

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DEL CARENADO DE UN
AUTOMÓVIL FORMULA SAE**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela

por el Bachiller:

Julio Ernesto Engelke Larrazábal

Para optar al título de

Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**DISEÑO DEL CARENADO DE UN
AUTOMÓVIL FORMULA SAE**

Tutor Académico: **Prof. Julio Segura Arribas**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Bachiller:

Julio Ernesto Engelke Larrazábal

Para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Caracas, 2009



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA MECANICA
DEPARTAMENTO DE ENERGETICA



Caracas, 09 de junio de 2.009

ACTA

Los abajo firmantes, miembros del jurado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el bachiller:

JULIO ENGELKE

Titulado:

“DISEÑO DEL CARENADO DE UN AUTOMOVIL FORMULA SAE”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudio conducente al Título de Ingeniero Mecánico.

Prof. Josué León
Jurado



Prof. Carlos Moreno
Jurado

Prof. Julio Segura
Tutor

DEDICATORIA

A la perseverancia y a la paciencia...

AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer a mi madre por su apoyo incondicional en todo momento, por la formación y valores que me ha dado.

A mis demás allegados quienes de alguna manera han aportado en mi crecimiento.

A mis amistades por la compañía a lo largo de mi vida.

A todos aquellos profesores que van más allá de la enseñanza en las aulas.

Al Team Formula SAE UCV por dar sentido a mi curso en esta carrera.

Engelke Larrazábal, Julio E.
DISEÑO DEL CARENADO DE UN AUTOMÓVIL FORMULA SAE

Tutor académico: Prof. Julio Segura Arribas

**Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica.**

Año 2009. 124 pág.

Palabras Claves: Carenado, *Formula SAE UCV*, Diseño, Estética, Aerodinámica, Mecánica de Fluidos, Diseño Asistido por Computador (CAD).

Resumen: El presente tuvo como objetivo primordial diseñar el carenado para el vehículo *Formula SAE UCV 2009*, previendo facilidad en su construcción y sencillez en su montaje y desmontaje, además de cubrir los aspectos estéticos y aerodinámicos propios de todo carenado, sin incluir los aspectos térmicos requeridos en los sistemas de enfriamiento por aire.

La facilidad en la construcción del carenado es importante debido a que éste suele reproducirse en fibra de vidrio, por lo cual amerita un molde con la geometría concebida. Entonces, es necesario que las piezas que conforman el carenado puedan desmoldarse y que, además, se garantice la mayor similitud posible entre el modelo en CAD y el producto obtenido.

La sencillez en su diseño se refiere a que las piezas culminadas que conforman el carenado deben poder montarse y desmontarse sin muchas complicaciones ya que éstas deben ser removidas del chasis o resto del automóvil bien sea por inspección de los jueces en la competencia o bien para intervenir en la mecánica del automóvil.

Los aspectos estéticos y aerodinámicos son el corazón de este trabajo. En cuanto a la estética por lo agradable que se desea sea el automóvil a la vista, pues el cómo luce un automóvil puede influir notablemente en qué opinar respecto al mismo; es decir, la primera impresión del automóvil se rige por su apariencia. Y por la aerodinámica porque resulta ser una característica de interés en todo bólido, siendo ésta la que contribuye en temas como el ahorro de combustible, adherencia del automóvil a la pista, entre otros.

En este trabajo no se pretendió la obtención de datos como coeficiente de arrastre, fuerza de sustentación, entre otros, para describir el desempeño aerodinámico como tal de los carenados sino para ser usados como valores referenciales y con ellos seleccionar, por medio de comparación, el mejor de los varios carenados que se proponen. La selección resulta de la comparación mediante una tabla en la que se consideran varios aspectos que son reflejados por datos geométricos y los provenientes de las simulaciones computacionales de dinámica de fluidos. Los carenados que se proponen deben ser aplicables a la configuración del automóvil y deben también cumplir con las normas preestablecidas por SAE Internacional.

Engelke Larrazábal, Julio E.
DESIGN OF THE BODYWORK OF A CAR FORMULA SAE

Academic tutor: Prof. Julio Segura Arribas
Caracas, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería.
Escuela de Ingeniería Mecánica.

Year 2009. 124 pag.

Key Words: Bodywork, *Formula SAE UCV*, Design, Aesthetic, Aerodynamic, Mechanics of Fluids, Computer Aided Design (CAD).

Summary: The present had as basic aim to design the bodywork for the vehicle Formula SAE UCV 2009, foreseeing facility in his construction and simplicity in his assembly and disassembly, in addition, covering the aesthetic and aerodynamic own aspects of some bodywork, without including the thermal aspects needed in the systems of cooling for air. The facility in the construction of the bodywork is important due to the fact that this one is in the habit of reproducing in glass fiber, for which he deserves a mold with the geometry wished. Then, it is necessary that the pieces that shape the bodywork could mold out and that, in addition, the major possible similarity is guaranteed between the model in CAD and the obtained product.

The simplicity in his design is because the pieces that shape the bodywork have to be able to be mounted and dismount without many complications since these must be removed of the chassis or rest of the car for inspection of the judges in the competition or to intervene in the mechanics of the car. The aesthetic and aerodynamic aspects are the heart of this work. The aesthetics because is wished that the car be agreeable to the sight, how may be seen it can influence notably in what to think about the car; the first impression of the car is ruled by his appearance. And the aerodynamics because it is a characteristic of interest in any race car, by the contribution in topics as the saving of fuel, adherence of the car to the track, between others.

In this work the obtaining of information as drag coefficient, lift force, between others, was not claimed to describe the aerodynamic performance as such of the bodyworks but yes to be used as referential values and with them to select, by means of comparison, the best of several bodyworks who propose. The selection is product from the comparison by means of a table where are considered aspects that are reflected by geometric information and by the simulations of dynamics of fluids. The bodyworks who propose must be applicable to the configuration of the car and have to expire also with the pre-established procedure for International SAE.

CONTENIDO

Página

CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES DEL ESTUDIO	1
1.1 Introducción	2
1.2 Motivación	3
1.3 Tema	4
1.3.1 Antecedentes	4
1.3.2 Planteamiento del Problema	5
1.4 Objetivos y Alcances	5
1.4.1 Objetivo General	5
1.4.2 Objetivos Específicos	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	7
2.1 Teoría Aerodinámica	8
2.1.1 Introducción	8
2.1.2 Teoría Aerodinámica de Perfiles	10
2.1.2.1 Aerodinámica Subsónica	10
2.1.2.2 Principios sobre la Sustentación en Perfiles, Flujo Bidimensional	11
2.1.2.3 Determinación de las Fórmulas de Sustentación y Resistencia para Perfiles	13
2.1.2.4 Sustentación y Estabilidad	15
2.1.3 Fenómeno de Compresibilidad	17
2.1.4 Aplicación en Diseño de Automóviles	17
2.1.4.1 Introducción	17
2.1.4.2 Coeficiente de Arrastre o de Resistencia	18
2.2 Apariencia y Estética	24
2.2.1 Introducción	24
2.2.2 Diseño	24
2.2.2.1 Algunos Puntos de Vista	26
2.2.3 Forma	27
2.2.3.1 Clasificación de las Formas	27
2.2.4 Estética	28
2.2.5 Diseño Automotriz	29
2.2.5.1 Introducción	29
2.2.5.2 Diseño Exterior	30
2.2.5.3 Diseño Interior	31
2.2.5.4 Diseño del Color y Detalles	32
2.3 Método de Construcción del Carenado	34
2.3.1 Introducción	34
2.3.2 Modelado en 3D de la Geometría del Carenado	35
2.3.3 Creación del Pre-molde	36
2.3.3.1 Impresión de Secciones de la Geometría del Carenado	37
2.3.3.2 Preparación de las Secciones en Madera	37
2.3.3.3 Armado del Esqueleto	38
2.3.3.4 Relleno del Esqueleto	38
2.3.3.5 Preparación de la Superficie	39
2.3.4 Creación del Molde	40
2.3.5 Creación de las Piezas que componen el Carenado	41

CAPÍTULO III: PROCESO DE DISEÑO DEL CARENADO	42
3.1 Diagrama del Proceso de Diseño del Carenado	43
3.2 Descripción del Diagrama del Proceso de Diseño del Carenado	44
3.2.1 Ensamble Digital del Automóvil <i>Formula SAE UCV</i>	44
3.2.2.1 Generación de Geometría de cada Carenado e Identificación de Criterios de Selección	45
3.2.2.2 Generación o Modificación de Geometría de Referencia lista para Simular	45
3.2.2.3 Toma de Decisiones	52
3.2.3.1 Preparación del Carenado para ser Simulado	52
3.2.3.1.1 Simulación de la Geometría de Referencia o del Carenado	54
3.2.3.1.1.1 Introducción	54
3.2.3.1.1.2 Etapa de Pre-procesamiento	56
3.2.3.1.1.3 Etapa de Procesamiento	60
3.2.3.1.1.4 Etapa de Post-procesamiento	61
3.2.3.1.2 Recolección de Resultados de la Simulación	61
3.2.3.1.3 Identificación y Jerarquización de Criterios de Desempeño Aerodinámico	62
3.2.3.1.4 Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico	64
3.2.3.1.5 Análisis y/o Comparación de Resultados	65
3.2.3.2 Preparación del Carenado para ser Presentado y Juzgado por Apariencia	66
3.2.3.2.1 Votaciones sobre Apariencia	73
3.2.3.2.2 Recolección de Resultados de las Votaciones sobre Apariencia	73
3.2.3.3 Observación del Carenado para ser Juzgado por Facilidad de Construcción	74
3.2.3.3.1 Estimaciones sobre Facilidad de Construcción	74
3.2.3.3.2 Recolección de Resultados de las Estimaciones sobre Facilidad de Construcción	74
3.2.4 Jerarquización de Criterios de Selección del Carenado	75
3.2.5 Evaluación de Criterios de Selección del Carenado	76
3.2.6 Selección del Carenado	77
CAPÍTULO IV: RESULTADOS	78
4.1 Resultados Previos	79
4.1.1 Recolección de Resultados de la Simulación	79
4.1.1.1 Geometría de Referencia	79
4.1.1.2 Carenado	85
4.1.1.2.1 Etapa de Pre-procesamiento	85
4.1.1.2.2 Etapa de Procesamiento	86
4.1.1.2.2 Etapa de Post-procesamiento	93
4.1.2 Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico	94
4.2.2.1 Visualizaciones	103
4.1.3 Recolección de Resultados de las Votaciones sobre Apariencia	109
4.1.4 Recolección de Resultados de las Estimaciones sobre Facilidad de Construcción	109
4.2 Resultados Finales	110
4.2.1 Evaluación de Criterios de Selección del Carenado	110
4.2.2 Selección del Carenado	111
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS	112
5.1 Etapa de Pre-procesamiento	113
5.2 Etapa de Procesamiento	113

5.3 Etapa de Post-procesamiento	114
5.3.1 Fuerza de Arrastre	114
5.3.2 Fuerza de Sustentación	114
5.3.3 Momento de Cabeceo	115
5.3.4 Máxima y Mínima Presión en el Volumen de Control	116
5.3.5 Máxima y Mínima Velocidad en el Volumen de Control	116
5.3.6 Coeficiente de Arrastre	117
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES	118
CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES	120
BIBLIOGRAFÍA	122

CONTENIDO DE FIGURAS

	Página	
1.1	Logos de <i>Formula SAE</i> y SAE International	2
2.1	Buen perfil fluido-dinámico: Tiburón Blanco	8
2.2	Fenómeno fluido-dinámico: Tormenta de arena desde África hacia las Islas Canarias	8
2.3	Ensayo de un Mercedes-Benz en túnel de viento	9
2.4	Flujo en estudio	10
2.5	Flujo en perfil simétrico	11
2.6	Flujo en perfil asimétrico	12
2.7	Ángulo de ataque	12
2.8	Ángulo de ataque grande	13
2.9	Experimento de Rayleigh sobre un cilindro con rotación	13
2.10	Equilibrio de fuerzas en un avión durante un viraje	15
2.11	Equilibrio de fuerzas en un automóvil durante un viraje	16
2.12	Mercedez-Benz de 1951	17
2.13	Ensayo de un Mercedes-Benz en túnel de viento, sobre básculas	19
2.14	Simulación por computadora de la aerodinámica de un Sauber Petronas C23	20
2.15	Simulación por computadora de la aerodinámica de un GM Opel Astra 2004	20
2.16	Distribución de consumo energético en un camión Iveco con aerodinámica mejorada	22
2.17	Vehículo de pasajeros ultra aerodinámico y muy ligero: Aptera Motors, modelo e2	23
2.18	Vehículo de competencia: Fórmula 1 de Mercedes-Benz	23
2.19	Automóviles del mismo estilo: Izquierda, Chery QQ. Derecha, Mini Cooper	29
2.20	Automóviles vistosos: Izquierda, Audi R8. Derecha, Lamborghini Murciélago LP640	30
2.21	Dibujos manuales y digitales	30
2.22	Modelo en arcilla del BMW 1 Series Convertible	31
2.23	Modelos en arcilla de un Mercedes-Benz concepto	31
2.24	Bosquejos del diseño interior del BMW 1 Series Convertible	32
2.25	Parte del diseño interior del BMW Z4	32
2.26	Carenado que sería para el prototipo del <i>Formula SAE UCV 2008</i>	34
2.27	Modelado en 3D de un carenado candidato	35
2.28	Planificación del esqueleto, en dibujos digitales	36
2.29	Planos de las secciones	37
2.30	Secciones ya cortadas en madera	37
2.31	Dibujo digital de los esqueletos para el pre-molde	38
2.32	Relleno del esqueleto con poliuretano	39
2.33	Pre-moldes en preparación de superficies	39
2.34	Pre-moldes con superficies preparadas	40
2.35	De izquierda a derecha, representación de: pre-molde, molde, pieza final	41
3.1	Dibujo digital del ensamble sin carenado del automóvil <i>Formula SAE UCV</i>	44
3.2	Los cinco carenados candidatos	45
3.3	Malla y líneas de corriente en una bala	46
3.4	Simulación de rueda en traslación y en rotación	46
3.5	Simulación de automóvil, con ruedas sin rotación	46
3.6	Simulación de automóvil, con ruedas en rotación	47

3.7	Traslación paralela o perpendicular al flujo	48
3.8	Traslación paralela al flujo	48
3.9	Traslación perpendicular al flujo	48
3.10	Traslación perpendicular al flujo	48
3.11	Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría	49
3.12	Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría	49
3.13	Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría	49
3.14	Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría	49
3.15	Traslación paralela al flujo y tendencia de sustentación	50
3.16	Traslación paralela al flujo y tendencia de sustentación	50
3.17	Simulaciones con y sin rugosidad, para “túneles de viento virtuales” de 12 y 15 metros	51
3.18	Dibujo del carenado a partir del ensamble del prototipo <i>Formula SAE UCV 2009</i>	52
3.19	Ruedas, motor y casco del piloto en el mismo archivo del dibujo del carenado	53
3.20	Túnel de viento virtual	53
3.21	Conjunto de módulos del <i>software</i> de simulación	55
3.22	Pre-procesamiento: obtención de geometría, mallado y suministro de datos	57
3.23	Paralelepípedo que encierra al carenado junto con ruedas y casco del piloto	58
3.24	Ubicación aproximada del centro de gravedad del automóvil	58
3.25	Despeje superior y lateral entre carenado y Túnel Virtual de Viento	58
3.26	Ubicación aproximada del automóvil dentro del túnel	59
3.27	Despeje aproximado hacia adelante y hacia atrás del automóvil en el túnel	59
3.28	Vistas ortogonales del carenado A	67
3.29	Vistas ortogonales del carenado B	68
3.30	Vistas ortogonales del carenado C	69
3.31	Vistas ortogonales del carenado D	70
3.32	Vistas ortogonales del carenado E	71
3.33	Carenado A	72
3.34	Carenado B	72
3.35	Carenado C	72
3.36	Carenado D	73
3.37	Carenado E	73
4.1	Visualizaciones en los Carenados: Gradientes de Presiones	103
4.2	Visualizaciones en los Carenados: Vectores de Velocidad	104
4.3	Visualizaciones en los Carenados: Líneas de Flujo	105
4.4	Visualizaciones del Carenado D: Gradiente de Presiones y Líneas de Flujo	106
4.5	Visualizaciones del Carenado D: Vectores de Velocidad	107
4.6	Visualizaciones del Carenado D: Vectores de Velocidad	108

CONTENIDO DE GRÁFICAS

	Página
2.1 C_L contra ángulos de ataque	14
2.2 Polar del perfil	15
2.3 Dependencia del coeficiente de fricción según número de Reynolds	18
2.4 Influencia de la forma de la carrocería y de la velocidad sobre el valor de C_x	18
2.5 Potencia gastada en el avance de un automóvil, a 130 km/h en autopista	21
2.6 Potencia gastada por un automóvil en ciudad	21
2.7 Proporción en el gasto de potencia	22
4.1 Fuerza de Arrastre (N) Vs. Número de Iteraciones; a 10 m/s	87
4.2 Fuerza de Sustentación (N) Vs. Número de Iteraciones; a 10 m/s	87
4.3 Momento de Cabeceo (N.m) Vs. Número de Iteraciones; a 10 m/s	87
4.4 Fuerza de Arrastre (N) Vs. Número de Iteraciones; a 20 m/s	89
4.5 Fuerza de Sustentación (N) Vs. Número de Iteraciones; a 20 m/s	89
4.6 Momento de Cabeceo (N.m) Vs. Número de Iteraciones; a 20 m/s	89
4.7 Fuerza de Arrastre (N) Vs. Número de Iteraciones; a 30 m/s	91
4.8 Fuerza de Sustentación (N) Vs. Número de Iteraciones; a 30 m/s	91
4.9 Momento de Cabeceo (N.m) Vs. Número de Iteraciones; a 30 m/s	91
4.10 Fuerza de Arrastre en función de la Velocidad	96
4.11 Fuerza de Sustentación en función de la Velocidad	98
4.12 Momento de Cabeceo en función de la Velocidad	100
4.13 Coeficiente de Arrastre C_D	101

CAPÍTULO I: CONSIDERACIONES GENERALES DEL ESTUDIO

1.1 Introducción

Formula SAE identifica una competencia estudiantil, patrocinada por la Sociedad de Ingenieros Automotrices y efectuada desde 1978, en la que se evalúa el diseño, la construcción y la operación de un automóvil monoplace.



Figura 1.1. Logos de *Formula SAE* y SAE International

El concepto de la competencia de *Formula SAE* consiste en que una compañía ficticia de manufactura contrata a un equipo de diseño conformado por estudiantes para desarrollar un vehículo de carreras. El prototipo de dicho vehículo de carreras es evaluado por su potencial como producto. *Formula SAE* engloba aspectos tales como investigación, diseño, manufactura, prueba, desarrollo, mercadeo, gerencia y gestión de fondos. Por normativa, las características del chasis y del motor están limitadas, así se evalúan el conocimiento y la creatividad de los estudiantes. El automóvil debe ser diseñado y construido en un período de un año y debe ser llevado a la competencia anual con la finalidad de ser juzgado y comparado con aproximadamente 120 vehículos de otras universidades de todo el mundo.

Cada equipo diseña, construye y opera un prototipo basado en una serie de normas, cuyo propósito es garantizar la seguridad en la pista (los vehículos son piloteados por los mismos estudiantes), y el equipo debe promover soluciones prácticas a los problemas que se presenten. Al principio de la competencia, los vehículos son sometidos a inspección técnica. Se comprueban la capacidad de frenado, la estabilidad del bólido y el nivel de ruido antes de que los vehículos participen. Los prototipos son evaluados en una serie de diferentes eventos, cuya puntuación es la siguiente:

Evento	Puntuación máxima
Diseño (<i>design</i>)	150
Análisis de Costos y Manufactura (<i>cost and manufacturing analysis</i>)	100
Presentación (<i>presentation</i>)	75
Aceleración (<i>acceleration</i>)	75
Zigzaguo (<i>skidpad</i>)	50
Características de Desempeño (<i>autocross</i>)	150
Consumo de Combustible (<i>fuel economy</i>)	50
Resistencia (<i>endurance</i>)	350
	Total 1000

Aparte de estos eventos, varios patrocinantes de la competición proveen de premios al desarrollo de diseños más avanzados, por ejemplo, innovaciones en el uso de electrónica, resistencia a impactos, etc. Hoy, la competición se ha expandido a Inglaterra (*Formula Student*), Australia (*Formula SAE Australasia*), Brasil, Japón, Alemania e Italia, entre otros países.

1.2 Motivación

El equipo *Formula SAE UCV* ha participado, en la competencia *Formula Series* realizada cada mes de mayo en los Estados Unidos, desde hace ya cuatro años: 2005, 2006, 2007 y 2008; incrementando año tras año su experiencia a tal punto de haber sido la segunda universidad latinoamericana, así como la primera venezolana, en haber recibido premio alguno en cualquiera de las diferentes pruebas realizadas en dicha competencia entre 120 universidades representantes de todo el mundo.

Para los mencionados cuatro años, el prototipo del equipo *Formula SAE UCV* ha sido, en cada oportunidad, provisto de un carenado (según la segunda acepción de la Real Academia Española de la Lengua "carenado: revestimiento de fibra de vidrio, plástico u otro material que se adapta a las motocicletas y a algunos bólidos con fines ornamentales y aerodinámicos") cumpliendo así con uno de los requisitos del vehículo contemplados para dicha competencia. Los requerimientos que rigen el

carenado pueden encontrarse en la parte *General Design Requirements*, en *Body and Styling* de las normas de competencia SAE.

Estos carenados se han diseñado, principalmente, siguiendo la estética de las líneas que mejor se ajustan a la geometría que debajo de ellos se encuentra y, de cierta forma, por apreciación de la aerodinámica que éstos puedan tener. Claro está, también han sido relevantes en el diseño factores como simplicidad de manufactura, creación del molde para el posterior desmolde de las piezas, entre otros.

En fin, para la competencia a celebrarse en mayo del 2009 y a partir de ésta, se desea que el prototipo realizado por el equipo *Formula SAE UCV* cuente con un carenado que, además de cuidar de la estética como hasta ahora ha sido, cumpla con mejores cualidades y entre otras características una muy importante: la aerodinámica.

1.3 Tema

1.3.1 Antecedentes

Además de referencias reconocidas en el ámbito de aerodinámica de automóviles, tales como Katz (1995), dos trabajos son de un interés particular en el caso de automóviles Formula SAE: Jalad y Longnecker (2001) y Melo (2004).

Jalad y Longnecker (2001) de la Universidad Tecnológica de Lawrence, realizaron un estudio experimental en el que tomaron en consideración ciertos parámetros de diseño para un carenado, tales como el arrastre, coeficiente de arrastre, área frontal, sustentación, coeficiente de sustentación, fuerza lateral relativa al peso (*lateral g-force*), aerodinámica interna, entre otros. En general, se comparan varios de dichos parámetros entre dos bólidos Formula SAE, el de 1999 y el del 2000 de la propia universidad.

Melo (2004) realiza una evaluación, mas no un diseño, por medio de análisis numérico (computacional): “para los efectos de este estudio se seleccionó el vehículo FSAE-USB 2003 y se utilizó el código de simulación CFX-5.5.1, con el fin de estudiar su comportamiento aerodinámico y proponer mejoras para el diseño del

vehículo, que permitan mejorar su comportamiento dinámico en condiciones de competencia.”

1.3.2 Planteamiento del Problema

El “evento de diseño” (*design event*) de Formula SAE, en el que se expone el diseño de los diversos componentes del automóvil y sus cualidades, basándose en parámetros tales como: funcionalidad, materiales, procesos de manufactura, peso, economía, etc., es de gran importancia en la puntuación. A medida que el equipo sea capaz de desarrollar e innovar en su diseño obtienen mayor puntuación y hasta en algunos casos reconocimientos y remuneraciones monetarias.

Debido a que los carenados de los cuatro prototipos de Formula SAE construidos previamente, en la Universidad Central de Venezuela, no se han cuantificado los parámetros aerodinámicos (ni experimental ni computacionalmente) sino que se han basado más que todo en estética, resistencia y facilidad de construcción, montaje y desmontaje, se teme a que no haya un aprovechamiento adecuado de carácter fluido-dinámico como para disminuir la carga aerodinámica y mejorar los sistemas de enfriamiento por aire.

Es por todo lo antes expuesto que se necesita realizar con mediciones experimentales o con simulaciones computacionales de modelos que cuantifiquen el comportamiento aerodinámico, con el fin de obtener un equilibrio entre los aspectos funcionales, estéticos y aerodinámicos. Para este trabajo se optó por las simulaciones computacionales.

1.4 Objetivos y Alcances

1.4.1 Objetivo General

Diseñar el carenado para el vehículo *Formula SAE UCV 2009*, previendo facilidad en su construcción y sencillez en su montaje y desmontaje, además de cubrir

los aspectos estéticos y aerodinámicos propios de todo carenado, sin incluir los aspectos térmicos requeridos en los sistemas de enfriamiento por aire.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Actualizar la revisión bibliográfica de los tópicos involucrados
- Adiestrarse en la utilización del *software* de Dinámica de Fluidos Computacional a utilizar
- Identificar los parámetros fluido-dinámicos más significativos (coeficiente de arrastre, fuerza de sustentación, etc)
- Analizar los aspectos geométricos relevantes con implicación aerodinámica
- Seleccionar el modelo físico-matemático-numérico a utilizar en las simulaciones de los diseños del carenado (modelo de turbulencia, entre muchos otros)
- Determinar las condiciones de contorno para las referidas simulaciones
- Elaborar no menos de tres diseños de carenado en CAD que se ajusten, tanto a los requerimientos de la Formula SAE como a los del equipo *Formula SAE UCV*
- Evaluar los diseños elaborados mediante simulaciones computacionales
- Analizar los resultados de las simulaciones mencionadas
- Hacer una tabla comparativa entre los diseños considerados, en la que se evalúen los aspectos generales más relevantes
- Seleccionar el mejor diseño de carenado, según los resultados de la tabla comparativa

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

Teoría Aerodinámica

2.1.1 Introducción

En la misma naturaleza se encuentran perfiles fluido-dinámicos; por ejemplo, en el caso de los peces se tiene como verdaderamente sorprendentes ya que su forma se apoya en los principios más exactos en cuanto a mínima resistencia al avance en fluidos.



Figura 2.1. Buen perfil fluido-dinámico: Tiburón Blanco

Algunos reptiles no son la excepción y presentan formas muy aerodinámicas, claro, con algunas modificaciones al perfil teórico matemático, puesto que se debe tomar en cuenta sus propias necesidades de subsistencia y de alimentación.

También pueden apreciarse fenómenos de carácter típicamente fluido-dinámico en situaciones cotidianas y en otras no tan cotidianas, como pudiera ser, por ejemplo, en una tormenta de arena.



Figura 2.2. Fenómeno fluido-dinámico: Tormenta de arena desde África hacia las Islas Canarias

Así pues, se hacen importantes los provechos que el hombre puede sacar a las propiedades de los fluidos dando a los artefactos una geometría adecuada para el fin por el cual se crean; entre dichos artefactos pueden mencionarse los veleros en barcos, helicópteros, submarinos, convertidores de energía eólica a otro tipo de energía, y muchas cosas más.

En la actualidad se hace relevante el ahorro de energía en el parque automotriz, sea por los elevados costos del combustible o por el cuidado que el medio ambiente amerita.

Lo anterior implica crear automóviles más compactos, de menor peso y con formas que aprovechen de la mejor manera posible el flujo de aire que le circunda, tanto para su rendimiento aerodinámico como para sus sistemas de admisión de aire hacia las partes del motor que lo requieran. Se hace entender entonces por qué cada vez se hace más riguroso el estudio de la aerodinámica en los automóviles; en general, se busca la optimización de los automóviles como máquinas mecánicas que son.



Figura 2.3. Ensayo de un Mercedes-Benz en túnel de viento

2.1.2 Teoría Aerodinámica de Perfiles

2.1.2.1 Aerodinámica Subsónica

Los problemas del vuelo supersónico eran predominantemente en el campo de la aeronáutica. La hipótesis de partida para los análisis de los perfiles subsónicos era que se consideraba el aire como incompresible. Esto implicaba que la densidad del aire variaba con la presión y la temperatura pero no con la velocidad. En estudios posteriores se vio que para grandes velocidades se presentaban problemas con el control de las aeronaves y casos de oscilaciones irregulares. En los laboratorios se determinó que estos fenómenos se debían a que el aire es compresible.

La parte comentada anteriormente en el sentido de considerar el aire incompresible, es válida para velocidades del orden de 480 km/h.

Para iniciar el estudio de la sustentación, véase el caso de un tubo (figura 2.4) por el que circula aire.

La masa de aire que pasa por AA y BB será igual a la CC, pero para mantener la continuidad con un fluido incompresible, la velocidad debe variar inversamente con el área de la sección transversal.

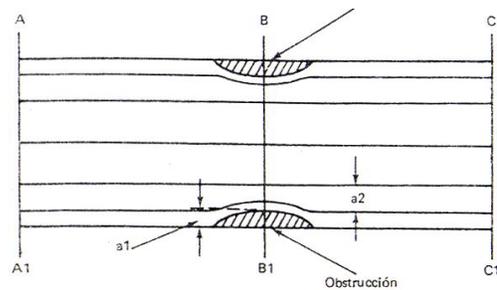


Figura 2.4. Flujo en estudio

El teorema de Bernoulli dice:

$$p + \rho \cdot (V^2/2) = \text{Cte} \quad \text{Ec. 2.1}$$

p = Presión externa o estática sobre el fluido.

ρ = Densidad del fluido.

V = Velocidad del fluido.

Se observa que cuando la velocidad es baja, la presión es alta y viceversa (ver figura 2.4), ya que la separación de las líneas de corriente cambia con la obstrucción. Sobre la ecuación 2.1 se harán análisis posteriores.

2.1.2.2 Principios sobre la Sustentación en Perfiles, Flujo Bidimensional

Para empezar el análisis supóngase un perfil simétrico, el cual está sujeto a un flujo (ver figura 2.5).

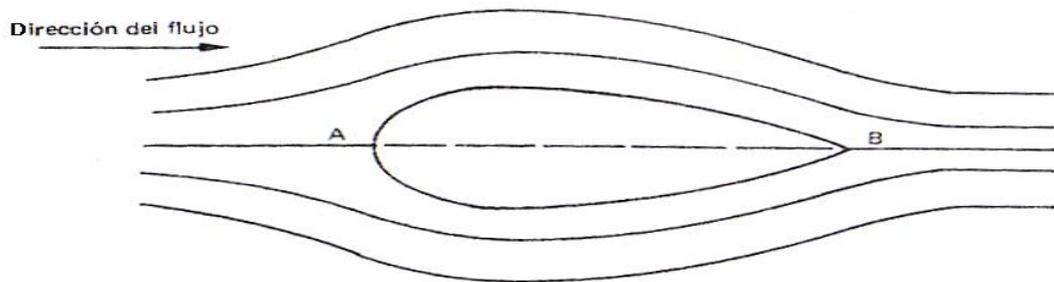


Figura 2.5. Flujo en perfil simétrico

Se observa que el flujo a lo largo del perfil de las trayectorias, o sea, las líneas de corriente, se separa siguiendo la forma de las superficies tanto superior como inferior, para después volver a sus trayectorias básicas. Sin embargo, es interesante analizar la línea de corriente central, la cual chocará con el extremo delantero. Como consecuencia del impacto su velocidad se reducirá a cero. Es lógico suponer que dicha línea de corriente se dividirá y seguirá los contornos tanto superior como inferior y finalmente se reunirá en el borde de salida. Los puntos A y B de la figura 2.5, se denominan puntos de estancamiento delantero y trasero, según lo expuesto.

Es interesante también analizar la presión en el punto A, (en dicho punto la velocidad se reduce a cero) y su valor es igual a la presión estática de la corriente más la presión dinámica (debido a la velocidad). La presión dinámica vale según el teorema de Bernoulli ya comentado $(1/2) \cdot \rho \cdot V^2$, por tanto, al pasar por el perfil la velocidad del fluido aumenta, teniendo como resultado un incremento de la presión dinámica y una disminución en la presión estática. Ahora bien, como el análisis se ha efectuado para un perfil simétrico, los cambios en la presión para la parte superior e

inferior son iguales, entonces se anulan. Si el análisis lo efectuamos con un perfil asimétrico (ver figura 2.6) las velocidades sobre sus superficies no serán iguales, ya que las partículas que se mueven sobre la superficie superior tienen que recorrer una distancia mayor que las que pasan por la inferior y por tanto su velocidad deberá de ser mayor. Según el teorema de Bernoulli, una carga de presión baja deberá acompañar a una carga de velocidad alta. Esto implica que la presión del fluido que actúa sobre la superficie superior será menor que la que obra sobre la parte inferior del perfil.

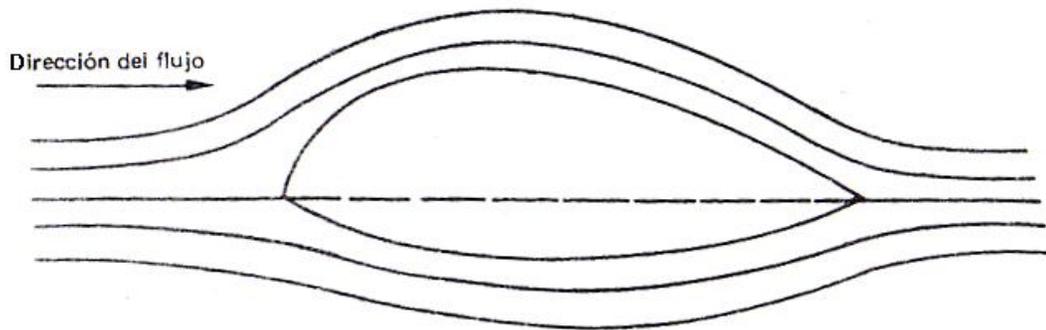


Figura 2.6. Flujo en perfil asimétrico

Los aspectos anteriores se ven modificados también por el llamado ángulo de ataque, el cual está formado por la dirección del fluido y la cuerda del perfil (ver figura 2.7).

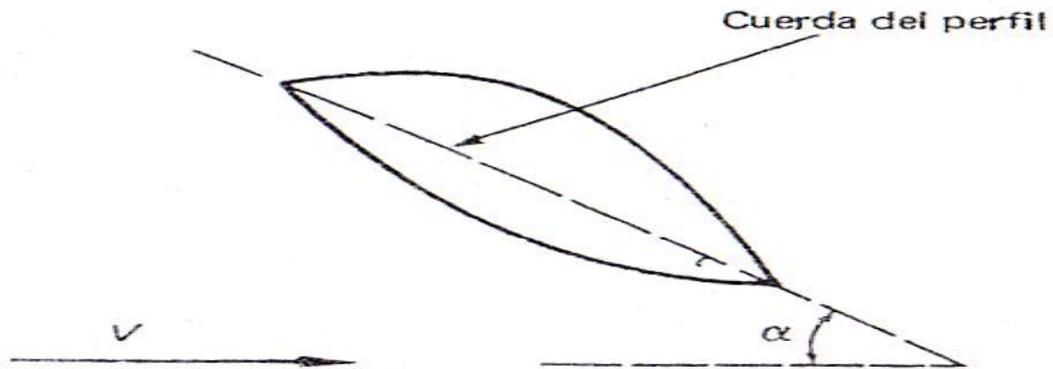


Figura 2.7. Ángulo de ataque

El valor de la depresión en la parte superior del perfil aumenta a medida que crece el ángulo. Pero esto solamente se verifica hasta cierto límite, porque llega un momento en que al aumentar el ángulo de ataque las líneas de corriente se

desprenden, originándose sobre el perfil una corriente turbulenta (ver figura 2.8); por lo que aumenta la presión en la parte superior del perfil y su sustentación disminuye.

El ángulo de ataque, a partir del cual la sustentación en vez de aumentar disminuye, se le llama ángulo de entrada en pérdida o de sustentación máxima. Sobrepasando este ángulo de ataque se dice que el ala ha entrado en pérdida.

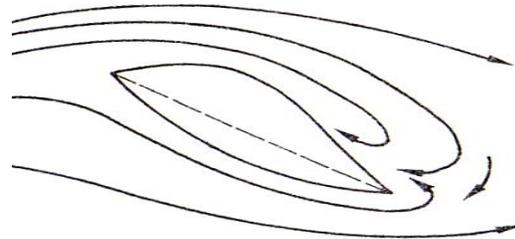


Figura 2.8. Ángulo de ataque grande



Figura 2.9. Experimento de Rayleigh sobre un cilindro con rotación

Rayleigh analizó el flujo en torno a un cilindro con movimiento de rotación, la figura 2.9 muestra que la distorsión del flujo da como resultado mayor velocidad (menor presión sobre el cilindro) en la parte superior, lo cual origina una sustentación.

2.1.2.3 Determinación de las Fórmulas de Sustentación y Resistencia para Perfiles

Una buena suposición es la de considerar que en el fenómeno intervienen la densidad “ ρ ” del fluido (aire generalmente), el tamaño del perfil o su longitud “ L ” y la velocidad “ V ”.

Con ayuda del análisis dimensional se puede plantear la siguiente ecuación, siendo K una constante de proporcionalidad:

$$F = K \cdot \rho^a \cdot V^b \cdot L^c \quad \text{Ec. 2.2}$$

Con base en unidades de masa, longitud y tiempo se tiene:

$$ML/T^2 = (M/L^3)^a \cdot (L/T)^b \cdot L^c$$

Resolviendo el problema (3 ecuaciones con 3 incógnitas), se obtiene:

$$a = 1$$

$$b = 2$$

$$c = 2$$

$$F = K \cdot \rho \cdot V^2 \cdot L^2 \quad \text{Ec. 2.3}$$

El valor de L^2 se pondrá como el área S .

$$F = K \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \quad \text{Ec. 2.4}$$

El valor de K toma la forma de C_L para cuando la fuerza sea la de sustentación y de C_D para el cálculo de la fuerza de resistencia, entonces las expresiones son:

$$L = (1/2) \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_L \quad \text{Ec. 2.5}$$

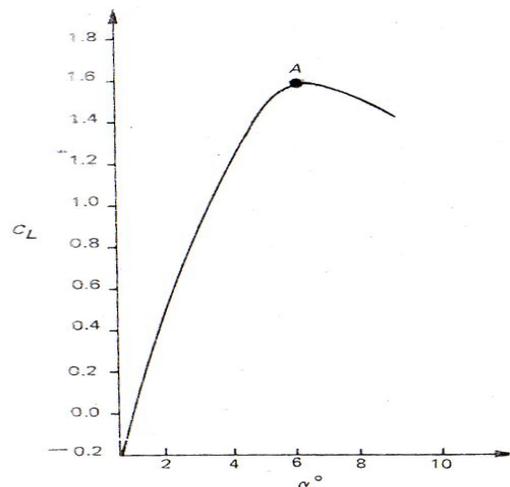
$$D = (1/2) \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_D \quad \text{Ec. 2.6}$$

Se introdujo el valor de $(1/2)$ para hacer una analogía con la ecuación 2.1 $((1/2) \cdot \rho \cdot V^2)$, la cual nos indica la presión dinámica.

Para muchas aplicaciones, los coeficientes C_L y C_D permanecen constantes para un perfil dado en una amplia gama de condiciones de operación. Por ejemplo, para un ángulo de ataque de 1° y flujo bidimensional, el coeficiente C_L vale 0.1 para una gama de velocidades de unos cuantos metros por segundo, a más de 100 m/s.

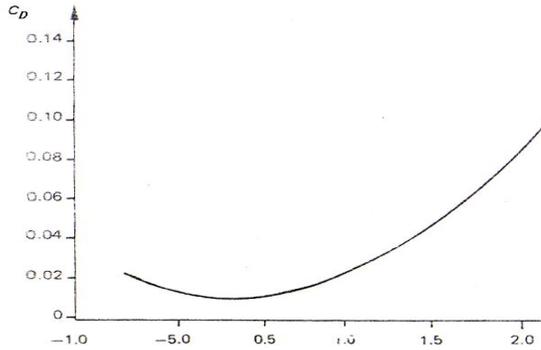
La curva de la gráfica 2.1 muestra la variación de C_L para diversos ángulos de ataque.

En la gráfica 2.1 se muestra lo que se llama la curva de sustentación, y se tiene una para cada tipo de perfil de que se trate.



Gráfica 2.1. C_L contra ángulos de ataque

Con respecto al coeficiente C_D , existen gráficas que indican su variación, según el tipo de perfil por analizar.



Gráfica 2.2. Polar del perfil

Hay gráficas que relacionan el coeficiente de resistencia C_D con el coeficiente C_L . La curva que relaciona en cada perfil C_D con C_L recibe el nombre de *polar del perfil*. El rendimiento aerodinámico del perfil para un ángulo de ataque fijo es:

$$T = C_L/C_D \quad \text{Ec. 2.7}$$

2.1.2.4 Sustentación y Estabilidad

Si el cuerpo va en movimiento y su sustentación es igual a su peso ($L = P$), su trayectoria será horizontal. En este caso, si la tracción T es superior a la resistencia aerodinámica D , el cuerpo aumenta su velocidad; si por el contrario T es menor que D , disminuye la velocidad. Y por último, si T y D son iguales el movimiento será uniforme.

Cuando un cuerpo vira aparece una nueva fuerza, la centrífuga F que tiende a oponerse al viraje. En el caso de un avión, la sustentación positiva L debe equilibrar también la fuerza centrífuga F .

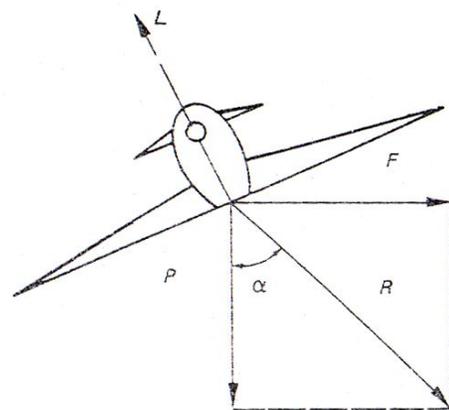


Figura 2.10. Equilibrio de fuerzas en un avión durante un viraje

Particularmente en el caso de un automóvil, la componente horizontal de la fuerza L de sustentación negativa favorece contraponiéndose a la fuerza centrífuga; esto gracias a la posición que el automóvil adopta durante un viraje.

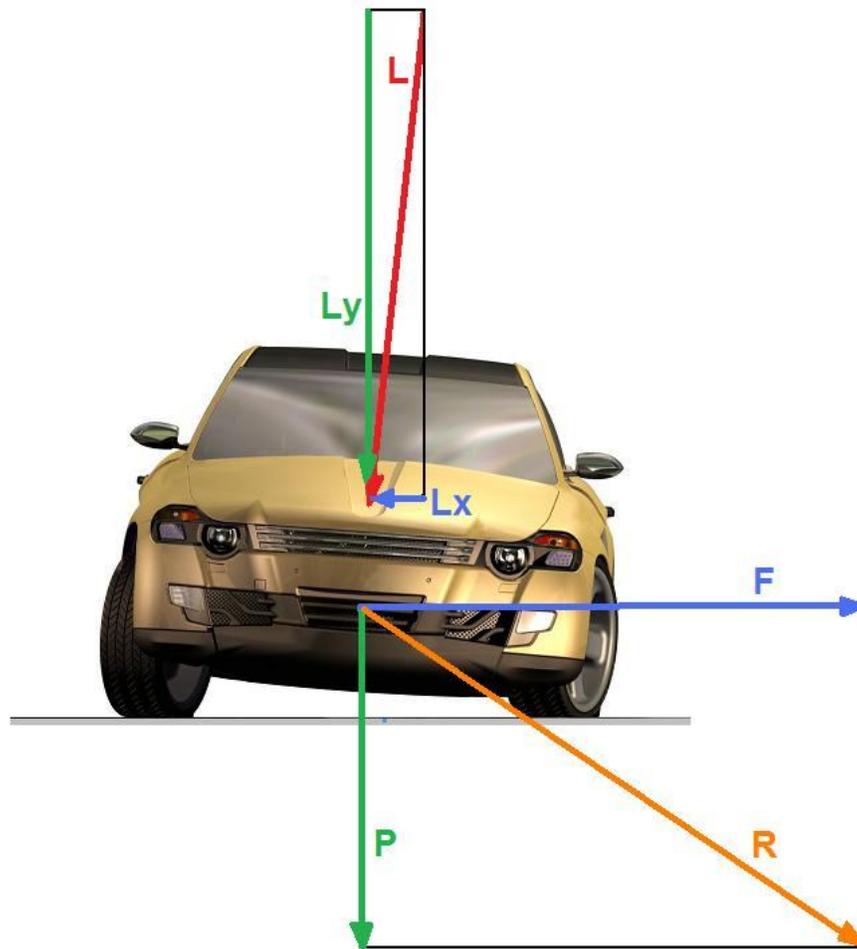


Figura 2.11. Equilibrio de fuerzas en un automóvil durante un viraje

Es importante, en un análisis de estabilidad para un cuerpo, conocer la situación relativa de su centro de gravedad (punto donde se puede considerar concentrada toda la masa del cuerpo) respecto al centro aerodinámico del perfil (punto donde se pueden considerar aplicadas la sustentación y la resistencia aerodinámica); de tal manera que puedan prevenirse vibraciones o mucha sensibilidad a distorsiones por causa de momentos de cabeceo.

2.1.3 Fenómeno de Compresibilidad

Para velocidades pequeñas, o bien en régimen subsónico, la densidad del aire se puede suponer constante ya no que varía excesivamente; sin embargo, a grandes velocidades la densidad del aire no se puede suponer invariable. En el teorema de Bernoulli, se ve que el error que se comete al poner la densidad constante aumenta al incrementarse el número de Mach. Los efectos de compresibilidad son despreciables a velocidades bajas (250 km/h) y altitudes bajas también.

2.1.4 Aplicaciones en Diseño de Automóviles

2.1.4.1 Introducción

La disminución de la resistencia al avance fue el primer objetivo que afrontaron los constructores de automóviles, puesto que está en relación directa con la velocidad máxima y la potencia del motor. Es muy importante hacer notar que un adecuado diseño aerodinámico de un auto disminuirá la resistencia y, por tanto, se podrá lograr un ahorro considerable de combustible. El efecto se hará más notable cuando el vehículo circule a velocidades altas, como es el caso de la circulación en carretera o autopista.

Hasta los años 60 la preocupación principal desde el punto de vista del diseño estaba enfocada a la belleza estética y a la fabricación masiva de vehículos en serie, sin tener una verdadera preocupación en el estudio de aspectos aerodinámicos para poder lograr diseños más acordes con la técnica y, por lo tanto, con una

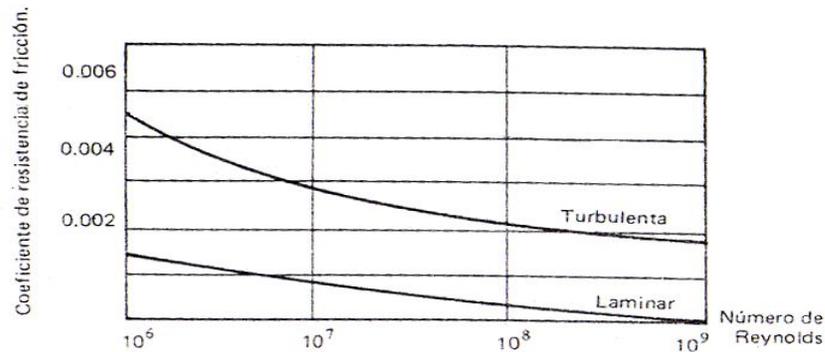
mayor economía en el consumo de combustible.



Figura 2.12. Mercedes-Benz de 1951

2.1.4.2 Coeficiente de Arrastre o de Resistencia

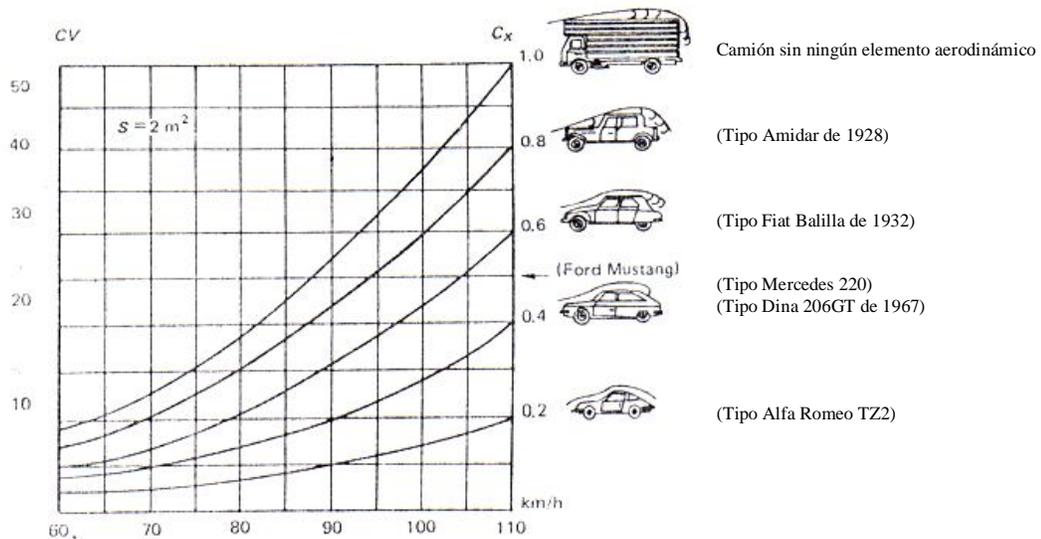
El valor de la resistencia de fricción depende en gran parte de que la capa límite sea laminar o turbulenta, y del valor del número de Reynolds. La forma en que depende se puede ver en la siguiente gráfica.



Gráfica 2.3. Dependencia del coeficiente de fricción según número de Reynolds

El coeficiente C_x se denomina como coeficiente de resistencia aerodinámica, y en la gráfica 2.4 se puede observar claramente la variación del mismo en función de la velocidad.

La gráfica indica cómo ese coeficiente aumenta al acrecentar la velocidad, y desde luego el perfil aerodinámico del vehículo en cuestión.



Gráfica 2.4. Influencia de la forma de la carrocería y de la velocidad sobre el valor de C_x

Puede observarse que para la misma área frontal con una forma mal estudiada, como es el caso de un tráiler, son necesarios casi cinco veces más potencia que la requerida para una forma muy aerodinámica; por ejemplo. En términos técnicos, esta ventaja se manifiesta con una disminución del coeficiente de resistencia aerodinámica, C_x , el cual es directamente proporcional a la resistencia, pero teniendo en cuenta que no se utilizan las dimensiones ni velocidad del vehículo, con lo que se puede hacer una comparación con vehículos diversos. En forma aproximada, se puede decir que C_x representa la fracción de la sección frontal del vehículo que ofrece resistencia como una placa plana. Así, un coeficiente de 0,5 significa que un vehículo con 2 m^2 de área frontal proyectada se comporta como una placa plana perpendicular a la dirección de marcha que tuviera un área de sólo 1 m^2 .

Para determinar el coeficiente C_x se efectúan pruebas en túnel aerodinámico, con vehículos de tamaño natural o con modelos a escala reducida. El vehículo se coloca en el túnel con las cuatro ruedas sobre una báscula que mide el empuje horizontal (hacia atrás), producido por el viento al pegar de frente sobre el vehículo, y también sobre básculas verticales con las cuales se puede medir el aligeramiento que se presenta en el tren delantero y el incremento en el trasero por el efecto de la sustentación ejercida por la carrocería. Con el dato del área frontal proyectada del vehículo y la velocidad del aire en el túnel se puede conocer el coeficiente C_x .



Figura 2.13. Ensayo de un Mercedes-Benz en túnel de viento, sobre básculas

En la actualidad se hace muy usual disponer de programas computacionales con los cuales se pueden simular situaciones muy reales y así obtener igualmente datos de interés en la aerodinámica de un automóvil. Este método permite grandes ahorros de dinero y de tiempo por cada ensayo, puesto que no es necesario hacer un modelo físico, a menos que se trate de validación de resultados. Además, pueden hacerse cambios en la geometría del automóvil a manera de un método retroalimentado, pues es posible ir captando las deficiencias notables de

una geometría e ir ajustando a los requerimientos.

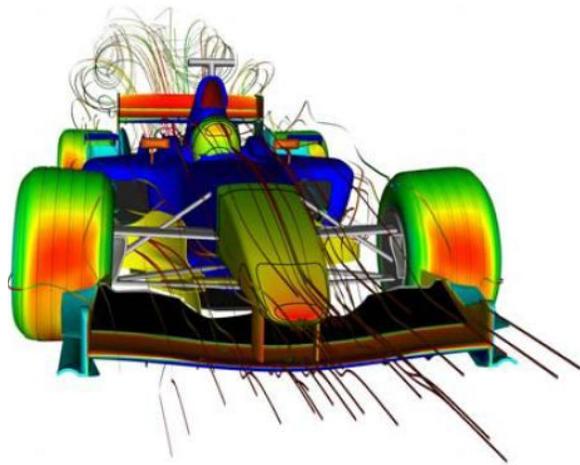


Figura 2.14. Simulación por computadora de la aerodinámica de un Sauber Petronas C23

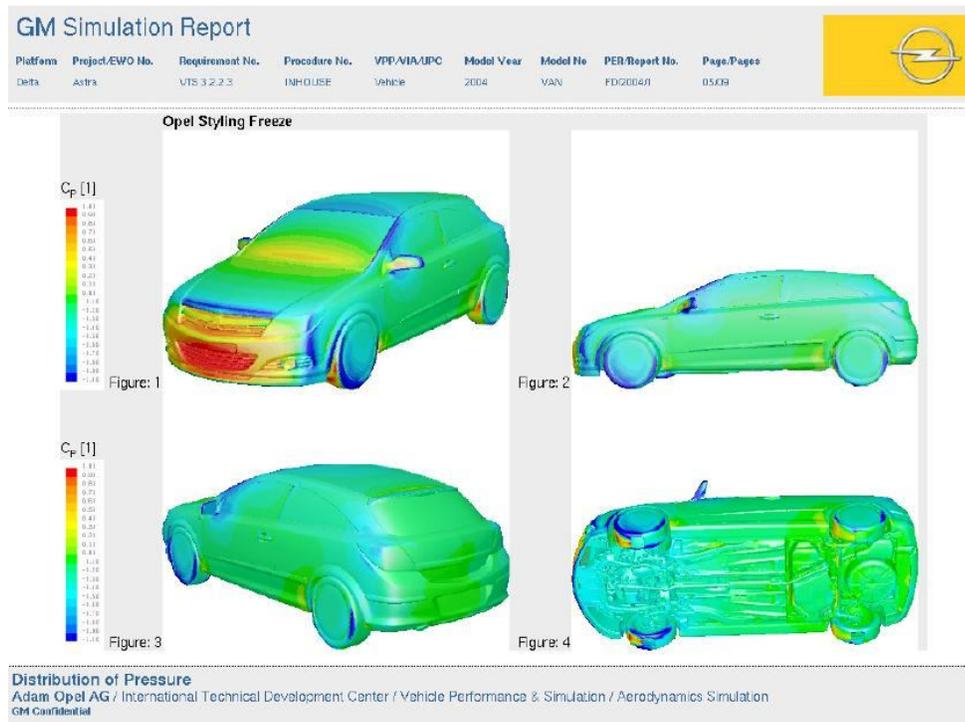
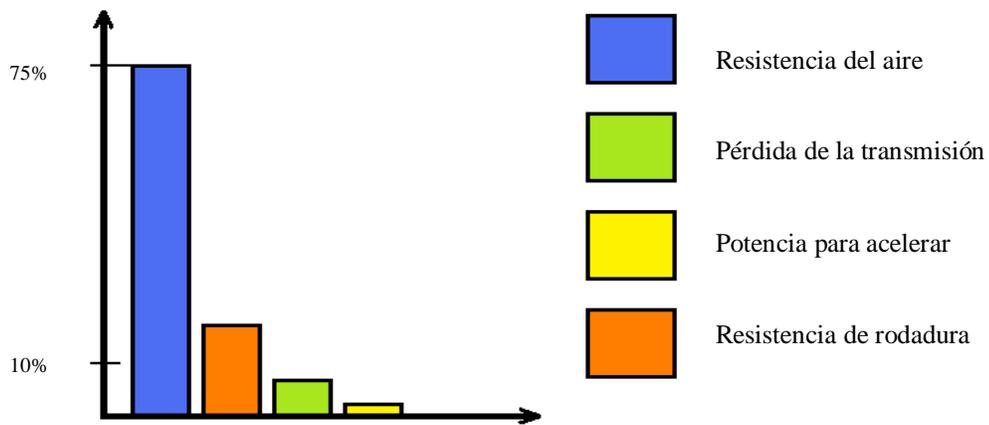


Figura 2.15. Simulación por computadora de la aerodinámica de un GM Opel Astra 2004

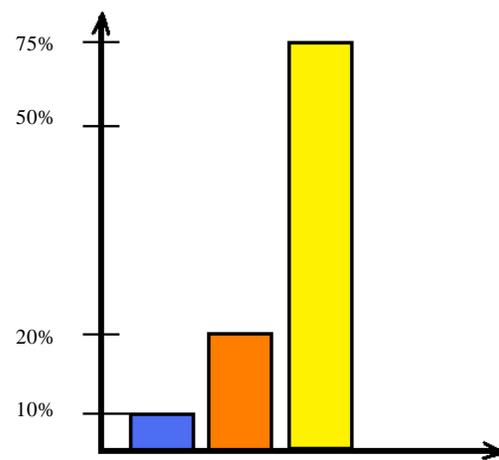
La resistencia aerodinámica no es el único obstáculo que el vehículo debe superar para alcanzar cierta velocidad. Tienen también importancia otros factores, entre los que destacan la resistencia a la rodadura, percibida en la transmisión debida ésta a fricción con los engranajes y cojinetes, así como la potencia gastada para acelerar y, por lo tanto, vencer la inercia de las masas en rotación.

Para un caso dado de un automóvil no tan moderno, la gráfica 2.5 muestra cómo se distribuye la potencia disponible en el motor, circulando a 130 km/h por una carretera llana.

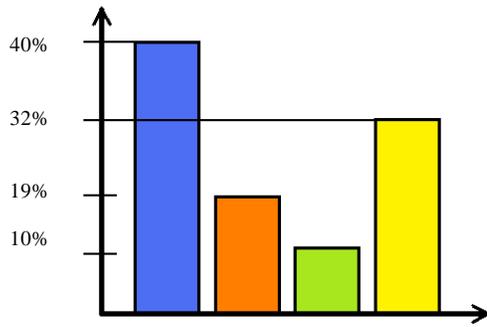


Gráfica 2.5. Potencia gastada en el avance de un automóvil, a 130 km/h en autopista

La gráfica 2.6 representa la distribución media de la potencia del motor en el caso del mismo automóvil, pero durante un recorrido por una ciudad donde no puede rebasar los 50 km/h y está sometido a continuas enfrenadas y arrancadas; se puede apreciar que la potencia es absorbida principalmente en las arrancadas (aceleraciones), en 65%, mientras que la potencia aerodinámica media es prácticamente despreciable (5%).



Gráfica 2.6. Potencia gastada por un automóvil en ciudad



Gráfica 2.7. Proporción en el gasto de potencia

En la utilización normal del automóvil, la situación constituye un promedio de los valores reflejados por los dos primeros diagramas (gráfica 2.7). Se puede observar que la mayor parte de la energía se pierde en vencer la resistencia del aire para cuando las velocidades del vehículo son altas.

En cambio, en el caso de un camión moderno, puede apreciarse en la figura 2.16 que el mayor consumo de energía es por causa de las ruedas pero, sin embargo, continúa teniendo la resistencia del aire un rol importante; siendo ésta la segunda mayor causa del consumo energético del camión en cuestión.



Aerodynamic optimization

The work begins with the well-known physics of the vehicle, as follows:

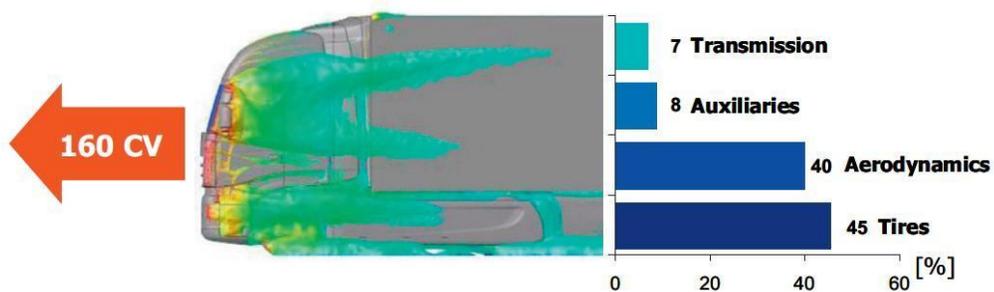


Figura 2.16. Distribución de consumo energético en un camión Iveco con aerodinámica mejorada

En fin, puede deducirse que es importante limitar el peso del vehículo y modificar los diseños para bajar el coeficiente C_X .

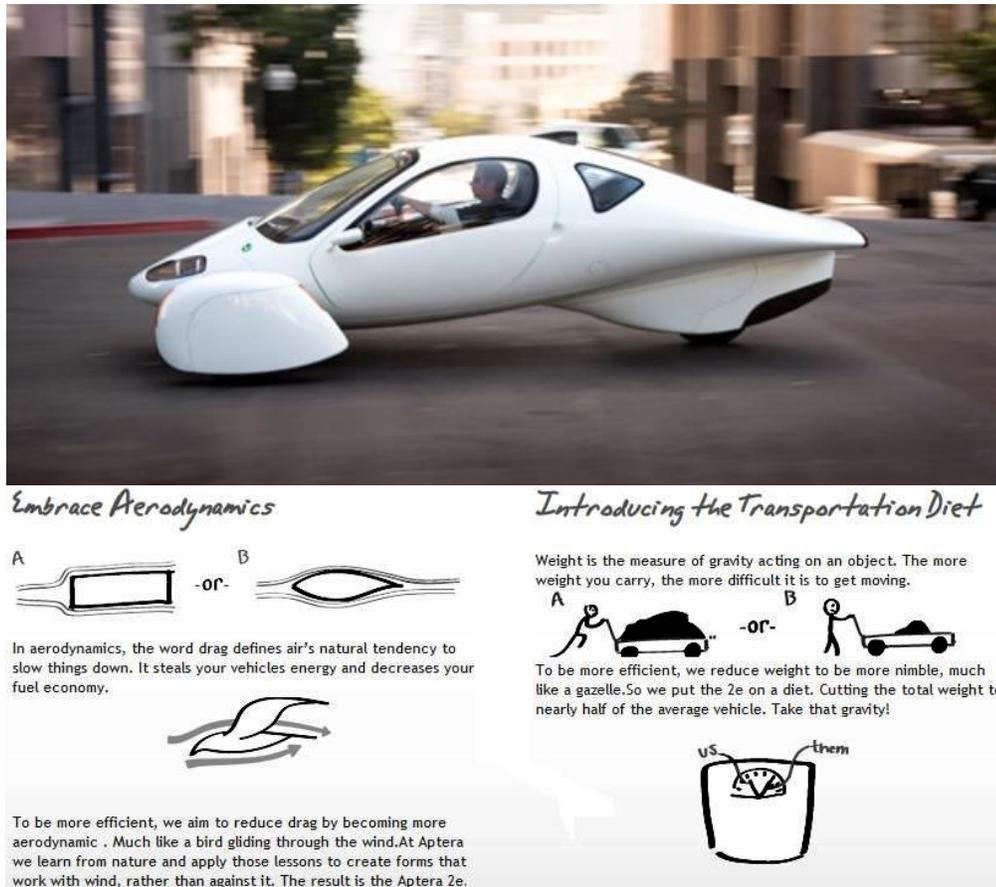


Figura 2.17. Vehículo de pasajeros ultra aerodinámico y muy ligero: Apera Motors, modelo e2

El segundo objetivo (distribución de las cargas que gravitan sobre las ruedas) es importante en cuanto a que influye en la adherencia de cada neumático y, por ello, en el comportamiento del vehículo y en la potencia transmisible a las ruedas. Esto es particularmente importante en vehículos muy potentes, sobre todo en los de competencia.



Figura 2.18. Vehículo de competencia: Fórmula 1 de Mercedes-Benz

Diseño, Forma y Estética

2.2.1 Introducción

El diseño es una actividad técnica y creativa encaminada a idear un proyecto útil, funcional y estético que pueda llegar a producirse en serie como en el diseño industrial, el diseño gráfico o el diseño de joyas; a pesar de que el diseño de interiores no va dirigido a una producción en serie en su gran mayoría.

La apariencia, sobre todo cuando se trata de una primera impresión, es de suma importancia para la percepción que se pueda tener respecto a un objeto. Tal así que un plato de comida, por ejemplo, puede parecer menos o más apetitoso en función de cómo luce.

2.2.2 Diseño

Diseñar requiere principalmente consideraciones funcionales y estéticas. Esto necesita de numerosas fases de investigación, análisis, modelado, ajustes y adaptaciones previas a la producción definitiva del objeto. Además, comprende multitud de disciplinas y oficios dependiendo del objeto a diseñar y de la participación en el proceso de una o varias personas.

Diseñar es una tarea compleja, dinámica e intrincada. Es la integración de requisitos técnicos, sociales y económicos, necesidades biológicas, con efectos psicológicos y materiales, forma, color, volumen y espacio, todo ello pensado e interrelacionado con el medio ambiente que rodea a la humanidad. De esto último se puede desprender la alta responsabilidad ética del diseño y los diseñadores a nivel mundial.

Utilizado habitualmente en el contexto de las artes aplicadas, ingeniería, arquitectura y otras disciplinas creativas, diseño se define como el proceso previo de configuración mental, "pre-figuración" en la búsqueda de una solución en cualquier campo.

Etimológicamente, derivado del término italiano *disegno* dibujo, designio, signare, signado "lo por venir", el porvenir visión representada gráficamente del futuro; *lo hecho* es la obra, *lo por hacer* es el proyecto, *el acto de diseñar como prefiguración* es el proceso previo en la búsqueda de una solución o conjunto de las mismas.

El acto humano de diseñar no es un hecho artístico en sí mismo aunque puede valerse de los mismos procesos y los mismos medios de expresión o signo de comunicación visual en función de la búsqueda de una aplicación práctica.

Un filósofo contemporáneo, Vilém Flusser, propone, en su libro *Filosofía del diseño*, que el futuro (el destino de la humanidad) depende del diseño.

El campo de actuación del diseñador tiene relación con la industria, el comercio y todas las actividades culturales; su perfil y educación pueden tener orientación técnica en la ingeniería de procesos industriales o constructivos, en relación con las disciplinas humanísticas en los campos de actuación de la comunicación audiovisual, las artes gráficas, entre otras.

La mayor parte del dibujo técnico se realiza hoy con ordenadores o computadoras, ya que es más fácil modificar un dibujo sobre la pantalla que sobre el papel. Las computadoras también hacen más eficientes los procesos de diseño y fabricación. Por ejemplo, si las especificaciones de una pequeña pieza de una máquina se modifican en el ordenador, éste puede calcular cómo afectan los cambios al resto de la máquina antes de proceder a su fabricación.

Se suele confundir con frecuencia a los diseñadores y a los artistas, aunque únicamente tienen en común la creatividad. El diseñador proyecta el diseño en función de un encargo, y ha de pensar tanto en el cliente como en el usuario final, justificando sus propuestas. A diferencia del artista que es más espontáneo y sus acciones pueden no estar justificados.

2.2.2.1 Algunos puntos de vista

Las definiciones sobre diseño son tantas y tan variadas como las actividades que han dado pie a esta actividad.

Tomás Maldonado, quien fue pintor, diseñador industrial y teórico del diseño argentino, señalaba que “el diseño industrial es una actividad proyectual que consiste en determinar las prioridades formales de los objetos producidos industrialmente”. La forma tiene por misión no sólo alcanzar un alto nivel estético, sino hacer evidentes determinadas significaciones y resolver problemas de carácter práctico relativos a la fabricación y el uso.

Según Joseph Edward Shigley y Charles R. Mishke, en su obra *Diseño en ingeniería mecánica (Mechanical Engineering Design)*, publicada en 1989, "diseño es formular un plan para satisfacer una necesidad humana".

Para el arquitecto Damiano Franco, el diseño se encuentra hasta en la parte más ínfima de la vida del ser humano. ¿Qué sería de la vida cotidiana sin un diseño apropiado para cada una de las cosas y objetos? Un caos...

A lo que refiere Mariano Maddio, diseñar es proyectar nuevas ideas desde nuestra propia mirada, en donde el diseño al igual que toda obra de arte es captado primeramente por nuestra vista y reflejado en nosotros mismos.

El diseñador industrial alemán Gui Bonsiepe define al diseño como: "Hacer disponible un objeto para una acción eficaz."

Desde esta perspectiva, diseño puede conceptualizarse como un campo de conocimiento multidisciplinario, que implica su aplicación en distintas profesiones, que puede ser estudiado, aprendido y, en consecuencia, enseñado. Que está al nivel de la ciencia y la filosofía, dado que su objetivo está orientado a estructurar y configurar contenidos que permitan ser utilizados para ofrecer satisfacciones a necesidades específicas de los seres humanos.

2.2.3 Forma

La definición de forma en relación al lenguaje visual tiene una doble acepción, fundamentada en la realidad que las cosas muestran en su configuración, determinada pues, por su apariencia: Es la apariencia externa de las cosas, el aspecto visual. También es su estructura expresiva plástica, donde se asienta su identidad visual

La primera se modifica según los condicionantes físicos de su percepción, como son la iluminación, el punto de vista, el sujeto observador, etcétera. La segunda es inmutable; en su esqueleto y armazón.

La forma es el contorno de un objeto sensible, la línea que precisa y aísla del medio ambiente la realidad física del objeto, lo que determina la diferencia y el modo de ser de los entes.

2.2.3.1 Clasificación de las Formas

Formas Básicas/Geométricas

Son el círculo, el cuadrado y el triángulo equilátero. Cada una de ellas tiene sus propias características y son la base para la formación de nuevas obras. Las vemos en arquitectura y en la manufactura de nuevos objetos.

Formas Orgánicas o Naturales

Son aquellas que pertenecen a la naturaleza, a las que el hombre recurre generalmente para sus creaciones artísticas.

Formas Artificiales

Son aquellas creadas o fabricadas por el hombre. El diseño de los automóviles, por ejemplo. Una silla, una mesa, etc.

2.2.4 Estética

La estética es una rama de la filosofía que se encarga de estudiar la manera como el razonamiento del ser humano interpreta los estímulos sensoriales que recibe del mundo circundante. Se podría decir, así como la lógica estudia el conocimiento racional, que la estética es la ciencia que estudia el conocimiento sensible, el que adquirimos a través de los sentidos. Entre los diversos objetos de estudio de la estética figuran la belleza o los juicios de gusto, así como las distintas maneras de interpretarlos por parte del ser humano. Por tanto, la estética está íntimamente ligada al arte, analizando los diversos estilos y periodos artísticos conforme a los diversos componentes estéticos que en ellos se encuentran. A menudo se suele denominar la estética como una “filosofía del arte”.

Lo estético no se funda en conceptos, no se puede medir. No puede haber ninguna regla de gusto objetiva que determine por conceptos lo que sea bello, puesto que todo juicio de esta fuente es estético, es decir, que su motivo determinante es el sentimiento del sujeto y no un concepto del objeto. No hay ciencia sino crítica de lo bello. La comunicación viene de lo común (u ordinario) a todos.

Muchos son los pensadores que se han interesado por el arte y su significado, entre ellos Immanuel Kant, quien en su obra *Crítica del juicio* cita: "Para discernir si algo es bello o no, referimos la representación, no por el entendimiento al objeto con vistas al conocimiento, sino por la imaginación (tal vez unida al entendimiento) al sujeto y al sentimiento de agrado o desagrado experimentado por éste".

El término estética proviene del griego (aísthêsis), “sensación”. Fue introducido por el filósofo alemán Alexander Gottlieb Baumgarten en su obra *Reflexiones filosóficas acerca de la poesía* (1735), y más tarde en su *Aesthetica* (1750).

2.2.5 *Diseño Automotriz*

2.2.5.1 *Introducción*

El diseño automotriz es la orientación hacia el desarrollo de un vehículo. Normalmente está referido al diseño de automóviles, pero también se refiere a motocicletas, camiones, entre otros. Esta práctica, hoy en día, es llevada a cabo por un gran equipo que reúne diferentes disciplinas. En este contexto se refiere sobre todo a desarrollar el aspecto o la estética visual del vehículo, aunque también está implicada en la creación del concepto del producto. El diseño automotor es practicado por los diseñadores que tienen generalmente una orientación en arte, pero sobre todo, un grado en diseño industrial o diseño del transporte.

La tarea del equipo de diseño está repartida generalmente en tres aspectos principales: el diseño exterior, el diseño interior, el color y los agregados aplicados.

La apariencia de un automóvil tiene mucha importancia desde sus inicios. Un automóvil por su aspecto exterior puede reflejarse más poderoso, más robusto o más rápido que otro del mismo estilo, aún cuando el otro posea alguna de las cualidades mencionadas en mayor grado. Es también el aspecto exterior, e incluso el interior, lo que define a un automóvil como elegante, jovial o deportivo; y muchas veces hasta la calidad del mismo se juzga por como luce.



Figura 2.19. Automóviles del mismo estilo: Izquierda, Chery QQ. Derecha, Mini Cooper

También el cómo se ve un automóvil puede constituir una estrategia de mercado, cuanto más atractivo visualmente se hace seguramente tendrá más terreno ganado en el comercio. Simplemente, una automóvil con un diseño externo impresionante se hace una pieza digna de mirar con gusto, tanto que es posible para los amantes del diseño seguir con la mirada alguno hasta perderlo de vista.



Figura 2.20. Automóviles vistosos: Izquierda, Audi R8. Derecha, Lamborghini Murciélago LP640

2.2.5.2 Diseño Exterior

El estilista responsable del diseño del exterior del vehículo desarrolla las proporciones, la forma, y las superficies del vehículo. El diseño exterior se hace por una serie de dibujos digitales o manuales. Se ejecutan y se aprueban dibujos progresivamente más detallados.

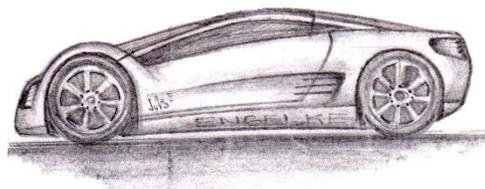


Figura 2.21. Dibujos manuales y digitales

La arcilla y o los modelos digitales se desarrollan, junto con de los dibujos. Los datos de estos modelos entonces se utilizan para crear una maqueta del mismo tamaño del diseño final (cuerpo en blanco). Con máquinas fresadoras CNC de 3 y 5 ejes, el modelo, primero se diseña en un programa de computadora, y en seguida “se talla” con la máquina y usando grandes cantidades de arcilla. Incluso en tiempos del software 3D de clase superior y de los modelos virtuales, el modelo en arcilla sigue siendo la herramienta más importante para evaluar el diseño exterior de un coche y por lo tanto usado a través de la industria.



Figura 2.22. Modelo en arcilla del BMW 1 Series Convertible



Figura 2.23. Modelos en arcilla de un Mercedes-Benz concepto

2.2.5.3 Diseño Interior

El estilista responsable del diseño del interior del vehículo desarrolla las proporciones, la forma, y las superficies para el tablero, los asientos, los paneles de ajuste, etc. Aquí el énfasis está en la ergonomía y la comodidad de los pasajeros. El procedimiento es igual que con el diseño exterior (bosquejo, modelo digital y modelo en arcilla).

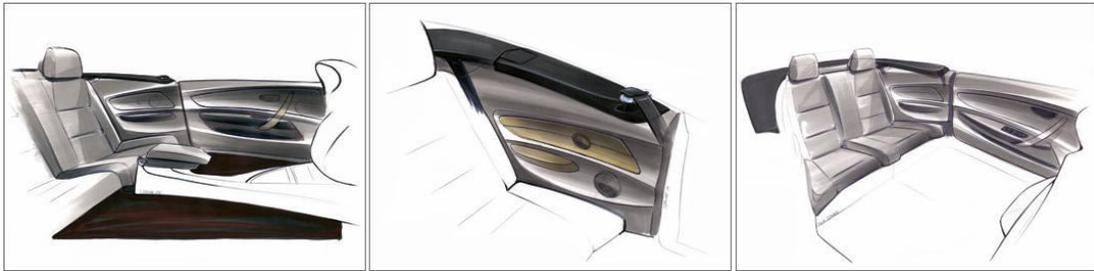


Figura 2.24. Bosquejos del diseño interior del BMW 1 Series Convertible

2.2.5.4 Diseño del Color y Detalles

El diseñador del color y los detalles (o color y los materiales) es responsable de la investigación, el diseño, y el desarrollo de todos los colores y materiales interiores y exteriores usados en un vehículo. Éstos incluyen las pinturas, plásticos, el diseño de la tela, forrado con cuero, alfombra, agregados de madera, y así sucesivamente. El color, el contraste, la textura, y el patrón se deben combinar cuidadosamente para dar al vehículo un ambiente y una personalidad interiores únicos. Estos diseñadores trabajan de cerca con los diseñadores exteriores e interiores.



Figura 2.25. Parte del diseño interior del BMW Z4

La inspiración de los diseñadores proviene de otras disciplinas del diseño, por ejemplo: diseño industrial, diseño de modas, mobiliario doméstico, y arquitectura.

La investigación específica en tendencias globales está dirigida para proyectos en dos a tres años en el futuro. Crean paneles de tendencia de esta investigación para no perder de vista las influencias del diseño mientras se relacionan con la industria del automóvil. El diseñador entonces utiliza esta información para desarrollar temas y conceptos que deben ser refinados adicionalmente y haberse probado en los modelos del vehículo.

Método de Construcción del Carenado

2.3.1 Introducción

Desde inicios del *Team Formula SAE UCV*, éste ha adoptado dos maneras de construir las carrocerías.

La primera experimentada fue la manera convencional, por llamarla de alguna manera, la cual se explicará a continuación pues es la que se utilizó para la construcción del carenado del 2009.

La otra manera consistió en hacer el molde de poliuretano expandido, primero como un bloque y después desglosarlo en varios bloques con dimensiones alrededor de $500 \times 400 \times 400 \text{ mm}^3$ que luego fueron maquinados en un CNC a partir de los correspondientes archivos digitales de las porciones de la carrocería. Este método no fue muy conveniente por varias razones, entre ellas porque los varios bloques no resultaron con caras refrentadas de manera adecuada para el ensamblaje del “rompe-cabezas”, la otra razón es que se salía del alcance del equipo el tiempo y disposición del proceso de maquinado.



Figura 2.26. Carenado que sería para el prototipo del *Formula SAE UCV 2008*

2.3.2 Modelado en 3D de la Geometría del Carenado

Como es sabido, gran número de componentes del automóvil *Formula SAE UCV* antes de ser fabricados y/o ensamblados son creados y/o llevados a dibujos asistidos por computador. Con ésto se obtiene entonces el ensamble digital del automóvil casi en su totalidad. Sobre dicho ensamble se procede, también en digital, al dibujo del carenado; buscando la forma más adecuada y ajustada al chasis y demás componentes como el intercambiador de calor, elementos de suspensión, atenuador de impacto, entre otros.

Generalmente se hacen varios carenados que cumplan los requerimientos tanto del equipo como los de las normas para la competencia, teniendo así varias alternativas para elegir bajo algún o algunos criterios determinados.

Entre las normas de mayor importancia para la competencia que aplican a los carenados, en cuanto a su forma, podemos destacar que existe un radio mínimo de curvatura para las “aristas” entre caras y caras, así como un ángulo mínimo, también entre caras y caras, de manera que éste no sea agudo.

Usualmente el carenado comprende un cuerpo principal, el cual cubre prioritariamente el habitáculo y la zona desde el mismo hasta la punta, y un par de “salientes” con los cuales se cubre de un lado el intercambiador de calor y del otro el turbo o, como en el caso del prototipo *Formula SAE UCV 2009*, los intercambiadores de calor a ambos lados.

Posteriormente se combinan los colores también en este dibujo digital.

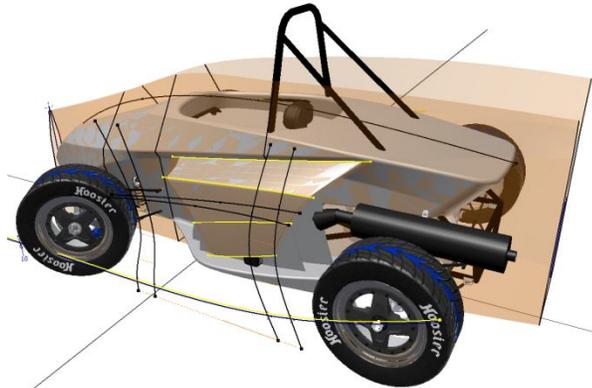


Figura 2.27. Modelado en 3D de un carenado candidato

2.3.3 Creación del Pre-molde

Una vez conformado y seleccionado el carenado, a éste se le proyecta en plano vistas de múltiples secciones transversales y también secciones longitudinales verticales y horizontales. Así se comienza con lo que vendría siendo el molde “en positivo”, al que es llamado como pre-molde y cuya superficie será réplica de la pieza final del carenado.

En los puntos siguientes se explican los pasos a seguir para la elaboración del pre-molde.

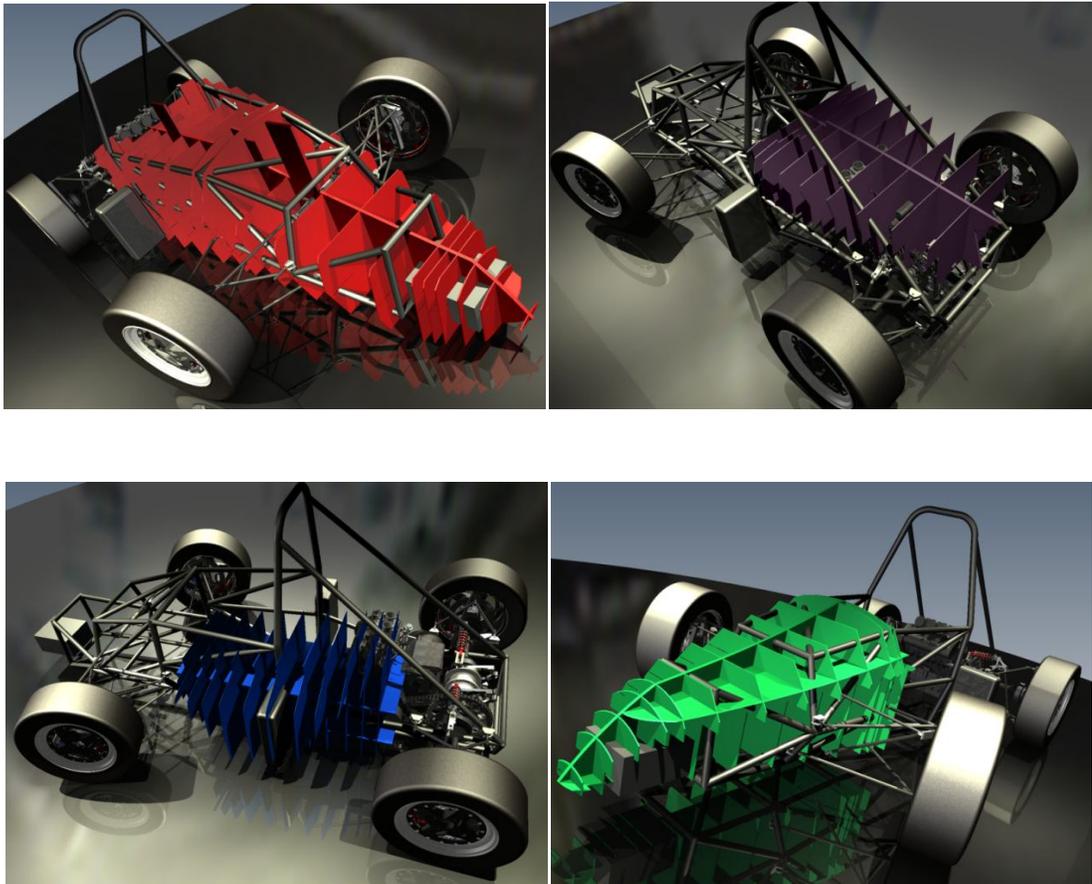


Figura 2.28. Planificación del esqueleto, en dibujos digitales

2.3.3.1 Impresión de Secciones de la Geometría del Carenado

Las secciones son impresas a escala 1:1, pues el carenado es dibujado también a escala natural, y tales secciones son enumeradas y organizadas para ser recortadas y calqueadas en tablas de madera.



Figura 2.29. Planos de las secciones

2.3.3.2 Preparación de las Secciones en Madera

El contorno dibujado en la madera también es cortado con tanta precisión como sea posible. Particularmente en este año se procedió a calcar los contornos de las secciones transversales y las longitudinales horizontales en tablas de 3mm de espesor, y las longitudinales verticales (que son generalmente la que funcionan como conexión entre todas las secciones, además de ser la guía de ensamblaje entre secciones) en tablas de 12mm. De esta forma se asegura la rigidez del esqueleto y a la vez un peso no excesivo, como ocurrió en años anteriores.



Figura 2.30. Secciones ya cortadas en madera

2.3.3.3 Armado del Esqueleto

Por medio de ranuras situadas estratégicamente son calzadas todas las secciones hasta formar un “esqueleto”. Como antes se mencionó, las secciones son enumeradas cuidadosamente y se hacen corresponder a la sección longitudinal vertical; de tal manera que el proceso de armar no se hace ni complicado ni confuso. Como ventaja respecto a veces anteriores, se observó que la alternabilidad entre tablas de 3 y 12mm previno la deformación y tendencia de curvado de la sección guía (la longitudinal vertical) puesto que las secciones transversales ahora no ejercían tanta presión en las paredes de la ranura al momento del calzado.

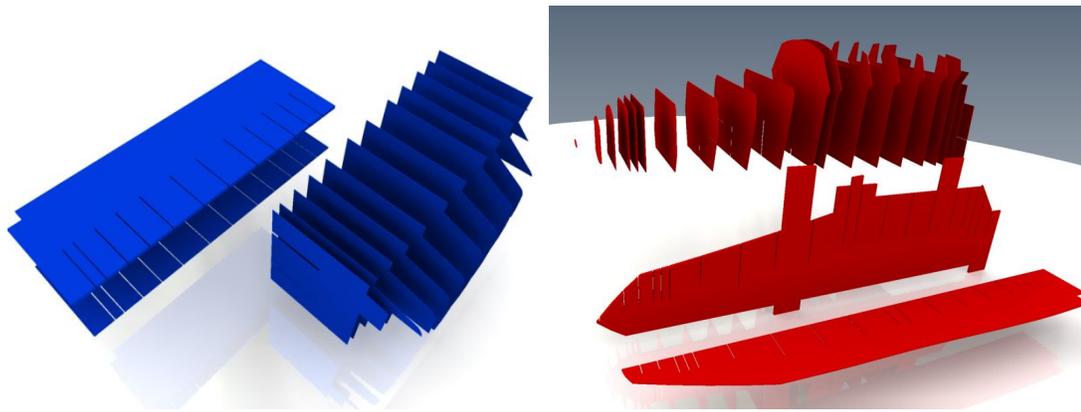


Figura 2.31. Dibujo digital de los esqueletos para el pre-molde

2.3.3.4 Relleno del Esqueleto

Una vez terminados los esqueletos de las distintas partes del carenado, se rellenan los espacios entre secciones primero con desechos (papel, básicamente) para hacer volumen y luego, ya cerca de la superficie límite, se utiliza poliuretano expandido; mejor conocido como *Foam*. El poliuretano expandido es un compuesto preparado por el equipo mismo a partir de una sustancia llamada “Poliol” y otra “IH”, estando éstos en estado líquido antes de la mezcla y convirtiéndose después en sólido por medio de reacción exotérmica.



Figura 2.32. Relleno del esqueleto con poliuretano.

2.3.3.5 Preparación de la Superficie

Al rellenar el esqueleto, el poliuretano o espuma se rebasa de la superficie límite, que es la superficie deseada, la cual para esta etapa sólo es determinada por tramos imaginarios de superficies entre una sección y otra contigua. Ese exceso es desbastado primero de manera inescrupulosa, normalmente con hojas sueltas de segueta; después, y ahora sí cuidadosamente, se continua desbastando con un esmeril con el cual a su vez se empareja cualquier irregularidad en las tablas de madera, producto del armado del esqueleto. Por último, la superficie es lijada por primera vez.



Figura 2.33. Pre-moldes en preparación de superficies

Luego de acabar con el desbaste del poliuretano se procede de la típica manera como lo hace un latonero con la reparación de una superficie no tan fina en un automóvil chocado, desde cuando es momento de aplicar la especie de masilla y demás sustancias.



Figura 2.34. Pre-moldes con superficies preparadas

2.3.4 Creación del Molde

A partir del pre-molde se hace el llamado molde, que consiste tener la pieza “en negativo”. El molde se suele hacer de fibra de vidrio, al igual que la pieza final, con la diferencia notable de la cantidad de capas de fibra de vidrio, ya que el molde debe ser fuerte, sin importar el peso que adquiera, mientras que la pieza deberá ser tan ligera como sea posible. En la creación de este molde se utilizan sustancias para desmoldar el mismo desde el pre-molde y para desmoldar de sí la pieza final que es hecha en su interior.

Cabe destacar que, justamente por dichos desmoldes, es relevante una geometría del carenado aceptable para la cuestión y/o cortes admisibles para la hora del mismo desmolde.

2.3.5 Creación de las Piezas que componen el Carenado

Tal y como se anticipó en el punto anterior, en el interior del molde se aplica la fibra de vidrio suficiente para lo que conformará la pieza final del carenado, esto en cada uno de los moldes de cada pieza del carenado. Así, entonces, la superficie de la pieza resultante deberá ser una réplica de la superficie obtenida anteriormente en el exterior del pre-molde que, a su vez, es también la misma que en el interior del molde.

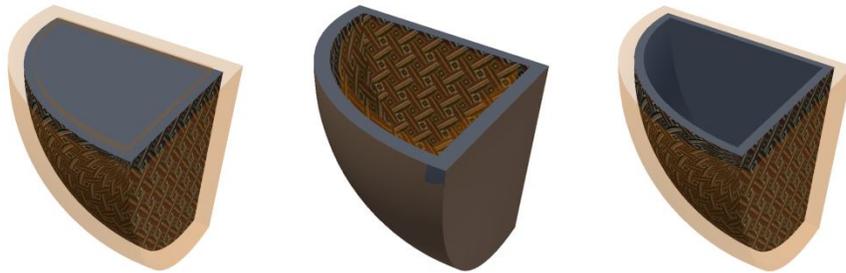


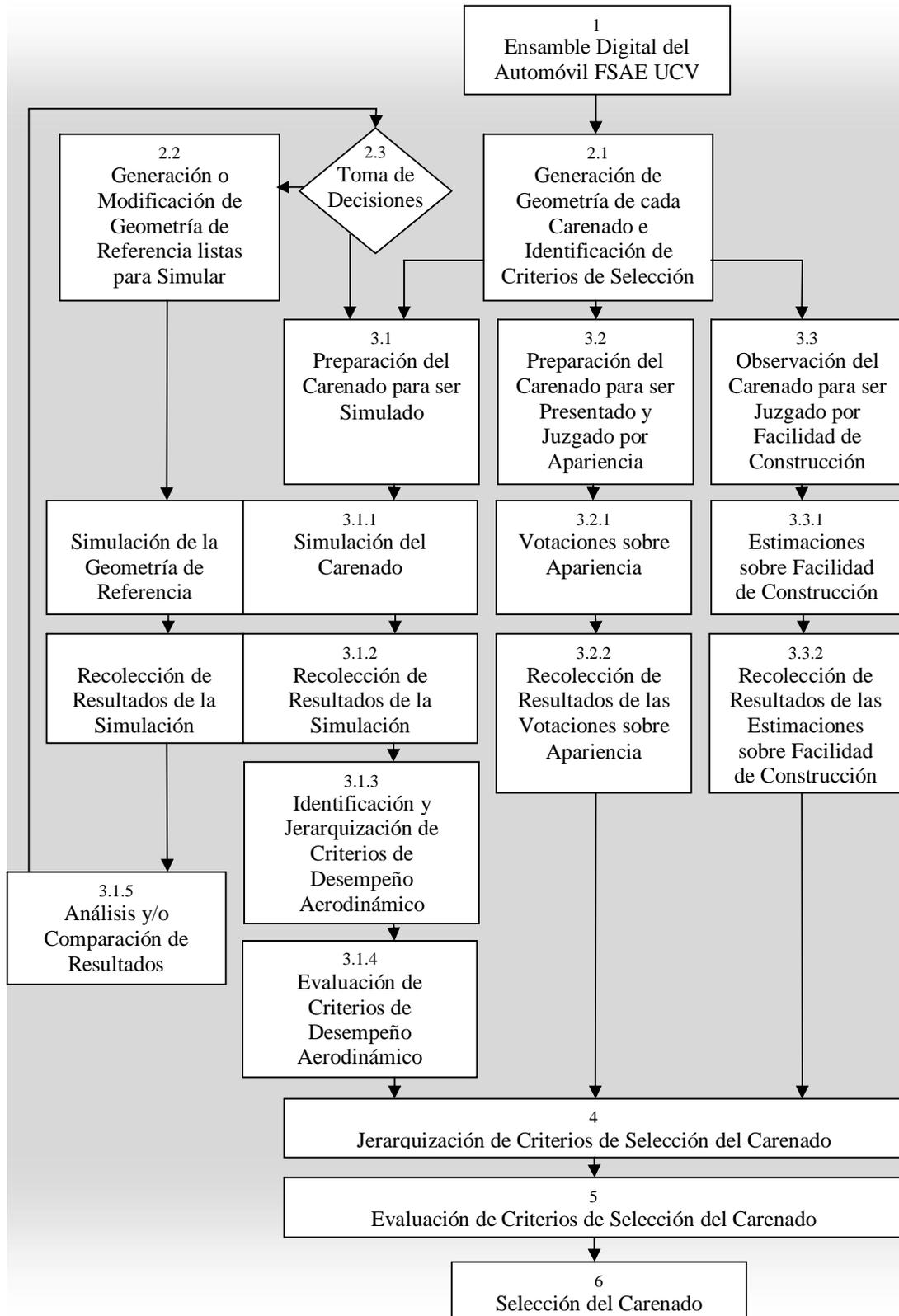
Figura 2.35. De izquierda a derecha, representación de: pre-molde, molde, pieza final

A las piezas se les hacen algunos refuerzos, sobre todo en los bordes y zonas de sujeción, ya que es donde más sufre la pieza en los repetidos montajes y desmontajes durante la competencia.

Las piezas son refinadas una vez más en sus superficies y luego de lograr los cortes y orificios pertinentes para su ensamble en el automóvil *Formula SAE UCV* son pintadas y pulidas. Como paso final, se pegan las calcomanías reglamentarias y de los patrocinadores del proyecto.

CAPÍTULO III: PROCESO DE DISEÑO DEL CARENADO

3.1 Diagrama del Proceso del Diseño del Carenado



3.2 Descripción del Diagrama de Proceso del Diseño del Carenado

Para llevar a cabo la selección del carenado más apropiado, según los criterios establecidos, se tuvieron en cuenta varios pasos con un necesario orden entre si. El anterior es el diagrama de tal proceso.

3.2.1 Ensamble Digital del Automóvil FSAE UCV

Aquí se encuentran todas las piezas más importantes que componen al automóvil *Formula SAE UCV*. Cada una de esas piezas son hechas cada año por integrantes del equipo, o bien, fueron hechas alguna vez (también por integrantes del equipo) y son reutilizadas; esto último suele ocurrir con componentes que no varían de un prototipo a otro, como suele ocurrir con el motor, el diferencial, entre otros.

Este ensamble digital es punto de partida para la iniciar el dibujo y diseño del carenado; y los componentes de dicho ensamble que son más relevantes para tal fin son el chasis, elementos de suspensión, intercambiador de calor, turbo y atenuador de impacto, debido a que son los más propensos a causar interferencia con el carenado, y en el caso particular del chasis porque es la guía primordial para la forma que llevará el mismo carenado.

Este ensamble, así como el carenado, es llevado a cabo por medio de programas CAD (siglas en inglés de Diseño Asistido por Computador: *Computer Aided Design*).

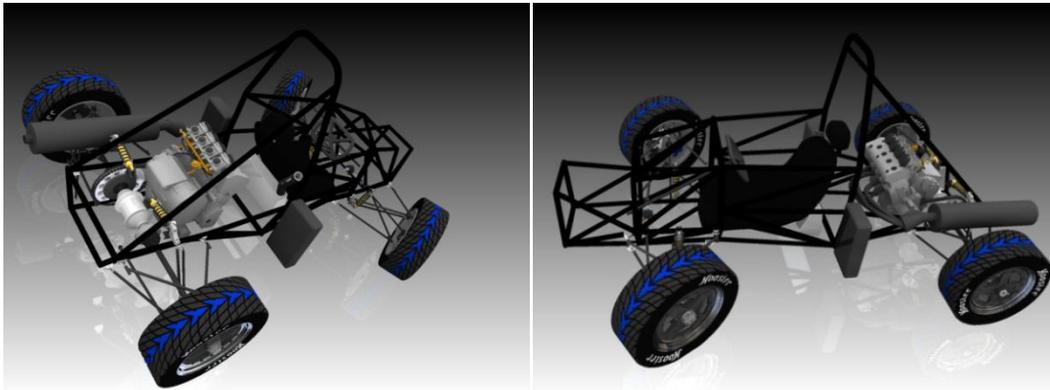


Figura 3.1. Dibujo digital del ensamble sin carenado del automóvil *Formula SAE UCV*

3.2.2.1 Generación de Geometría de cada Carenado e Identificación de Criterios de Selección

Para el presente trabajo se hicieron cinco carenados diferentes para ser sometidos a evaluaciones bajo tres criterios pilares: desempeño aerodinámico, mayor gusto por apariencia y facilidad para ser construidos. Entonces cada carenado fue dibujado procurando rasgos favorables para las mencionadas cualidades que se usarían como criterios de selección. A los carenados se les llamó A, B, C, D y E.



Figura 3.2. Los cinco carenados en estudio, de izquierda a derecha: E, D, C, B y A

3.2.2.2 Generación o Modificación de Geometría de Referencia lista para Simular

Previamente a realizar las simulaciones fluido-dinámicas pertinentes para evaluar cada uno de los carenados se hizo necesario realizar diversas pruebas a manera de ensayos, de tal manera que pudiesen aclararse ciertas cosas respecto al funcionamiento del *software* utilizado, además de determinar valores de datos de inicio, como por ejemplo, la longitud del túnel virtual utilizado o si valía la pena o no considerar rugosidades en ciertas superficies.

En un primer grupo de ensayos, en el cual se aspiraba únicamente el dominio suficiente del *software* utilizado, se destacan los siguientes:

- **Bala:** Fue una de las pruebas más primitivas. El objetivo fue conocer el *software* de simulación. Se simula una bala en movimiento de traslación únicamente.

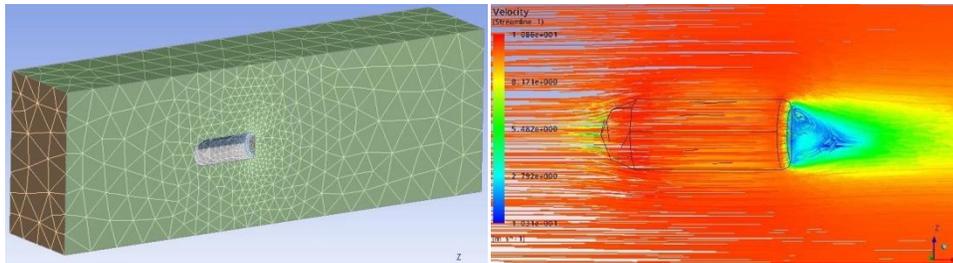


Figura 3.3. Malla y líneas de corriente en una bala

- **Rueda:** Se simula una rueda en que se incluyó el movimiento de rotación sobre su propio eje, además del típico de traslación. Por los vectores de velocidad en la periferia de la rueda, puede apreciarse que la rotación fue asignada erradamente en sentido contrario respecto al sentido de la traslación, si se asume rodadura, claro.

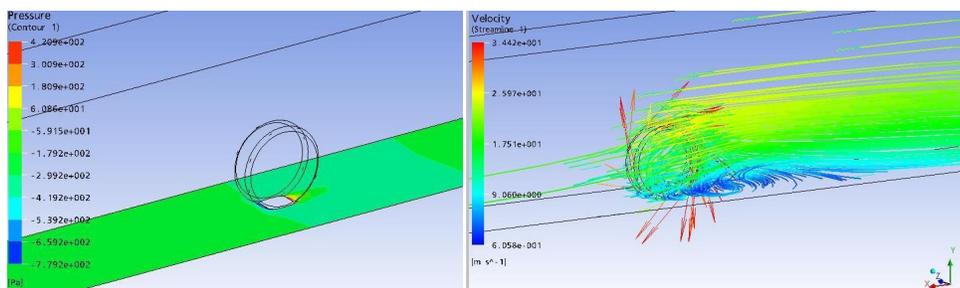


Figura 3.4. Simulación de rueda en traslación y en rotación

- **Automóvil con ruedas sin rotación:** Se empieza aquí con geometrías más cercanas a un automóvil, sin embargo, aún muy simples. Para este caso las ruedas están en traslación pura.

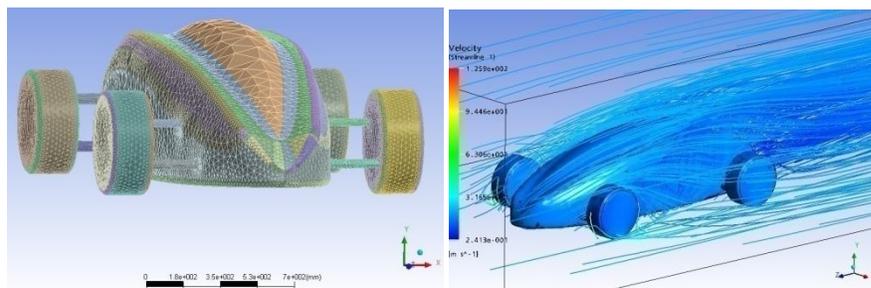


Figura 3.5. Simulación de automóvil, con ruedas sin rotación

- **Automóvil con ruedas en rotación:** Igualmente la geometría es simple. Esta vez las ruedas rotan pero las traseras lo hacen en torno a las delanteras. El error fue detectado gracias a la visualización de la gran turbulencia generada y de los vectores de velocidad que lo evidenciaban muy claramente.

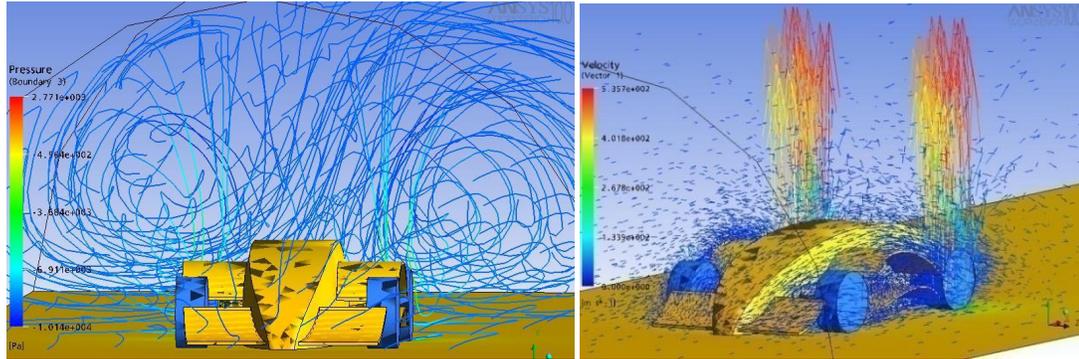


Figura 3.6. Simulación de automóvil, con ruedas en rotación

Ahora como segundo grupo, con el que se quiso de alguna manera comprobar la fidelidad de resultados arrojados por el *software*, se tienen los siguientes ensayos como los más importantes; cuyos resultados se darán y se analizarán en los capítulos correspondientes más adelante:

- **Variación de resultados según parámetros geométricos en un mismo objeto de estudio y con mismas condiciones:** Para comprobar la influencia que pudiere tener colocar un objeto al cual se le analiza el flujo circundante en un sitio u otro respecto al origen de coordenadas, se utilizaron varias configuraciones en las que se ensayó: a) Traslación en dirección del flujo (figuras 3.7 con 3.8; 3.11 con 3.13; 3.12 con 3.14; 3.15 con 3.16); b) Simetría respecto a un plano con la dirección del flujo, de tal manera que las caras incidentes del objeto con el fluido siguen siendo las mismas (figuras 3.11 con 3.12; 3.13 con 3.14); c) Traslación en dirección perpendicular al flujo (figuras 3.8 con 3.9 y 3.10); d) El mismo tipo de simetría ya mencionado más traslación en dirección del flujo (figuras 3.11 con 3.14; 3.12 con 3.13); e) Geometría con tendencia de sustentación predecible (figuras 3.11; 3.12; 3.13; 3.14; 3.15 y 3.16).

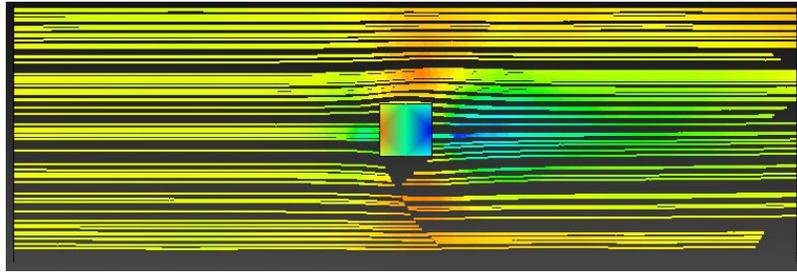


Figura 3.7. Traslación paralela o perpendicular al flujo

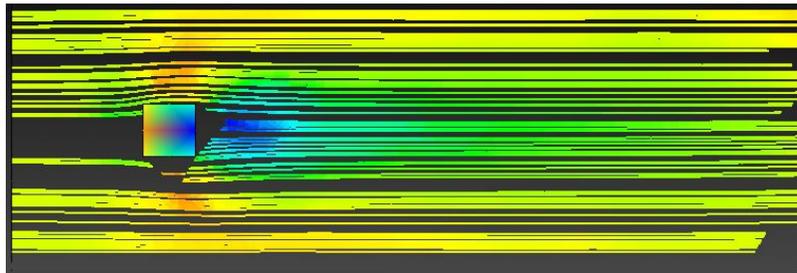


Figura 3.8. Traslación paralela al flujo

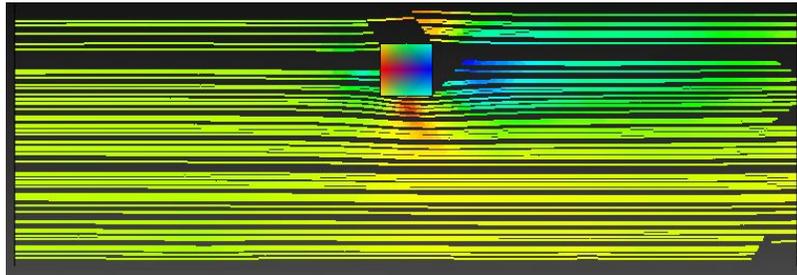


Figura 3.9. Traslación perpendicular al flujo

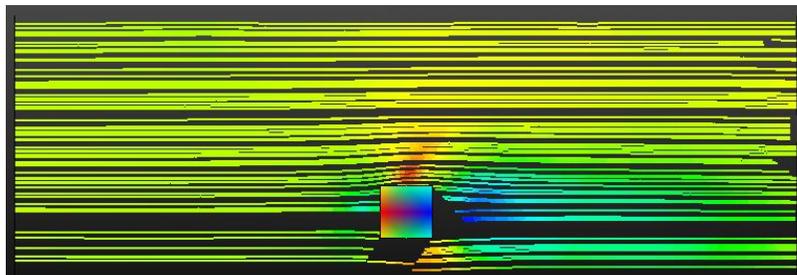


Figura 3.10. Traslación perpendicular al flujo

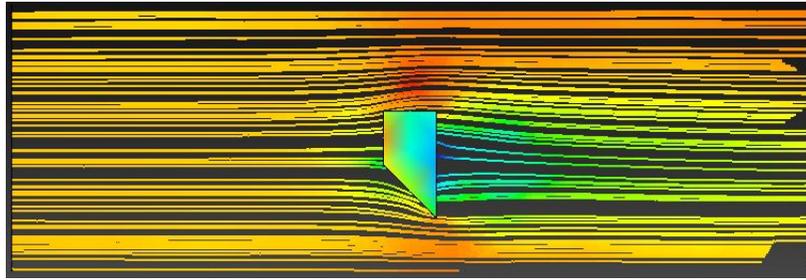


Figura 3.11. Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría

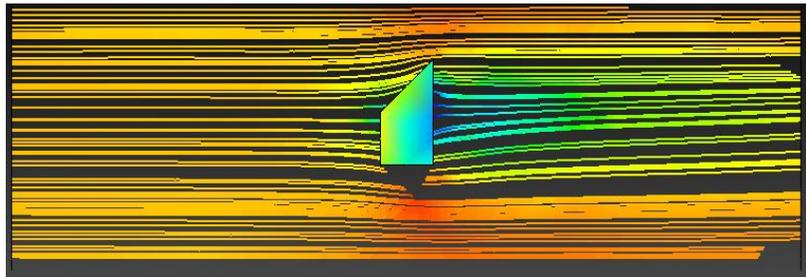


Figura 3.12. Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría

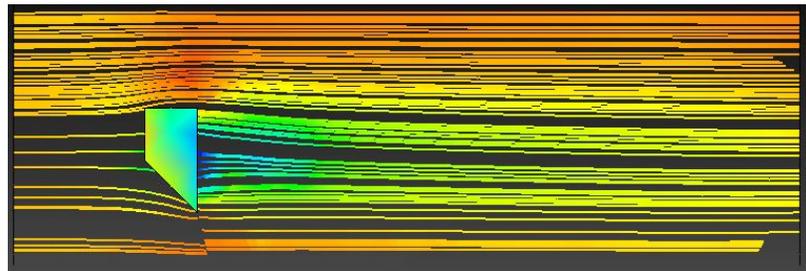


Figura 3.13. Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría

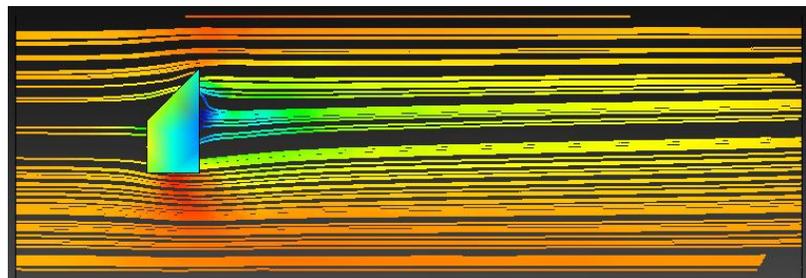


Figura 3.14. Traslación paralela al flujo, tendencia de sustentación y simetría

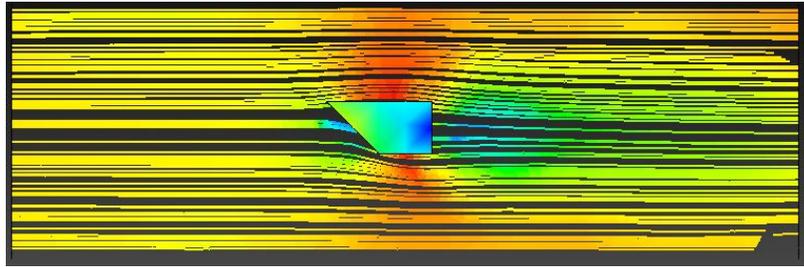


Figura 3.15. Traslación paralela al flujo y tendencia de sustentación

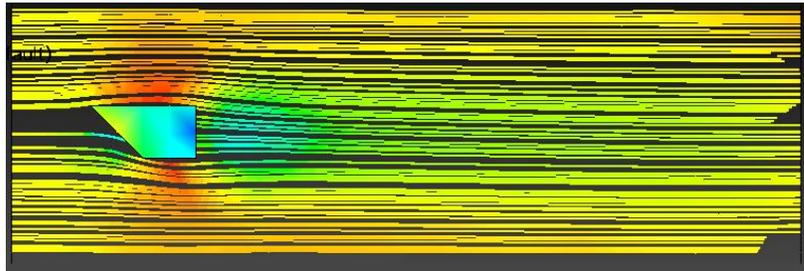


Figura 3.16. Traslación paralela al flujo y tendencia de sustentación

- Obtención de resultados por diferentes vías, para un mismo objeto de estudio y mismas condiciones:** Se quiso comprobar que un valor arrojado directamente por el *software* fuese igual o muy cercano a otro arrojado no directamente. Esto se logró mediante la simulación de un par de cubos idénticos, uno por encima a una distancia determinada del origen de coordenadas y el otro por debajo a la misma distancia pero ambos con sus centros geométricos en el mismo plano, llámese vertical, paralelo al flujo. Entonces era de esperarse que el momento respecto al eje perpendicular al plano mencionado, y que pasa por el origen, debiera ser el mismo para ambos cubos. Además, dicho momento podía ser hallado directamente por el *software*, para cada caso, o bien podía hallarse sólo la fuerza resultante en cada cubo a través del *software* y multiplicar ésta por el brazo de torque ya conocido (igual para cada cubo). Se determinó el promedio de los momentos en los cubos hallados directamente (eran muy similares entre sí) y se comparó con el momento producto del promedio de las fuerzas resultantes en los cubos multiplicado por el brazo de torque ya conocido. Los cubos utilizados pueden apreciarse en las figuras 3.9 y 3.10.

- **Repetitividad de resultados:** Se hizo una misma simulación más de una vez y se tomaron datos intercalados de igual manera durante el transcurso de las simulaciones repetidas con el fin de verificar la repetitividad de los resultados dados por el *software*.

- **Variación de resultados y de tiempo de simulación según parámetros geométricos y físicos de un mismo objeto de estudio y condiciones similares:** Se hizo importante sopesar si valía la pena o no la inversión de más tiempo como precio de hacer simulaciones más detalladas en cuanto a ciertas condiciones de índole físico, como lo fue la rugosidad en este caso, o variaciones geométricas al entorno del objeto de estudio, como lo fue la ampliación del volumen de control; es decir, verificar qué tanta diferencia pudiera haber de un resultado a otro según la modificación de dichos parámetros. Entonces, se ensayó un automóvil cuya geometría se acercaba considerablemente a lo buscado para el prototipo *Formula SAE UCV 2009*. En un caso, para un volumen de control (conocido luego como “túnel de viento virtual”) de 12 metros de longitud se hizo similares corridas; una con rugosidad de 3 mm en las ruedas y en lo que sería el suelo 5 mm, la otra sin rugosidad. En el otro caso, se hizo lo mismo en cuanto a las rugosidades pero esta vez con un volumen de control de 15 metros de longitud. En total fueron cuatro simulaciones.

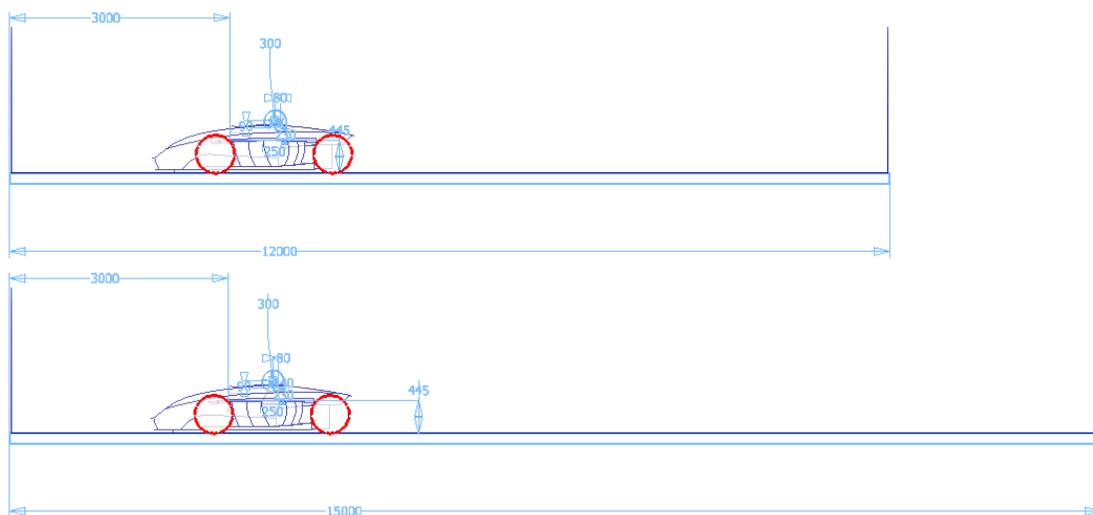


Figura 3.17. Simulaciones con y sin rugosidad, para “túneles de viento virtuales” de 12 y 15 metros

- **Variación del tiempo en simulaciones iguales hechas por diferentes computadoras:** Se comprobó qué tanto puede diferir el tiempo de corrida para condiciones y geometría idénticas en simulaciones hechas por computadores de diferentes prestaciones.

3.2.2.3 Toma de Decisiones

Como se dijo anteriormente, se realizaron varios ensayos previos a las simulaciones definitivas de los carenados.

Las geometrías aleatorias fueron simuladas y con sus resultados analizados se hicieron otros ensayos con variantes respecto a las primeras geometrías o bien se hicieron otras nuevas con las cuales se pudiera obtener respuesta a otras inquietudes; es decir, esto se trataba de ensayos cíclicos retroalimentados con el fin de hacer las simulaciones definitivas de cada carenado de la manera más acertada posible.

3.2.3.1 Preparación del Carenado para ser Simulado

Este punto va dirigido a la parte técnica o netamente ingenieril.

Inicialmente, como se explicó anteriormente, el carenado es dibujado a partir del ensamble digital del automóvil *Formula SAE UCV*, es decir, encima de él. Por tal razón, el archivo del carenado hasta este instante es propiamente del carenado, sin los demás componentes del ensamble.



Figura 3.18. Dibujo del carenado a partir del ensamble del prototipo *Formula SAE UCV* 2009

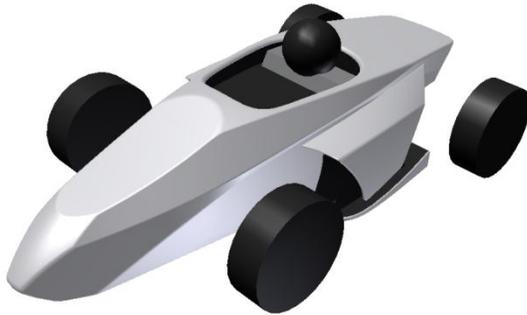


Figura 3.19. Ruedas, motor y casco del piloto en el mismo archivo del dibujo del carenado

Para realizar las simulaciones se hace necesario disponer de las ruedas y del motor, además del casco del piloto, el cual termina siendo como un agregado geométrico del carenado. A manera de simplificar las simulaciones y aligerar carga de cómputo se prefirió que dichos componentes estuviesen en el mismo archivo que originalmente era sólo del dibujo del carenado.

Adicionalmente, para lograr simular flujo externo al carenado, en vista de que el *software* sólo permite literalmente simulaciones con flujo interno, fue imprescindible determinar un volumen de control en el que las superficies externas del carenado, ruedas, motor y casco constituyen parte de la superficie límite de tal volumen de control; ésto es un túnel de viento virtual, cuya geometría más adecuada se consideró fuese un semi-cilindro. La cara plana que biseca al cilindro sería el piso sobre el cual el automóvil rueda.

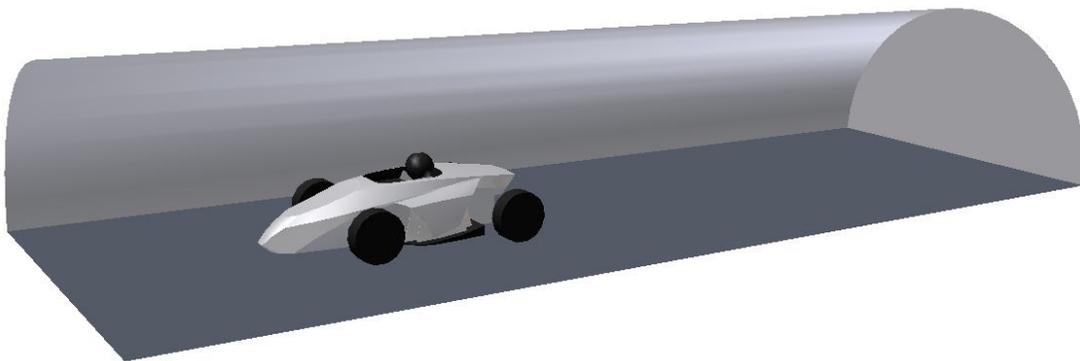


Figura 3.20. Túnel de viento virtual

El efecto final es como si a un ducto semi-cilíndrico se le hiciera una abolladura con la forma del automóvil en la cara plana que se mencionó y como si lo

que es flujo interno en dicho ducto sería flujo externo para la abolladura, o sea, para el automóvil. También, además de crear las ruedas, el motor, el casco del piloto y el túnel de viento virtual, se hizo relevante eliminar los redondeos de las aristas, así como sustituir las aristas que representarían bordes muy agudos por una nueva y sutil cara comprendida ahora entre dos aristas, con el propósito de facilitar los cálculos para la geometría.

3.2.3.1.1 Simulación de la Geometría de Referencia o del Carenado

3.2.3.1.1.1 Introducción

ANSYS® CFX™ es un *software* de CFD (siglas en inglés de Dinámica de Fluidos Computacional) de la empresa norteamericana ANSYS®, que fue desarrollado por la empresa británica AEA Technology®.

Hasta la versión 4.x este *software* utiliza la técnica numérica conocida como Método de Volúmenes Finitos (FVM por sus siglas en inglés), desarrollada por Patankar, S. y publicada en 1980, que requiere que la malla a utilizar sea estructurada (para que permita el escalonamiento), mientras que la versión 5.x y posteriores (10 y 11) utilizan una variante denominada Método de Volúmenes Finitos basados en Elementos (EbFVM por sus siglas en inglés), también conocida como Método de Elementos Finitos basados en Volúmenes de Control (CVFEM por sus siglas en inglés), y la malla puede ser desestructurada. Dicho *software* utiliza estos métodos por una modificación de la ecuación de continuidad global (ecuación de masa-presión), tantas ecuaciones de continuidad por especie como sustancias estén presentes (éstas si aplican al caso en estudio), tres ecuaciones (escalares) de *momentum* (ecuaciones de Navier-Stokes para el caso de fluido Newtoniano), y la ecuación de energía (ésta si aplica al caso en estudio).

ANSYS® CFX™ tiene incorporadas funciones lineales de interpolación (para los términos difusivos de todas las ecuaciones discretizadas y el de presión de las ecuaciones de *momentum*) y varios esquemas de diferenciación (para el término

transitorio y los advectivos de las ecuaciones). También tiene implementado un algoritmo propio de solución para acoplar las ecuaciones, y la técnica numérica conocida como “multigrid” para resolver el sistema de ecuaciones algebraicas linealizadas. Adicionalmente, dispone de diversos modelos para toda una variedad de fenómenos relacionados con CFD, tales como:

- Flujo multifásico
- Transferencia de calor conjugada (interacción térmica sólido-fluido)
- Radiación térmica
- Combustión y flujo con reacción química
- Turbulencia

Además, dispone de una base de datos de propiedades de sustancias puras (gases, líquidos y sólidos), permite utilizar malla deformable, considerar interacción estructura-fluido (interacción dinámica sólido-fluido) y es apropiado para análisis-diseño de maquinaria rotativa, particularmente turbomáquinas.

El siguiente diagrama de bloques muestra la manera en la que está concebido el *software* como conjunto de módulos. Los términos “grande” y “pequeño” que se utilizan más adelante se refieren al diagrama.



Figura 3.21. Conjunto de módulos del *software* de simulación

El primer bloque grande se denomina *Pre-Processor* y tiene el propósito de generar el archivo de datos (geométricos, de malla y físicos-numéricos) que definen el problema a resolver. Los tres bloques pequeños que constituyen el *Pre-Processor* son: *Geometry*, *Meshing* y *CFX-Pre*TM, y los programas computacionales con los que se ejecutan son:

- *Geometry*: DesignModelerTM (para crear o importar la geometría)
- *Meshing*: CFX-MeshTM (para generar la malla)

- *Geometry + Meshing*: ICEM CFD™ (para crear o importar la geometría y para generar o importar la malla)
- CFX-Pre™ (para simular los datos físicos y numéricos)

El siguiente bloque grande es *Solver*, que se ejecuta con el programa computacional CFX-Solver™ el cual se gestiona con CFX-SolverManager™ y cuyo propósito es encontrar la solución numérica, para los datos suministrados con CFX-Pre™, del sistema de ecuaciones de conservación: de masa (global y por especie, ésta si hay transferencia de masa), de *momentum* y de energía (ésta si hay transferencia de calor).

Por último, el bloque grande *Post-Processor* que se ejecuta con el programa computacional CFX-Post™, que tiene la finalidad de visualizar en 2D o 3D y animar (ésta si el régimen del problema resuelto es transitorio) para una mejor comprensión de los resultados obtenidos con CFX-Solver™.

En el presente trabajo, ANSYS® CFX™ fue utilizado para simular, primeramente, la aerodinámica de las geometrías de ensayo y luego cada uno de los carenados candidatos. Fue necesario entonces, según la manera en que está concebido el *software*, ejecutar tres etapas (ver figura 3.21).

3.2.3.1.1.2 Etapa de Pre-procesamiento:

En esta etapa, por medio del programa DesignModeler™, se obtuvo la geometría de ensayo o el carenado a los cuales se les generó la malla gracias al otro programa de nombre CFX-Mesh™. A ambos programas mencionados se les accede a través de Workbench™, que permite gestionar todos los módulos, mientras que al módulo CFX-Pre™, que sirve para el suministro de datos físicos y numéricos, se accede a través de Workbench™ o CFX Launcher™ (este último sólo permite gestionar los módulos CFX-Pre™, CFX-Solver™ y CFX-Post™)

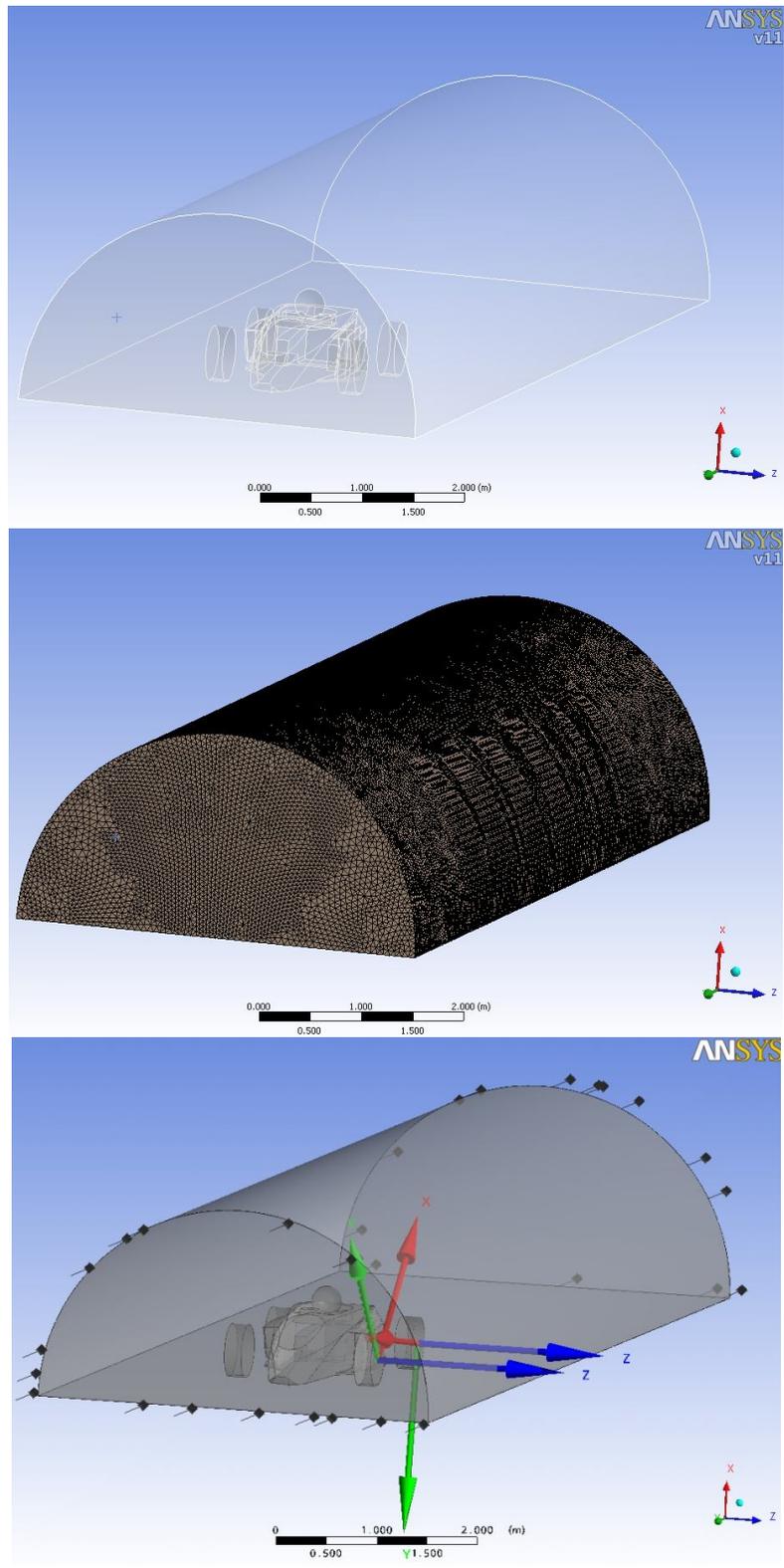


Figura 3.22. Pre-procesamiento: obtención de geometría, mallado y suministro de datos

Para el caso de los carenados, los datos físicos y numéricos suministrados en el módulo CFX-Pre™ se darán a conocer posteriormente a los datos geométricos preestablecidos en “Preparación del Carenado para ser Simulado” que se dan a continuación:

- **Datos Geométricos**

- *Dimensiones del paralelepípedo que encierra al carenado junto con ruedas y casco del piloto: Largo: 2.770mm; Ancho: 1.500mm; Alto: 880mm.*

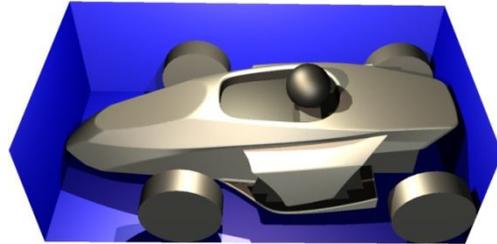


Figura 3.23. Paralelepípedo que encierra al carenado junto con ruedas y casco del piloto

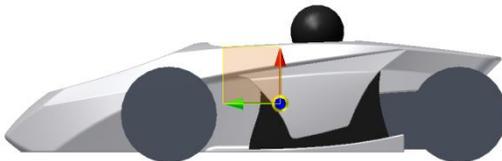


Figura 3.24. Ubicación aproximada del centro de gravedad del automóvil

-*Ubicación aproximada, en dirección longitudinal, del centro de gravedad en automóvil; que además se estima en el plano medio: 280mm de altura respecto al suelo y a un 65% de la longitud del automóvil desde adelante hacia atrás.*

-*Diámetro del casco del piloto: 300mm.*

-*Dimensiones del túnel de viento virtual semi-cilíndrico: Diámetro: 4.000mm; Longitud: 12.000mm.*

-*Distancias aproximadas entre el automóvil y la cima del simi-cilindro y entre el automóvil y los costados del semi-cilindro: 1.150mm y 1.200mm, respectivamente.*

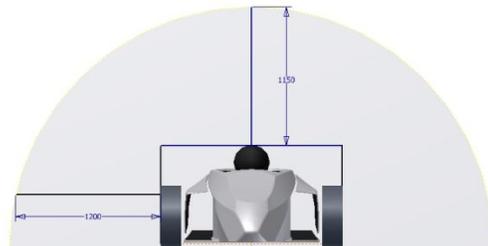


Figura 3.25. Despeje superior y lateral entre carenado y Túnel Virtual de Viento

-*Despeje entre lo más inferior del carenado y el suelo: 50mm*

-Ubicación aproximada del automóvil dentro de túnel, tomando como referencia el centro d gravedad del automóvil: De adelante hacia atrás a 2/7 la longitud del túnel.

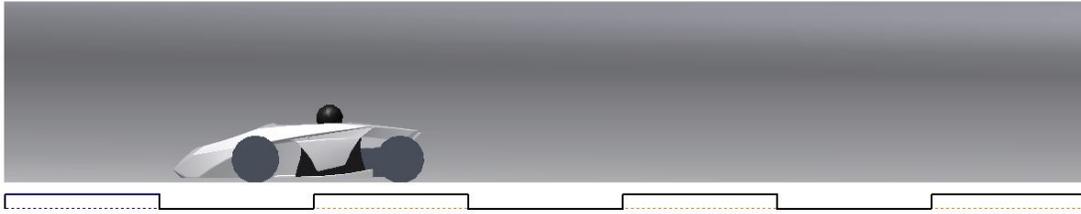


Figura 3.26. Ubicación aproximada del automóvil dentro del túnel

-Distancias aproximadas desde la entrada del túnel hasta la nariz del carenado y desde la cola del carenado hasta la salida del túnel: 1.850mm y 7.300mm, respectivamente.

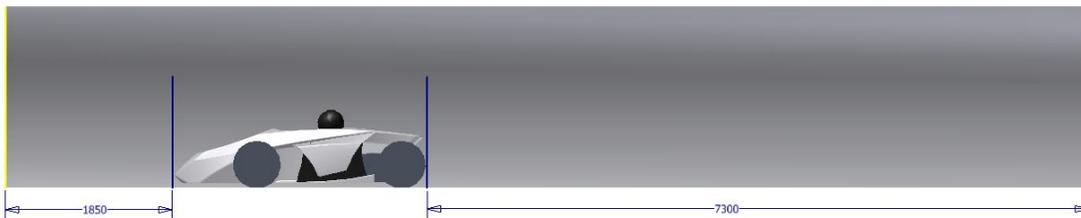


Figura 3.27. Despeje aproximado hacia adelante y hacia atrás del automóvil en el túnel

-Diámetro y ancho de ruedas: 530mm y 170mm, respectivamente.

-Dimensiones del paralelepípedo que supone el motor y sus allegados: Largo: 300mm; Ancho: 400mm; Alto: 430mm.

- **Datos Físicos**

-Fluido utilizado:

Aire seco a 25C° y 1atm, como sustancia pura, con densidad de 1,185 kg/m³ y viscosidad dinámica de 1,831x10⁻⁵ kg/m.s.

-Condiciones de borde impuestas:

Cara anterior del túnel:

Entrada de aire a velocidad en dirección normal de 30, 20 ó 10 m/s.

Régimen de flujo subsónico.

Cara posterior del túnel:	Salida de aire a presión relativa de 1 atm. Régimen de flujo subsónico.
Superficie cilíndrica del túnel:	Techo y paredes. “Pared” de libre deslizamiento para el flujo.
Cara inferior del túnel:	Suelo en traslación con misma velocidad del flujo. “Pared” lisa sin deslizamiento para el flujo.
Cilindros del automóvil:	Ruedas en rotación en torno a su eje geométrico, con velocidad angular de 18, 12 ó 6 rev/s y sentido de giro según corresponda. “Pared” lisa sin deslizamiento para el flujo.
Esfera y superficies del Automóvil:	Casco del piloto y carenado. “Pared” lisa sin deslizamiento para el flujo.

-Modelos implicados:

Modelo de transferencia de calor:	Ninguno (Isotérmico).
Modelo de Turbulencia:	kappa-épsilon.

3.2.3.1.1.3 Etapa de Procesamiento:

La solución numérica del problema ya definido se obtiene con CFX-Solver™ que es el programa computacional correspondiente al bloque de procesamiento, que se gestiona con CFX-SolverManager™, y que se accede a él también a través de Workbench™ o CFX-Launcher™.

3.2.3.1.1.4 Etapa de Post-procesamiento:

Finalmente, mediante CFX-Post™ (bloque de post-procesamiento), se visualizan los resultados del problema ya resuelto, y también se accede a él a través de Workbench™ o CFX-Launcher™.

3.2.3.1.2 Recolección de Resultados de la Simulación

Diversos valores de resultados arrojados por el *software* son tomados y registrados durante y después de las simulaciones.

Los resultados de mayor importancia son tomados en la última etapa de la simulación, en el módulo de post-procesamiento; unos para ser usados en cálculos posteriores, otros para ser reportados directamente y otros sólo para completar el panorama al momento de analizar y comprender la situación.

Para el caso de los carenados, los resultados de interés fueron:

- Fuerza ejercida sobre el automóvil en dirección al avance del mismo (Fuerza de Arrastre)
- Fuerza ejercida sobre el automóvil en dirección normal al suelo (Fuerza de sustentación)
- Momento en torno al eje horizontal transversal que pasa aproximadamente por el centro de gravedad del automóvil (Momento de Cabeceo)
- Máxima y mínima presión relativa dentro del túnel
- Máxima y mínima velocidad dentro del túnel

También son tomados otros datos en la primera y segunda etapa, en el primer y segundo módulo.

Del primer módulo los valores son registrados con el fin de corroborar que las mallas entre los cinco carenados candidatos sean similares, o sea, que se estén haciendo simulaciones bajo la misma rigurosidad, en cuanto a lo fino de la malla.

Entonces se tomó como resultados de la malla generada:

- Número total de nodos en la malla
- Número total de tetraedros en la malla de volumen
- Número total de caras resultantes en la malla de superficie

Del segundo módulo, durante la solución numérica, se registran valores para asegurar que los finales son correspondientes a un número de iteración de cuando hay estabilidad en los resultados iterativos que el programa maneja internamente; es decir, para estar en capacidad de detectar si el proceso iterativo se trunca inadecuadamente.

Dichos resultados son:

- Fuerza de Arrastre, Fuerza de Sustentación y Momento de Cabeceo cada diez iteraciones durante la solución numérica, excepto por el rango desde la iteración número 1 a la 10
- Número de última iteración de la solución numérica
- Tiempo total utilizado en la solución numérica (*Total Wall Clock Time*).

Adicionalmente, desde el dibujo digital de cada carenado se tomaron sus respectivas áreas frontales proyectadas.

3.2.3.1.3 Identificación y Jerarquización de Criterios de Desempeño Aerodinámico

Una vez tomados los resultados más relevantes para el estudio en cuestión, se seleccionaron los que actuarán, directa o indirectamente, como criterios de desempeño aerodinámico y así juzgar los carenados candidatos.

Se seleccionaron los correspondientes a la Fuerza de Arrastre, la Fuerza de Sustentación y el Momento de Cabeceo. La misma Fuerza de Arrastre fue necesaria para el cálculo del Coeficiente de Arrastre, el cual fue considerado también como otro criterio de desempeño aerodinámico.

Entonces, los criterios de desempeño aerodinámico seleccionados fueron:

- Coeficiente de Arrastre
- Fuerza de Sustentación
- Fuerza de Arrastre
- Momento de Cabeceo

El valor del coeficiente de arrastre indica la manera cómo puede el carenado desplazarse atravesando el fluido, en este caso el aire; es decir, qué tan eficaz es el carenado en cuanto a aprovechamiento de su geometría. El valor de dicho coeficiente constituye un criterio de desempeño aerodinámico muy importante.

Para tratarse de un bólido no es menos importante la Fuerza de Sustentación, la cual refleja si el vehículo tiende a levantarse, lo que sería altamente desfavorable, o si por el contrario tiende a “pegarse” más al suelo. Lo deseado es esa tendencia a “pegarse” al suelo, y cuanto mayor sea la magnitud con el que lo haga mejor será para el comportamiento dinámico del bólido en las situaciones en las que más amerite adherencia al suelo.

La fuerza de arrastre, si bien está implicada en el coeficiente de arrastre, ésta indica cuánto el vehículo debe vencer para lograr su avance. Indistintamente de si el valor del coeficiente de arrastre es muy bajo (muy bueno), es posible que la fuerza de arrastre sea alta lo cual implicaría un alto consumo de combustible para el vehículo. Esto no conviene en ningún aspecto y menos para la competencia.

Un Momento de cabeceo elevado puede inducir a vibraciones indeseadas en el vehículo. En el caso del automóvil *Formula SAE UCV* el sistema de suspensión tiene un rango de movimiento muy limitado, por lo que una tendencia de levantar o bajar la nariz del carenado no llegaría muy lejos, pero de todas maneras lo conveniente es que el vehículo vaya lo más equilibrado posible.

Con fines en la evaluación de criterios de desempeño aerodinámico éstos se ponderan de 0 a 5 puntos según relevancia o jerarquía al momento de calificar cada carenado por su desempeño aerodinámico.

Tomando en cuenta lo anterior se decidió jerarquizar los criterios de desempeño aerodinámico de la siguiente manera:

Criterios de Desempeño Aerodinámico	Puntos
<u>Coeficiente de Arrastre</u>	<u>5</u>
<u>Fuerza de Sustentación</u>	<u>5</u>
<u>Fuerza de Arrastre</u>	<u>3</u>
<u>Momento de Cabeceo</u>	<u>3</u>

3.2.3.1.4 Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico

Por cada carenado, y según los resultados obtenidos en las simulaciones, se asigna un valor que muestra el nivel de cumplimiento de los criterios seleccionados anteriormente. Los valores varían de 0 a 10 ajustándose al grado de cumplimiento que tuviera el carenado frente al criterio, siendo 0 un valor del peor y 10 del mejor cumplimiento con respecto a los demás.

Para cada carenado, luego de obtener los valores correspondientes al cumplimiento de los criterios y multiplicar cada uno de ellos con el puntaje de su respectivo criterio los productos son sumados. La suma será una especie de medida de cuánto mejor es el desempeño aerodinámico de cada carenado; es decir, el carenado que tenga un mayor puntaje total es considerado como con mejor desempeño aerodinámico.

En la tabla siguiente V puede valer desde 0 hasta 10, P es el producto del puntaje de cada criterio por V , y S la suma de las P correspondientes a su columna.

Los valores de V dependen de los resultados obtenidos en las simulaciones, los cuales podrán encontrarse más adelante en el capítulo correspondiente a “Resultados” así como también la misma tabla ya elaborada enteramente con sus respectivos resultados.

Tabla de Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico

Ponderación	Criterios	Carenado A		Carenado B		Carenado C		Carenado D		Carenado E	
		Valor de Cumplimiento	Producto								
5pts	Coefficiente de Arrastre	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
5pts	Fuerza de Sustentación	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
3pts	Fuerza de Arrastre	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
3pts	Momento de Cabeceo	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
Total		S		S		S		S		S	

3.2.3.1.5 Análisis y/o Comparación de Resultados

Este proceso de analizar y/o comparar, exclusivo para las geometrías de ensayo, consiste en detallar los resultados obtenidos para ponerlos en contrapeso con resultados esperados, resultados estos últimos por el cual se motiva el ensayo. También la comparación es comúnmente hecha entre resultados obtenidos netamente de las simulaciones, por ejemplo, fuerza de arrastre en dos geometrías una espejo de la otra. El análisis, además de aportar un gran paso en la comprensión de la situación y en la consolidación de decisiones, fomenta una manera retroalimentaría de indagar sobre diversas posibilidades y combinaciones de ensayos posibles para cerrar decisiones permanentes en el presente estudio.

Próximo a este proceso, entonces, viene la toma de decisiones comentada anteriormente.

3.2.3.2 Preparación del Carenado para ser Presentado y Juzgado por Apariencia

Esto se refiere más que todo a la preparación del carenado en su lado artístico. En este sentido, preparar el carenado para ser presentado y juzgado se refiere a estandarizar y a hacer atractivo el aspecto visual que los carenados tendrán. Esto es, colocar los carenados candidatos todos del mismo color, mismo nivel de acabado, misma iluminación, mismos ambientes y, en lo posible, mismas vistas de manera que quien los observe pueda discernir y comparar con mayor facilidad el estilo y las líneas de cada cual, sin influencias terceras. Lo anterior implica tomar imágenes con las cualidades mencionadas a partir del dibujo digital del ensamble con el carenado y acomodarlas para ser presentadas a quienes evaluarán los carenados por su apariencia. A continuación, algunas de las imágenes presentadas a los miembros del equipo:



Figura 3.28. Vistas ortogonales del carenado A



Figura 3.29. Vistas ortogonales del carenado B



Figura 3.30. Vistas ortogonales del carenado C



Figura 3.31. Vistas ortogonales del carenado D



Figura 3.32. Vistas ortogonales del carenado E



Figura 3.33. Carenado A



Figura 3.34. Carenado B



Figura 3.35. Carenado C



Figura 3.36. Carenado D

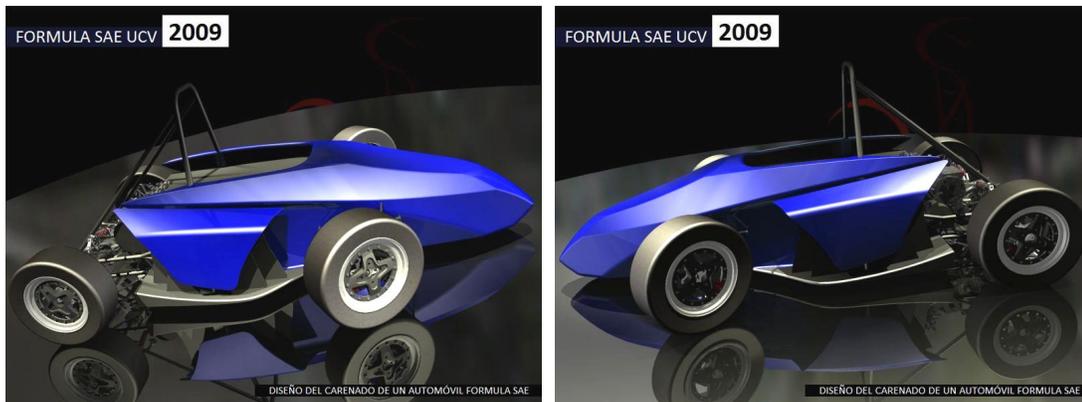


Figura 3.37. Carenado E

3.2.3.2.1 *Votaciones sobre Apariencia*

En este caso los integrantes del *Team Formula SAE UCV* fueron el universo para estas votaciones, con un número de 10 personas. La votación consistió en que cada persona eligió el carenado que más le gustaba; es decir, cada quien votó por uno solo de los cinco carenados candidatos.

3.2.3.2.2 *Recolección de Resultados de las Votaciones sobre Apariencia*

La votación de cada persona fue registrada y todas apiladas para su uso en el proceso de selección del carenado

3.2.3.3 Observación del Carenado para ser Juzgado por Facilidad de Construcción

Esta parte es referente a la mano de obra al momento de construir el carenado y la estrategia a seguir para tal fin. Aunque la construcción del carenado no es un objetivo explícito del presente trabajo sí se hace muy importante a considerar puesto que al diseñar el carenado del prototipo *Formula SAE UCV 2009* se desea pueda ser construido con un nivel de dificultad razonable.

En este caso observar consiste en mirar cuidadosamente los detalles en cada carenado, tales como diferencias de relieves, curvaturas pronunciadas, bordes que requieren de un excelente acabado, entre otros.

3.2.3.3.1 Estimaciones sobre Facilidad de Construcción

El fundamento para declarar un carenado como difícil o fácil de construir se basa primordialmente en la experiencia obtenida a lo largo de los años en los que el equipo ha participado en la competencia. Otro factor que debe influir en la estimación es qué tan posible sea el desmolde de las piezas, pues este proceso de desmolde se efectúa dos veces, como se explicó anteriormente.

3.2.3.3.2 Recolección de Resultados de las Estimaciones sobre Facilidad de Construcción

A cada carenado se le asigna un valor que represente su nivel de facilidad de construcción. Dicho valor para cada carenado pertenece a una escala común entre todos los carenados y éste es registrado para entrar en juego durante la selección del carenado

3.2.4 Jerarquización de Criterios de Selección del Carenado

Como ya es sabido, los tres pilares para el diseño del carenado del prototipo *Formula SAE UCV 2009* son su aerodinámica, su apariencia y su facilidad de construcción.

Estas tres características vendrán a ser los tres criterios de selección para elegir uno de los 5 carenados candidatos.

La aerodinámica cumple un rol muy importante en la dinámica del vehículo, tal como pudo apreciarse anteriormente en la parte de “Teoría Aerodinámica” del presente trabajo. Además, para este caso y motivado en la competencia, se hace sumamente importante un buen aprovechamiento del combustible aunque cierto es que la aerodinámica impacta sobre este aspecto más a altas velocidades, las cuales son alcanzadas en ciertas oportunidades durante toda la competencia.

Tan importante como la aerodinámica se hace también el aspecto exterior del automóvil, su apariencia, ya que esto constituye una manera de comunicación visual y mientras más armoniosas sean las líneas mejor es la idea que se transmite.

Un poco menos importante que las anteriores pero sin dejar de ser de consideración se encuentra la facilidad de construcción. Se sabe que un carenado puede hacerse difícil de construir pero seguirá siendo posible de hacer (mientras el diseño conceptual del carenado se haya concebido previendo al menos la posibilidad de su construcción), a diferencia de la aerodinámica y la apariencia, las cuales sólo podrán repercutir de buena o de mala manera alterando al fin el resultado final. Obviamente, lo idóneo es un carenado con mucha facilidad de construcción; que sea tal de poderse hacer en un tiempo y con esfuerzo prudentes para el equipo de *Formula SAE UCV*.

De igual manera que para la jerarquización de los criterios de desempeño aerodinámico esta vez también se ponderaron los criterios de selección desde 0 a 5 puntos según importancia en el resultado de la selección del carenado.

Entonces, para el estudio en cuestión, se jerarquizaron los criterios de selección del carenado de la siguiente manera:

Criterios de Selección del Carenado	Puntos
<u>Aerodinámica</u>	<u>5</u>
<u>Apariencia</u>	<u>5</u>
<u>Facilidad de Construcción</u>	<u>3</u>

3.2.5 Evaluación de Criterios de Selección del Carenado

Según los resultados provenientes de la evaluación de criterios de desempeño aerodinámico, de las votaciones por parte de los miembros del equipo *Formula SAE UCV* a favor de la apariencia y, basado en la experiencia, de la facilidad de construcción, se le asigna un valor a cada carenado que muestra el nivel de cumplimiento de los criterios de selección mencionados. Los valores varían de 0 a 10 ajustándose al grado de cumplimiento que tuviera el carenado frente al criterio, siendo 0 un valor del peor y 10 del mejor cumplimiento con respecto a los demás.

Para cada carenado, luego de obtener los valores correspondientes al cumplimiento de los criterios y multiplicar cada uno de ellos con el puntaje de su respectivo criterio los productos son sumados. La suma representará, por mayor o menor que sea, el carenado que mejor o peor combine los tres criterios de selección, respectivamente

En la tabla siguiente V puede valer desde 0 hasta 10, P es el producto del puntaje de cada criterio por V , y S la suma de las P correspondientes a su columna.

Los valores de V dependen, según el caso, de los resultados obtenidos en la evaluación de criterios de desempeño aerodinámico, en la votación por la apariencia y en la estimación de facilidad de construcción; todos éstos pueden hallarse más adelante en el capítulo correspondiente a “Resultados” así como también la misma tabla ya elaborada enteramente con sus respectivos resultados.

Tabla de Evaluación de Criterios de Selección

Ponderación	Criterios	Carenado A		Carenado B		Carenado C		Carenado D		Carenado E	
		Valor de Cumplimiento	Producto								
5pts	Aerodinámica	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
5pts	Apariencia	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
3pts	Facilidad de Construcción	V	P	V	P	V	P	V	P	V	P
Total		S		S		S		S		S	

3.2.6 Selección del Carenado

La selección del carenado dependerá directamente del resultado obtenido en la tabla de “Evaluación de Criterios de Selección”; precisamente, el carenado que posea la más alta suma en el reglón “Total” de dicha tabla (lo mismo decir que el carenado cuyo valor “S” sea el mayor) es, entonces, el que habrá combinado de la mejor manera los tres criterios fundamentales para el diseño del prototipo *Formula SAE UCV 2009*.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS

4.1 Resultados Previos

Entre los todos resultados recolectados éstos, los previos, son los que contribuyen de manera directa o indirecta en lo que viene siendo el proceso de selección del carenado mas no son los determinantes por sí mismos en dicha selección. Luego se tendrán los resultados finales, los cuales sí son determinantes.

4.1.1 Recolección de Resultados de la Simulación

4.1.1.1 Geometría de Referencia

Los resultados aquí obtenidos son de suma importancia ya que por ellos fue que se pudo tomar decisiones cruciales y así determinar cuáles serían los parámetros a considerar al momento de las simulaciones de los carenados. Además, los resultados entre un ensayo y otro sucesivo daban camino a nuevas inquietudes, las cuales sirvieron para aclarar otros puntos luego de ser estudiadas.

A continuación se encontrarán los resultados de las simulaciones, ya mencionadas anteriormente, de las geometrías de ensayo.

- ***Variación de resultados según parámetros geométricos en un mismo objeto de estudio y con mismas condiciones***

- a) Traslación en dirección del flujo (figuras 3.7 con 3.8; 3.11 con 3.13; 3.12 con 3.14; 3.15 con 3.16):

Puede observarse en las siguientes tablas que entre geometrías idénticas pero una trasladada respecto a otra en la dirección del flujo, los valores de mayor importancia como lo son la fuerza de arrastre y la fuerza de sustentación (esta última sólo para aquellas geometrías que induzcan claramente una sustentación) varían levemente entre sí, lo que indica que ciertamente el *software* arroja un resultado tal como lo esperado.

Traslación en dirección del flujo; figuras 3.7 con 3.8

Geometría de Referencia	F_X (Fuerza de Arrastre) N	F_Y (Fuerza de Sustentación) N	F_Z (Fuerza Lateral) N	T_Z (Momento de Cabeceo) N.m	T_X N.m	T_Y N.m
Figura 3.7	9,173	-0,324	-0,202	0,068	-0,005	-0,008
Figura 3.8	8,996	-0,120	0,008	0,192	-0,001	0,008

Traslación en dirección del flujo; figuras 3.11 con 3.13

Geometría de Referencia	F_X (Fuerza de Arrastre) N	F_Y (Fuerza de Sustentación) N	F_Z (Fuerza Lateral) N	T_Z (Momento de Cabeceo) N.m	T_X N.m	T_Y N.m
Figura 3.11	22,706	5,357	0,503	1,971	-0,076	0,028
Figura 3.13	22,652	4,832	0,479	-2,328	-0,014	0,458

Traslación en dirección del flujo; figuras 3.12 con 3.14

Geometría de Referencia	F_X (Fuerza de Arrastre) N	F_Y (Fuerza de Sustentación) N	F_Z (Fuerza Lateral) N	T_Z (Momento de Cabeceo) N.m	T_X N.m	T_Y N.m
Figura 3.12	22,746	-5,046	-0,272	-1,894	-0,046	-0,021
Figura 3.14	22,146	-5,169	-0,368	2,805	-0,055	-0,348

Traslación en dirección del flujo; figuras 3.15 con 3.16

Geometría de Referencia	F_X (Fuerza de Arrastre) N	F_Y (Fuerza de Sustentación) N	F_Z (Fuerza Lateral) N	T_Z (Momento de Cabeceo) N.m	T_X N.m	T_Y N.m
Figura 3.15	8,632	4,863	-0,186	-0,860	0,043	-0,006
Figura 3.16	8,949	4,545	-0,704	-4,949	0,005	-0,695

- b) Simetría respecto a un plano con la dirección del flujo, de tal manera que las caras incidentes del objeto con el fluido siguen siendo las mismas (figuras 3.11 con 3.12; 3.13 con 3.14):

En este caso podrá observarse que no influye en gran medida colocar un cuerpo en una posición u otra simétrica respecto a un plano paralelo al flujo, en el tipo de túnel de viento virtual utilizado. Esto, de igual manera, era un resultado esperado. Claro está, en las geometrías cuya sustentación es notable podrá apreciarse un cambio de signo en la misma.

Simetría respecto a un plano con la dirección del flujo; figuras 3.11 con 3.12

Geometría de Referencia	F_X (Fuerza de Arrastre) N	F_Y (Fuerza de Sustentación) N	F_Z (Fuerza Lateral) N	T_Z (Momento de Cabeceo) N.m	T_X N.m	T_Y N.m
Figura 3.11	22,706	5,357	0,503	1,971	-0,076	0,028
Figura 3.12	22,746	-5,046	-0,272	-1,894	-0,046	-0,021

Simetría respecto a un plano con la dirección del flujo; figuras 3.13 con 3.14

Geometría de Referencia	F_X (Fuerza de Arrastre) N	F_Y (Fuerza de Sustentación) N	F_Z (Fuerza Lateral) N	T_Z (Momento de Cabeceo) N.m	T_X N.m	T_Y N.m
Figura 3.13	22,652	4,832	0,479	-2,328	-0,014	0,458
Figura 3.14	22,146	-5,169	-0,368	2,805	-0,055	-0,348

- c) Traslación en dirección perpendicular al flujo (figuras 3.8 con 3.9 y 3.10):
 La simulación correspondiente a la geometría de referencia mostrada en la figura 3.10 presentó fallas desconocidas, lo que implicó un resultado fuera de contexto; sin embargo, entre las geometrías de las figuras 3.8 y 3.9 podrá notarse que los resultados eran de esperarse. Por tratarse de cubos aquí la sustentación no se hace importante.

Traslación en dirección perpendicular al flujo; figuras 3.8 con 3.19 y 3.10

Geometría de Referencia	F _X (Fuerza de Arrastre) N	F _Y (Fuerza de Sustentación) N	F _Z (Fuerza Lateral) N	T _Z (Momento de Cabeceo) N.m	T _X N.m	T _Y N.m
Figura 3.8	8,996	-0,120	0,008	0,192	-0,001	0,008
Figura 3.9	8,755	-0,200	-0,034	-2,120	-0,006	0,000
Figura 3.10	17,554	-7,952	6,234	4,474	-1,343	-0,002

d) El mismo tipo de simetría ya mencionado más traslación en dirección del flujo (figuras 3.11 con 3.14; 3.12 con 3.13):

Se juega con una traslación paralela al flujo simultáneamente con una simetría como la mencionada anteriormente y el resultado es tal como se esperaba; al igual que en los ensayos en sólo traslación se mantienen casi igual las fuerzas, la más relevante a considerar en este caso es la de arrastre, y al igual que en los ensayos de simetría también se invierte el signo de la sustentación.

El mismo tipo de simetría ya mencionado más traslación en dirección del flujo; figuras 3.11 con 3.14

Geometría de Referencia	F _X (Fuerza de Arrastre) N	F _Y (Fuerza de Sustentación) N	F _Z (Fuerza Lateral) N	T _Z (Momento de Cabeceo) N.m	T _X N.m	T _Y N.m
Figura 3.11	22,706	5,357	0,503	1,971	-0,076	0,028
Figura 3.14	22,146	-5,169	-0,368	2,805	-0,055	-0,348

El mismo tipo de simetría ya mencionado más traslación en dirección del flujo; figuras 3.12 con 3.13

Geometría de Referencia	F _X (Fuerza de Arrastre) N	F _Y (Fuerza de Sustentación) N	F _Z (Fuerza Lateral) N	T _Z (Momento de Cabeceo) N.m	T _X N.m	T _Y N.m
Figura 3.12	22,746	-5,046	-0,272	-1,894	-0,046	-0,021
Figura 3.13	22,652	4,832	0,479	-2,328	-0,014	0,458

- e) Geometría con tendencia de sustentación predecible (figuras 3.11; 3.12; 3.13; 3.14; 3.15 y 3.16):

Las geometrías aquí simuladas poseen unos cantos que favorecen a la sustentación positiva o a la negativa, por ello esta simulación tuvo la intención de verificar además que el *software* reconociera esto como tal.

Geometría con tendencia de sustentación predecible; figuras 3.11; 3.12; 3.13; 3.14; 3.15 y 3.16

Figuras	3.11	3.12	3.13	3.14	3.15	3.16
Signo de Sustentación	+	-	+	-	+	+

- ***Obtención de resultados por diferentes vías, para un mismo objeto de estudio y mismas condiciones***

Puede notarse en la tabla próxima que un mismo resultado obtenido de distintas maneras es muy similar cuando proviene de una u otra vía, lo cual indica son bastante coherentes los resultados arrojados por el *software*.

Geometría de Referencia	Momento arrojado por el <i>Software</i> N.m	Fuerza que actúa perpendicularmente al Brazo de Palanca, arrojado por el <i>Software</i> N	Brazo de Palanca conocido a partir de la Geometría de Referencia m	Momento producto del promedio de las Fuerzas por el Brazo de Palanca N.m
Figura 3.9	-2,120	8,755	0,250	13,155x0,250=
Figura 3.10	4,474	17,554		
Promedio	3,297	13,155		

- ***Repetitividad de resultados***

Gracias a los varios datos recogidos pudo observarse que para una misma geometría, misma malla, mismas condiciones de borde, y mismo número de iteración en la solución numérica, los resultados se hacen idénticos entre una simulación y otra. Esto implica que, a pesar de manejarse un modelo de

turbulencia en las simulaciones, éstas siguen un patrón de manera que no hay aleatoriedad en la forma en que se hacen los cálculos iterativos internos del *software*; por lo tanto, puede tenerse la seguridad de que al hacer una simulación en algún momento o sitio determinado podrá hacerse la misma en otro momento y sitio sin sufrir alteraciones en los resultados.

- ***Variación de resultados y de tiempo de simulación según parámetros geométricos y físicos de un mismo objeto de estudio y condiciones similares***

Como se describió anteriormente, fueron hechas cuatro simulaciones.

Las dos sin rugosidad, la de 12 y la de 15 metros de longitud en el túnel de viento virtual necesitaron sólo 61 y 60 iteraciones, respectivamente, para llegar a una convergencia en los cálculos iterativos; sin embargo, a pesar de que los números de iteraciones finales para cada caso son casi iguales los tiempos requeridos para la solución numérica se diferencian casi por el doble.

Luego, considerando las rugosidades, para una longitud del túnel de viento virtual de 12 metros se tiene fueron necesarias las 100 iteraciones tope predefinidas para la solución numérica y aún así se cree pudo haber hecho falta muchas iteraciones más para llegar a una convergencia de resultados. En cambio, para una longitud de 15 metros, igual con las rugosidades, no fue posible siquiera realizar la simulación debido al anuncio de escasa memoria disponible en el computador.

		Fuerza de Arrastre N	Fuerza de Sustentación N	Momento de Cabeceo N.m	Tiempo total utilizado en la solución numérica hh:min
12 metros de Longitud del Túnel de Viento Virtual	Sin Rugosidades	-144,115	-68,654	-24,471	02:57
	Con Rugosidades	-160,279	-96,878	-55,468	06:23
15 metros de Longitud del Túnel de Viento Virtual	Sin Rugosidades	-143,459	-72,278	-30,422	04:12
	Con Rugosidades	–	–	–	–

- ***Variación del tiempo en simulaciones iguales hechas por diferentes computadoras***

Un mismo tipo de simulación fue hecha en computadores de diferentes prestaciones. El resultado, particularmente para los dos computadores utilizados, fue que para una simulación de dos iteraciones de un carenado a 30 m/s y cuya malla poseía 947.775 nodos, la diferencia de tiempo total utilizado en la solución numérica era de 3 horas y 45 minutos en un computador contra 12 minutos en el otro. En fin, puede verse que dependiendo del computador seleccionado para las simulaciones pudiera haber una diferencia en tiempo invertido de al menos hasta 15 veces. Es importante tener un computador apropiado para cada caso.

4.1.1.2 Carenado

4.1.1.2.1 Etapa de Pre-procesamiento

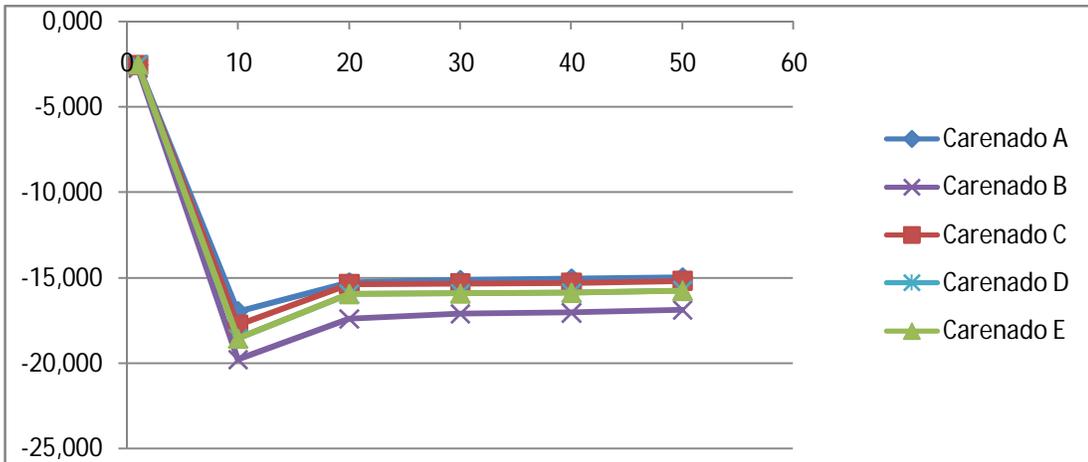
Resultados recolectados en la etapa de Pre-procesamiento.

Carenados:					
	A	B	C	D	E
Número Total de nodos en la malla	974.765	974.333	981.116	972.772	973.633
Número Total de tetraedros en la malla de volumen	5.463.033	5.461.560	5.483.197	5.456.753	5.461.789
Número Total de caras resultantes en la malla de superficie	153.292	153.248	164.296	150.076	150.306

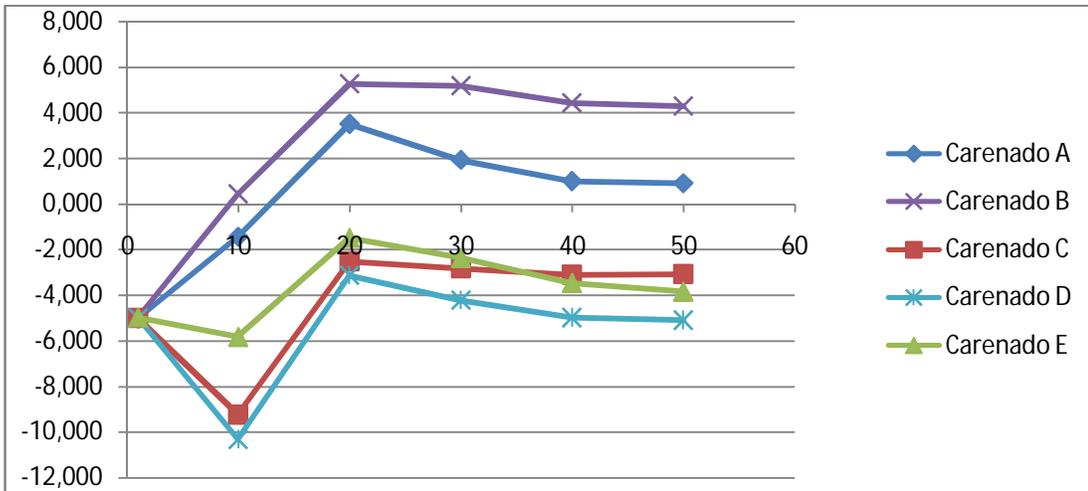
4.1.1.2.2 Etapa de Procesamiento

Resultados recolectados en la etapa de Procesamiento, para simulaciones a 10 m/s (36 km/h)

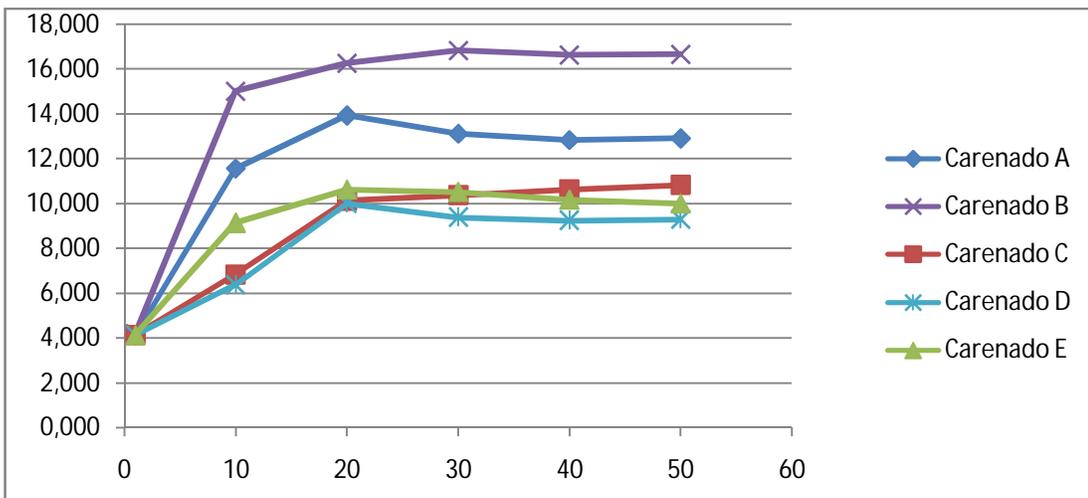
Carenados:						
		A	B	C	D	E
@ 10 m/s; 6 rev/s						
Fuerza de Arrastre por número de iteraciones (N)	1	-2,546	-2,732	-2,542	-2,526	-2,418
	10	-16,968	-19,785	-17,753	-18,549	-19,325
	20	-15,266	-17,418	-15,382	-15,937	-17,312
	30	-15,125	-17,100	-15,343	-15,907	-17,106
	40	-15,053	-17,048	-15,307	-15,863	-17,015
	50	-14,975	-16,892	-15,183	-15,746	-16,912
	60	-	-	-	-	-
Fuerza de Sustentación por número de iteraciones (N)	1	-5,021	-4,991	-4,996	-4,987	-4,980
	10	-1,430	0,437	-9,224	-10,312	-5,830
	20	3,516	5,274	-2,520	-3,130	-1,489
	30	1,931	5,194	-2,816	-4,219	-2,368
	40	1,007	4,430	-3,106	-4,977	-3,464
	50	0,917	4,292	-3,079	-5,090	-3,838
	60	-	-	-	-	-
Momento de Cabeceo por número de iteraciones (N.m)	1	4,134	4,198	4,143	4,135	4,151
	10	11,561	15,019	6,838	6,378	9,144
	20	13,927	16,252	10,140	9,996	10,627
	30	13,112	16,821	10,373	9,387	10,518
	40	12,830	16,631	10,643	9,245	10,174
	50	12,904	16,647	10,832	9,293	9,999
	60	-	-	-	-	-



Gráfica 4.1. Fuerza de Arrastre (N) Vs. Número de Iteraciones; a 10 m/s



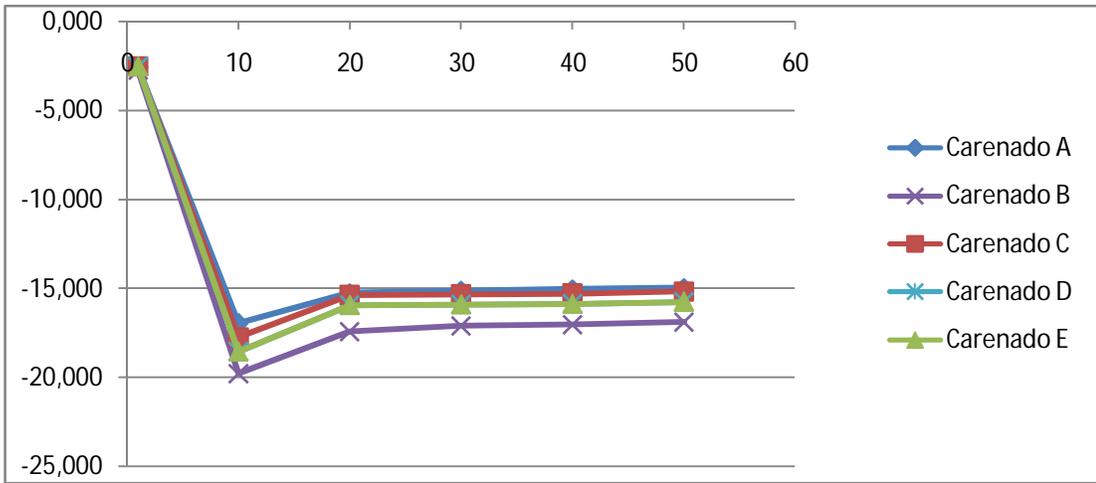
Gráfica 4.2. Fuerza de Sustentación (N) Vs. Número de Iteraciones; a 10 m/s



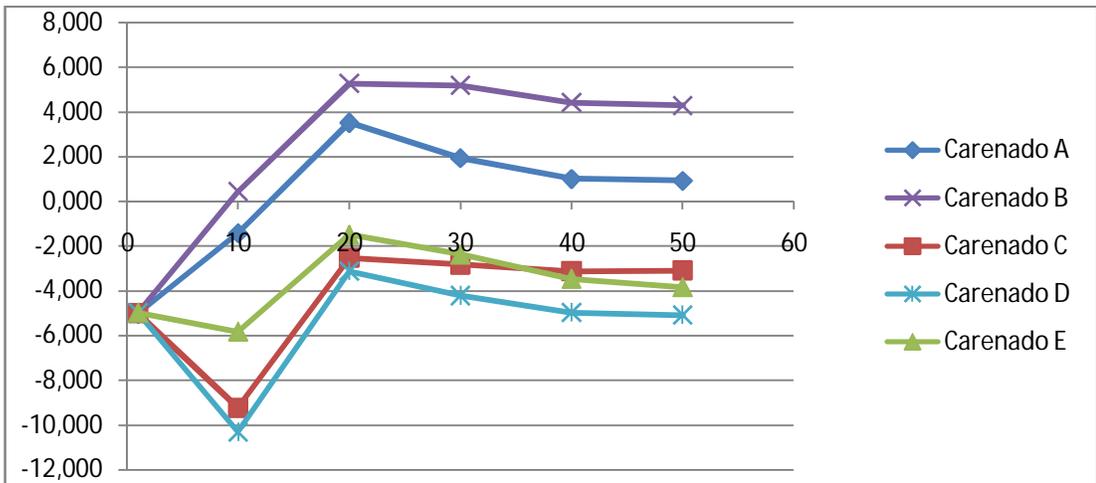
Gráfica 4.3. Momento de Cabeceo (N.m) Vs. Número de Iteraciones; a 10 m/s

Resultados recolectados en la etapa de Procesamiento, para simulaciones a 20 m/s (72 km/h)

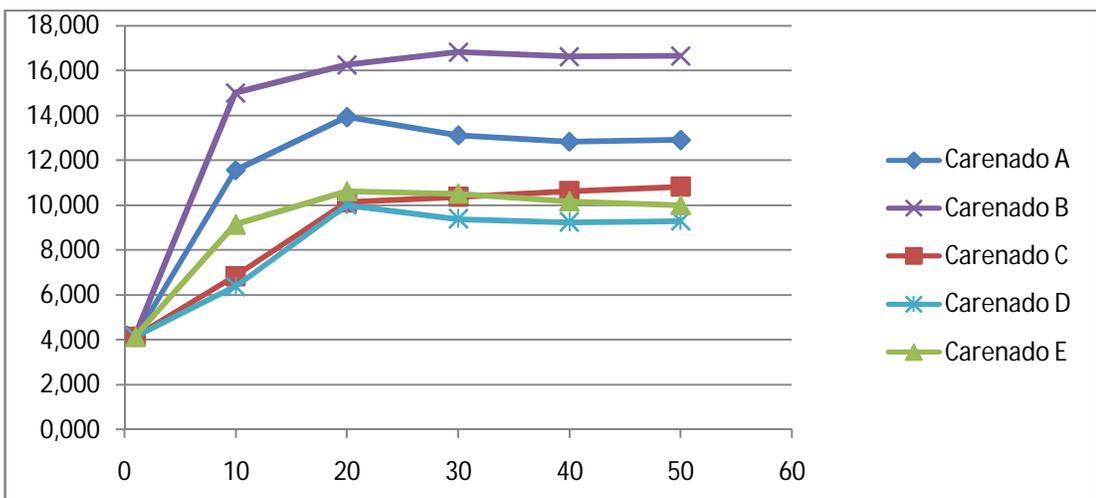
Carenados:						
		A	B	C	D	E
@ 20 m/s; 12 rev/s						
Fuerza de Arrastre por número de iteraciones (N)	1	-9,186	-9,840	-9,165	-9,117	-8727
	10	-68,231	-75,184	-69,395	-72,592	-75,761
	20	-59,405	-67,965	-59,883	-62,104	-65,642
	30	-58,851	-66,710	-59,705	-61,928	-66,729
	40	-58,539	-66,528	-59,524	-61,535	-66,231
	50	-58,170	-65,988	-59,017	-61,024	-65,784
	60	-	-	-	-	-
Fuerza de Sustentación por número de iteraciones (N)	1	-4,903	-4,790	-4,811	-4,777	-4,754
	10	5,008	19,825	-22,624	-27,173	-8,960
	20	28,806	36,002	4,794	2,169	8,991
	30	22,287	35,459	3,571	-2,211	5,511
	40	18,608	32,342	2,373	-4,882	1,151
	50	18,272	31,768	2,557	-5,255	-0,225
	60	-	-	-	-	-
Momento de Cabeceo por número de iteraciones (N.m)	1	4,981	5,205	5,013	4,988	5,041
	10	32,987	49,928	15,430	13,444	24,724
	20	44,209	53,857	28,959	28,261	30,870
	30	40,937	56,131	29,997	25,943	30,531
	40	39,774	55,391	31,127	25,703	29,233
	50	40,179	55,371	31,898	25,899	28,560
	60	-	-	-	-	-



Gráfica 4.4. Fuerza de Arrastre (N) Vs. Número de Iteraciones; a 20 m/s



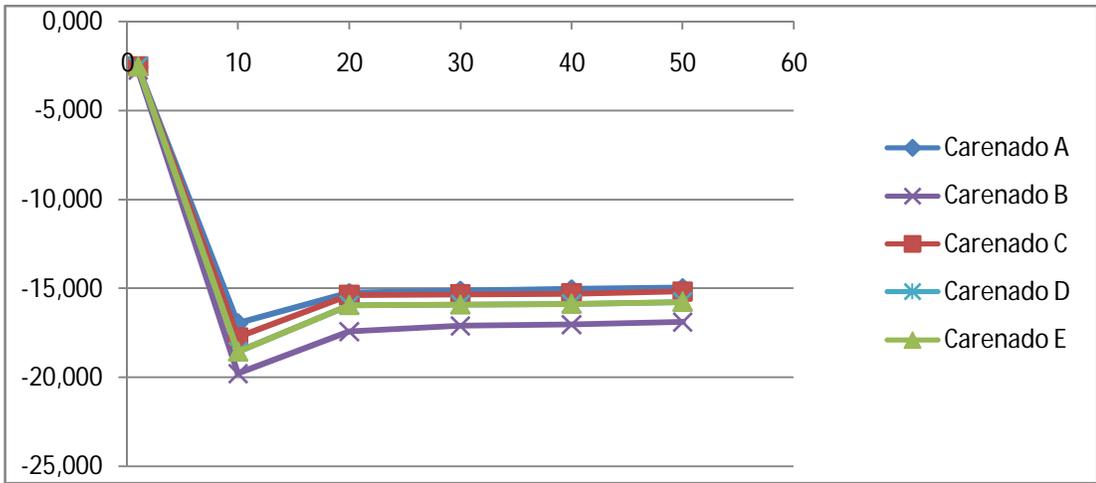
Gráfica 4.5. Fuerza de Sustentación (N) Vs. Número de Iteraciones; a 20 m/s



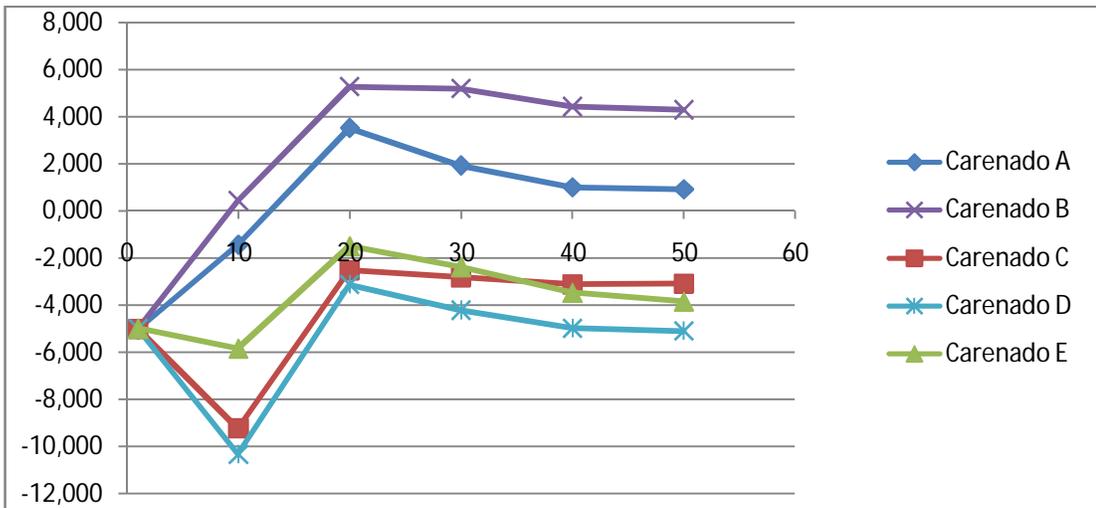
Gráfica 4.6. Momento de Cabeceo (N.m) Vs. Número de Iteraciones; a 20 m/s

Resultados recolectados en la etapa de Procesamiento, para simulaciones a 30 m/s (108 km/h)

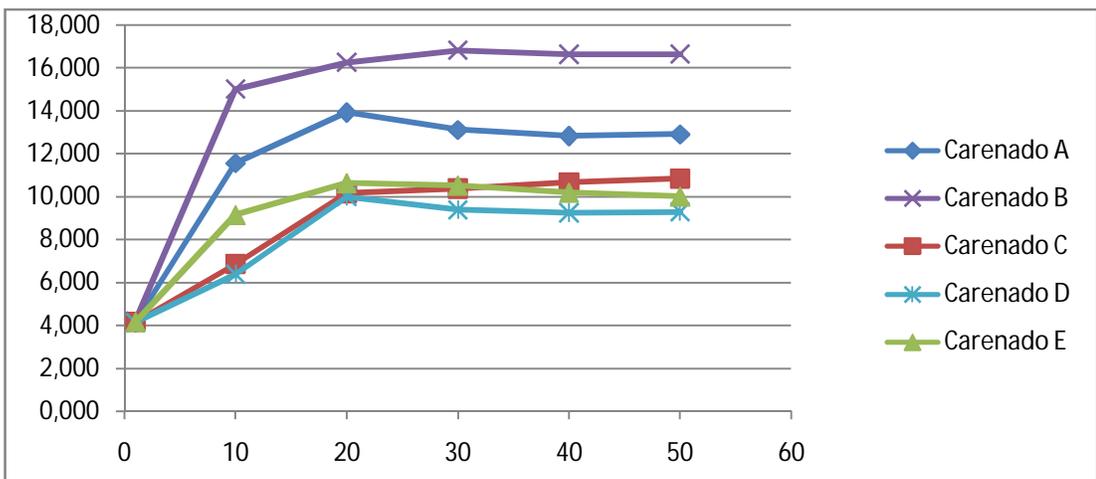
Carenados:						
		A	B	C	D	E
@ 30 m/s; 18 rev/s						
Fuerza de Arrastre por número de iteraciones (N)	1	-19,545	-20,933	-19,496	-19,404	-18,572
	10	-151,707	-167,258	-154,370	-161,575	-168,768
	20	-131,839	-151,033	-132,948	-137,938	-150,440
	30	-130,603	-148,223	-132,514	-137,477	-148,283
	40	-129,694	-147,772	-132,067	-136,338	-147,008
	50	-128,965	-146,604	-130,832	-135,097	-145,977
	60	-	-	-	-	-
Fuerza de Sustentación por número de iteraciones (N)	1	-4,720	-4,486	-4,525	-4,449	-4,401
	10	16,632	50,110	-45,576	-56,006	-14,749
	20	70,639	87,033	16,782	10,698	26,304
	30	55,800	85,619	14,032	0,855	18,582
	40	47,392	78,627	11,321	-4,733	8,863
	50	46,975	77,332	12,079	-5,304	5,920
	60	-	-	-	-	-
Momento de Cabeceo por número de iteraciones (N.m)	1	6,300	6,775	6,372	6,319	6,432
	10	69,080	107,596	29,420	24,796	50,387
	20	94,624	116,735	60,209	58,535	64,466
	30	87,259	121,851	62,697	53,456	63,847
	40	84,899	120,233	65,294	53,295	61,031
	50	85,681	120,051	67,219	53,847	59,549
	60	-	-	-	-	-



Gráfica 4.7. Fuerza de Arrastre (N) Vs. Número de Iteraciones; a 30 m/s



Gráfica 4.8. Fuerza de Sustentación (N) Vs. Número de Iteraciones; a 30 m/s



Gráfica 4.9. Momento de Cabeceo (N.m) Vs. Número de Iteraciones; a 30 m/s

Resultados recolectados en la etapa de Procesamiento, para simulaciones a 10, 20 y 30 m/s

Carenados:					
	A	B	C	D	E
@ 10 m/s; 6 rev/s					
Número de última iteración de la solución numérica (número de iteraciones)	51	57	51	53	50
Tiempo total utilizado en la solución numérica (<i>Total Wall Clock Time</i>) (hh:min:ss) ó (s)	02: 57: 33 ó 10.650	03: 21: 53 ó 12.110	03: 08: 21 ó 11.300	03: 04: 40 ó 11.090	02: 50: 54 ó 10.250
@ 20 m/s; 12 rev/s					
Número de última iteración de la solución numérica (número de iteraciones)	51	57	53	52	50
Tiempo total utilizado en la solución numérica (<i>Total Wall Clock Time</i>) (hh:min:ss) ó (s)	02: 59: 07 ó 10.750	03: 19: 08 ó 11.950	03: 03: 28 ó 11.010	03: 04: 27 ó 11.070	02: 55: 37 ó 10.540
@ 30 m/s; 18 rev/s					
Número de última iteración de la solución numérica (número de iteraciones)	50	56	53	52	50
Tiempo total utilizado en la solución numérica (<i>Total Wall Clock Time</i>) (hh:min:ss) ó (s)	02: 54: 06 ó 10.450	03: 15: 16 ó 11.720	03: 10: 08 ó 11.410	03: 00: 01 ó 10.800	02: 56: 16 ó 10.580

4.1.1.2.3 Etapa de Post-procesamiento

Resultados recolectados en la etapa de Post-procesamiento, para simulaciones a 10, 20 y 30 m/s

Carenados:					
	A	B	C	D	E
@ 10 m/s; 6 rev/s					
Fuerza de Arrastre (N)	-14,975	-16,892	-15,183	-15,746	-16,912
Fuerza de Sustentación (N)	0,917	4,292	-3,079	-5,090	-3,838
Momento de Cabeceo (N.m)	12,904	16,647	10,832	9,293	9,999
Máxima / Mínima Presión (10^5 Pa)	1,014/1,012	1,013/1,012	1,013/1,012	1,014/1,012	1,014/1,012
Máxima / Mínima Velocidad (m/s)	11,27/0,05	14,69/0,07	14,60/0,00	14,79/0,06	14,52/0,00
@ 20 m/s; 12 rev/s					
Fuerza de Arrastre (N)	-58,170	-65,988	-59,017	-61,024	-65,784
Fuerza de Sustentación (N)	18,272	31,768	2,557	-5,255	-0,225
Momento de Cabeceo (N.m)	40,179	55,371	31,898	25,899	28,560
Máxima / Mínima Presión (10^5 Pa)	1,016/1,009	1,016/1,009	1,014/1,009	1,016/1,009	1,016/1,009
Máxima / Mínima Velocidad (m/s)	29,24/0,00	28,70/0,00	30,05/0,22	28,88/0,00	29,94/0,15
@ 30 m/s; 18 rev/s					
Fuerza de Arrastre (N)	-128,965	-146,604	-130,832	-135,097	-145,977
Fuerza de Sustentación (N)	46,975	77,332	12,079	-5,304	5,920
Momento de Cabeceo (N.m)	85,681	120,051	67,219	53,847	59,549
Máxima / Mínima Presión (10^5 Pa)	1,019/1,003	1,019/1,003	1,019/1,003	1,019/1,003	1,019/1,003
Máxima / Mínima Velocidad (m/s)	45,28/0,16	43,06/0,00	45,16/0,44	43,34/0,00	43,65/0,00

4.1.2 Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico

Por cada carenado, y según los resultados obtenidos en las simulaciones, se asigna un valor que muestra el nivel de cumplimiento de los criterios seleccionados anteriormente. Los valores varían de 0 a 10 ajustándose al grado de cumplimiento que tuviera el carenado frente al criterio.

Para lograr lo anterior se toma el menor de los valores de los resultados de las simulaciones de los carenados para el criterio en cuestión, a cierta velocidad, y éste se le resta a los demás valores del mismo criterio. Luego, teniendo esas diferencias, se logra una escala de valores iniciada en cero, la cual, a su vez, se lleva de 0 a 10 siendo 0 el mismo cero anterior y 10 el mayor valor después de la diferencia o viceversa, 0 el mayor valor después de la diferencia y 10 el cero anterior; de tal manera que finalmente el valor representado por 10 sea el más favorable. Esto significa que los valores intermedios se obtienen por interpolación.

A continuación las conversiones de los valores arrojados por el *software* a valores de cumplimiento que van de 0 a 10.

Evaluación de Fuerza de Arrastre

		Valores Obtenidos de la Simulación	Menor Valor	Diferencia	Valor de Cumplimiento Correspondiente
@ 10 m/s					
Carenados	A	14,975	14,975	$14,975 - 14,975 = 0$	10
	B	16,892		$16,892 - 14,975 = 1,917$	0
	C	15,183		$15,183 - 14,975 = 0,208$	9
	D	15,746		$15,746 - 14,975 = 0,771$	6
	E	16,912		$16,912 - 14,975 = 1,937$	0
@ 20 m/s					
Carenados	A	58,170	58,170	$58,170 - 58,170 = 0$	10
	B	65,988		$65,988 - 58,170 = 7,818$	0
	C	59,017		$59,017 - 58,170 = 0,847$	9
	D	61,024		$61,024 - 58,170 = 2,854$	4
	E	65,784		$65,784 - 58,170 = 7,614$	0
@ 30 m/s					
Carenados	A	128,965	128,965	$128,965 - 128,965 = 0$	10
	B	146,604		$146,604 - 128,965 = 17,639$	0
	C	130,832		$130,832 - 128,965 = 1,867$	9
	D	135,097		$135,097 - 128,965 = 6,132$	7
	E	145,977		$145,977 - 128,965 = 17,012$	0

Como se tienen valores de cumplimiento para velocidades distintas, éstos se promediarán entre carenados de manera que exista un único de valor de cumplimiento que represente a cada carenado. Siendo así, para la fuerza de arrastre de cada carenado, se tiene:

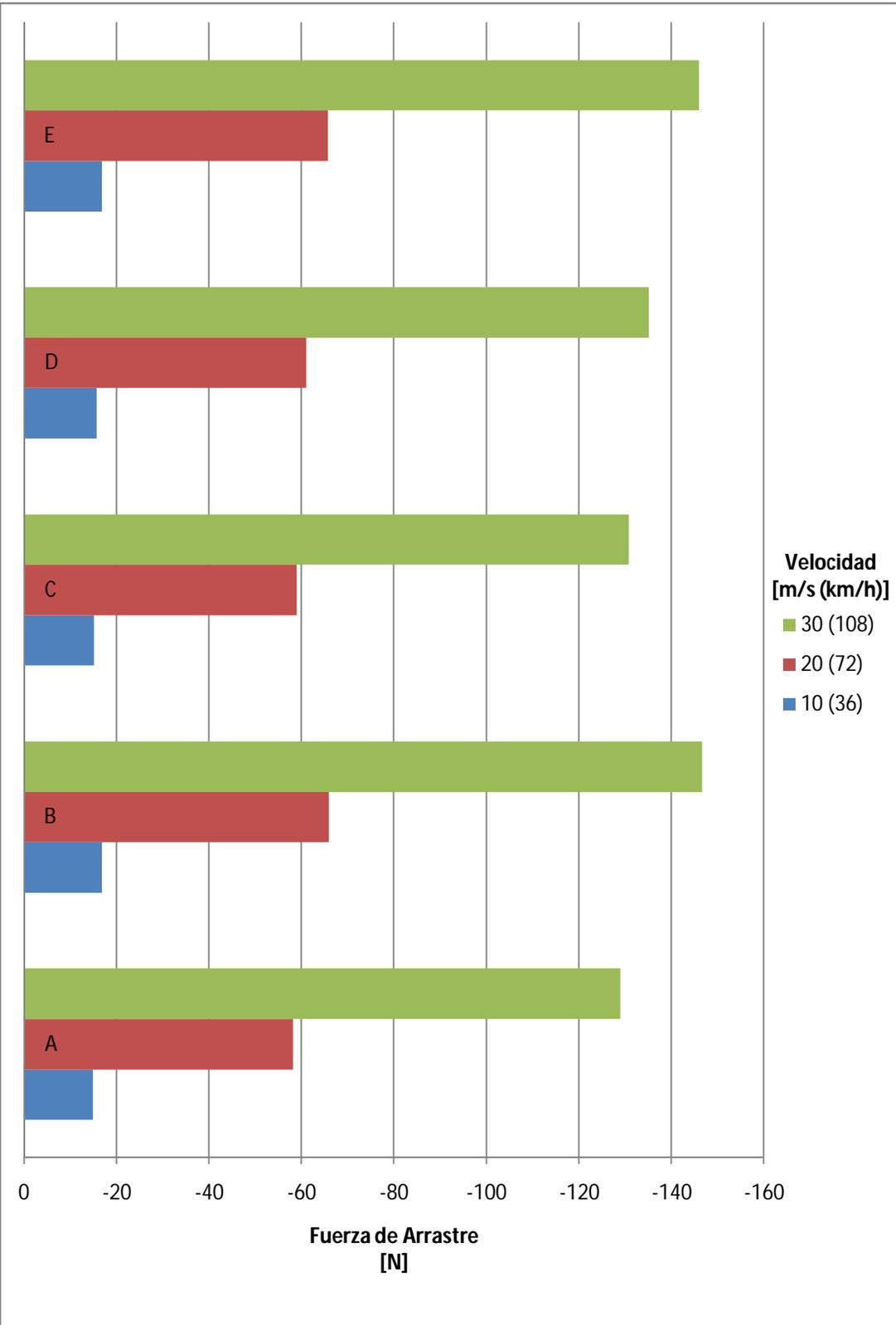
A: 10

B: 0

C: 9

D: 6

E: 0



Gráfica 4.10. Fuerza de Arrastre en función de la Velocidad

Evaluación de Fuerza de Sustentación

		Valores Obtenidos de la Simulación	Menor Valor	Diferencia	Valor de Cumplimiento Correspondiente
@ 10 m/s					
Carenados	A	0,917	5,090	$0,917 + 5,090 = 6,007$	4
	B	4,292		$4,292 + 5,090 = 9,382$	0
	C	-3,079		$-3,079 + 5,090 = 2,011$	8
	D	-5,090		$-5,090 + 5,090 = 0$	10
	E	-3,838		$-3,838 + 5,090 = 1,252$	9
@ 20 m/s					
Carenados	A	18,272	5,225	$18,272 + 5,225 = 23,497$	4
	B	31,768		$31,768 + 5,225 = 36,993$	0
	C	2,557		$2,557 + 5,225 = 7,782$	8
	D	-5,255		$-5,255 + 5,225 = 0$	10
	E	-0,225		$-0,225 + 5,225 = 5,000$	9
@ 30 m/s					
Carenados	A	46,975	5,304	$46,975 + 5,304 = 52,279$	4
	B	77,332		$77,332 + 5,304 = 82,636$	0
	C	12,079		$12,079 + 5,304 = 17,383$	8
	D	-5,304		$-5,304 + 5,304 = 0$	10
	E	5,920		$5,920 + 5,304 = 11,224$	9

Como se tienen valores de cumplimiento para velocidades distintas, éstos se promediarán entre carenados de manera que exista un único de valor de cumplimiento que represente a cada carenado. Siendo así, para la fuerza de sustentación de cada carenado, se tiene:

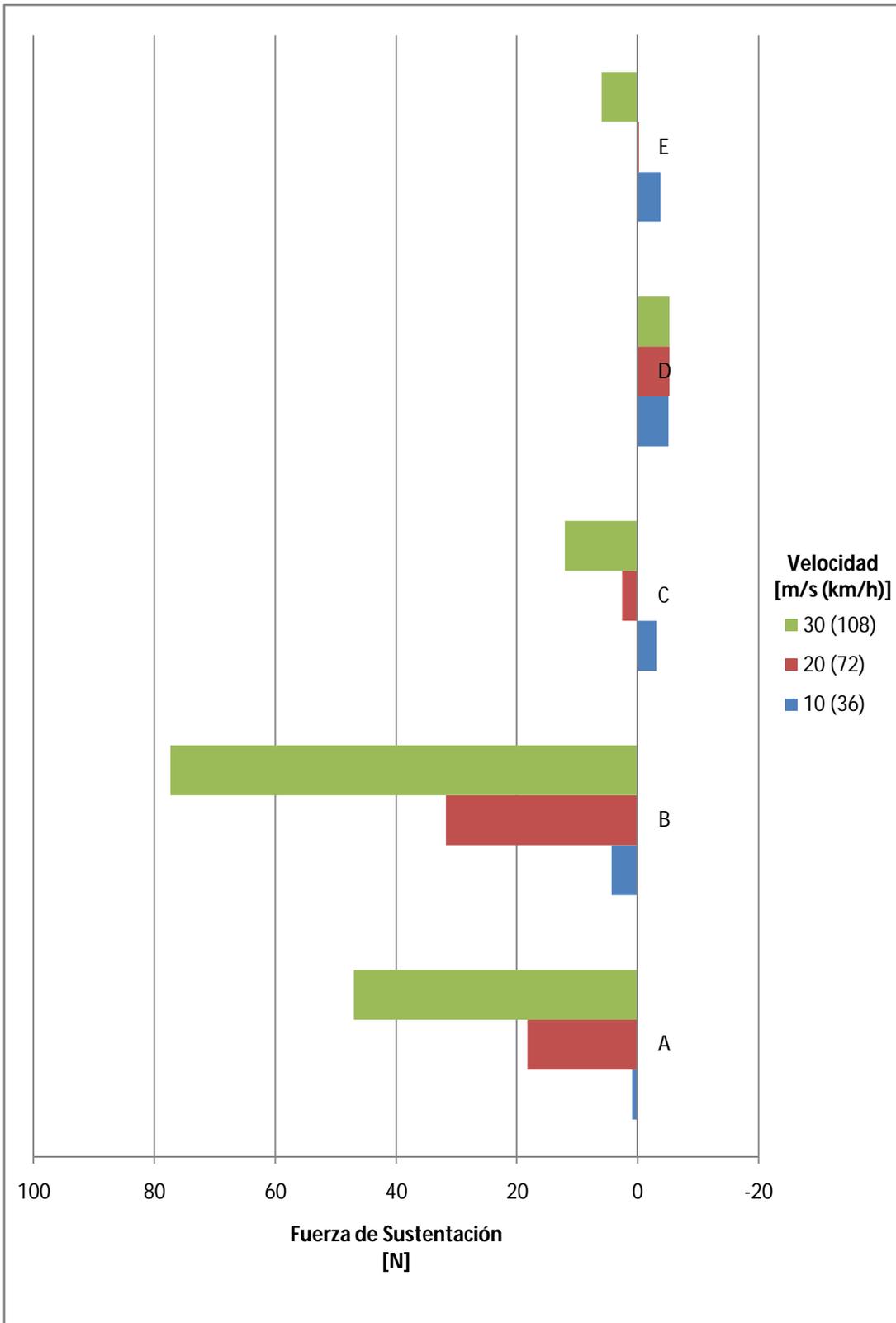
A: 4

B: 0

C: 8

D: 10

E: 9



Gráfica 4.11. Fuerza de Sustentación en función de la Velocidad

Evaluación de Momento de Cabeceo

		Valores Obtenidos de la Simulación	Menor Valor	Diferencia	Valor de Cumplimiento Correspondiente
@ 10 m/s					
Carenados	A	12,904	9,293	$12,904 - 9,293 = 3,611$	5
	B	16,647		$16,647 - 9,293 = 7,354$	0
	C	10,832		$10,832 - 9,293 = 1,539$	8
	D	9,293		$9,293 - 9,293 = 0$	10
	E	9,999		$9,999 - 9,293 = 0,706$	9
@ 20 m/s					
Carenados	A	40,179	25,899	$40,179 - 25,899 = 14,280$	5
	B	55,371		$55,371 - 25,899 = 29,472$	0
	C	31,898		$31,898 - 25,899 = 5,999$	8
	D	25,899		$25,899 - 25,899 = 0$	10
	E	28,560		$28,560 - 25,899 = 2,661$	9
@ 30 m/s					
Carenados	A	85,681	53,847	$85,681 - 53,847 = 31,834$	5
	B	120,051		$120,051 - 53,847 = 66,204$	0
	C	67,219		$67,219 - 53,847 = 13,372$	8
	D	53,847		$53,847 - 53,847 = 0$	10
	E	59,549		$59,549 - 53,847 = 5,702$	9

Como se tienen valores de cumplimiento para velocidades distintas, éstos se promediarán entre carenados de manera que exista un único de valor de cumplimiento que represente a cada carenado. Siendo así, para el momento de cabeceo de cada carenado, se tiene:

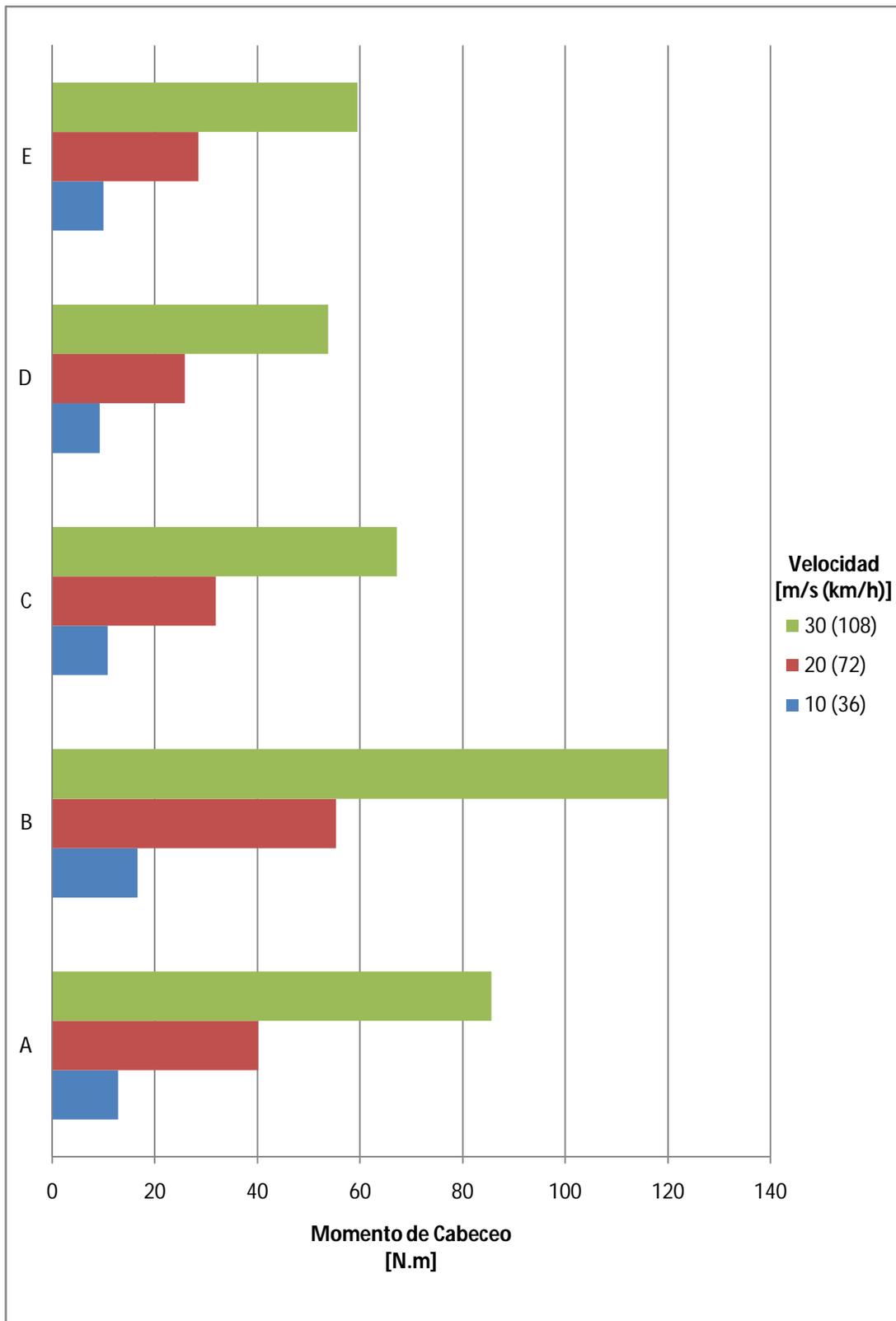
A: 5

B: 0

C: 8

D: 10

E: 9



Gráfica 4.12. Momento de Cabeceo en función de la Velocidad

Evaluación del Coeficiente de Arrastre

		Valores Obtenidos de la Simulación	Menor Valor	Diferencia	Valor de Cumplimiento Correspondiente
Carenados	A	0,358	0,333	$0,358 - 0,333 = 0,025$	4
	B	0,364		$0,364 - 0,333 = 0,031$	3
	C	0,333		$0,333 - 0,333 = 0$	10
	D	0,346		$0,346 - 0,333 = 0,013$	7
	E	0,375		$0,375 - 0,333 = 0,042$	0

Para el coeficiente de arrastre se tiene:

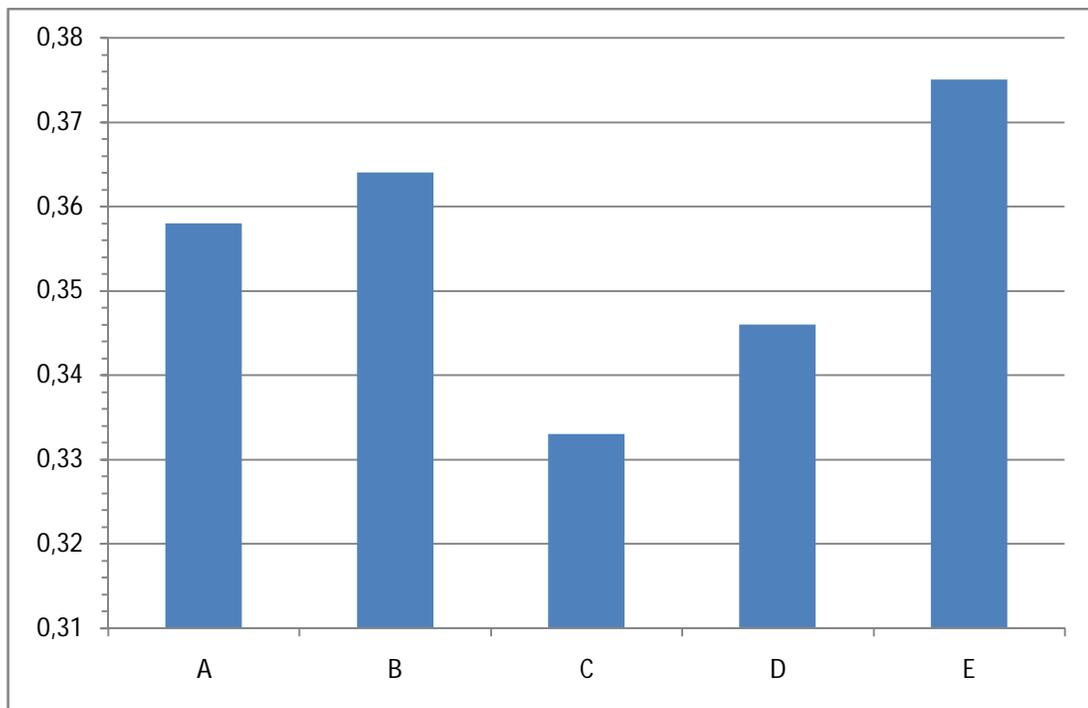
A: 4

B: 3

C: 10

D: 7

E: 0



Gráfica 4.13. Coeficiente de Arrastre C_D

Entonces, luego de evaluar los resultados concernientes a la aerodinámica y asignarle a cada carenado un valor de cumplimiento según un criterio u otro, dicho valor de cumplimiento es el utilizado en la siguiente tabla para la calificación en el aspecto aerodinámico de cada carenado.

Tabla de Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico

Ponderación	Criterios	Carenado A		Carenado B		Carenado C		Carenado D		Carenado E	
		Valor de Cumplimiento	Producto								
5pts	Coefficiente de Arrastre	4	20	3	15	10	50	7	35	0	0
5pts	Fuerza de Sustentación	4	20	0	0	8	40	10	50	9	45
3pts	Fuerza de Arrastre	10	30	0	0	9	27	6	18	0	0
3pts	Momento de Cabeceo	5	15	0	0	8	24	10	30	9	27
Total		85		15		141		133		72	

Por conveniencia para el proceso de Evaluación de Criterios de Selección, que viene más adelante, los valores totales de las sumas de los productos de cada carenado obtenidos a través de la Evaluación de Criterios de Desempeño Aerodinámico, que van desde 15 hasta 141, se escalarán desde el 0 al 10 con el fin de catalogar cada carenado con un valor de cumplimiento en el desempeño aerodinámico.

	Carenado A	Carenado B	Carenado C	Carenado D	Carenado E
Total	85	15	141	133	72
Valor de Cumplimiento Correspondiente	6	0	10	9	5

4.1.2.1 Visualizaciones

- *Gradiente de Presiones:*

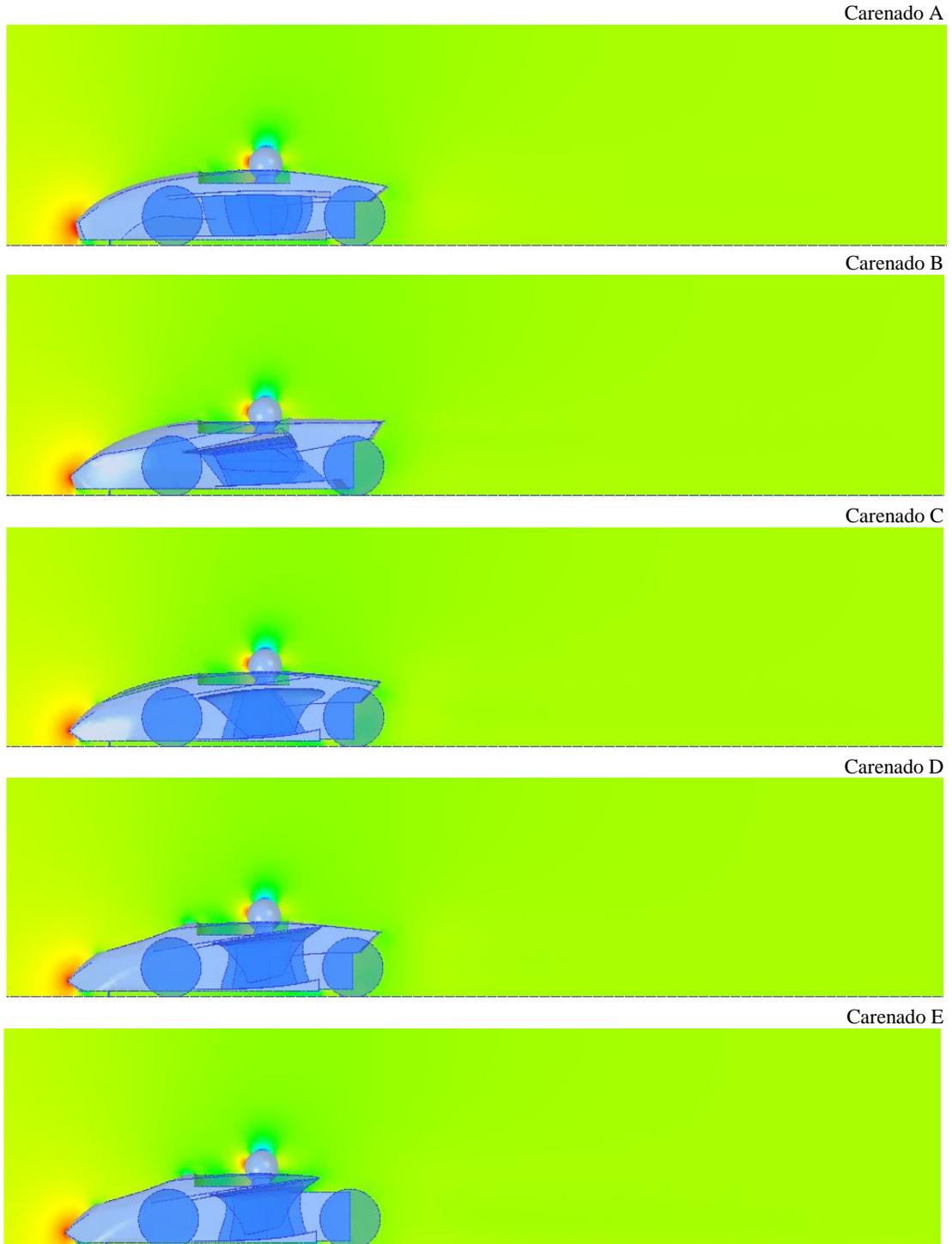
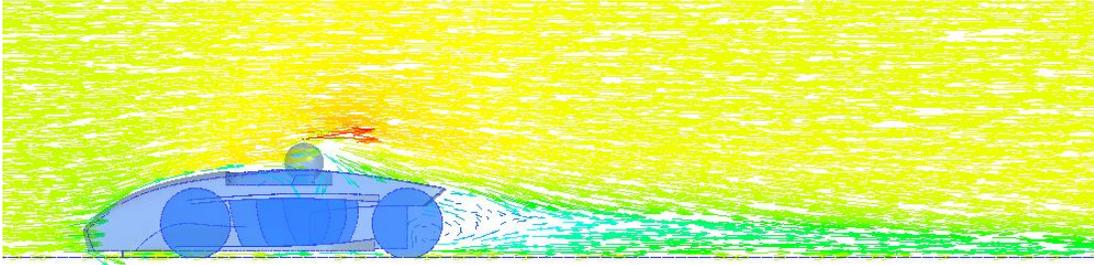


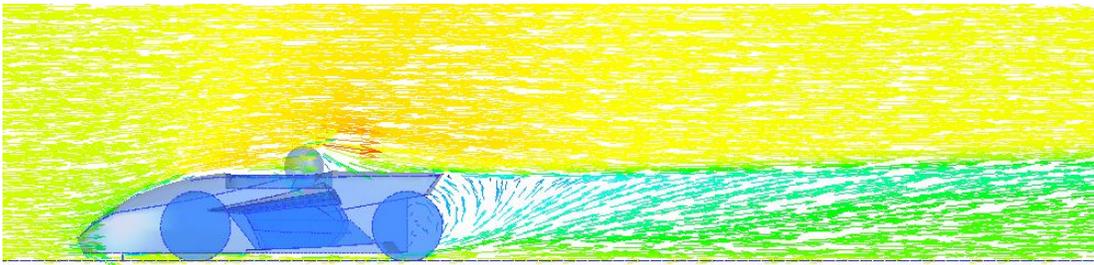
Figura 4.1. Visualizaciones en los Carenados: Gradiente de Presiones

- **Vectores de Velocidad:**

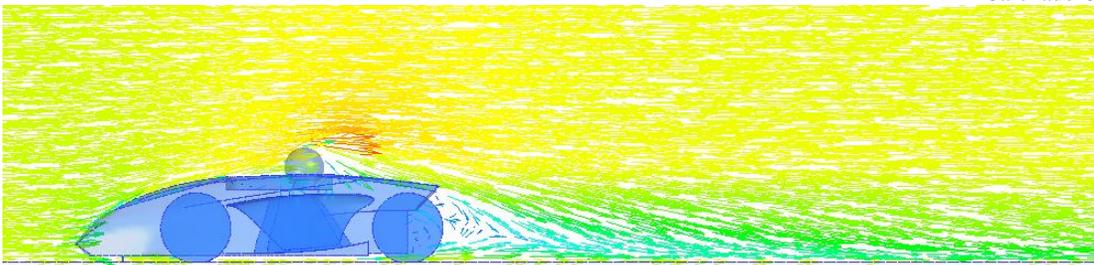
Carenado A



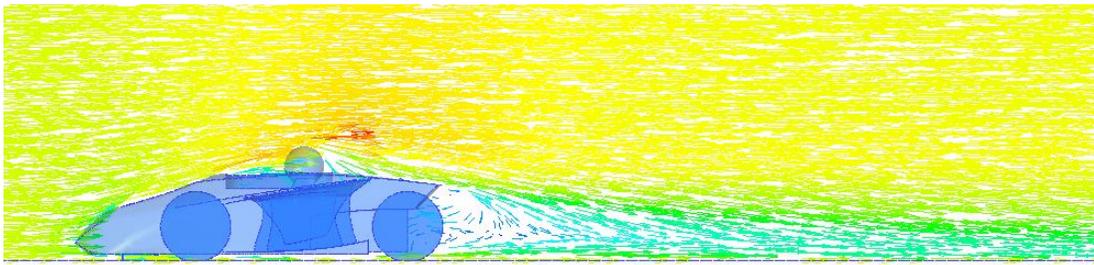
Carenado B



Carenado C



Carenado D



Carenado E

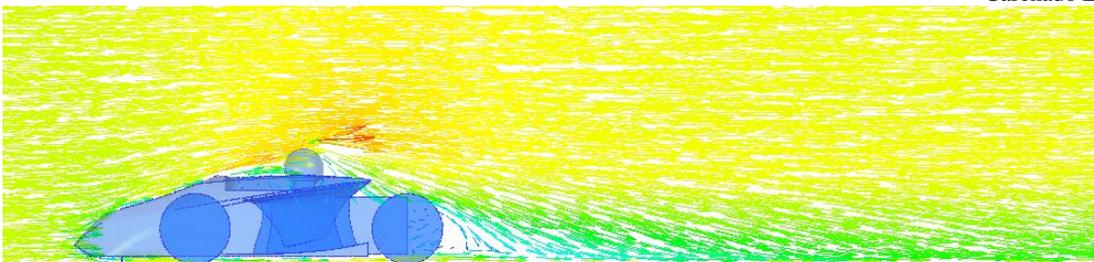
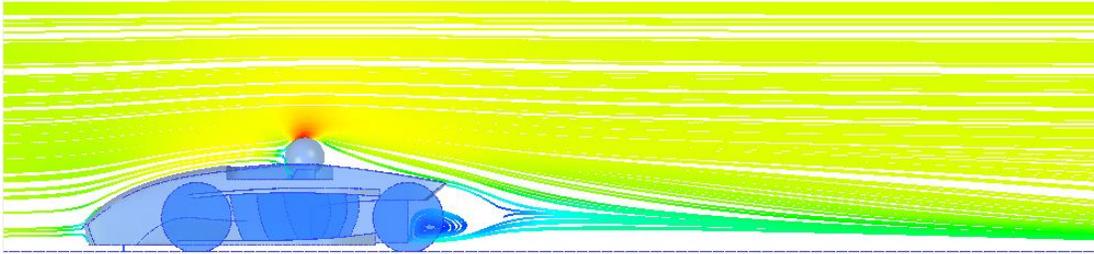


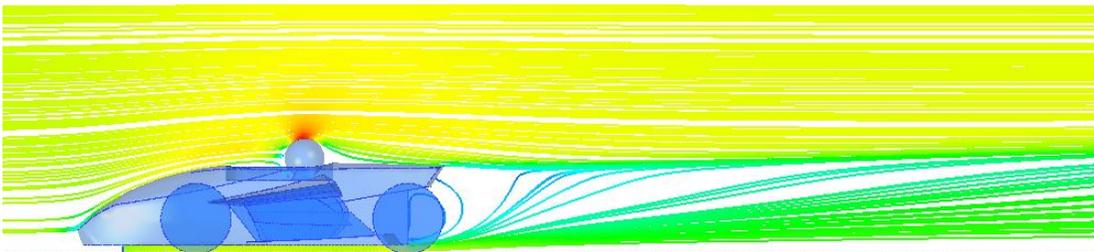
Figura 4.2. Visualizaciones en los Carenados: Vectores de Velocidad

- *Líneas de Flujo:*

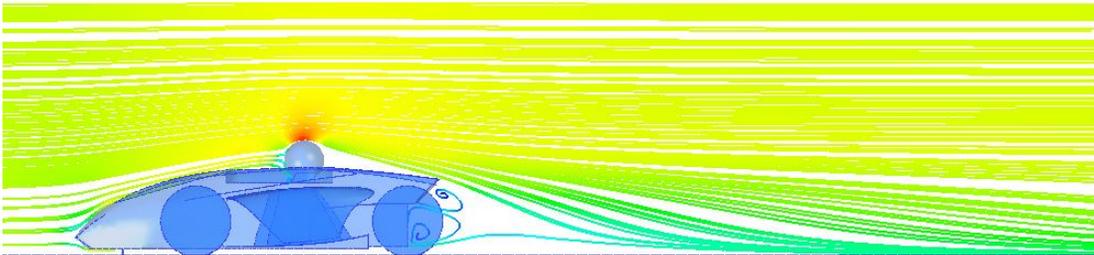
Carenado A



Carenado B



Carenado C



Carenado D



Carenado E

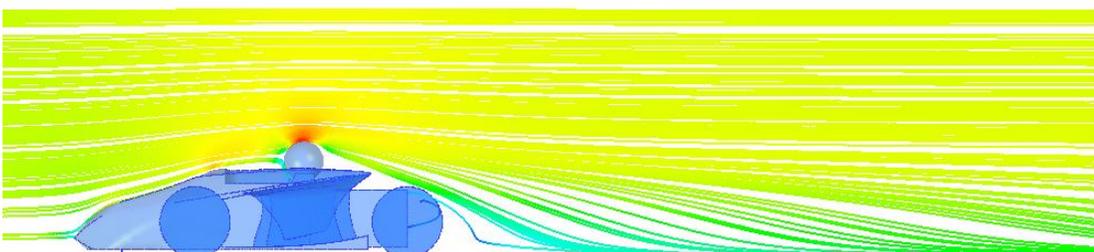


Figura 4.3. Visualizaciones en los Carenados: Líneas de Flujo

- *Varias:*

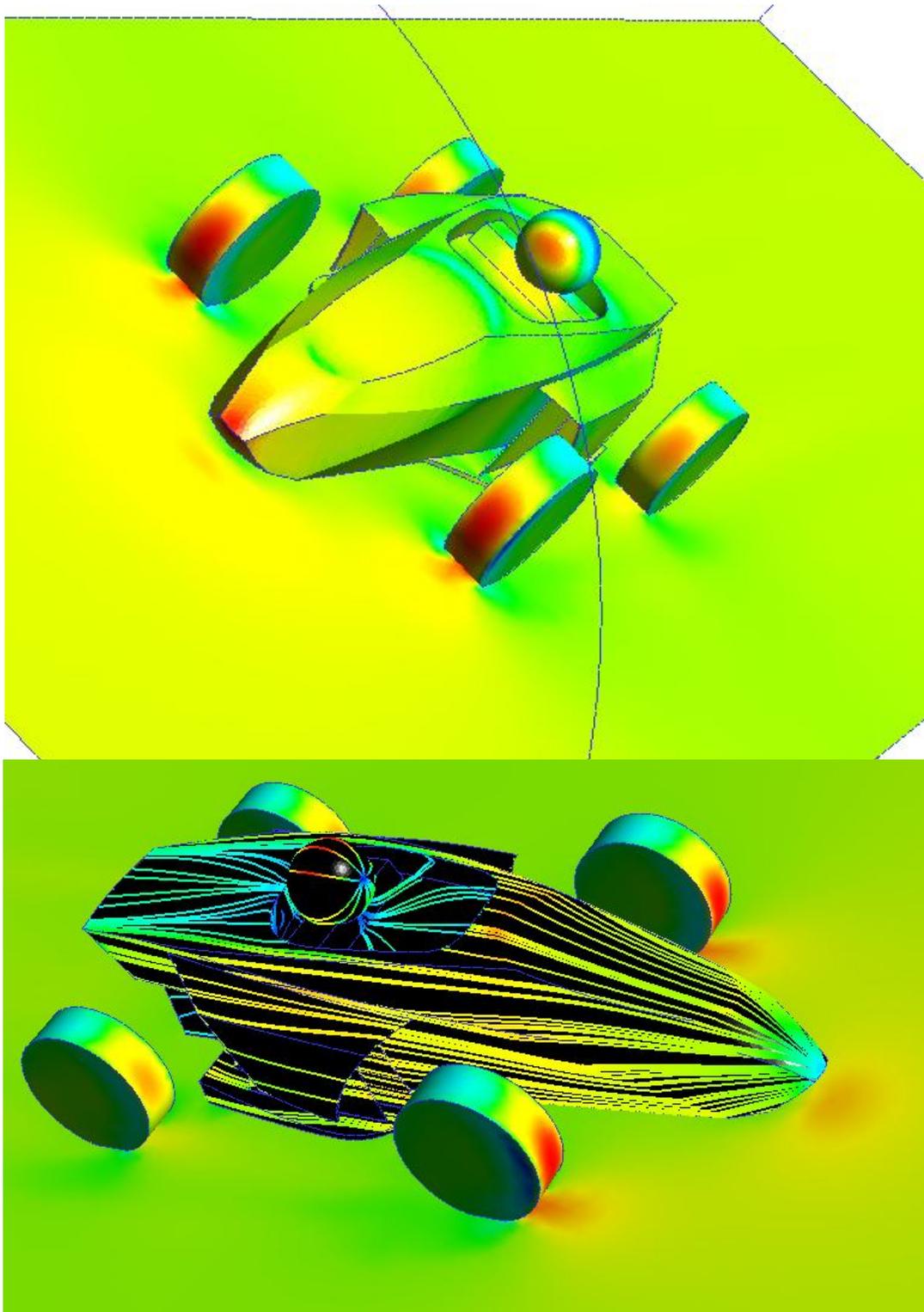


Figura 4.4. Visualizaciones del Carenado D: Gradiente de Presiones y Líneas de Flujo

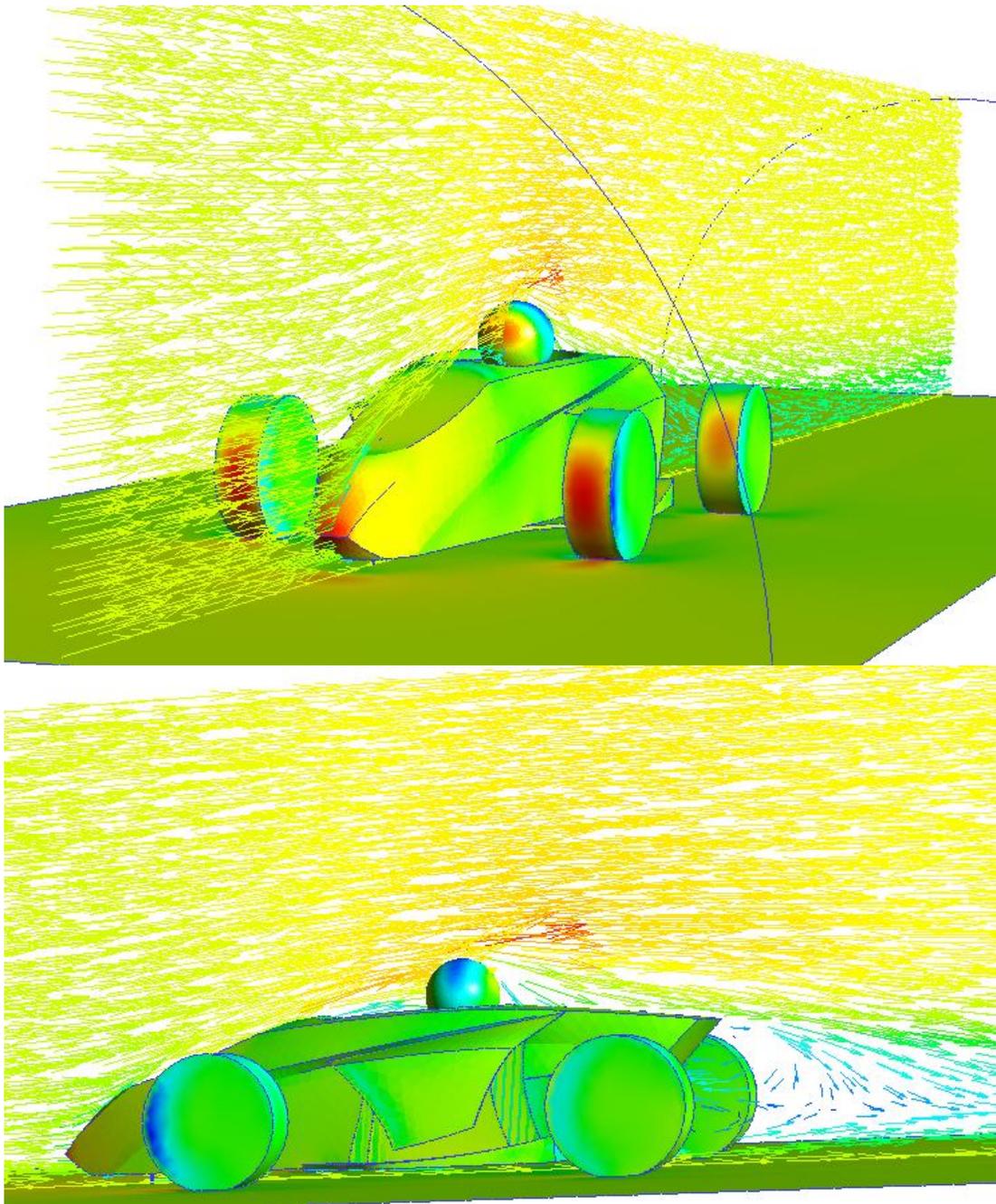


Figura 4.5. Visualizaciones del Carenado D: Vectores de Velocidad

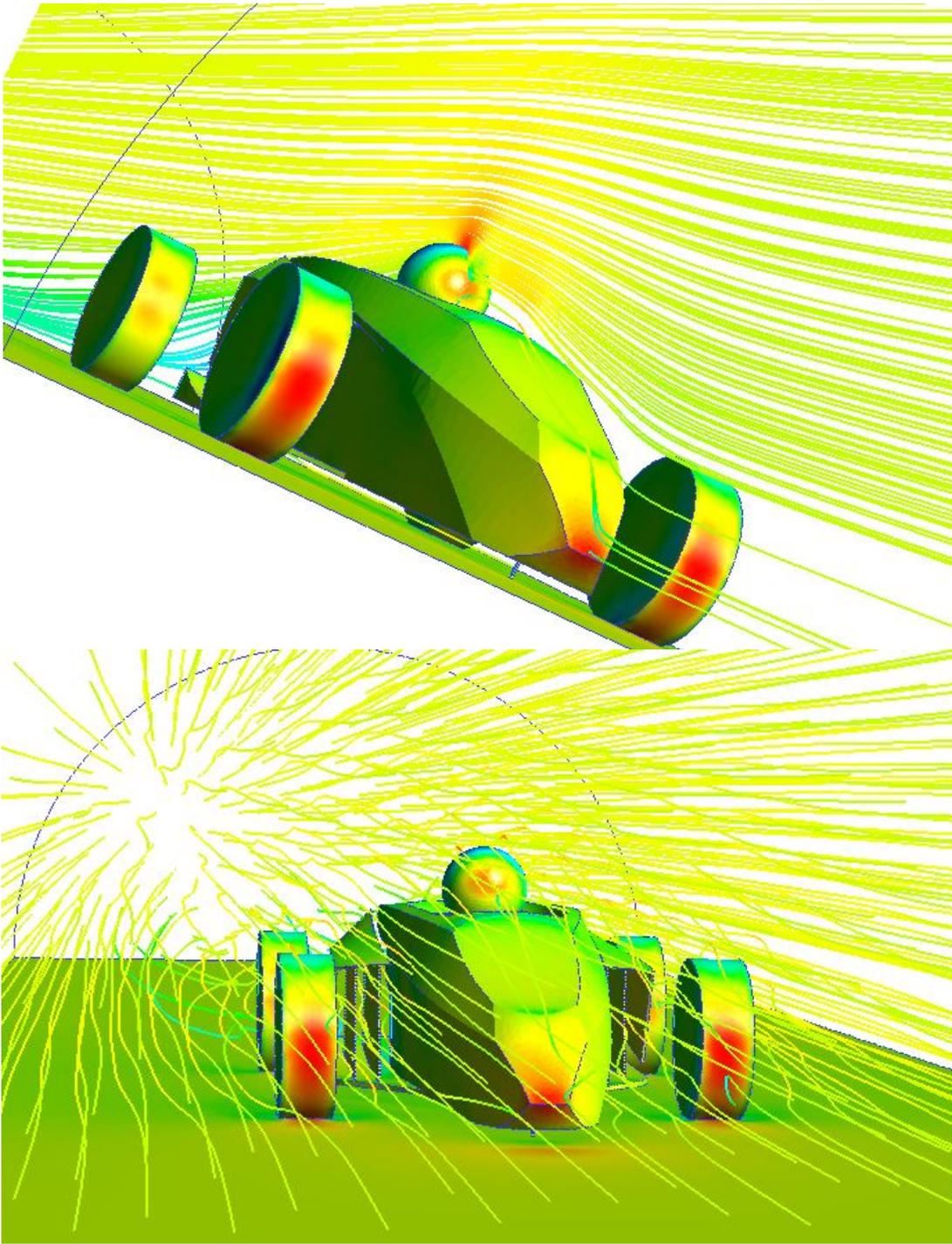


Figura 4.6. Visualizaciones del Carenado D: Líneas de Flujo

4.1.3 *Recolección de Resultados de las Votaciones sobre Apariencia*

En la siguiente tabla se leen el número de votaciones hechas a favor de cada carenado.

Al igual que los resultados concernientes a la aerodinámica, a estos valores que representan la aceptación por su apariencia de cada carenado se les asignó un valor de cumplimiento desde el 0 al 10. Cuanto mayor sea el valor en algún carenado más aceptado es éste respecto a su apariencia y entonces le es correspondido un valor de cumplimiento de 10. Al menor le corresponde un valor de cumplimiento de 0 y a los intermedios según interpolación.

Carenados:					
	A	B	C	D	E
Número de Votaciones por cada Carenado	3	0	2	3	2
Valor de Cumplimiento Correspondiente	10	0	6	10	6

4.1.4 *Recolección de Resultados de las Estimaciones sobre Facilidad de Construcción*

En este caso la valoración disponible para calificar cada carenado según su facilidad de construcción va desde el 0 al 10, lo cual funciona directamente como el valor de cumplimiento de cada carenado, en el presente aspecto. El valor de 10 indica ser más fácil.

Carenados:					
	A	B	C	D	E
Grado de Facilidad de construcción por cada Carenado	8	4	0	8	10

4.2 Resultados Finales

Estos resultados son justamente los que señalarán de manera directa el carenado que mejor combina los criterios establecidos.

4.2.1 Evaluación de Criterios de Selección del Carenado

Como es sabido los tres criterios de selección son el desempeño aerodinámico, la apariencia y la facilidad de construcción.

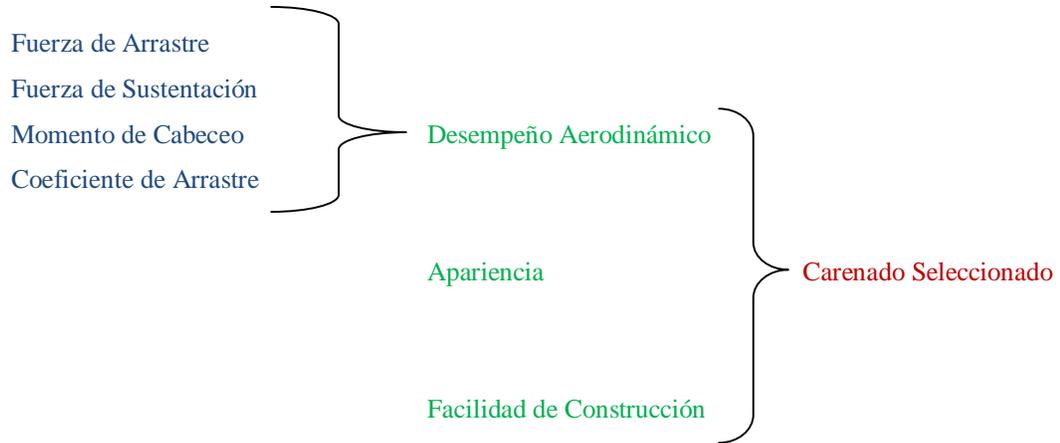
Anteriormente cada carenado fue evaluado bajo esos criterios de manera independiente. Ahora, en cambio, se evaluará cada carenado cruzando los tres criterios; valiéndose además para la siguiente tabla de que cada carenado ya expresa su valor de cumplimiento de cada criterio, desde el 0 al 10.

Tabla de Evaluación de Criterios de Selección

Ponderación	Criterios	Carenado A		Carenado B		Carenado C		Carenado D		Carenado E	
		Valor de Cumplimiento	Producto								
5pts	Aerodinámica	6	30	0	0	10	50	9	45	5	25
5pts	Apariencia	10	50	0	0	7	35	10	50	7	35
3pts	Facilidad de Construcción	8	24	4	12	0	0	8	24	10	30
Total		104		12		85		113		94	

4.2.2 Selección del Carenado

En síntesis, y de manera ilustrativa, para llegar a este punto se ha procedido de la siguiente manera:



Basándose en los resultados de la Tabla de Evaluación de Criterios de Selección se llega a un carenado definitivo, éste es, entonces, el que acumule el mayor puntaje en el Total, puesto que esa es la representación de qué tan bien se ajusta cada carenado a los criterios de selección establecidos. Siendo así resulta evidente que, en orden decreciente, los carenados se ajustan en la siguiente secuencia: D, A, E, C y, por último, B.

Por todo lo anterior, se tiene como resultado general del presente estudio que es el carenado D el más adecuado bajo los criterios establecidos

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Etapa de Pre-procesamiento

Puede observarse que el número total de nodos de la malla, de tetraedros en la malla de volumen y de caras resultantes en la malla de superficie entre los carenados son muy parecidos entre sí, lo cual indica que las geometrías de los carenados son muy similares en cuanto a complejidad de forma. El hecho de que las mallas entre los carenados resulten así de parecidas también previene una equidad al momento de las simulaciones y, por tanto, en los resultados.

5.2 Etapa de Procesamiento

Las gráficas demuestran que, para un margen admisible de error, las curvas que representan los sucesivos resultados a lo largo de las iteraciones se hacen estables aún antes de llegar a la iteración última. Es decir, puede tenerse la garantía de que los resultados arrojados para el momento de la convergencia en cálculos internos del *software* son ya resultados que desde iteraciones atrás eran confiables; no hay un truncamiento del comportamiento.

Lo mismo ocurre para tanto 10, 20 ó 30 m/s; se trate de la fuerza de arrastre, de sustentación o del momento de cabeceo.

Teniéndose antes mallas tan similares entre carenados, y siendo las condiciones de simulación iguales, no es de extrañarse que entonces el número de iteración al cual ocurre la convergencia en la solución numérica sea también muy parecido entre los distintos carenados, aún a distintas velocidades. El promedio del número de iteración es 52. Igualmente ocurre con el tiempo invertido en la solución numérica, muy parecidos entre sí, con un promedio aproximado de 3 horas.

5.3 Etapa de Post-procesamiento

5.3.1 Fuerza de Arrastre

Aún a la mayor velocidad (a 30 m/s ó 108 km/h) la fuerza de arrastre no llega a ser algo tan relevante en comparación a lo que pudiese esperarse de un automóvil de turismo. En este caso, uno de los carenados puede sufrir las consecuencias equivalentes a como si arrastrase a una persona de unos 70 kg con unos esquíes sobre la nieve (asumiendo un coeficiente de roce dinámico de 0,2); es decir, tener una carga que arrastrar de alrededor de 140 N. Esto, claramente, repercute principalmente en el consumo del combustible, en la elongación del tiempo necesario para alcanzar determinada velocidad en el automóvil, en el retardo de la respuesta del automóvil frente a una brusca aceleración y hasta posiblemente en el desprendimiento de piezas o componentes del mismo carenado. Sin embargo, resulta obvio que la ganancia es considerable, pues la fuerza de arrastre seguramente sería mayor si no se dispusiera de un carenado que ofrezca ventajas en la disminución de arrastre aerodinámico.

En cuanto a la simulación, las fuerzas de arrastre de los carenados resultaron opuestas al avance, lo cual es lógico y esperado.

En términos generales, los arrastres o resistencias al avance de cada carenado son muy parecidos entre sí; sin embargo, destacan por ser un tanto mayor el del carenado B y el del E. Así mismo, destaca también el del A por ser ligeramente menor. Lo anterior es un comportamiento generalizado para las tres velocidades consideradas en la simulación.

5.3.2 Fuerza de Sustentación

Aquí lo importante es que la sustentación sea negativa (*downforce*) y que su módulo como fuerza sea el mayor posible. Este caso ocurre sólo con el carenado D que, a pesar de tener una sustentación negativa, la magnitud de la fuerza resulta sumamente baja. Esto es, el aporte del carenado D en la fuerza ejercida hacia abajo, a

30 m/s ó 108 km/h, puede ser comparado con un par de vasos de agua ingeridos por el conductor.

Los carenados A y B tienen una creciente fuerza de sustentación, tal que si se hiciera un estudio a 40 m/s lo más probable es que la fuerza de sustentación fuera equivalente a un valor por encima de los 15 kgf, el inconveniente de estos carenados es que dicha sustentación es positiva, razón por la cual el automóvil tendería a aligerar su carga sobre las ruedas y así desmejorar su comportamiento dinámico.

Los carenados C y E tienen un comportamiento extraño en el crecimiento de la fuerza de sustentación en función de la velocidad; la primera pasa de ser negativa a ser luego positiva; es decir, a bajas velocidades la sustentación es negativa y al incrementar la velocidad la sustentación se hace neutra en algún momento para terminar finalmente siendo positiva. Sin tener determinada con exactitud la causa de este hecho se asume que la razón es que la geometría del carenado es una compuesta, por lo cual unas zonas de dicha geometría puede aportar una sustentación negativa y otras una positiva, y ambas sustentaciones varían con la velocidad de manera distinta, sobrepasando una a la otra a determinada velocidad y haciendo de la sumatoria de fuerzas de sustentación un valor cambiante en su signo.

5.3.3 Momento de Cabeceo

El momento de cabeceo se hace especialmente grande en el carenado B, posteriormente en el A. En el caso del carenado B es muy posible que eso se deba a que el borde de salida o cola del carenado es un tanto levantado, en comparación con los otros, entonces la estela producida es mayor; por ende, las cargas fluctuantes a causa de la turbulencia se hacen también mayor y así mismo los efectos sobre el carenado en este desequilibrio.

5.3.4 Máxima y Mínima Presión en el Volumen de Control

A las tres velocidades consideradas en la simulación, ocurre que las presiones relativas máximas y mínimas se mantienen predominantemente estables. En el caso de la simulación a 10 m/s la diferencia promedio de presión es de 160 Pa (0,023 psi), a 20 m/s es de 700 Pa (0,102 psi) y a 30 m/s es de 1600 Pa (0,232 psi). Resulta lógico el incremento de la diferencia de presiones, pues a mayor velocidad se supone deben crearse presiones más altas y más bajas entorno al automóvil.

En las visualizaciones del capítulo anterior (Figura 4.1) puede observarse que la zona de mayor presión es la nariz del carenado, seguida de la cara frontal del casco. La de menor presión la zona superior del casco.

5.3.5 Máxima y Mínima Velocidad en el Volumen de Control

A 10, 20 y 30 m/s en las simulaciones se encuentra que hay una superación de velocidad de hasta aproximadamente 14, 29 y 44 m/s, respectivamente. Esto es 50, 108 y 158 km/h en cada caso. Esto es lógico pues al aumentar el recorrido de las partículas de aire, debido a las curvaturas del carenado, será necesario que éstas aumenten su velocidad. Así mismo, se encuentran valores mínimos de velocidad diferentes a cero, lo cual puede constituir un error de aproximación del *software* ya que es sabido debe haber puntos de estancamiento donde la velocidad del aire es nula. Este punto de estancamiento puede asumirse, por ejemplo, en la nariz del carenado.

Según las visualizaciones de vectores de velocidad se destaca una crecida de la misma sobre el casco del piloto, justo donde antes se registra una disminución de presión, lo cual es algo esperado en consecuencia de. Igualmente, puede notarse una disminución de velocidad en la nariz y parte posterior del casco, también en zonas circundantes a las ruedas, y muy importante, en la cola del carenado puede evidenciarse inclusive hasta un cambio drástico de sentido de la velocidad, como una especie de succión hacia la cavidad donde se aloja el motor.

El carenado B se hace curioso por tener una estela creciente, aunque atenuante. Todos los demás carenados generan una estela más o menos similar.

Con este resultado se explica por qué a veces a los automóviles se les “pega” y con movimientos oscilatorios una bolsa plástica, por ejemplo, en su parte trasera.

Hacia el interior del habitáculo también hay la presencia de turbulencias.

5.3.6 Coeficiente de Arrastre

El carenado con menor coeficiente de arrastre resultó ser el identificado con la letra C, mas no es éste el que tiene la menor fuerza de arrastre ni el mayor módulo negativo de la fuerza de sustentación, tampoco el menor momento de cabeceo. Este coeficiente de arrastre es producto de un cociente en el que entra en juego como denominador el área frontal proyectada del automóvil, por ello es posible que ocurra justamente lo que se evidencia en este caso. Cabe destacar que también es posible que un gran camión tenga el mismo coeficiente de arrastre que un pequeño automóvil, o incluso menor, pero la diferencia radica en que el primero obviamente tendrá una fuerza de arrastre mayor por lo que entonces consumirá mucha más energía.

Finalmente, el carenado seleccionado como el más adecuado bajo los criterios establecidos no es el que tiene mejor desempeño aerodinámico ni es el más fácil de construir (aunque no está lejos de ser el uno y el otro), sin embargo, sí es uno de los mejores votados por su apariencia.

Como es sabido, todos los resultados obtenidos en este estudio son basados en idealizaciones necesarias para llevar a cabo las simulaciones de una manera más conveniente, en cuanto a cómputo y en cuando al propósito de este trabajo el cual no es obtener resultados para identificarlos como reales y característicos de cada carenado sino para funcionar como valores referenciales en el proceso de diseño fundamentado en una forma de comparación entre carenados.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES

En términos generales puede concluirse que los objetivos propuestos para este trabajo fueron alcanzados en su totalidad.

Se hicieron un total de cinco carenados, los cuales fueron evaluados bajo tres criterios. Por los resultados obtenidos, es posible afirmar que un estudio de esta naturaleza se hace importante por varias razones. Entre ellas se tienen el mejoramiento de la dinámica del automóvil que en un automóvil en el cual las velocidades son mayores el efecto sería más notorio, esto referente a los efectos aerodinámicos; también se consigue así un diseño de la geometría en el que los aspectos constructivos son considerados, de manera que desde un principio la sencillez es una característica de partida desde el dibujo en digital del carenado, y así también, la apariencia o estética es cuidada y consultada a los gustos de varias personas, lo cual permite una mayor aceptación visual del carenado.

En fin, puede decirse que el presente estudio ha sido relevante, pues de una manera u otra el enriquecimiento en conceptos vinculados al tema hace del autor una persona con una formación más integral en el área del diseño automotriz, muy específicamente en la combinación del estilo y funcionalidad de un carenado, o carrocería si es el caso.

En cuanto al *Team Formula SAE UCV*, este estudio constituye un aporte para su crecimiento de año tras año, ya que cada vez son más los trabajos especiales de grado dirigidos a distintos componentes del bólido, por lo cual hay también un favorecimiento personal hacia sus integrantes por tratarse esto de otra vía de aprendizaje, así como también por los puntos extras al momento de la presentación del vehículo en la competencia internacional.

Definitivamente el aprovechamiento de las fuentes de energía es el eslogan del futuro, por eso es imprescindible hacer cuantos estudios sean posibles en busca de la mejora de los productos de la ingeniería y así disminuir el consumo energético.

CAPÍTULO VII: RECOMENDACIONES

En ingeniería, siguiendo la línea evaluación-diseño-optimización, y teniéndose ya como antecedentes el trabajo especial de grado titulado “Estudio de la Aerodinámica de un Vehículo tipo Formula mediante Simulación Numérica”, elaborado por M. Melo, de la USB, a manera de evaluación y el presente trabajo a manera de diseño se hace válido recomendar la optimización del carenado aquí propuesto o uno similar que se ajuste a los requerimientos del *Team Formula SAE UCV* y de *SAE International*.

Colocar elementos de mejora aerodinámica, como alerones, puede resultar una buena idea si se pretenden altos niveles de competitividad, claro está, esto implicaría mayor dificultad de construcción y mayor fuerza de arrastre. La ganancia estaría en la sustentación.

Conociéndose las zonas de mayor velocidad y/o mayor presión circundantes al automóvil, puede hacerse una investigación sobre puntos más adecuados para colocar componentes como intercambiadores de calor, admisión de aire para el motor con o sin turbo, entre otros.

Con el sistema de suspensión del automóvil, es muy recomendable que ciertos componentes queden cubiertos con el carenado, para así mejorar el desempeño aerodinámico y facilitar el montaje del carenado.

Aunque las geometrías de los carenados ya raya la complejidad admisible para la capacidad de cómputo del que se dispuso, en otra oportunidad pudieran agregarse ciertas partes del vehículo al dibujo digital, al menos los tubos de protección delantero y trasero anti-rolido (*main and front rollbar*)

Igualmente, si se dispone de mayor capacidad de cómputo considerar aspectos termodinámicos y rugosidades en las superficies expuestas, ésto aumentaría el detalle de la información pero vale la pena sólo si se desean resultados para reportar características aerodinámicas del carenado.

Aumentar el área de la superficie del suelo del carenado puede contribuir de manera perceptible con el “efecto suelo”.

Mantener el concepto de “piezas aisladas”, como se hizo con las tomas laterales de aire en este automóvil del 2009, lo cual facilita la construcción y montaje.

BIBLIOGRAFÍA

Referencias Bibliográficas:

- Aguirre, J.A. (1975). *Una introducción al estudio de PERFILES AERODINAMICOS y sus aplicaciones al estudio de energéticos*. México: Editorial Limusa.
- Galvin, C. (2002). UMR racing team uses advances visualization to overturn conventional aerodynamic wisdom.
- Jawad, B.A. y Longnecker, M.M. (2001). Aerodynamic Evaluation on Formula SAE Vehicles, *Vehicle Aerodynamics Design and Technology*. Congreso Mundial: Detroit, Michigan.
- Katz, J. (1995, Julio). *Race Car Aerodynamics*. Robert Bentley, Inc. Automotive Publishers. Detroit, Michigan.
- Melo, M.A. (2004). *Estudio de la Aerodinámica de un Vehículo tipo Formula mediante Simulación Numérica*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Simón Bolívar, Miranda.
- Segura, J. y Baritto, M. (2008). Presentación de Ansys CFX. *Sala de Simulaciones Computacionales*. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica.

Referencias Electrónicas:

Ansys (2009). *Engineering Simulation for the 21st Century*, [Documento en línea].

Disponible: <http://www.ansys.com/products/fluid-dynamics/default.asp>

[Consulta: 2008 Diciembre]

Real Academia Española (2007). *Diccionario de la Lengua Española*, 22^a ed. España:

Valencia. [Documento en línea]. Disponible: <http://buscon.rae.es/draeI/> ó

<http://www.rae.es> [Consulta: 2007 Noviembre]

Wikipedia, 2007, *Enciclopedia libre*. [Documento en línea]. Disponible:

<http://www.wikipedia.org>; [Consulta: 2009 Febrero]