System (SRS)*	•	•	•	•		
Rear Seat Heater Ducts	•				Front Seatbelt Pre-Tensioners & Force Limiters	٠	٠	٠	٠		
<ul> <li>Air Conditioning, Clean Air Filter, Rear Seat Heater Ducts</li> </ul>		٠	٠	٠	All-Position 3-Point Lop & Shoulder Belts	•	•	•	•		
Fabric Seat Material	•				Adjustable "B" Pillar Shoulder Belt Anchors	٠	٠	٠	٠		
<ul> <li>Sport Fabric Seat Material</li> </ul>		٠		٠	<ul> <li>Anchor Points for Child Restraint Seats</li> </ul>	•	•	•	•		
Premium Cloth Seat Material			٠		Child Protector Rear Door Locks	٠	٠	٠	٠		
Front Bucket Seats	٠	٠	٠		Engine Immobilizer	•	٠	٠	٠		
Front Sport Seats				٠	Low Fuel, Low Washer Fluid, Door Ajar, Front Driver & Passenger						
<ul> <li>Driver Seat Recline, Cushion Height, Headrest-Vertical Adjustments</li> </ul>	٠	٠	٠	٠	Seatbelt Warning	•	•				
<ul> <li>Passenger Seat Recline, Headrest-Vertical Adjustments</li> </ul>	٠	٠	٠	٠	<ul> <li>Low Fuel, Low Washer Fluid, Door Ajar, Tire Pressure Monitoring</li> </ul>						
<ul> <li>60/40 Split Rear Bench Seat w/Fold-Down Seat Back,</li> </ul>					System, Front Driver & Passenger Seatbelt Warning			٠	٠		
Headrest-Vertical Adjustments	•	٠	٠		EXTERIOR:						
<ul> <li>Rear Bench Seat, Headrest-Vertical Adjustments</li> </ul>				٠	Full Wheel Covers	٠					
<ul> <li>Power Windows w/Driver Side Auto Down</li> </ul>			٠	٠	Aluminum Alloy Wheels		٠	٠	٠		
<ul> <li>Tachometer, Water Temperature Gauge, Outside Temperature Gauge</li> </ul>	٠				<ul> <li>Side Window Defoggers</li> </ul>	٠	٠	٠	٠		
<ul> <li>Silhouette Lighted Gauges, Tachometer, Water Temperature Gauge,</li> </ul>					<ul> <li>Electric Rear Window Defroster w/Timer</li> </ul>	٠	٠	٠	٠		
Outside Temperature Gauge		٠			Tinted Glass	٠	٠	٠	٠		
<ul> <li>Optitron Electronic Gauges, Tachometer, Water Temperature Gauge,</li> </ul>					<ul> <li>Fuel Cap Hanger</li> </ul>	٠	٠	٠	٠		
Outside Temperature Gauge			٠	٠	<ul> <li>Coloured Bumpers &amp; Bodyside Mouldings; Front &amp; Rear Splash Guards</li> </ul>	٠					
Dual Vanity Mirrors	•	٠	٠	٠	<ul> <li>Coloured Bumpers, Mirrors, Bodyside Mouldings, Full Skirt Package,</li> </ul>						
<ul> <li>Leather-Wrapped Steering Wheel</li> </ul>		٠		٠	Rear Spoiler		٠				
<ul> <li>Leather-Wrapped Shift Knob</li> </ul>				٠	<ul> <li>Coloured Bumpers, Mirrors, Bodyside Mouldings,</li> </ul>						
<ul> <li>Simulated Woodgrain Trim</li> </ul>			٠		Front & Rear Splash Guards			٠			
<ul> <li>Fabric Door Trim, Fabric Headliner</li> </ul>	٠	٠	٠	٠	<ul> <li>Coloured Bumpers, Mirrors, Bodyside Mouldings, Full Skirt Package,</li> </ul>						
Chrome Inner Door Handles		٠		٠	Unique Grille, Rear Spoiler; Power Moonroot, Moonroot Sunshade				٠		
Chrome Vent Knobs		٠	٠	٠	Power Remote-Control Mirrors	٠	٠	٠	٠		
Driver Footrest	٠	٠	٠	٠	Intermittent Wipers	٠					
Metallic Dash Accents				٠	Intermittent Wipers		٠	٠	٠		
XRS Scuff Plates				٠	Reflector-Style Halogen Headlamps	٠	٠	٠	٠		
3-Spoke Tilt Steering Wheel	٠	٠	٠	٠	Fog Lamps		٠	٠	٠		
Power Door Locks		٠	٠	٠	PACKAGES						
Power Auto Door Lock w/Shifter Activation			٠		CE PACKAGE 'B'i						
Carpet Floor Mats	٠	٠	٠	٠	<ul> <li>Air Conditioning, Clean Air Filter, Keyless Entry, Power Door Locks</li> </ul>						
CONVENIENCE:					CE PACKAGE 'C'I						
Cruise Control			٠	٠	Air Conditioning, Clean Air Filter, Keyless Entry, Power Door Locks,						
Digital Clock	٠	٠	٠	٠	Power Windows w/Driver Side Auto Down, Cruise Control	•					
Front & Rear Cup Holders	٠	٠	٠	٠	CE SPECIAL EDITION:						
Accessory Power Outlets	٠	٠	٠	٠	<ul> <li>Air Conditioning, Dust/Pollen/Deodorizing Air Filter, Keyless Entry,</li> </ul>						
Driver's Coin Case Compartment	٠	٠	٠	٠	Power Door locks, Aluminum Alloy Wheels with Wheel Locks,	•					
Door Map Pocket	٠	٠	٠	٠	Power Moonroor, Special Eathon Badging						
Front Seat Back Pocket			٠		LE PACKAGE 'B'I						
Keyless Entry		٠	٠	٠	<ul> <li>Front Seat-Mounted Side Airbags (SRS)*, Front Head/Side Curtain</li> </ul>						
Key Lockout Protection		٠	٠	٠	Airbags (SRS)*, Leather Seat Surfaces, Power Moonroof,						
<ul> <li>Illuminated Entry w/Fadeout</li> </ul>		٠	٠	٠	Learner-Wrapped Steering Wheel, Chrome Inner Door Handles, Anti-Theft System						
* Airbag Notice: The 2005 Corolla features a driver & front passenger airb	ag Su	ppler	nento	al l	Ann-Inert System						
Restraint System (SRS) which activates only in a full-frontal collision of sufficient magnitude SPORT PACKAGE 18'1											
to inflate the bags. In moderate frontal collisions, the airbags may not infli or side collision the airbags are designed not to inflate, so the primary pro by the lap and shoulder belt system. <i>Seatbelts must be worn at all times l</i>	ote; in tection by all	n a re n is p <i>occup</i>	ar rovide xants.	bd	<ul> <li>Antilock Braking System (ABS), Electronic Brake Force Distribution (EBD), Power Windows w/Driver Side Auto Down, Cruise Control, Power Moonroof</li> </ul>		•				
					Standard      Goptional						
		8	5	E	H			8	ş	E	Ħ
---	--	---------------------------------	---	---	-----------	---	--	---------------------------	---------------------------	----------------------------	------
COROLLA			8			COROLLA			8		a
MECHANICAL						DIMENSIONS	mm (in.)				
Engino 1MZ-FE	<ul> <li>1.8 Litre, 4-Cylinder, DOHC, 16-Valve, Variable Valve Timing w/intelligence (VVT-i), Stainless Steel Exhaust System</li> <li>1.8 Litre, 4-Cylinder, DOHC, 16-Valve, Variable Valve Timing w/Lift &amp; intelligence (VVTL-i)', Stainless Steel Exhaust Surtem</li> </ul>	•	•	•		Length	4530 (178.3)	•	٠	٠	٠
						Width	1700 (66.9)	٠	٠	٠	٠
						Height (Unloaded)	1480 (58.3) 1485 (58.5) 1475 (58.1)	•	•	•	•
						Wheelbase	2600 (102.4)	٠	٠	٠	٠
	Exhibitsi System				•	Tread	Front: 1480 (58.3)	•	٠	٠	٠
Compression Ratio	• 10.0:1	٠	٠	٠		Senting Conneity	Kear: 1460 (57.5)	•	•	•	•
Harranawar (kW)	• 11.5.1				•	Searing Capacity	2 145 A (5 72)	•	•	•	•
Horsepower (KW)	• 170 (127) @ 7600 rpm	•	•	•	•	Ground Clearance	143.4 (5.72)	•	•	•	
Torque (N.m.)	• 125 (170) @ 4200 rpm	٠	٠	٠			145.0 (5.71)				٠
	• 127 (172) @ 4400 rpm				٠	Headroom	Front: 998 (39.2)	•	٠	٠	
Suspension	<ul> <li>Front: Independent, MacPherson Gas Struts, Coil Springs, Stabilizer Bar</li> <li>Rear: Torsion Beam Type, Coil Springs, Stabilizer Bar</li> <li>Front: Independent, Sport Suspension, MacPherson Gas Struts, Front Strut Tower Bar, Coil Springs, Stabilizer Bar</li> <li>Rear: Sport Suspension, Torsion Beam Type, Coil Springs, Stabilizer Bar</li> </ul>	•	•		•		Kear: 943 (37.1) Front: 960 (37.8)	•	:	:	
				•		w/Moonroof	Rear: 940 (37.0)				1
				•		Legroom	Front: 1049 (41.3)				
						Logiooni	Rear: 898 (35.4)				
						Shoulder Room	Front: 1350 (53.1)	•	•	•	•
							Rear: 1359 (53.5)	•	٠	٠	•
						GROSS VEHICLE WEIGHT	t kg (lb)				
Drivetrain	Front Wheel Drive		•	•	•		1625 (3585)	٠	٠	٠	
Transmission	<ul> <li>5-Speed, Manual, Overdrive</li> <li>4-Speed, Automatic, ECT, Overdrive,</li> </ul>		•				1635 (3605)				٠
		- T				CURB WEIGHT	kg (lb)				
	Overdrive Cancel Switch	•	•	٠			Manual: 1145 (2530)	•			
	<ul> <li>6-Speed, Manual, Overdrive</li> </ul>				٠		Automatic: 1175 (2595) Manual: 1155 (2550)	•			
Brakes	<ul> <li>Power-Assisted, Front Ventilated Discs, Rear Drums</li> <li>Power-Assisted, Antilock Braking System (ABS), Electronic Brake Force Distribution (EBD), Front Ventilated Discs, Rear Drums</li> <li>Power-Assisted, Antilock Braking System (ABS), Electronic Brake Force Distribution (EBD), Front Ventilated Discs, Rear Discs</li> <li>Antilock Braking System (ABS),</li> </ul>	•					Automatic: 1185 (2615)		•	•	
			٠				Manual: 1210 (2670)				•
				•		TOWING CAPACITY	kg (lb)				
							680 (1500)	٠	٠	٠	٠
						CARGO CAPACITY	m² (cu.ft.)				
							0.39 (13.6)	•	٠	٠	•
						COEFFICIENT OF DRAG	¢d				
					•		0.270 m (ft )	•	•	•	•
						TORNINO CIRCLE	10.7 (35.2)		•		
	Electronic Brake Force Distribution (EBD)		٠			FUEL CAPACITY	litres (ad)		-	-	
Steering	<ul> <li>Power Steering, Rack &amp; Pinion</li> </ul>	٠	٠	٠	٠		50.0 (11.0)	٠	٠	٠	•
Tires	P185/65R15, All-Season Radials     P195/65R15, All-Season Radials     P195/65R15, All-Season Radials	•				FUEL CONSUMPTION RA	TING**				
			•	•			L /100 km mpg				
• F195/35K16, Summer Tires     • - Standard			_		•	City/Highway					
						Manual	7.1/5.3 40/53	•	•		
						Automatic	8.1/5.8 35/49				•
					** 0	rad on 2004 model was date to	an your Dealer for details). These	arthur	-	-	
					on cor	the Government of Canada's app isumption of this vehicle may var	roved criteria and testing method: y. Refer to the Government of Ca	estim ;. The nada p	ates a actua public	are bo al fuel ation	1560
		erGuide Fuel Consumption Guide.									

## **ESPECIFICACIONES**

## ANEXO II

## Especificaciones relevantes del ordenador utilizado en las simulaciones:

Designación: Computador personal Hewlett Packard HP Pavilion dv2000

Procesador: Intel (R) Core (TM) 2 Duo T5550 1.83GHz

Sistema operativo: Windows XP Profesional Service Pack 2

Memoria: 3 GB

Capacidad disco duro: 300 GB (En partición 80 GB)