

Propuesta metodológica en el ámbito de la mecatrónica: vehículos de competición de alta eficiencia

VICENTE COLOMER ROMERO

**EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Tesis Doctoral

PROPUESTA METODOLÓGICA EN EL ÁMBITO DE LA MECATRÓNICA: VEHÍCULOS DE COMPETICIÓN DE ALTA EFICIENCIA

Autor

Vicente Colomer Romero

Director: Josep Tornero Montserrat

Valencia, Junio 2013

Colección Tesis Doctorales

© Vicente Colomer Romero

© 2014, de la presente edición: Editorial Universitat Politècnica de València
Telf.: 963 877 012 / www.lalibreria.upv.es

ISBN: 978-84-9048-275-9 (version impresa)

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Quiero agradecer al director de la tesis Dr. D. Josep Tornero i Montserrat la oportunidad de desarrollar este trabajo en las instalaciones del Instituto de Diseño y Fabricación (IDF), su motivación, insistencia y apoyo económico, hacen posible este trabajo y los logros de nuestro equipo.

También quiero agradecer su motivación y consejos al Dr. D. Juan Antonio García Manrique, sin su ayuda económica nunca hubiera sido posible nuestro prototipo.

A mis amigos Antonio V. Martínez y Ángel Sánchez por colaborar conmigo en todo lo que les he pedido.

A mi amigo José Miralles Ferrer por su inestimable apoyo en el diseño y fabricación de nuestro propulsor, por sus consejos y soporte que nos ha llevado al record.

Así mismo a mis colaboradores en el diseño, fabricación y montaje de este prototipo en la temporada 2010, especialmente a Dante Rogiest y José Ignacio Martínez Sánchez, por las muchas horas que pasaron a mi lado en el proceso de diseño y fabricación. Al equipo IDF Eco-Marathon 2010 que llevo a cabo un trabajo extraordinario en un tiempo record.

Especial gratitud a mis alumnos del Master CAD-CAM-CIM Rubén Jacob y Francisco Palacios por sus magníficos trabajos y su brillantez.

A los equipos IDF Eco-Marathon 2011, 2012 y 2013 por sus logros deportivos y su magnífico ambiente de trabajo, el record de España es suyo.

A mis amigos docentes que pensaron que este momento nunca llegaría, gracias por alentarme.

Especialmente a mi esposa Matilde Clavel y mis hijas Elia y Paola Vega, por todas las horas que el proyecto IDF Eco-Marathon les han robado.

A mis padres que me dieron la mejor educación y que siempre confiaron en mí.

RESUMEN

El principal interés de la presente tesis reside en la aplicación de las metodologías mecatrónicas para el diseño y fabricación de un vehículo prototipo de alta eficiencia para la participación en competiciones de nivel internacional. El método descrito se aplicará como ejemplo a la forma exterior del vehículo. En el diseño y fabricación de estos vehículos se deben cumplir unos principios básicos de eficiencia y seguridad. En este trabajo se ha procedido a realizar las siguientes acciones:

- Estudio de las diferentes metodologías mecatrónicas.
- Estudio de la reglamentación en cuanto a medidas de seguridad.
- Estudio de las restricciones de diseño impuestas por nuestro tipo de vehículo (dirección delantera, motor de combustión, etc.).
- Establecimiento de la metodología.
- Diseño en 2D del perfil aerodinámico óptimo.
- Diseño de la carrocería en 3D y su posterior, perfeccionamiento del diseño a partir de un estudio CFD (*Computation Fluid Dynamics*).
- Proceso de Fabricación de la carrocería.

Se han descrito posteriormente los logros obtenidos con el diseño de la carrocería actual, así como las publicaciones relacionadas con esta tesis.

RESUM

El principal interès de la present tesi resideix en l'aplicació de les metodologies mecatròniques per al disseny i fabricació d'un vehicle prototip d'alta eficiència per a la participació en competicions de nivell internacional. El mètode descrit s'aplicarà com a exemple a la forma exterior del vehicle. En el disseny i fabricació d'aquests vehicles s'han de complir uns principis bàsics d'eficiència i seguretat. En aquest treball s'ha procedit a realitzar les següents accions:

- Estudi de les diferents metodologies mecatròniques.
- Estudi de la reglamentació quant a mesures de seguretat.
- Estudi de les restriccions de disseny imposades pel nostre tipus de vehicle (adreça davantera, motor de combustió, etc.).
- Establiment de la metodologia.
- Disseny en 2D del perfil aerodinàmic òptim.
- Disseny de la carrosseria en 3D i el seu posterior, perfeccionament del disseny a partir d'un estudi CFD (Computation Fluid Dynamics).
- Procés de Fabricació de la carrosseria.

S'han descrit posteriorment els assoliments obtinguts amb el disseny de la carrosseria actual, així com les publicacions relacionades amb aquesta tesi.

ABSTRACT

The main subject of this thesis consists of a study of the mechatronics methodology to design and fabricate a high efficiency prototype, to compete in competitions on an international level. The described method will be applied to the exterior shell of the vehicle as an example. The design and fabrication of this type of vehicles has to accomplish certain basic efficiency and safety related principles. In this study the following processes were realized:

- Study of the mechatronics methodology's.
- Study of the regulations, regarding safety measures.
- Study of the design restrictions, that apply to our type of vehicle (front-wheel steering, internal combustion engine, etc.).
- Establishment of the methodology
- 2-D design of the optimal aerodynamical profile
- Design of the body in 3-D and its subsequent optimization, based on a CFD-study (Computational Fluid Dynamics)
- Production process of the chassis.

Afterwards the results obtained with the actual chassis design are described, along with the realized publications that are related to this thesis.

ÍNDICE

ÍNDICE	11
ÍNDICE DE FIGURAS	13
ÍNDICE DE TABLAS	21
Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	23
1.1 Introducción.....	25
1.2 Objetivos	33
1.3 Estructura	34
Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE.....	37
2.1 Marco teórico y tendencias actuales	39
2.2 Tipos de vehículos utilizados	55
2.3 Principios básicos	61
Capítulo 3: COMPETICIONES DE BAJO CONSUMO.....	65
3.1 Medidas del consumo.....	67
3.2 Reglamentación y restricciones para el diseño	73
Capítulo 4: ESTABLECIMIENTO DE LA METODOLOGÍA	77
4.1 Restricciones de diseño	80
4.2 Parámetros para el diseño.....	81
Capítulo 5: DISEÑO DE LA CARROCERÍA	85
5.1 Minimizar el perfil aerodinámico	88
5.2 Diseño 3D.....	96
5.3 Desarrollo de la simulación CFD.....	105
5.4 Propuestas para modificaciones.....	156
5.5 Modelo definitivo	166
5.6 Ergonomía	169
5.7 Diseño de las ventanas	170
Capítulo 6: PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA CARROCERÍA	173
6.1 Modelado CNC.....	175
6.2 Fabricación del modelo	177

6.3	Construcción de los moldes	179
6.4	Proceso de infusión	182
Capítulo 7: RESULTADOS		193
7.1	Resultados	195
7.2	Publicaciones	201
Capítulo 8: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS		227
8.1	Conclusiones.....	229
8.2	Líneas de investigación futuras.....	230
Capítulo 9: BIBLIOGRAFÍA		233

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Ciclo de resolución del problema en micro-nivel [1].....	29
Figura 1-2 Modelo en forma de V para macro-nivel.	30
Figura 1-3 Vehículo IDF-11 en pista.	33
Figura 2-1 Fuerzas Aerodinámicas, centro de presiones, y componentes en cada dirección [14].....	44
Figura 2-2 Esquema de Capa Límite Laminar y Turbulenta.	46
Figura 2-3 Influencia de la altura del punto de estancamiento [21].....	51
Figura 2-4 Influencia de la altura del punto de estancamiento [22].....	51
Figura 2-5 Punto de estancamiento en el vehículo del IDF.....	52
Figura 2-6 Análisis preliminar vehículo IDF.	52
Figura 2-7 Comparativa en el proceso de la forma de un vehículo con y sin la utilización de simulación CFD[17].....	55
Figura 2-8 Vehículo Politécnico de Nantes, Francia.	56
Figura 2-9 Vehículo Lycée St. Joseph La Joliverie, Nantes, Francia.	56
Figura 2-10 Vehículo Agilis, Real Instituto de Tecnología KTH, Estocolmo, Suecia.....	57
Figura 2-11 Vehículo Idra, Politécnico di Torino, en Turín, Italia.	57
Figura 2-12 Vehículo Artimide, Politécnico de Milán, en Milán, Italia.	58
Figura 2-13 Vehículo Baldos, Universidad de Lulea, Suecia.....	58
Figura 2-14 Vehículo prototipo, I.E.S. Alto Nalón, Barredos, Asturias.	59
Figura 2-15 Vehículo Eco_Vehiculo, Dpto. de Mecánica, Universidad de Coímbra, Portugal.....	59
Figura 2-16 Vehículo Dátil, Universidad Miguel Hernández de Elche.	60
Figura 2-17 Vehículo TIM-05, INSA Toulouse, Francia.....	60
Figura 2-18 Primero vehículos prototipo en la Shell Eco-Marathon 1985...	62
Figura 3-1 Sistemas de medición por volumen para combustibles líquidos (Shell Eco-Marathon Lausitz 2011).....	68

Figura 3-2 Medición de combustible por volumen después de una manga (IDF Eco-Marathon Lausitz 2011).....	68
Figura 3-3 Extracción del sistema de combustible para su pesaje después de una manga (Lycee La Joliviére-Nantes Lausitz 2011).....	69
Figura 3-4 Vehículo con pila de combustible hidrógeno fluidómetro en rojo. (Lausitz 2011).....	71
Figura 3-5 Vehículo eléctrico juliómetro en gris en el lateral del vehículo. (I.E.S. Politécnico de Cartagena Lausitz 2011).....	72
Figura 3-6 Vehículo en rampa de comprobación de frenos previo a la salida de una manga. (IDF Eco-Marathon Lausitz 2011).	74
Figura 4-1 Esquema metodológico general.	79
Figura 4-2 Equilibrio de fuerzas con vehículo en movimiento.	81
Figura 5-1 Esquema metodológico empleado en el desarrollo de este trabajo.	87
Figura 5-2 Número local de Reynolds.	89
Figura 5-3 Perfil NACA 0020-65 utilizado en el diseño.....	94
Figura 5-4 Vistas de las ruedas delanteras y traseras.....	95
Figura 5-5 Perfil superior defensa delantera.....	96
Figura 5-6 Perfil inferior defensa delantera.....	96
Figura 5-7 Defensa de rueda delantera.....	96
Figura 5-8 Transformación de un perfil en una superficie de revolución. ...	97
Figura 5-9 Abertura delantera para el perfil 0020-65.	98
Figura 5-10 Contorno del plano horizontal.	98
Figura 5-11 Visión alámbrica y conceptual de la superficie conseguida.	99
Figura 5-12 Perfil Inferior.	99
Figura 5-13 Visión alámbrica y conceptual de la superficie conseguida. ...	100
Figura 5-14 Vista de la defensa de rueda delantera.	101
Figura 5-15 Detalle de la arista que forman el cubre rueda y la superficie inferior del monocasco.	101

Figura 5-16 Detalle del empalme de superficies de radio variable aplicado.	102
Figura 5-17 Vista general del modelo completo.....	102
Figura 5-18 Vista lateral del modelo.....	103
Figura 5-19 Construcción del cubrerrueda trasero.....	103
Figura 5-20 Nueva vista lateral.	104
Figura 5-21 Detalle de la parte posterior del monocasco.....	104
Figura 5-22 Detalle de la parte posterior del monocasco refinado.	105
Figura 5-23 Paralelepípedo que representará el túnel de viento alrededor del vehículo. Obsérvese la proporción y distancia de las paredes.	107
Figura 5-24 Monitor de Solución en pantalla mientras se realiza el cálculo de la solución al problema configurado.....	109
Figura 5-25 Presión en la superficie del vehículo - estudio de viento lateral.	111
Figura 5-26 Presión en la superficie del vehículo - estudio de avance frontal.	111
Figura 5-27 Modelo inicial en Rhinoceros 4.0.....	112
Figura 5-28 Análisis de bordes en Rhinoceros 4.0.....	112
Figura 5-29 Análisis de bordes en Rhinoceros 4.0.....	113
Figura 5-30 Unión de bordes desnudos en Rhinoceros 4.0.....	114
Figura 5-31 Análisis de las dimensiones del modelo.....	115
Figura 5-32 Modelo en NX.....	116
Figura 5-33 Selección de superficies a coser en NX.....	116
Figura 5-34 Modelo con todas las superficies cosidas en NX.....	117
Figura 5-35 Creación del paralelepípedo para el túnel de viento.	118
Figura 5-36 Creación del paralelepípedo para el túnel de viento.	118
Figura 5-37 Creación del paralelepípedo para el túnel de viento.	119
Figura 5-38 Activación del módulo de elementos finitos de NX.	120
Figura 5-39 Elección de "flujo" en la simulación.....	121
Figura 5-40 Configuración de la simulación.....	122

Figura 5-41 Elección del modelo de turbulencia.	122
Figura 5-42 Elección de las unidades para la solución.	124
Figura 5-43 Elección de las condiciones ambientales.....	124
Figura 5-44 Elección de las condiciones de flujo en 3D para la solución. .	125
Figura 5-45 Visión del archivo previo a la simulación.	126
Figura 5-46 Añadir transparencia a las paredes del túnel.....	126
Figura 5-47 Visión sin túnel oculto.	127
Figura 5-48 Visión con túnel oculto.	127
Figura 5-49 Elección del tipo de malla 2D para el modelo.	128
Figura 5-50 Modelo mallado con las opciones por defecto del software..	129
Figura 5-51 Modelo mallado con las opciones por defecto del software..	129
Figura 5-52 Modelo mallado con las opciones modificadas.	130
Figura 5-53 Activación de las condiciones límite del flujo.	131
Figura 5-54 Ubicación de la entrada de flujo en el túnel.	132
Figura 5-55 Selección de la velocidad de flujo y sus unidades.	132
Figura 5-56 Selección de las condiciones externas.....	133
Figura 5-57 Selección del dominio de fluido.	134
Figura 5-58 Mallado relativo.....	135
Figura 5-59 Mallado regular.....	136
Figura 5-60 Configuración de mallado del fluido.....	136
Figura 5-61 Navegador del post-procesador.	139
Figura 5-62 Soluciones en el árbol.	139
Figura 5-63 Visualización del plano de corte.	140
Figura 5-64 Eliminación del mallado en la visualización del resultado....	141
Figura 5-65 Visualización de la presión total sobre el modelo.....	141
Figura 5-66 Visualización de la velocidad sobre el modelo.....	142
Figura 5-67 Ubicación de las líneas.....	143
Figura 5-68 Grupos de líneas y mallas alámbricas activadas.	144
Figura 5-69 Representación de la presión estática.....	144
Figura 5-70 Modificación de línea a tubo o burbuja.....	145

Figura 5-71 Tubos activados.	145
Figura 5-72 Grupos de líneas horizontales con forma de tubo.	146
Figura 5-73 Modificación de tubo a burbuja.	146
Figura 5-74 Desplazamiento del flujo sobre el vehículo.	147
Figura 5-75 Visualización de líneas aerodinámicas con burbujas.	147
Figura 5-76 Método utilizado para la obtención del área frontal.	149
Figura 5-77 Proyecciones frontales y laterales del vehículo. Modelo previo al final.	149
Figura 5-78 Relación que se utilizará entre los coeficientes alrededor del vehículo.	151
Figura 5-79 Gráfico de evolución del C_x/C_y frente al ángulo del viento. .	154
Figura 5-80 Imágenes que muestran el efecto suelo sobre el vehículo.	156
Figura 5-81 Renders del primer modelo del coche mostrando piloto y zonas de visibilidad.	157
Figura 5-82 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 01..	158
Figura 5-83 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 02..	159
Figura 5-84 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 03..	159
Figura 5-85 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 04..	160
Figura 5-86 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 05..	161
Figura 5-87 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 06..	162
Figura 5-88 Comparativa de la continuidad entre los modelos 04 y final..	162
Figura 5-89 Comparación entre el comportamiento del fluido en la zona posterior en los modelos 04 y final. Nótese la diferencia de presiones y la continuidad de las líneas de flujo.	163
Figura 5-90 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 – Modelo Definitivo.	164
Figura 5-91 Vista alzado acotada.	167
Figura 5-92 Vista planta acotada.	167
Figura 5-93 Vista frontal acotada.	167
Figura 5-94 Diversos renderizados foto-realistas.	168

Figura 5-95 Imagen del IDF-10 en pista, en la Shell Eco-Marathon Europe 2010.	168
Figura 5-96 Simulación del alcance de las manos del piloto.....	169
Figura 5-97 Recreación de la prueba de visibilidad.....	170
Figura 5-98 Visión del piloto. Vista al frente.	171
Figura 5-99 Visión del piloto. Vista lateral.	171
Figura 6-1 Mecanizado de los cubre ruedas.	175
Figura 6-2 Comienzo del mecanizado.....	176
Figura 6-3 Vista de las espumas mecanizadas por CNC.....	176
Figura 6-4 Vista de la parte trasera inferior.....	177
Figura 6-5 Mecanizado terminado.	177
Figura 6-6 Ajuste de bordes con cera calibrada.....	178
Figura 6-7 Pulido de la imprimación.	178
Figura 6-8 Detalle del acabado superficial.	179
Figura 6-9 Modelo de espuma parte inferior.	179
Figura 6-10 Colocación de la fibra de vidrio para la creación del molde. .	180
Figura 6-11 Interior de la parte inferior del molde.	181
Figura 6-12 Pulido a espejo del interior del molde. Interior de la parte superior.	181
Figura 6-13 Vista general del molde acabado.	182
Figura 6-14 Corte de la tela de carbono tras hacer el patronaje.....	184
Figura 6-15 Malla para que corra la resina.....	184
Figura 6-16 Colocación del film.	185
Figura 6-17 Vista general de los tubos para la infusión.	185
Figura 6-18 Vista general del molde mientras se realiza la infusión.	186
Figura 6-19 Frente de avance de la resina.	186
Figura 6-20 Frente de avance de la resina.	187
Figura 6-21 Frente de avance de la resina.	187
Figura 6-22 Detalle de uno de los tubos que efectúa vacío.	188
Figura 6-23 Vista general del molde mientras se realiza la infusión.	188

Figura 6-24 Tapa del prototipo en el horno mientras cura la resina.	189
Figura 6-25 Carrocería desmoldeada a falta de barnizado de protección...	190
Figura 6-26 Carrocería desmoldeada, se puede apreciar la tapa superior sin recortar.	190
Figura 6-27 Carrocería dispuesta para la ubicación de piezas interiores. ..	191
Figura 7-1 Vehículo ensamblado.	196
Figura 7-2 Detalle ubicación del motor.....	197
Figura 7-3 Detalle habitáculo motor y eje trasero.	197
Figura 7-4 Detalle mangueta delantera izquierda.	198
Figura 7-5 Detalle habitáculo del piloto.....	198
Figura 7-6 Vista de la posición del piloto.	199
Figura 7-7 Vehículo sobre banco de potencia a la rueda.....	199
Figura 7-8 Vehículo preparado para salir a pista.	200
Figura 7-9 Vehículo en pista en la Shell Eco-Marathon 2013.....	200

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Tabla comparativa de los poderes caloríficos de los distintos combustibles.....	67
Tabla 4-1 Tabla comparativa de los coeficientes de rozamiento de distintos tipos de neumático y vehículo.	83
Tabla 5-1 Propiedades del aire en condiciones ISA.	88
Tabla 5-2 Flujo laminar vs turbulento para un vehículo prototipo.	90
Tabla 5-3 Principales características de los perfiles NACA.....	91
Tabla 5-4 Radio de borde principal.	93
Tabla 5-5 Coeficientes de penetración del vehículo en diferentes ángulos frente al flujo [36].	153
Tabla 5-6 Incidencia del efecto suelo en el arrastre ejercido sobre el vehículo a 30 km/h.....	155
Tabla 5-7 Incidencia del efecto suelo en el arrastre ejercido sobre el vehículo a 50 km/h.....	155
Tabla 5-8 Evolución de la forma del vehículo, y sus coeficientes de penetración.	166

***Capítulo 1: INTRODUCCIÓN Y
OBJETIVOS***

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

Los productos innovadores exigen la integración sinérgica de diferentes dominios de la ingeniería como la mecánica, electrónica y la informática. Esto se expresa por el término mecatrónica.

Para el diseño sistemático de productos mecatrónicos, el ingeniero de diseño en la práctica necesita una guía para seleccionar los procedimientos más adecuados, métodos eficientes y herramientas de fácil uso para su tarea de diseño.

Sin embargo, las encuestas muestran que las directrices a menudo no son aceptadas y utilizadas por la industria en lo que se esperaban. Los profesionales afirman que los procedimientos propuestos son demasiado rígidos, a menudo complejos y por tanto no adaptables a la etapa de diseño.

Los resultados de la investigación empírica sobre el proceso de diseño confirman que no hay ninguna "forma óptima del proceso de diseño". No obstante, el Ingeniero de diseño puede seguir el diagrama de flujo que se muestra en la Figura 1-1 [1].

Existen normas como la VDI 2221 [2], que pretenden guiar al diseñador en el procesos de diseño. No obstante, no suelen ser útiles dado que existen fuertes variaciones entre unos diseños y otros. Por lo tanto, nuevos enfoques de investigación intentan proporcionar procedimientos y métodos de una manera flexible ante situaciones concretas, por ejemplo, [3], [4].

El diseño de sistemas mecatrónicos difiere del diseño de productos, que son principalmente desarrollados en solo un dominio de la Ingeniería. Por el contrario, los sistemas mecatrónicos son especialmente complejos debido a la gran cantidad de disciplinas que involucran. Se puede decir que la mecatrónica es un dominio de la ingeniería de tipo heterogéneo.

Con el fin de gestionar la complejidad y heterogeneidad, los métodos de modelización y análisis del modelo – entre otros – son muy importantes. Se necesitan para integrarse en los procedimientos de diseño de sistemas mecatrónicos. Las directrices existentes como la VDI 2221 [2] o VDI 2422 [5] no cumplen con los requisitos especiales de la Mecatrónica en forma suficiente.

Se plantean dos cuestiones principales:

- ¿Cómo debe ser una metodología para que ofrecer apoyo sistemático de una manera flexible a situaciones específicas de la industria?.
- ¿Cuáles son los requisitos específicos de Mecatrónica en el diseño?
¿Cómo debe ser el procedimiento por los modelos diseñados para cumplir con estos requisitos?.

Frente a estas preguntas el Comité de la Asociación de Ingenieros Alemanes (VDI) ha elaborado una guía, la VDI 2206 "Diseño de metodología para sistemas mecatrónicos" [6]. Requisitos específicos para el diseño de Sistemas Mecatrónicos.

Antes de introducir la metodología, introduciremos los requerimientos propios del diseño, agrupados en dos categorías: 1) impacto de complejidad y 2) impacto de heterogeneidad.

1) El impacto de complejidad en sistemas mecatrónicos deriva de la vinculación cruzada de diferentes dominios de ingeniería. La complejidad es causada por el creciente número de disciplinas conectadas. La Mecatrónica mejora el comportamiento, la precisión y la proporción de coste-valor del producto diseñado. Desarrollos en la industria automotriz o aeronáutica solo son posibles con planteamientos mecatrónicos, conscientes o inconscientes, solo posibles gracias a la interacción permanente de mecánica, electrónica y elementos de software.

Por lo tanto, la complejidad del diseño de un sistema mecatrónico conduce a cuatro requisitos:

1. Procedimiento que permita el cambio de nivel de detalle (concreto) y general (abstracción).
Durante el proceso de diseño, los ingenieros de diseño necesitan la acción recíproca entre el contexto general y el enfoque de detalle. Debido a la vinculación entre otros detalles, nuevas soluciones y conclusiones también tienen que revisarse permanentemente en el contexto general.
2. Métodos de estructuración y jerarquización.
Los sistemas mecatrónicos deben estructurarse con el fin de reducir la complejidad y minimizar las interacciones, por

ejemplo, la estructura jerárquica de elementos básicos, sistemas y sistemas vinculados.

3. Principios de modelado y simulación.

Las interacciones entre los subsistemas, por ejemplo, acoplamiento del sistema de gestión y freno de motor para el programa electrónico de estabilidad (ESP), sólo pueden ser anticipadas por los principios de modelado y simulación del comportamiento del sistema. Adecuados métodos y herramientas de software son necesarios para este fin.

4. Integración, verificación y validación de propiedades.

Los resultados de diseño tienen que integrarse en un sistema global y comprobarse continuamente la adecuación a los requerimientos del producto o sistema a diseñar. Es asegurarse de que las características del sistema real coinciden con lo que deseaba el cliente. Seguramente, serán necesarias varias iteraciones para cumplir este objetivo.

2) El impacto de la heterogeneidad en las soluciones y componentes proviene de diferentes dominios de la ingeniería como la mecánica, electrónica e informática. Estos dominios implicados están trabajando sobre la base de métodos de diseño establecidos, con sus propias metodologías específicas, nomenclaturas y experiencias. La integración de componentes heterogéneos para sistemas mecatrónicos es un gran reto expresado por cuatro requisitos:

1. La comunicación y cooperación entre las disciplinas involucradas requiere reunir conocimientos sinérgica y diseñar una solución totalmente optimizada.
2. Expertos de diferentes disciplinas necesitan un método común para especificar los resultados de la conceptualización de producto, como se puede observar en Gausemeier [7].
3. La partición, es decir, la distribución de funciones entre las disciplinas de la ingeniería y la asignación de tareas, es muy importante en la mecatrónica.
4. Los resultados de diseño – modelados por las distintas disciplinas con diferentes modelos, lenguajes y herramientas – deben integrarse.

La metodología de diseño de sistemas mecatrónicos se caracteriza por dos niveles: diseño de apoyo en el nivel Micro y proceso de diseño a nivel Macro. Es decir, el diseño individual (nivel micro) y el proceso genérico de diseño y estados de producto correspondientes (nivel macro).

El nivel micro es compatible con el diseñador de una manera orientada a la acción: alternancia entre formas de proceder, reaccionar en situaciones imprevistas, estructuración de tareas de diseño etc. sistemáticas y asociativas, mientras que el nivel macro ayuda a estudiar el proceso de diseño total, planificación y control de los progresos de diseño etc.

Micro-Nivel

La actual forma de resolver los problemas en el micronivel viene marcada por el modo de actuar en los sistemas de ingeniería, esta metodología esta extraída de Gausemeier et al [1]. El ciclo de la solución de problemas comprende los pasos siguientes:

El análisis de situación y/o el control del objetivo. Un ciclo básico comienza con el análisis de la situación o el asumir el control del objetivo. Un objetivo externamente preestablecido puede asumir el control por acciones temporales y/o una individual. Si el primer análisis diera un resultado confuso, se reformulara el objetivo.

Análisis y síntesis. Es el objetivo a buscar para las soluciones del problema dado y la elaboración de las variantes de la solución alternativa. Este proceso representa en la práctica una interacción permanente de los pasos de la síntesis y del análisis que los ingenieros de diseño realizan en parte conscientes, en parte inconsciente también. Durante la búsqueda de la solución pueden localizarse aspectos adicionales del problema que pueden requerir una vuelta a la formulación del análisis y del objetivo de situación o la consideración de criterios suplementarios.

Análisis y evaluación. Las variantes de la solución son tema de una fase detallada de la evaluación. Si ciertas ideas de la solución se diferencian demasiado para ser comparadas apropiadamente, se deberá volver a la fase de búsqueda de la solución. La evaluación de las variantes de la solución se hace en base a los criterios de la evaluación definidos dentro de la búsqueda de la formulación y de la solución del objetivo. El resultado consistirá en la propuesta de una o varias soluciones alternativas.

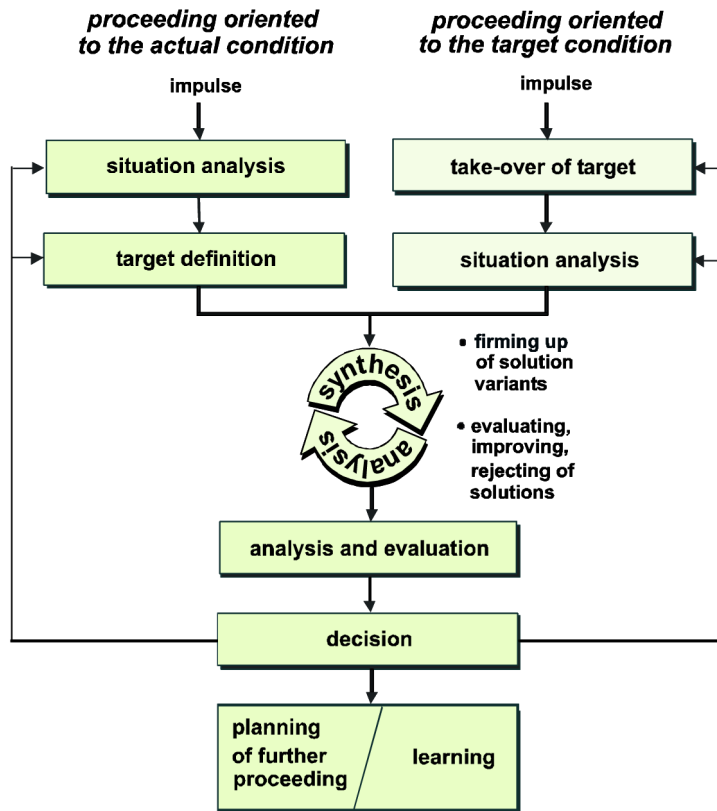


Figura 1-1 Ciclo de resolución del problema en micro-nivel [1].

Decisión. Se tomará una decisión siempre que el proceso anterior nos ofrezca una solución del problema. Si éste no es el caso, uno debe volver a la formulación del análisis y del objetivo. Si no es una, también pueden elegirse varias soluciones alternativas que quizá representan la base para un posterior planteamiento.

Planificación del procedimiento posterior / learning. El procedimiento posterior lleva en muchos casos más o menos continuamente a otros ciclos de resolución del problema y así a un proceso situación-adaptación. Al lado de la evaluación del resultado del proceso de diseño, también debe realizarse un análisis crítico. Entendiendo los impactos positivos y negativos en el proceso, el conocimiento que puede ser generado en las tareas de diseño posteriores. Esto ayuda a mejorar los procesos de diseño futuros de una manera sistemática.

Un ejemplo de la utilización de este método son los publicados en Gausemeier et al [1], como pueden ser las tecnologías de ensamblaje y conexión.

Macro-Nivel

El modelo en forma de V se establece en el ámbito de la ingeniería de programas informáticos. Hay tres razones por las que parecía ser adaptado para la mecatrónica:

1. El modelo de forma de V ilustra el enfoque descendente (diseño de sistemas: división en subfunciones) y el parte-ascendente (integración de sistema: integración de resultados al sistema total) de una manera obvia.
2. Permite señalar la necesidad de la verificación y/o de la validación permanente entre los requisitos o las funciones especificadas (lado izquierdo) y el sistema actual (virtual y/o real) (lado derecho).
3. Es utilizado ya por la industria en el contexto de la mecatrónica dado que ayuda a aumentar la aceptación de la metodología.

Por lo tanto el modelo de forma de V es el utilizado y se ha adaptado a las necesidades mecatrónicas. Describe el procedimiento genérico para el diseño de sistemas mecatrónicos que tiene que ser especificado según la tarea individual del diseño (Figura 1-2).

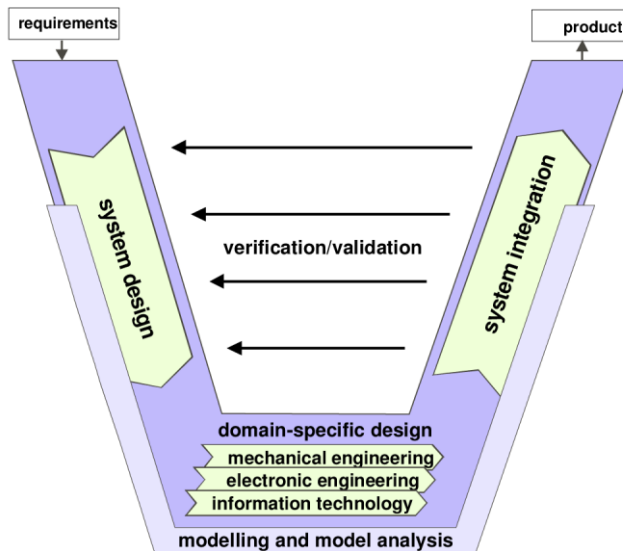


Figura 1-2 Modelo en forma de V para macro-nivel.

Requisitos. El punto inicial es una tarea individual del diseño. La tarea se ha aclarado o definido y se ha descrito con la ayuda de requisitos. Estos requisitos representan al mismo tiempo la medida para la evaluación del producto posterior.

Diseño de sistemas. El objeto es definir una solución de concepto que describa las características físicas y lógicas esenciales del producto futuro. La función total de un sistema será dividida en sub-funciones. Los principios de funcionamiento y/o los elementos convenientes de la solución se asignan a estas sub-funciones y se evalúa la satisfacción de las funciones con respecto al contexto del sistema total. En la ingeniería industrial esta fase se llama “conceptualización”, pero este término no tiene el mismo significado dentro del software y de la ingeniería electrónica. La integración de las disciplinas implicadas es apoyada por métodos y herramientas: Los sistemas mecatrónicos de estructuración en módulos para reducir la complejidad, usando un lenguaje común para especificar el concepto de la solución, modelado temprano y el apoyo de las herramientas de simulación, ayuda de organización (equipos de proyecto, integración de los socios externos etc. del diseño).

Ámbito específico del diseño. El concepto de la solución que ha sido desarrollado conjuntamente por los ámbitos implicados será resuelto detalladamente sobre todo por separado en los ámbitos en cuestión. El diseño y los cálculos elaborados son necesarios para garantizar una solución funcional, particularmente la que tiene que ver con las funciones críticas.

Integración de sistema. Los resultados de los ámbitos específicos se integran a un sistema total para analizar las interrelaciones.

Verificación/validación. El progreso del diseño tiene que ser comprobado continuamente mediante el concepto especificado de la solución y los requisitos. Debe asegurarse que las características de sistema son las deseadas.

Modelado y análisis modelo. Las fases descritas son flanqueadas por el modelado y el análisis de las características del sistema con la ayuda de modelos y de herramientas automatizadas para la simulación.

Producto. El producto es el resultado exitoso del paso por un macro-ciclo. No significa exclusivamente el artículo manufacturado acabado, realmente existente, sino la concreción en curso del producto futuro (madurez del producto). Los grados de madurez son, por ejemplo, el modelo de concepto, el modelo funcional etc.

Esta metodología diferente del procedimiento fase-orientado clásico e.g. [2]: Primero distingue claramente entre micro y el macronivel que apoyan al diseñador y a la gestión del diseño. El macromodelo combina en segundo lugar acercamiento de arriba hacia abajo y ascendente. A menudo el diseño mecatrónico se conduce parte -para arriba- (integración de componentes de diversas disciplinas por los interfaces). Las nuevas funciones mecatrónicas (integración funcional y espacial) necesitan crear procedimientos que combinen de arriba-abajo y su evaluación de abajo-arriba. Tercero el modelo no se entiende como un plan rígido, él integra los elementos para su adaptación.

Ejemplo de la utilización de esta metodología son las publicaciones de Liu-Henke et al. [8] y Gausemeier et al. [7].

Diseñar y construir un vehículo de alta eficiencia no es solo un gran trabajo de ingeniería, además se requiere la aplicación de una serie de técnicas que conllevan que sea este un problema ingenieril a resolver con muchos caras, anar cada una de ellas en una metodología es el objetivo de esta tesis.

La problemática del diseño de este tipo de vehículos de competición no está abordada en ninguna metodología conocida, aplicaremos los avances de la mecatrónica en esta tesis hasta obtener de este trabajo una herramienta útil de desarrollo para el futuro, no solo para nuestro equipo, sino para otros que quieran fijarse en cual ha sido nuestro proceso creativo, de cálculo y su posterior implementación.



Figura 1-3 Vehículo IDF-11 en pista.

1.2 Objetivos

El contexto en el que se desarrolla esta tesis es la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) dentro de su Instituto de Diseño para la Fabricación y Producción Automatizada (IDF), en la línea de Mecatrónica que este Instituto posee, recientemente se ha impulsado desde la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño la puesta en marcha de un Master en Mecatrónica para surtir a la industria del automóvil española de nuevos titulados con las especiales habilidades de las ramas mecánicas, electrónicas e informática.

La mecatrónica ofrece los potenciales del éxito para la creación de nuevos productos, el proceso de diseño necesita sin embargo requisitos especiales: Los sistemas mecatrónicos se caracterizan por su alta complejidad debido al gran número de elementos conectados además de los diversos ámbitos de la ingeniería (heterogeneidad).

Para manejar estos requisitos es necesaria una metodología para el diseño sistemático de sistemas mecatrónicos. La tarea individual de diseño tiene que ser apoyada para asegurar la aceptación y el uso en la industria.

La contribución presenta los elementos principales del modelo flexible de procedimiento como parte de la nueva guía VDI 2206 [6]. Los

elementos son: 1) ciclo general de la solución de problemas en micronivel, 2) modelo de forma de V en el macronivel, 3) macro-ciclos según el grado de madurez y 4) módulos de proceso especificados por el usuario para los pasos de la operación que se repiten.

La guía es un paso hacia una metodología específica mecatrónica que comprende: la base de sistemas mecatrónicos, modelo del procedimiento, métodos de modelado y análisis del modelo, herramientas de automatizados y aspectos seleccionados de la organización mecatrónica.

El IDF posee un equipo de competición de vehículos de bajo consumo desde el año 2.006, desde entonces se han fabricado dos vehículos, a la vista de los resultados obtenidos en la European Shell Eco-Marathon 2009, surge este trabajo con la intención de diseñar, desarrollar y construir un vehículo de optimas características.

Los objetivos marcados en el inicio de ese proceso fueron los siguientes:

- Establecer el marco teórico y experimental en el que basar este trabajo (Capítulo 2 y 3).
- Establecer una metodología general para la resolución de diseños mecatrónicos (Capítulo 4).
- Establecida la metodología general aplicarla para el caso particular del proceso de diseño de la carrocería, así como realizar un estudio ergonómico y de visión del modelo generado (Capítulo 5).
- Estudiar los distintos tipos de fabricación posible y definir cuál es el idóneo para la forma del vehículo optimizando el peso, la resistencia y la rigidez del mismo (Capítulo 6).

1.3 Estructura

La presente tesis está estructurada en 9 capítulos incluyendo este.

El Capítulo 2, *Estado del Arte* es una revisión del marco teórico del trabajo, las tendencias en diseños de vehículos y los principios básicos necesarios para iniciar la tesis.

Capítulo 3, *Competiciones de Bajo Consumo* establecemos en este capítulo que reglamentación existe en la competiciones, como se compite y se establecen las restricciones de diseño básicas para este tipo de vehículo.

En el Capítulo 4, *Establecimiento de la Metodología de Diseño* se establece las restricciones de diseño propias de nuestro equipo, como esas restricciones se convertirán en parámetros que modificaran el método empleado para la optimización del perfil aerodinámico de la sección del vehículo en 2 dimensiones.

Capítulo 5, *Diseño de la Carrocería* se procederá al diseño en 3 dimensiones de las formas creadas en el capítulo anterior, se realizará un estudio por el método de los elementos finitos aplicado a fluidos (*Computation Fluid Dynamics*) de la forma obtenida, modificando la forma en los aspectos necesarios hasta conseguir que la fuerza de arrastre debida a la forma sea la mínima posible, por último se realizará un estudio ergonómico y de visión, para comprobar la seguridad del vehículo.

En el Capítulo 6, *Proceso de Fabricación de la Carrocería* se establece el método a emplear en la fabricación, así como se definirán todos los pasos llevados a cabo.

En los Capítulos 7 y 8, *Resultados y Conclusiones y Trabajos Futuros* en estos capítulos se enunciaran los resultados obtenidos en forma de marca en km/l, peso del vehículo, etc. y las publicaciones más notorias que han surgido de este trabajo (Capítulo 7). Asimismo las conclusiones serán mostradas en el último capítulo junto con los líneas futuras de actuación en el campo de los vehículos de bajo consumo del IDF (Capítulo 8).

Capítulo 2: ESTADO DEL ARTE

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Marco teórico y tendencias actuales

Mecatrónica

El término “mecatrónica”, un híbrido de mecánica y electrónica, describe la interacción cercana de la mecánica, electrónica, ingeniería del control y de programas informáticos así como nuevos materiales. El objetivo de la mecatrónica es mejorar el comportamiento de sistemas técnicos. Pueden responder a los cambios en su ambiente, detectan estados de funcionamiento críticos y, con la ayuda de la ingeniería de control adaptativo, optimizan los procesos que son difíciles de controlar. La mecatrónica permite el desarrollo fundamental de nuevas soluciones en el área de la ingeniería industrial y en los sectores relacionados, que a su vez pueden mejorar considerablemente el ratio del coste/ventaja de familias de productos familiares y también estimular el diseño de nuevos, hasta ahora productos desconocidos, según indica Radkowski et al [9].

Una de las características de un sistema mecatrónico es un lazo de control que consiste en una estructura mecánica, los sensores, el proceso de la línea-de información y los actuadores. Los objetivos de este sistema incluyen la manipulación activa de la estructura básica generalmente mecánica para compensar interferencias, adaptabilidad a cambiar circunstancias ambientales y la realización del autoexamen, posiblemente autocorrección.

Los productos de la ingeniería industrial y de los sectores industriales relacionados, tales como la industria del automóvil, se basan a menudo en la interacción cercana de la ingeniería mecánica, de la electrónica y de programas informáticos, que es expresada conveniente por el termino la mecatrónica. El desarrollo concebible de la comunicación y la tecnología de la información abren las perspectivas cada vez más fascinantes, que se mueven mucho más allá de estándares actuales de la mecatrónica: sistemas mecatrónicos que tienen una inteligencia parcial inherente, según Gausemeier et al [10].

Por lo tanto, utilizamos el término “auto-optimización”. La “auto-optimización” permite a los sistemas de ingeniería industrial que reaccionan de forma autónoma y flexiblemente en condiciones cambiantes de operación. El diseño de tales sistemas es un desafío. En ese caso, metodologías de diseño establecidas de la ingeniería industrial convencional, e.g el diseño de

ingeniería por Pahl/Beitz [11], y también las metodologías de la mecatrónica, por ejemplo la metodología VDI 2206 “Metodología de diseño para los sistemas mecatrónicos” (VDI 2004), no son más adecuadas a la tarea-especial en las fases de diseño tempranas “del planeamiento y de aclarar la tarea” y “diseño conceptual” que dan lugar a la supuesta “solución del principio”.

La solución del principio determina la estructura básica y el modo de operación de los sistemas y, posteriormente, del él es la base para el concretización adicional. Cómo especificar la solución del principio no se ha fijado para el campo de los sistemas de la mecatrónica y de la auto-optimización de momento.

Dentro del Collaborative Research Centre (CRC) 614 “Sistemas y estructuras auto-óptimos en la ingeniería industrial” de la universidad de Paderborn, se ha resuelto un sistema de técnicas específicas para describir la solución del principio de sistemas auto-óptimos.

Usando las técnicas especificadas, el sistema que debe ser desarrollado se definirá en un ámbito holístico. Al principio, esta contribución define el paradigma activo de la “auto-optimización”. Se continúa analizando los desafíos del desarrollo de sistemas auto-óptimos y se señala la necesidad de la acción según el desarrollo adicional de la técnica de la especificación en las fases tempranas del proceso de desarrollo [12].

Aerodinámica y CFD

La aerodinámica es la rama de la mecánica de fluidos que se encarga de estudiar el movimiento relativo entre un sólido y un fluido gaseoso, generalmente aire, que lo rodea, definiendo las presiones y fuerzas que se generan.

En la práctica las mayores aplicaciones de la aerodinámica están en la aeronáutica, determinando el comportamiento de los aviones y vehículos aéreos, y mejorando, principalmente mediante la modificación de sus formas, su comportamiento respecto al aire, y en segundo término en la automoción, originalmente la alta competición, que sirve como laboratorio de pruebas para lo que luego serán vehículos urbanos. Es en ésta área en la que éste trabajo tendrá incidencia, estudiando el comportamiento del vehículo terrestre de alto rendimiento que desarrolla el IDF de la Universidad Politécnica de Valencia, y proponiendo mejoras que optimicen su rendimiento aerodinámico.

El análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) mediante software es un método que, desde la aparición de computadores capaces de procesar la enorme cantidad de información requerida para llevarlo a cabo, ha venido a apoyar o en ocasiones a reemplazar el estudio aerodinámico realizado en terreno o en túneles de viento con el que desde hace décadas se busca lograr mejores perfiles de desempeño en vehículos tanto terrestres como aéreos.

El análisis CFD es hoy por sí mismo una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de sustancias. Los procesadores de última generación son utilizados para realizar los millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas proyectadas por la ingeniería. Aun con ecuaciones simplificadas y computadores de alto rendimiento, los resultados suelen ser aproximados y sujetos a verificación respecto a condiciones y experimentos reales, como túneles de viento en condiciones totalmente controladas. Aún así la posibilidad de realizar múltiples ensayos mediante un entorno virtual, incluso existiendo aun la necesidad relativa de evaluar dichos ensayos mediante una comparación con la realidad, logra un ahorro sustancial en todo el proceso de estudio aerodinámico involucrado en el desarrollo de cualquier vehículo.

Evolución histórica

Aunque los primeros análisis matemáticos de un flujo fluido comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XVIII, cuando Laplace, Bernoulli y Euler establecieron las ecuaciones básicas de la Mecánica de Fluidos, de hecho, su utilización para aplicaciones en ingeniería fue escasa debido a la complejidad de su estructura y falta de recursos numéricos en aquel momento.

En el siglo XIX fueron Navier y Stokes los que establecieron las ecuaciones fundamentales que describen un flujo real en fluidos viscosos. De igual manera seguía ocurriendo que, a excepción unos pocos casos sencillos para los que podían encontrarse soluciones analíticas, la mayor parte de las veces las ecuaciones no podían ser resueltas en casos de interés práctico.

La historia del CFD propiamente tal surge en los años 60's con el auge de la investigación aeroespacial, es la División Teórica de la NASA en "Los Álamos", USA, la que desarrolla en ese entonces muchos de los métodos que aun hoy se aplican en las tareas de CFD: Particle-In-Cell (PIC), Marker-and-Cell (MAC), Métodos de función de flujo de Vórtice, Método arbitrario Lagrangiano-Euleriano (ALE), entre otros.

En los 70, el grupo del Doctor Brian Spalding, en el Imperial College, Londres, desarrolla el código de flujos parabólicos (GENMIX), y en 1980 se publica uno de los más influyentes escritos en el área del CFD hasta hoy, el trabajo de Suhas V. Patankar "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", base para la creación de múltiples algoritmos de cálculo CFD.

En los años 80 también comenzó un amplio desarrollo comercial del CFD, y las grandes compañías desarrolladoras de software inician la aplicación de los códigos teóricos a aplicaciones que permitirán el cálculo computacional de fluidos, acelerando el tedioso proceso que hasta ese entonces significaba el cálculo manual.

El CFD es hoy también considerado parte de las tecnologías conocidas como CAE, ingeniería asistida por computador, utilizadas hoy en la mayoría de las industrias y ámbitos de la ciencia, volviéndose indispensable en el desarrollo de vehículos de todo tipo, desde trenes y automóviles, hasta aviones, cohetes aeroespaciales y también vehículos submarinos debido a que es posible extrapolar los avances en aerodinámica a la hidrodinámica, al tratarse también de fluidos que rodean un cuerpo [13].

Lo que en la reciente década de los 90 era sólo alcanzable con supercomputadoras, propiedad de empresas o universidades, es hoy posible de desarrollar con un computador personal potente y al alcance de la mayoría de las personas.

Aerodinámica de automóviles

El campo de la aerodinámica de automóviles se encuentra en un régimen subsónico, es decir velocidades por debajo de los 0.3 Mach que registra el sonido. Al margen de ello, las leyes y principios son exactamente los mismos que permiten que un avión pueda volar, con la gran diferencia que el perfil aerodinámico del automóvil es diseñado para producir una fuerza resultante hacia abajo, para adherirse al suelo, en lugar de hacia arriba, para elevarse [14].

Al interactuar en un proceso mecánico dos cuerpos sólidos, las fuerzas entre ellos se registran y actúan en el punto de contacto, sin embargo cuando un sólido actúa con un fluido, en las moléculas de éste último se produce una distorsión, y comienzan a moverse por la superficie, alrededor del sólido, manteniendo un estrecho contacto físico entre todos sus "puntos", por ello las fuerzas en este sistema deben considerarse en todos los puntos de la superficie del vehículo, en la práctica casi infinitos, o más bien determinados por el tamaño de las moléculas del fluido.

Esto se puede ver a simple vista en fluidos como líquidos viscosos, cuando por ejemplo se vierte un chorro constante de agua sobre una cuchara, y el agua se desliza por ésta chorreando por ella hasta llegar al límite inferior, donde se separa gradualmente, ésto también permite notar que la forma del sólido en cuestión, contribuye a que esto ocurra o dificulta la aparición del fenómeno. Para efectos de la aerodinámica el fluido siempre será aire, y para efectos de la aerodinámica de automoción, el sólido siempre será el vehículo, en éste caso el efecto no será visible como en el ejemplo, sin embargo igualmente ocurrirá.

En el mundo real, y ante velocidades altas, hay ciertos aspectos que influirán enormemente en la aparición de las fuerzas que interactúan en éste sistema, lo primero será la densidad y viscosidad del aire, o lo que es equivalente, su compresibilidad, y la rugosidad superficial y la superficie de contacto del automóvil, junto a la velocidad relativa entre aire y vehículo.

Debido a lo anterior, siempre existirán dos fuerzas a considerar, una “fuerza de presión”, normal a la superficie del cuerpo, producto de la velocidad relativa entre ambos, y una “fuerza de rozamiento”, tangente a la superficie del cuerpo, debida a la viscosidad del aire.

Daniel Bernoulli estableció en el siglo XVIII el principio físico que lleva su nombre y que señala que en un fluido en movimiento la suma de la presión y de la velocidad en un punto cualquiera permanece constante, por lo tanto si se aumenta la velocidad, disminuye la presión, y viceversa.

Esto resulta clave pues permite establecer una distribución de presiones sobre un cuerpo sólido que se desplaza en un fluido a partir de una distribución de velocidades, y a la inversa.

Si se suman todas las fuerzas de presión que actúan sobre los diferentes elementos de la superficie, se obtiene como resultante, una fuerza total, que se aplicará sobre un punto imaginario, denominado “centro de presiones”.

Como se conoce la dirección del movimiento del fluido, o más bien la del automóvil, es posible descomponer esa fuerza total, que es una magnitud vectorial, en dos componentes de un triedro referencial, uno en la dirección de movimiento del fluido, y otra perpendicular a la primera, estas fuerzas son la “fuerza de arrastre”, que se opone al movimiento del vehículo, y la segunda “fuerza de adherencia o sustentación”, que hace que el vehículo se adhiera o tenga tendencia a elevarse del suelo. Lo anterior, es también válido para las fuerzas de rozamiento.

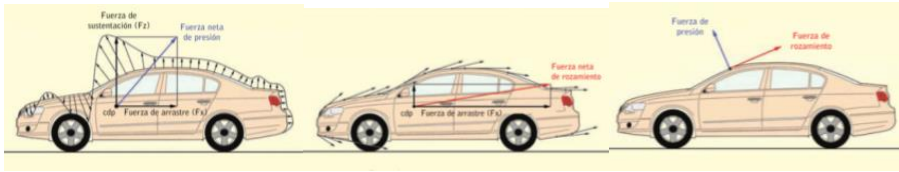


Figura 2-1 Fuerzas Aerodinámicas, centro de presiones, y componentes en cada dirección [14].

Debido a la complejidad de los efectos del aire sobre el vehículo y para hacer posible su estudio, principalmente antes de la aparición de los ordenadores potentes de la actualidad, se hace depender estas relaciones de fuerzas en una única variable (coeficiente) que permita, de una forma simple, conocer los efectos que resulten presentes. El valor de estos coeficientes es determinado de forma experimental en un entorno controlado (por ejemplo, túnel de viento), en el que se puede conocer la velocidad, la densidad del aire, el área de referencia del automóvil (factor de forma y superficie frontal) y el arrastre y la sustentación producida sobre un cuerpo conocido (modelo del sistema). También se pueden determinar de forma teórica, haciendo uso de ordenadores para resolver las ecuaciones de la mecánica de fluidos.

Es importante considerar para que estos coeficientes sean de utilidad práctica, que los automóviles se asumen simétricos entre su lado izquierdo y derecho tanto geométrica, como cinemática y dinámicamente, y que el número de Reynolds, sea constante en la experimentación, pues a velocidades subsónicas el aire se presenta incompresible, y es entonces, mucho más importante su viscosidad que su compresibilidad.

Los coeficientes más importantes en esta área son el “coeficiente de arrastre”, también llamado “coeficiente aerodinámico” y conocido por su notación C_x , y el “coeficiente de sustentación” C_z que se determinan simplemente dividiendo las fuerzas de arrastre para el primero y de sustentación para el segundo, y el producto de la presión dinámica por una superficie de referencia, que será la proyección del área frontal del vehículo.

El coeficiente C_x obtenido será solamente un valor referencial para conocer el grado de eficiencia de un perfil aerodinámico determinado, para comparar la eficacia aerodinámica de distintos automóviles lo más apropiado es comparar el valor conocido como SC_x , que resulta de multiplicar C_x nuevamente por la superficie frontal de referencia, y esperándose obtener los valores más bajos posibles. Así no sólo se considerará el perfil del vehículo, sino también su tamaño, dado que si bien la eficiencia aerodinámica es independiente del tamaño del móvil y tiene una mayor relación con la forma y la suavidad de las superficies y transiciones del vehículo, el rendimiento real si estará en cierta medida condicionado por el tamaño.

Lo anterior significa que el C_x de dos vehículos de muy distinto tamaño podrá ser similar, pues sólo dependerá de la eficiencia aerodinámica de su forma, pero el valor del SC_x estará ligado también al tamaño de dicho móvil. Todo ello nos dará una referencia que permitirá, en concreto, definir las cualidades aerodinámicas que un vehículo posee en relación a otro.

Efecto suelo

Otro aspecto importante en cuanto a la aerodinámica en general y a la de automoción en particular, es el llamado “efecto suelo” o “ground effect” es decir el fenómeno aerodinámico que ocurre cuando un cuerpo, con una diferencia de presiones entre la zona que hay por encima de él y la que hay por debajo, está muy cerca de la superficie terrestre, lo que provoca alteraciones en el flujo de aire.

En el automovilismo se busca, como ya se ha mencionado, al contrario que en aeronáutica, crear una zona de alta presión por encima del vehículo y una de baja presión por debajo. La diferencia de presiones provoca una succión que "atrae" al vehículo hacia el suelo, mejorando el agarre, lo que permite una mayor maniobrabilidad a altas velocidades sin riesgos de despiste. Este efecto es tan trascendente que se utilizó por largo tiempo en la alta competencia. En el coche Brabham BT46B, por ejemplo, se utilizó la extracción del aire de debajo del vehículo mediante un ventilador situado horizontalmente, lo que creaba el efecto sin necesidad de lograr un perfil aerodinámico adecuado plenamente para ello.

Capa límite

El concepto de capa límite reviste particular importancia en aerodinámica, para definir lo que es la capa límite se considerará por ejemplo aire fluyendo alrededor de un vehículo. Cuando las partículas de aire que están más cercanas a la pared del vehículo rozan con esta, se produce un rozamiento directo que hace que pierdan velocidad hasta quedar prácticamente detenidas, esto, en un instante, produce una finísima capa de partículas “quietas” sobre la superficie del móvil. Las partículas que están en la capa inmediatamente superior a las que han rozado de forma directa con la pared sólida, rozan a su vez con las partículas que se consideran estáticas, perdiendo también velocidad, pero en menor medida que las primeras. Esto se sucede capa a capa de fluido, y gradualmente, en la medida que las partículas pertenecen a capas más lejanas a la pared sólida se llega a una capa donde la pérdida de velocidad es nula.

La distancia que existe entre la pared sólida y la capa de partículas más cercana a la pared y que ya no experimenta disminución de su velocidad, constituye la capa límite que tendrá entonces un espesor determinado por éste fenómeno. La Figura 2-2 muestra los dos tipos de capas límite existentes, es decir, laminar o turbulenta, dependiendo del flujo que exista, la viscosidad del fluido, y la calidad superficial de la pared.

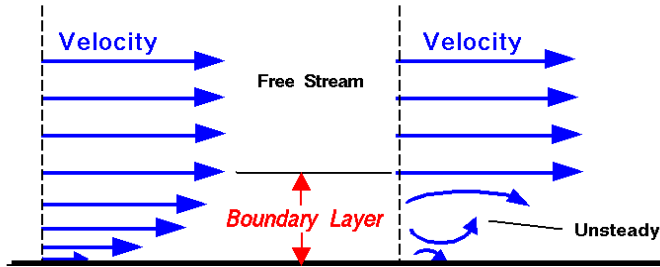


Figura 2-2 Esquema de Capa Límite Laminar y Turbulenta.

El concepto de capa límite resulta importante pues determinará en cierta medida, dependiendo también del tamaño del vehículo en movimiento, el qué tan “pronto” el fluido se separará o desprenderá de la pared del móvil, lo que se desea que se mantenga en la mayor cantidad de superficie posible. En la práctica todos los vehículos capaces de transformar pasajeros son lo suficientemente grandes para generar capas límite turbulentas, sin embargo la forma de sus zonas y los acabados de sus superficies contribuyen a mantener la capa límite laminar en la mayor medida posible.

El espesor de la capa límite dependerá también de la forma y acabado superficial del vehículo, y si bien es posible calcular su espesor mediante ecuaciones relativamente simples, para efectos de resolver una simulación CFD se suele acudir a valores referenciales, por ejemplo de 12 mm para un automóvil promedio considerando la primera capa de 3 mm de espesor.

Túnel de viento

Como se ha mencionado en el apartado anterior, resulta imprescindible para la obtención de las fuerzas que nos permitirán calcular el coeficiente aerodinámico de un vehículo, o bien la experimentación en túnel de viento, con el vehículo real o a escalas no inferiores a 1/3 del vehículo real, o bien el cálculo de dichas fuerzas mediante ordenadores. Como son pocos los desarrolladores de vehículos que pueden disponer de túneles de viento libremente, y menos aún, de túneles que tengan las condiciones

adecuadas para pruebas rigurosas el cálculo por ordenador es un excelente reemplazo y con un costo enormemente menor.

Análisis CFD

Es importante comprender que el análisis aerodinámico de un vehículo mediante un software de elementos finitos es sólo una de las muchísimas posibilidades que tiene el cálculo de la dinámica de los fluidos por éstos métodos (CFD). Es de hecho uno de los más desconocidos e inexplorados, y de los menos utilizados en proporción a por ejemplo, cálculo de fluidos en tuberías o cámaras, transferencia de temperaturas, emisión de partículas y otras aplicaciones del CFD que son utilizadas en industrias más masivas que las automotrices, o que incluso trabajan dentro de éstas desarrollando componentes para vehículos. Este apartado se enfocará en los aspectos del CFD más directamente relacionados al análisis aerodinámico.

El análisis aerodinámico de vehículos mediante CFD, operando de exactamente igual manera que lo descrito para todos los análisis mediante FEM en el apartado anterior, pretende encontrar las magnitudes de fuerzas y momentos que como se mencionó previamente, es la información que habitualmente se obtiene en un túnel de viento y así tener una idea de las fuerzas de resistencia al avance (Drag) y de sustentación (Lift) sobre el vehículo obteniéndose después a partir de ellas los coeficientes aerodinámicos.

También es posible mediante CFD determinar la posición del centro de presiones que ejerce una vital importancia en la definición de la estabilidad direccional del vehículo. Por otro lado el análisis computacional ofrece la ventaja de poder ver muchas variables del problema a las que resulta muy difícil acceder en la realidad, por ejemplo ver líneas de flujo, desprendimiento de vórtices, los campos de presiones alrededor del vehículo [15].

Cuando son utilizadas las simulaciones por ordenador en reemplazo o apoyo del túnel de viento real, lo que se realiza es la construcción de un verdadero “túnel de viento virtual”, pero normalmente sólo de la sección de pruebas, donde se incluyen las paredes del conducto, de tal manera que se pueda definir un área por donde el flujo de aire avance, el fluido mismo, con su densidad, velocidad, viscosidad y Re correspondientes, la geometría 3D del vehículo, y la zona de entrada y salida del fluido como componentes principales del sistema.

Al respecto, una de las grandes limitantes que posee un túnel de viento real, es el tamaño al que debe ser construido. Para comprender esto hay que remitirse a Bernoulli.

“Supongamos que necesitamos realizar 2 ensayos aerodinámicos en días sucesivos; resulta por ejemplo, que la temperatura del aire, no es la misma esos citados días; con ello, los resultados que obtenemos, son diferentes, por cuanto el día de más temperatura, las fuerzas son mayores pues, como vimos, la densidad es mayor; para evitar este tipo de problemas de escala, necesitamos mantener, lo que se denomina, el Número de Reynolds fijo; no sólo depende de la temperatura, sino también depende del tamaño del objeto a ensayar, así como de la velocidad del flujo; el Número de Reynolds se define como, siendo “V” la velocidad, sea “μ” la viscosidad, sea “A” el área o superficie” y sea “ρ” la densidad:

$$R_e = \frac{V \cdot A \cdot \rho}{\mu} \quad (2-1)$$

*Por lo dicho, si queremos hacer un ensayo con una maqueta a escala 1:2, hemos de aumentar la velocidad el doble; si la densidad es la mitad, la velocidad también debemos de aumentarla el doble. Notar que si la escala es muy pequeña, por ejemplo en el caso de coches 1:10, necesitamos, para que los ensayos sean análogos y los resultados extrapolables, que la velocidad sea ¡¡10 veces mayor !!; **ello no es posible, puesto que a partir de 330 km/h más o menos, se hacen patentes otra serie de fenómenos (compresibilidad del fluido), no relacionados directamente con los coches de competición; para evitar este problema, es posible disponer de un túnel de agua, con lo que la densidad es 1000 veces mayor que la del aire, pudiendo realizar ensayos que equivalen a grandes velocidades. Por otro lado, es posible incluso, presurizar el túnel de ensayos, de tal forma, que podemos variar la densidad del aire a nuestro antojo, con el mismo objetivo; el problema de estos túneles es que son extremadamente caros y costosos.***

Por tanto y como resumen, hay que tener en cuenta, que podemos jugar con la velocidad, la densidad y la viscosidad, para mantener el Número de Reynolds constante, que en definitiva, es el objetivo de un túnel de viento” [16].

Esta problemática de las enormes escalas de construcción de los túneles de viento reales, se soluciona mediante el análisis CFD, pues no es necesario desarrollar la experimentación a escala, sino que las dimensiones utilizadas son las reales, inclusive cuando sean de varios metros, dado que no reviste ningún costo adicional trabajar en estas dimensiones.

En el análisis aerodinámico se debe considerar la existencia del flujo de aire alrededor del automóvil, el que como se ha mencionado antes, es considerado incompresible dadas las velocidades subsónicas de los vehículos. Además de ello, se cuenta en la práctica con dos tipos de “régimen o carácter” de flujo, un régimen turbulento y viscoso y uno laminar de viscosidad casi nula, que quedarán definidos por la capacidad del aire de mantenerse en un flujo constante y ordenado que se “abre y cierra” al chocar con el vehículo, recorrerlo y abandonarlo, en el caso del laminar, y por un comportamiento más errático, con creación de vórtices y remolinos, con irregularidades en el recorrido de las partículas de aire alrededor del vehículo, en el caso del turbulento. Aun cuando el flujo en un automóvil urbano, dado que el Re es alto, superior a 1 millón, es siempre turbulento, en una simulación de CFD en muchas ocasiones se opta por un carácter de flujo semi-turbulento y viscoso, en la práctica un flujo laminar y uno turbulento superpuestos, que se asemeja al laminar en gran parte de su contacto con el vehículo, el reto será entonces lograr, mediante el diseño de la forma del automóvil, la transición suave y gradual entre sus zonas y superficies, y su acabado superficial libre de rugosidades, un comportamiento laminar en un fluido que debiese ser turbulento, donde el aire se adhiere a la superficie del automóvil, y lo recorra suavemente, reuniéndose las partículas al llegar a la zona de separación sin remolinos ni sobresaltos en su recorrido.

Briet [16] aporta también la definición de algunos de los tipos de flujo que se consideran al realizar un análisis CFD subsónico.

- *Flujo estacionario: Las condiciones de contorno no varían con el tiempo, por lo que todas las variables térmicas y cinéticas del problema son independientes del tiempo. Suele asumirse que el flujo es estacionario para facilitar el cálculo.*
- *Flujo transitorio: Las condiciones de contorno varían con el tiempo, por lo que todas las variables térmicas y cinéticas del problema se resuelven paso por paso temporal. Esto requiere una enorme potencia y tiempo de cálculo y un conocimiento pleno de las condiciones de contorno del problema.*
- *Flujo cuasi-estacionario: Aunque las variables cambian con el tiempo, se considera el problema como dividido en pequeños intervalos de tiempo, durante los cuales todas las variables térmicas y cinéticas del problema son independientes del tiempo. Por tanto, se resuelve el problema como una sucesión de estacionarios.*

Otra “adaptación” que se suele realizar en la simulación CFD es considerar el flujo estacionario o constante, es decir que no cambia en la medida que avanza por el cuerpo del móvil, ni lo afectan fuerzas externas en su avance, permitiendo eliminar una variable altamente compleja en el

experimento como es la variación del flujo a lo largo del tiempo que tarda en recorrer el vehículo.

La correcta representación de estos flujos en el análisis CFD resulta clave, para ello el modelo "k-epsilon" ($k-\epsilon$) se utiliza en general con bastante éxito en las aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, este modelo de turbulencia no predice con exactitud la separación de puntos tanto como algunas veces se requiere. Para mejorar la predicción de la separación sin incrementar la complejidad del análisis y en general la posibilidad de llegar a una solución, otro modelo de 2 ecuaciones llamado RNG está disponible en la mayoría de las aplicaciones. Debido a que las ecuaciones en éste modelo tienen una base teórica firme, los resultados obtenidos mediante el modelo RNG son en general más exactos. Sin embargo, este modelo es menos estable numéricamente y por tanto sujeto a mayores dificultades de convergencia. Se suele iniciar los análisis con el modelo "k-epsilon" y en caso de dificultades o inexactitudes de cálculo cambiar al modelo RNG [17]. NX cuenta con el modelo Viscosidad Turbulencia Fija que simplifica las ecuaciones y resulta muy adecuado para las primeras simulaciones, previas a la utilización del modelo $k-\epsilon$ [18].

En un análisis CFD, al ser los vehículos simétricos entre su lado izquierdo y derecho suele analizarse solamente la mitad, obteniéndose los mismos resultados, con menos tiempo de mallado y cálculo de la solución.

El aspecto que se destacó anteriormente como clave en los túneles de viento, es decir el "suelo rodante", debiese también ser simulado en un entorno virtual CFD, aun cuando muchas veces se prescinde de ello, es un factor determinante a la hora de obtener resultados aún más exactos y cercanos a los valores reales, sin embargo esto afectará también el tiempo de cálculo y el proceso de configuración del análisis tampoco será el mismo. Por otro lado no todos los pre-procesadores tendrán la capacidad de recrear el efecto de velocidad en el suelo ni los solvers de calcular adecuadamente la solución incorporando dicho factor. La importancia de éste factor es tal que los equipos de alta competencia fabrican o recubren las bandas que usan en los túneles de viento reales con el mismo material donde competirán [19].

Relación entre la forma y la aerodinámica

Uno de los factores que más va a influir sobre el valor del C_x es el denominado "punto de estancamiento" en su altura, y las diferentes inclinaciones de los elementos comprendidos desde este punto hasta la zona más elevada del vehículo.

El punto de estancamiento del vehículo es el punto más adelantado de éste, y recibe su nombre porque en él tiene lugar un estancamiento del aire, siendo su velocidad nula, y la presión que genera el aire sobre el vehículo es máxima [20].

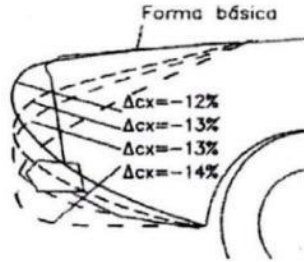


Figura 2-3 Influencia de la altura del punto de estancamiento [21].

En la Figura 2-3 es posible ver que el descenso del punto de estancamiento resulta un factor que contribuye a la disminución del coeficiente Cx de un vehículo, sin embargo pasado un cierto punto, esta mejora desaparece. Esta gráfica, en rigor, es válida solamente para la forma del ejemplo de la imagen, y no aplicable por ejemplo al modelo del vehículo del IDF, sin embargo puede tomarse en cuenta como la descripción de la tendencia que se da en estas situaciones.

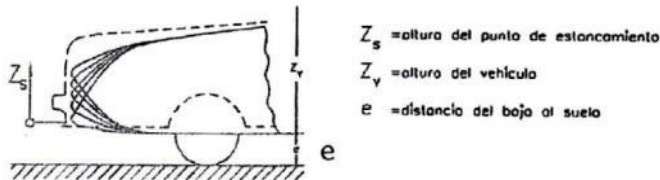


Figura 2-4 Influencia de la altura del punto de estancamiento [22].

Siempre la disminución del punto de estancamiento deberá estar en directa relación con la evolución de la altura del vehículo, obteniéndose reducciones máximas de Cx cuando:

$$\frac{Z_s}{Z_y} \approx 0.5 \tag{2-2}$$

Si bien existe una serie de estudios relativos a los ángulos de inclinación del parabrisas y la luneta trasera, éstos, en el caso del vehículo del IDF son inexistentes, pues la forma propuesta es continua y de transiciones extremadamente graduales y suaves y no resulta procedente su análisis en estos aspectos.



Figura 2-5 Punto de estancamiento en el vehículo del IDF.

Geometría de la zona posterior

El factor que sí incidirá en el coeficiente C_x del vehículo, es la geometría de la zona posterior del vehículo. Una adecuada relación entre la longitud desde el punto donde comienza el declive en el área superior del coche y la longitud total del vehículo, y una pendiente suave garantizan que el flujo se mantendrá con características laminares la mayor parte del recorrido, generando los vórtices cuando ya las partículas se hayan comenzado a alejar del cuerpo del vehículo, como observan Song et al. [22].

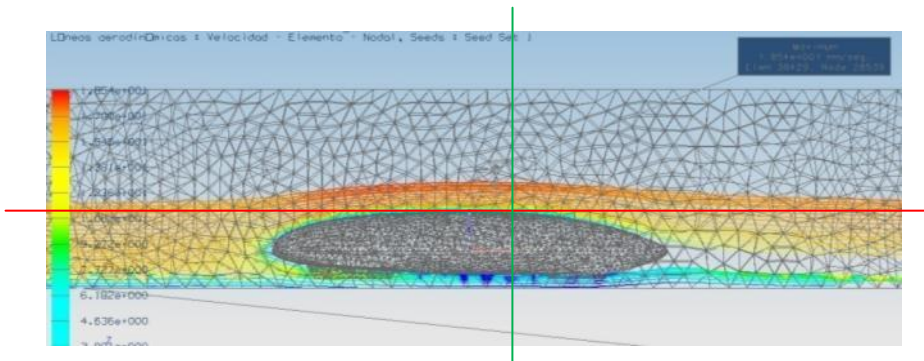


Figura 2-6 Análisis preliminar vehículo IDF.

En la imagen previa es posible visualizar, en el cruce de las líneas superpuestas, el inicio de la zona posterior y como el flujo de aire se adhiere a la superficie hasta el final de ésta, separándose solo al no existir mayor superficie donde adherirse. Es también posible observar que el comportamiento no es igual de eficiente en la zona inferior, donde el flujo se separa del vehículo antes del final del cuerpo de éste.

En la zona mencionada, existe en los primeros modelos una serie de cambios de volúmenes que restan gradualidad a las transiciones de forma, generando entonces una mayor turbulencia en el flujo, esto es válido en cualquier vehículo que no presente en dicha zona una forma adecuada para guiar el flujo de aire.

Geometrías complementarias del vehículo

Los demás componentes de un automóvil tienen una importancia media en la optimización de su coeficiente aerodinámico, en particular en su dirección X, es decir longitudinalmente.

Deberán tomarse en cuenta las ruedas, y los laterales de las ruedas, elementos que deberán quedar ocultos idealmente, integrados en la forma principal. Otra opción será utilizar llantas cerradas, que no desvíen el flujo de aire que pasa por sus costados, sin embargo esto, de no usarse los materiales adecuados, podría significar un aumento de peso en los vehículos, descendiendo entonces su rendimiento respecto al combustible, lo que suele ser mucho más notorio que las variaciones aerodinámicas, llegado cierto nivel mínimo de optimización en éste aspecto.

Las ruedas deberán también presentar una mínima superficie frontal, pues si se observan los coeficientes de vehículos de competencia como los F1, es posible ver que no son bajos, lo que ocurre en gran parte por la enorme superficie que presentan las ruedas que utilizan.

Las zonas laterales deberán ser suaves como toda la superficie del vehículo, sin embargo deberán aumentar en la menor medida posible la superficie de la proyección del área frontal, factor de altísima incidencia en el Cx. Para efectos de la determinación de las fuerzas laterales, el que será llamado Cy, o coeficiente de empuje lateral, el área proyectada a considerar será el área lateral y no la frontal usada para el cálculo del Cx [23].

Las superficies de los vehículos al margen de su continuidad formal ya mencionada, deberán contar con acabados suaves, que permitan un deslizamiento adecuado de las partículas que rozan contra ellas, para de esa manera permitir un avance natural del flujo de aire, minimizando las fuerzas de rozamiento, que es en términos concretos el efecto buscado.

Tendencias actuales.

Las técnicas de CFD han alcanzado una madurez, temprana aún, que ha permitido su salto desde la investigación a la aplicación comercial y práctica. Sin embargo la investigación ha continuado, principalmente en países como Japón, Alemania y USA pero también, en menor escala, en otras latitudes.

Se debe distinguir al momento de revisar la investigación más reciente relacionada con esta tesis, la investigación CFD general, la

investigación orientada a fenómenos de transmisión térmica [24], y otras aplicaciones mucho más masivas del CFD, de la que realmente compete a este trabajo, que es la aplicación del CFD para el desarrollo automotriz, y más específicamente para el desarrollo automotriz experimental.

La búsqueda de información reciente, es decir de los últimos 5 años, en esa línea no arroja resultados amplios, sino bastante acotados en las fuentes bibliográficas comunes como “Web of Science” y otros portales de divulgación científica de uso común. Debe considerarse que la base autoral, el “marco teórico común” de todos los nuevos estudios es la física propuesta desde Bernoulli en adelante, y es ello lo estable al respecto. Muchos de los estudios de CFD que tienen apenas algunos años publicados, y que se enfocan en los aspectos del software utilizado, se han vuelto obsoletos dadas las modificaciones que éstos han sufrido con la evolución tecnológica. Evidentemente, los estudios que se soportan o apuntan a temas que involucran FEM pero se enfocan en la ciencia tras el software siguen manteniéndose vigentes.

Esta aparente falta de investigación tiene una razón bastante clara, sólo la investigación académica es la publicada y no es abundante, mientras que la investigación desarrollada, por ejemplo, escuderías de la F1 es mantenida bajo máximo secreto. La investigación desarrollada por fabricantes de automóviles también es celosamente guardada, inclusive la investigación académica enfocada a competiciones, como la misma Shell Eco Marathon no es de fácil acceso, dejando entonces accesible a cualquiera que desee investigar en el área, solamente los estudios de carácter académico puro.

Debe mencionarse el informe preparado sobre el PAC Car II como uno de los documentos más trascendentes en este aspecto, dando cuenta de todo el proceso de desarrollo de uno de los vehículos más eficientes creados [23].

Al respecto cabe destacar los trabajos de M. Argento et al [25], Xin Chen et al [26, 27], Yingshao Zhang et al [28, 29], D’Anca et al [30] y Valet et al [31] donde se analizan diferentes aspectos para los que el CFD puede ser aplicado como la generación de ruido en el automóvil, y la influencia del CFD en el diseño conceptual y estilístico de los coches, todos estos trabajos han sido realizados de forma reciente, con fines de estudio y desarrollo académico.

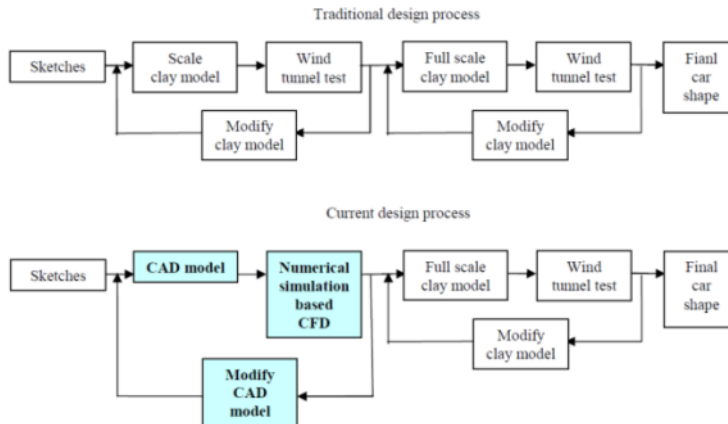


Figura 2-7 Comparativa en el proceso de la forma de un vehículo con y sin la utilización de simulación CFD[17].

Resulta importante además destacar la aplicación de las simulación CFD en áreas afines al automóvil como las motocicletas en el trabajo de Conti et al [32].

2.2 Tipos de vehículos utilizados

En este capítulo mostramos algunos de los vehículos más destacados en las competiciones de alta eficiencia y estudiaremos cual es la mayor diferencia existente entre ellos, a parte de la fuente de energía utilizada.

El equipo del Politécnico de Nantes (Figura 1-3) estableció un nuevo récord en 2011, con una marca de 590 km/kWh con su prototipo impulsado por hidrógeno [33].



Figura 2-8 Vehículo Politécnico de Nantes, Francia.

El prototipo Microjoule (Figura 2-9) del liceo St Joseph La Joliverie de Francia, el cual regenta la mejor marca en prototipos con motor de combustión. Con un motor de gasolina ha conseguido 3771 Km/l.



Figura 2-9 Vehículo Lycée St. Joseph La Joliverie, Nantes, Francia.



Figura 2-10 Vehículo Agilis, Real Instituto de Tecnología KTH, Estocolmo, Suecia.

Real Instituto de Tecnología KTH, Estocolmo, Suecia, (Figura 2-10) la revelación de este equipo es su compacto motor HCCI de combustión interna, con una relación de variables para controlar los modos de operación. Este concepto soluciona el problema de la optimización de la amplia gama de carga común a los motores de combustión interna.



Figura 2-11 Vehículo Idra, Politécnico di Torino, en Turín, Italia.

Ganador de los premios al Diseño y a la Comunicaciones y Marketing de Shell en 2010. Politécnico di Torino, en Turín, Italia [34].



Figura 2-12 Vehículo Artimide, Politécnico de Milán, en Milán, Italia.

El equipo del Politécnico de Milán (Figura 2-12) consiguió en 2011 la primera plaza en vehículos solares con una marca de 1108 km/kWh.

Otro vehículo con el que se tiene una competencia directa es con el prototipo del equipo Baldos de la Universidad de Lulea, Suecia. Han consiguiendo la mejor marca en etanol en el año 2008-2009-2010.



Figura 2-13 Vehículo Baldos, Universidad de Lulea, Suecia.

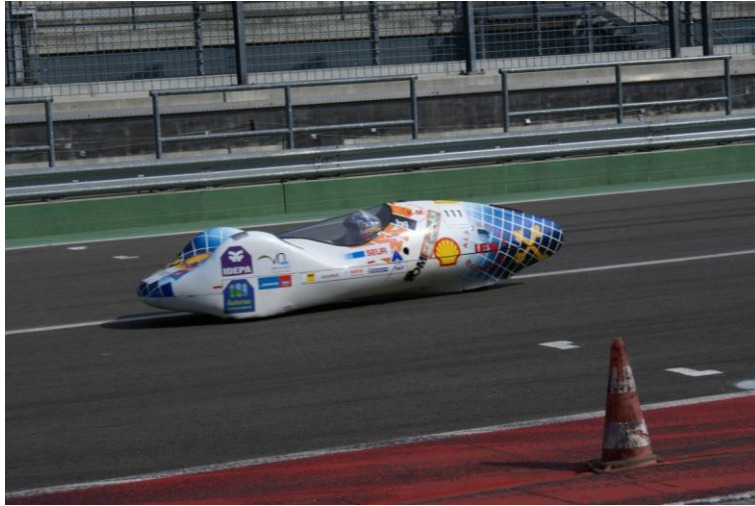


Figura 2-14 Vehículo prototipo, I.E.S. Alto Nalón, Barredos, Asturias.

El Instituto de Educación Secundaria Alto Nalón de Barredos (Asturias) (Figura 2-14) es pionero entre los españoles participantes en las competiciones de bajo consumo con más de 17 años participando en las mismas. Han participado con varios combustibles fundamentalmente Diesel y en sus últimas competiciones lo han hecho con plug-in alcanzando el record español en esta categoría con 221 km/kWh.



Figura 2-15 Vehículo Eco_Vehiculo, Dpto. de Mecánica, Universidad de Coímbra, Portugal.

La Universidad de Coímbra (Figura 2-15) tiene el record ibérico de MCI con 2568 km/l con motor de gasolina efectuado en la Shell Eco-Marathon® 2010.

La Universidad Miguel Hernández de Elche (Figura 2-16) posee el record nacional de MCI con 1450 km/l con motor de gasolina efectuado en 2011.



Figura 2-16 Vehículo Dátil, Universidad Miguel Hernández de Elche.



Figura 2-17 Vehículo TIM-05, INSA Toulouse, Francia.

El prototipo Tim-05 del INSA de Toulouse (Figura 2-17) participante en la edición 2009. Este vehículo en 2010 superó el record mundial de bajo consumo con etanol alcanzando 3350 km/l.

La gran diferencia fundamental en la construcción de estos vehículos es la ubicación de la dirección los vehículos de las figuras:

- Figura 2-8 Vehículo Politécnico de Nantes, Francia.
- Figura 2-9 Vehículo Lycée St. Joseph La Joliverie, Nantes, Francia.
- Figura 2-11 Vehículo Idra, Politécnico di Torino, en Turín, Italia.
- Figura 2-14 Vehículo prototipo, I.E.S. Alto Nalón, Barredos, Asturias.
- Figura 2-15 Vehículo Eco_Vehículo, Dpto. de Mecánica, Universidad de Coímbra, Portugal.

Poseen dirección delantera, los vehículos que aparecen en las figuras siguientes poseen dirección trasera:

- Figura 2-10 Vehículo Agilis, Real Instituto de Tecnología KTH, Estocolmo, Suecia.
- Figura 2-12 Vehículo Artimide, Politécnico de Milán, en Milán, Italia.
- Figura 2-13 Vehículo Baldos, Universidad de Lulea, Suecia.
- Figura 2-16 Vehículo Dátil, Universidad Miguel Hernández de Elche.
- Figura 2-17 Vehículo TIM-05, INSA Toulouse, Francia.

La posición de la dirección permite ubicar las ruedas delanteras con un ángulo de inclinación de tal forma que la sección frontal es inferior en estos vehículos respecto a los de dirección frontal, mejorando su aerodinámica. En contraprestación, este tipo de direcciones traseras son mecánicamente más complejas, menos intuitivas para el piloto y muy delicadas para la conducción, en circuitos con curvas pronunciadas.

2.3 Principios básicos

El objetivo básico es conseguir que el vehículo realice el mínimo consumo en las condiciones que la competición requiera. El organizador indica cual es la velocidad media a desarrollar durante la prueba, así como el número de kilómetros a realizar por manga (alrededor de 25 km). La clasificación final es dominada por aquel vehículo que haya conseguido recorrer la distancia indicada con el mínimo consumo, todos los resultados de los distintos combustibles posibles se transforman a una misma unidad básica de comparación, el litro de gasolina sin plomo 95 octanos.

A partir del año 2010 se decidió dividir la clasificación en dos conjuntos, motores de combustión interna (que integra gasolina, diesel,

etanol, gas licuado y fatty acid methyl ester) y electro-movilidad (que integra todos los vehículos que utilizan energía eléctrica para impulsarse, como pilas de combustible hidrogeno, enchufables o plug-in y solar). De este modo se obtienen dos clasificaciones en unidades distintas para los MCI en km/l y en el caso de la electro-movilidad en km/kWh.

Historia

La Shell Eco-Marathon® nació en 1939 en el laboratorio de investigación de Shell en Illinois en los Estados Unidos de Norteamérica, como una competición entre científicos para comprobar quien era capaz de realizar mayor número de millas con un galón de combustible en sus vehículos.

Las grandes competiciones de vehículos de bajo consumo se iniciaron en 1985 en Europa bajo el sustento de la petrolera Shell. En 2013 se celebrara la edición vigésimo octava edición del evento en Europa, el séptimo evento en EUA y el cuarto evento en Asia.



Figura 2-18 Primero vehículos prototipo en la Shell Eco-Marathon 1985.

Otros eventos en el mundo

Aparte de las competiciones organizadas por Shell® en Europa, América y Asia, se han desarrollado a lo largo de los últimos 30 años competiciones de este tipo en Finlandia, Japón, Francia, Gales y el Reino Unido, y más recientemente desde el año 2009 en España con la aparición de la Murcia Solar Race con 3 eventos organizados (desde 2009) y la Madrid EcoCity que ha iniciado este año 2012 su andadura.

Espíritu de la Competición

Estas competiciones están abiertas a estudiantes de Bachillerato, Formación Profesional, Estudiantes Universitarios de Grado y Master que conjuntamente con sus profesores desarrollan durante un año un proyecto formativo e investigador, que les llevara a participar en la competición. Este

proyecto ofrece al alumno el desarrollo de un producto desde el boceto inicial hasta la fabricación final y la puesta en marcha en la competición.

Ofrece por tanto una experiencia única en el desarrollo de habilidades de todo tipo para los alumnos y profesores, el diseño, la fabricación en materiales novedosos, la financiación y la materialización de las ideas de un grupo de personas que trabajan unidas con un mismo objetivo.

Y todo ello, forma a un grupo de personas que podrán acceder con una experiencia superior a la de sus compañeros de estudios al mercado laboral, aprendiendo a respetar el medio ambiente y la seguridad de las personas en el diseño de nuevos vehículos.

Innovaciones transferidas a la industria

Los vehículos de MCI utilizan en estas competiciones una estrategia de encender y apagar el motor, hasta alcanzar una determinada velocidad, este conocimiento de que el punto de mayor rendimiento y menor contaminación relativa es cuando este se encuentra al ralentí ha sido llevado a la serie por diversas marcas, con nombres como Auto Start-Stop, Stop-Start, etc.

La utilización así mismo del punto óptimo de funcionamiento de los MCI de los vehículos híbridos es otro claro ejemplo de tecnologías utilizadas previamente en estas competiciones que han sido llevados a la serie.

***Capítulo 3: COMPETICIONES DE
BAJO CONSUMO***

3 COMPETICIONES DE BAJO CONSUMO

Este capítulo nos mostrara que es una competición de vehículos de bajo consumo y cuáles son las necesidades de reglamentación básica, y de qué forma afectan estos reglamentos al diseño del vehículo.

3.1 Medidas del consumo

En este apartado describiremos cómo se realizan las mediciones del consumo y que diferencias existen entre los distintos tipos de combustibles. En el apartado 3.1.1 se describe el modo en el que se realizan las medidas para los combustibles tradicionales y se transforma el resultado a km/l equivalentes de gasolina 95, en el apartado 3.1.2 se describe la forma en la que los vehículos de la categoría electro-movilidad evalúan sus resultados en km/kWh.

3.1.1 Medidas del combustibles para MCI

Los combustibles para MCI en estas competiciones son Gasolina, Etanol (como sustituto de la gasolina), Diesel, Gas Licuado y FAME (como sustitutos del diesel). El consumo de los vehículos es estimado por volumen o por peso, dependiendo del nivel de la marca de los competidores.

Los resultados obtenidos con cualquiera de estos combustibles se transforman a través del poder calorífico (PC) de los mismos, siendo el valor de referencia el PC de la gasolina 95. En la Tabla 3-1 podemos ver los PC por masa de los distintos combustibles a temperatura 15° C.

Tabla 3-1 Tabla comparativa de los poderes caloríficos de los distintos combustibles.

Combustible	Poder Calorífico por masa (kJ/kg)
Gasolina 95	42,900
Diesel	42,600
Etanol	26,900
Gas licuado	44,000
Fame	37,700
Hidrógeno	119,930



Figura 3-1 Sistemas de medición por volumen para combustibles líquidos (Shell Eco-Marathon Lausitz 2011).

Estimación por volumen

En estas competiciones se emplean unos depósitos de combustible de vidrio transparente que en su cuello superior poseen una marca que indica la referencia de llenado y enrase del depósito, los comisarios de la competición llenan el mismo hasta dicha marca, previo a la manga y después de la misma, así mismo se toma nota de la temperatura del combustible antes y después de realizar la manga, por las posibles variaciones de volumen sufridas por el combustible.



Figura 3-2 Medición de combustible por volumen después de una manga (IDF Eco-Marathon Lausitz 2011).

Con todos estos datos se transforma el volumen de combustible en masa para posteriormente calcular la energía empleada en el combustible utilizado.

Estimación por peso

La normativa de estas competiciones indica que al superar la marca de 1500 km/l equivalente de gasolina se pesara el combustible en lugar de medir el volumen consumido por el vehículo, dado que es mucho más exacto este método, una variación de 1 ml de consumo supone una importante diferencia de kilómetros en la marca.

De este modo el sistema de alimentación de combustible es retirado del vehículo, ello incluye, depósito, inyector y los tubos de conexión entre ambos. Todo este sistema es desmontado del vehículo antes y después de cada manga para realizar las pertinentes mediciones que en este caso son directas de masa. El fondo de escala de los equipos de medición alcanza el miligramo, la báscula está situada sobre una mesa antivibración y en una habitación con las condiciones de temperatura y humedad controladas.

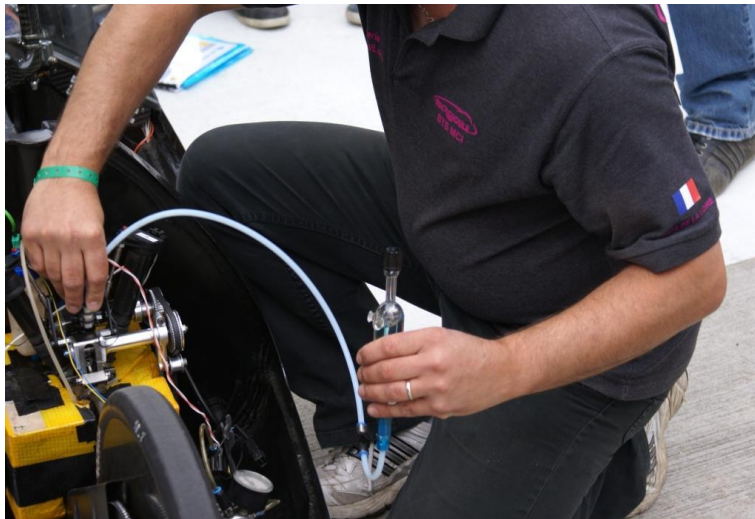


Figura 3-3 Extracción del sistema de combustible para su pesaje después de una manga (Lycee La Joliviere-Nantes Lausitz 2011).

Cálculo del consumo

Ilustraremos este apartado con un ejemplo. Si un vehículo ha consumido 34 ml de etanol en una manga de 25'4 km, cuál ha sido su

consumo en km/l equivalentes de gasolina 95, considerando que la temperatura del combustible es 15° C.

La densidad del etanol es 0'79 kg/l y la de la gasolina 0'74616 kg/l, multiplicando la densidad y el poder calorífico se obtiene la energía que se utiliza por unidad de masa de cada combustible, al realizar el cociente entre esa energía del etanol versus la gasolina y multiplicando por el volumen de etanol consumido, obtenemos el volumen de gasolina necesario para generar esa misma energía.

$$V_{gas\ 95} = \frac{26900 \times 0'79}{42900 \times 0'74616} 34 = 22'57\ ml \quad (3-1)$$

Con este volumen de gasolina equivalente y el kilometraje realizado en la manga obtendremos cual sería el número de kilómetros realizados con un litro de combustible equivalente gasolina 95.

$$D/l\ gas\ 95 = \frac{22'57}{25'4} 1000 = 888'58\ km/l \quad (3-2)$$

La expresión de los resultados en km/l, a diferencia del consumo habitual de cualquier vehículo que se expresa en l/100 km, puede confundir al gran público, dado que puede hacer pensar que se recorren esos 888'58 km para realizar la prueba, tal vez sería posible expresarlos como l/km, pero el resultado siempre sería bastante insignificante, del ejemplo anterior obtendríamos 0'1125 litros cada 100 km.

$$l/100km = \frac{100}{888'58} = 0'1125\ l \quad (3-3)$$

3.1.2 Medida del consumo en Electro-movilidad

En el apartado de electro-movilidad tenemos que diferenciar 2 sub-apartados, los vehículos con pilas de combustible hidrógeno y los vehículos enchufables (plug-in) y solares. Para todos estos vehículos la unidad de medida es el km/kWh

No pueden compararse en una misma clasificación dado que los vehículos con pila de combustible realizan una transformación de combustible en el propio vehículo, al transformar el poder calorífico del

hidrógeno en energía eléctrica, con el rendimiento que las pilas de combustible tienen que es alrededor del 45 %, en cambio los otros vehículos parten con baterías cargadas de electricidad que descargan en el vehículo sin ninguna transformación, los vehículos solares para obtener energía deben consumir menos energía que producen sus paneles solares, de este modo se genera un balance positivo.

Vehículos con pila de combustible hidrógeno

A los vehículos con pila de combustible hidrógeno se les suministra una botella de hidrógeno del tipo 0'4kg de H₂ a 200 bares de presión, en el vehículo se instala un regulador de presión previo a la pila y un fluidómetro que mide la masa de hidrógeno que es consumida.

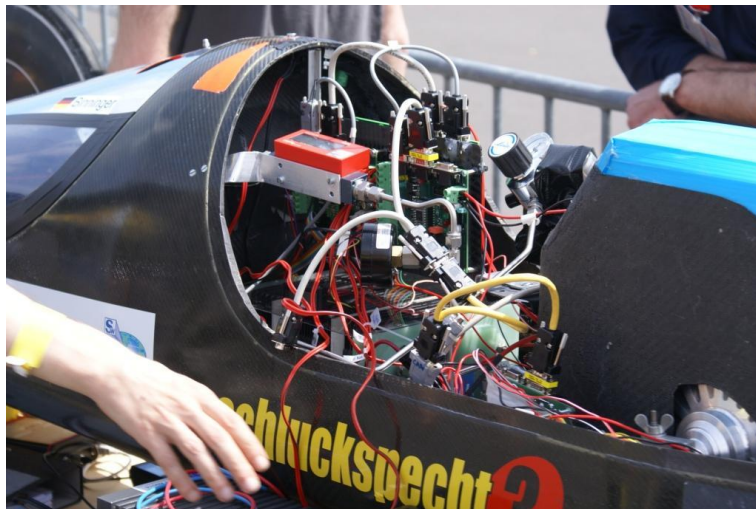


Figura 3-4 Vehículo con pila de combustible hidrógeno fluidómetro en rojo. (Lausitz 2011).

Vehículos eléctricos

En los vehículos eléctricos se coloca un julioímetro entre las baterías del vehículo y el motor, de tal modo que medimos el consumo de energía producido en el transcurso de la manga.



Figura 3-5 Vehículo eléctrico juliómetro en gris en el lateral del vehículo. (I.E.S. Politécnico de Cartagena Lausitz 2011).

Vehículos solares

En los vehículos solares se colocan dos juliómetros, el primero va situado entre las placa solares y las baterías (éste mide la energía que las placas son capaces de suministrar a las baterías), el segundo se sitúa entre las baterías y el motor eléctrico, para conocer el consumo del motor.

Para que el vehículo obtenga resultado debe producirse balance positivo, es decir el motor no puede haber consumido más energía que la suministrada por los paneles. Se permite por supuesto que las baterías sean cargadas antes de las mangas en este apartado.

Cálculo del consumo

En cuanto al cálculo del consumo para vehículos eléctricos y plug-in vatímetro mide el gasto en kWh del vehículo en la manga y se realiza la siguiente operación:

$$\text{Consumo} \frac{\text{Km}}{\text{kWh}} = \frac{25'4}{0'04} = 635 \frac{\text{Km}}{\text{kWh}} \quad (3-4)$$

Se divide la longitud de la manga en kilómetros por el consumo en kWh.

Para los vehículos que son impulsados por pilas de hidrogeno, el fluidometro instalado mide el consumo de hidrogeno.

3.2 Reglamentación y restricciones para el diseño

La reglamentación de la mayoría de carreras parte de la base de la generada para la Shell Eco-Marathon[®], en estos reglamentos podemos distinguir cuatro apartados fundamentales:

- Organización.
- Seguridad de los vehículos y la competición.
- Diseño de los vehículos.
- Tipos de energías utilizadas.

La primera de ellas Organización describe cómo será el acceso a la competición y cuál será la relación entre los miembros del equipo y los organizadores, las reclamaciones, sanciones, etc.

Trataremos la seguridad en el apartado 3.2.1 y las restricciones de diseño en el 3.2.2, por último las fuentes de energía ya han sido analizadas en el apartado 3.1.

3.2.1 Resumen de la reglamentación en seguridad

Como en cualquier actividad deportiva del motor existen riesgos, conocerlos y controlarlos es vital para el desarrollo de la misma.

Seguridad activa

Los vehículos prototipo dispondrán de un sistema de frenos independiente, para el tren delantero y trasero, se realizará una prueba de frenado durante la inspección técnica y antes de cada una de las mangas, en la que el vehículo se ubicará en un plano inclinado de un 20%, el sistema de frenos debe parar el vehículo de forma independiente con cada uno de los ejes.



Figura 3-6 Vehículo en rampa de comprobación de frenos previo a la salida de una manga. (IDF Eco-Marathon Lausitz 2011).

El sistema de combustible debe ir ubicado en un compartimento independiente y hermético del que utilice el piloto.

El compartimento del piloto debe estar bien ventilado.

El piloto tendrá visión directa de frente, no se permite ningún sistema de visión indirecta frontal.

El piloto dispondrá de espejos retrovisores que permitan ver a los vehículos que circulen detrás de su vehículo, con unas dimensiones mínimas de 25 cm².

Se equipará a los prototipos de una bocina que emita un sonido superior a 85 dB medidos en horizontal a 4 metros del vehículo.

Seguridad pasiva

El piloto deberá ir sentado y con los pies por delante.

El piloto irá provisto de un casco de protección homologado para motocicletas o automovilismo.

Los monos de protección del piloto serán como mínimo de algodón, aunque se recomienda el uso de monos ignífugos homologados para automovilismo.

El vehículo irá provisto de un cinturón de seguridad de 5 puntos al menos, se recomienda que sea homologado o utilizado en automoción.

El habitáculo del piloto deberá ser suficientemente reforzado para soportar un impacto lateral.

Existirá una distancia mínima de 10 cm entre los pies del piloto y la interior del habitáculo.

El interior del habitáculo no dispondrá de ningún elemento que pueda herir al piloto.

El piloto utilizará un sistema de manos libres para comunicarse con su equipo durante la prueba sin necesidad de soltar las manos de la dirección.

Las ruedas colocadas en el interior del vehículo no deben ser accesibles para el piloto.

Seguridad en el rescate

Un extintor de un kilo del tipo ABC o BC se colocará en el interior del vehículo de forma que sea accesible para el piloto al abandonar el prototipo.

El vehículo dispondrá de un desconectador del sistema eléctrico que podrá ser accionado indistintamente desde el interior y el exterior del mismo, al ser accionado debe detener el motor y cortar la corriente en todos los sistemas.

Los pilotos deben ser capaces de salir del vehículo en un tiempo máximo de 10 segundos.

3.2.2 Restricciones para el diseño

Para los vehículos prototipo se deben cumplir las siguientes restricciones de medidas y pesos:

- Los prototipos pueden tener 3 o 4 ruedas.
- No se permite la utilización de accesorios aerodinámicos móviles.
- Un arco de seguridad 5 cm por encima de la cabeza del piloto debe ser instalado, que soportara 70 kilos de peso.
- La altura máxima del vehículo será 1 metro.

- El ancho mínimo de las ruedas delanteras será 500 mm (y el máximo 1000 mm).
- La máxima altura del habitáculo será 1'25 veces la anchura del eje delantero, sin superar 1000 mm.
- La anchura máxima del vehículo no debe superar los 1300 mm.
- La longitud máxima del vehículo no será superior a 3500 mm.
- El peso máximo del 140 kg.
- El piloto debe tener visibilidad suficiente para ver la base de siete conos colocado a 5 metros separados 30° cada uno en media circunferencia por delante del vehículo.
- Radio de giro 12 m.

Nuestro vehículo además debe cumplir algunos aspectos más, dado que se utiliza un motor y sistema de transmisión ya existente:

- Longitud máxima desde el eje delantero al frontal del vehículo 600 mm.
- Anchura de 500 mm para colocar el motor, por detrás del piloto.
- Anchura de 300 mm para montar la transmisión.

Pueden encontrarse otras restricciones del diseño en el Reglamento de Shell Eco-Marathon®.

***Capítulo 4: ESTABLECIMIENTO
DE LA METODOLOGÍA***

4 ESTABLECIMIENTO DE LA METODOLOGÍA

Esquema de la metodología genérica que ha sido definida en este trabajo y que podrá ser aplicada al entorno mecatrónico es:

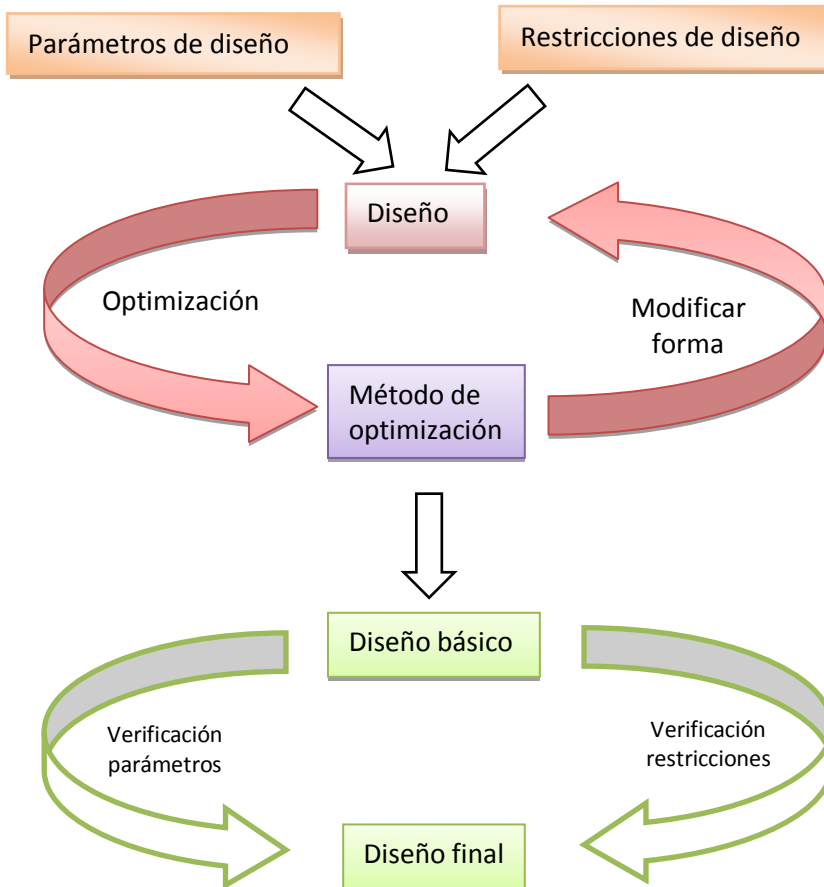


Figura 4-1 Esquema metodológico general.

La metodología estaría dividida en tres fases:

1. Preliminar, que permite recabar la información necesaria para establecer el marco del diseño.
2. Diseño Básico, análisis y optimización.

3. Diseño final y verificación del diseño.

En este apartado describiremos la fase preliminar al desarrollo de la metodología que es la obtención de las restricciones y parámetros de diseño utilizados para el diseño del prototipo.

En el apartado 5 procederemos al desarrollo de los puntos de Diseño básico y Diseño final.

4.1 Restricciones de diseño

Según las restricciones vistas en el apartado 3.2.2 procederemos ahora a establecer un método a seguir para conseguir diseñar un vehículo óptimo. Diseñar un prototipo para una competición de bajo consumo requiere de varias disciplinas, el objetivo final será crear un prototipo que consuma el mínimo de combustible.

En el apartado 2.2 se describen los múltiples diseños de vehículos que se desarrollan para estas competiciones.

La configuración final de la forma del vehículo fundamentalmente viene determinada por la ubicación de la dirección del mismo, si la dirección es delantera deberá ser más ancho, sin embargo al colocar la dirección en el eje trasero, la parte delantera del vehículo puede ver su sección reducida, este aspecto es ampliamente tratado por J.J. Santin at all [23] , aunque de su publicación no podemos determinar una conclusión definitiva del beneficio de la utilización de la dirección trasera.

La fácil ejecución de la dirección delantera de accionamiento directo, sin reenvíos mecánicos o eléctricos, y la seguridad y facilidad de aprendizaje de la conducción nos llevó a utilizar una dirección delantera.

Se determinó también la necesidad de ubicar todos los elementos en el interior del vehículo, las ruedas delanteras irán integradas en el vehículo.

Los factores más importantes a tener en cuenta a partir de estas premisas serán:

- El peso del vehículo.
- La resistencia aerodinámica.
- La fricción de las ruedas y los rodamientos.
- La eficiencia del motor.

4.2 Parámetros para el diseño

Equilibrio de fuerzas

Determinaremos cuales son las fuerzas que actúan sobre el vehículo para proceder a minimizarlas en la fase de diseño.

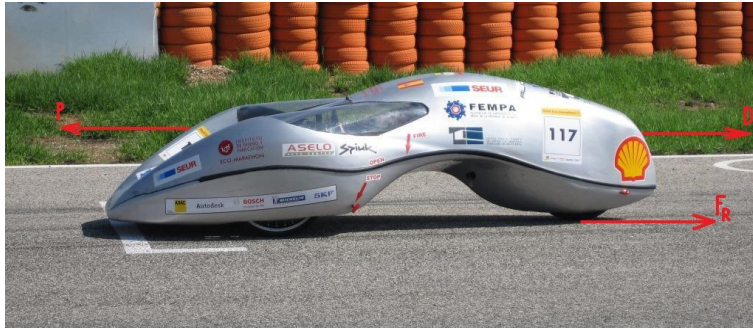


Figura 4-2 Equilibrio de fuerzas con vehículo en movimiento.

Como podemos ver en la Figura 4-2 las fuerzas que aparecen cuando el vehículo está en movimiento se representan en la Ecuación 4-2.

$$m_{coche} \cdot \frac{dV_{coche}(t)}{dt} = \sum_{i=1}^6 F(t) \quad (4-1)$$

$$m_{coche} \cdot \frac{dV_{coche}(t)}{dt} = F_{Aerodinámica} + F_{Rodadura} + F_{Inclinación} + F_{Rodamiento} + F_{Viento} \quad (4-2)$$

Dónde:

$F_{Aerodinámica}$ = Fuerza debida a la carga aerodinámica

$F_{Rodadura}$ = Fuerza de rodadura (N)

$F_{Inclinación}$ = Fuerza por la inclinación de la pista (N)

$F_{Rodamientos}$ = Fuerza para vencer el rozamiento de los rodamientos (N)

F_{Viento} = Fuerza del viento (N)

ρ = Densidad del aire (kg/m^3)

A_f = Área frontal del vehículo (m^2)

C_{xf} = Coeficiente de carga aerodinámica frontal

g = Gravedad (m/s^2)

C_r = Coeficiente de rodadura neumático-pista

α = Angulo de inclinación de la pista (rad)

$A_{Lateral}$ = Área lateral del vehículo según el ángulo de incidencia del viento (m^2)

C_{xl} = Coeficiente carga aerodinámica lateral según el ángulo de incidencia del viento

V_{coche} = Velocidad del coche (m/s)

V_{viento} = Velocidad del viento (m/s)

m_{coche} = Masa del coche (kg)

β = Angulo de incidencia del viento (rad)

μ = Coeficiente de rozamiento de los rodamientos

d = Diámetro del rodamiento

D = Diámetro de la rueda

Fuerza aerodinámica

Como hemos indicado en el apartado anterior la carga aerodinámica del vehículo es uno de los factores de diseño a minimizar para conseguir un menor consumo. Se observamos la ecuación 4-3 que los factores que podemos variar arreglo al diseño son A_f y C_{xf} , dado que la velocidad del vehículo vendrá fijada por la media indicada por la organización de cada evento y la densidad del aire por la altitud del lugar de celebración de la prueba.

$$F_{Aerodinamia} = -\frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A_f \cdot C_{xf} \cdot V_{coche}^2(t) \quad (4-3)$$

Factores determinantes serán por tanto:

- Área frontal.
- Generar una forma en el vehículo que disminuya el C_{xf} .

Fuerza de rodadura

La fuerza de rodadura o la carga por fuerza de rodadura puede determinarse con la ecuación 4-4:

$$F_{Rodadura} = -m_{coche} \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot C_r \quad (4-4)$$

En la tabla siguiente podemos observar distintos valores de C_r para distintos tipos de neumático y vehículo.

Tabla 4-1 Tabla comparativa de los coeficientes de rozamiento de distintos tipos de neumático y vehículo.

Tipo de Neumáticos	Coefficiente de rozamiento C_r
Coche sobre asfalto	0'013
Bicicleta de carretera	0'006
Michelin 44-406 SEM [®]	0'0024
Michelin Radial 45-75R16 SEM [®]	0'00081

Existen por tanto dos factores que deben ser tenidos en cuenta en el diseño:

- El tipo de neumático utilizado.
- El peso del vehículo.

Fuerza por la inclinación de la pista

Debido a la inclinación de la pista la componente correspondiente a la descomposición del peso del vehículo en función del ángulo se expresará como:

$$F_{Inclinacion} = -m_{coche} \cdot g \cdot \operatorname{sen} \alpha \quad (4-5)$$

El único factor que puede verse reducido en el diseño es:

- El peso del vehículo.

Fuerza de debidas a los rodamientos

$$F_{Rodamiento} = -\mu \cdot m_{coche} \cdot g \cdot \frac{d}{D} \quad (4-6)$$

El único factor que puede verse reducido en el diseño es:

- El peso del vehículo.
- El rozamiento de los rodamientos, utilizando aceites y grasas especiales.

Fuerza del viento

$$F_{Viento} = \pm \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot A_L \cdot C_{xl} \cdot V_{viento}^2(t) \quad (4-7)$$

Factores determinantes serán por tanto:

- Área lateral.
- Generar una forma en el vehículo que disminuya el C_{xl} .

***Capítulo 5: DISEÑO DE LA
CARROCERÍA***

5 DISEÑO DE LA CARROCERÍA

Esquema de la metodología específica para el caso del diseño del vehículo desarrollado:

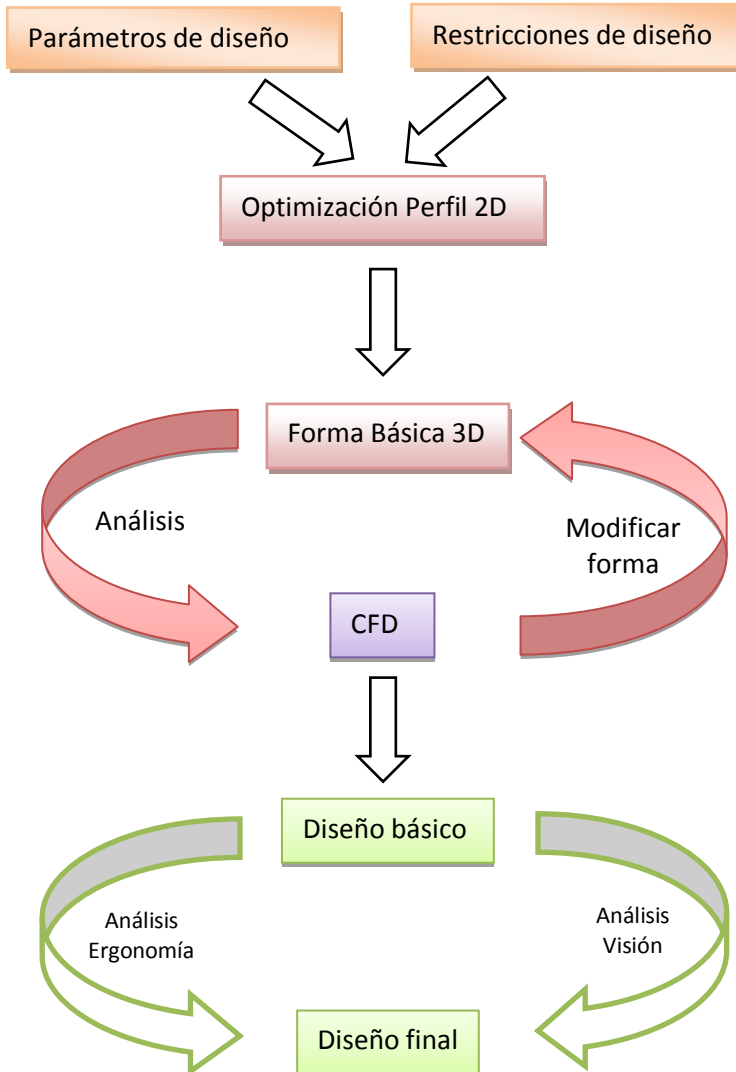


Figura 5-1 Esquema metodológico empleado en el desarrollo de este trabajo.

Sobre el esquema de la metodología descrita se procederá a aplicar la misma, después de la fase preliminar descrita en el apartado 4.

5.1 Minimizar el perfil aerodinámico

El perfil aerodinámico o C_d depende de la forma básica del vehículo. Existen muchas propiedades del fluido que influyen sobre el comportamiento del mismo y por consiguiente harán variar las reacciones del fluido y de los distintos perfiles. Para encontrar una solución para este problema (es decir, conseguir un valor de C_d lo más bajo posible) fijaremos primero las propiedades de la corriente de aire alrededor del vehículo. Una vez conocidas estas propiedades se seleccionara un perfil arreglo a las condiciones marcadas en el apartado 4.

5.1.1 Propiedades del fluido aire sobre un vehículo tipo SEM

Supondremos por simplificación que el prototipo se mueve por el aire en condiciones estándar. Estas condiciones ISA supuestas implican las propiedades definidas en Tabla 5-1 para el aire en movimiento.

Tabla 5-1 Propiedades del aire en condiciones ISA.

Temperatura (T)	20 (°C)
Densidad (ρ)	1,225 (Kg/m ³)
Viscosidad (μ)	1,8*10 ⁻⁵ (Kg/ms)
Presión (p)	1,01325*10 ⁻⁵ (Pa)

Como se explica en el apartado 3.2.2 la velocidad media de un vehículo para la Shell Eco-Marathon[®] está entre 25 y 30 km/h, dependiendo de la carrera. La experiencia nos enseña que un prototipo con un motor de combustión interna optimiza su funcionamiento en la ventana de velocidades entre 18 and 35 km/h.

Es muy importante saber esta velocidad de corriente libre (p ej. La velocidad del aire sin interferencia del vehículo) ya que esto determinará el número de Reynolds del flujo alrededor del vehículo. Este número de Reynolds tiene un impacto muy importante en la naturaleza del flujo, sobre todo en la transición de cuerpo a flujo. Este número puede ser calculado usando la formula (5-1):

$$R_e = \frac{x \cdot \rho_{aire} \cdot V}{\mu} \tag{5-1}$$

Donde:

- X = La distancia entre el borde principal y el punto sobre la superficie sustentadora.
- ρ = densidad del aire en condiciones ISA.
- μ = viscosidad del aire en condiciones ISA.
- V = velocidad del aire.

Si asumimos que la superficie sustentadora para ser una capa límite y que la teoría dicta que la transición entre flujo laminar y turbulento ocurre alrededor de un número de Reynolds 500.000. Usando la formula (5-1) podemos calcular el número local de Reynolds. La Figura 5-2 nos muestra el número local de Reynolds.

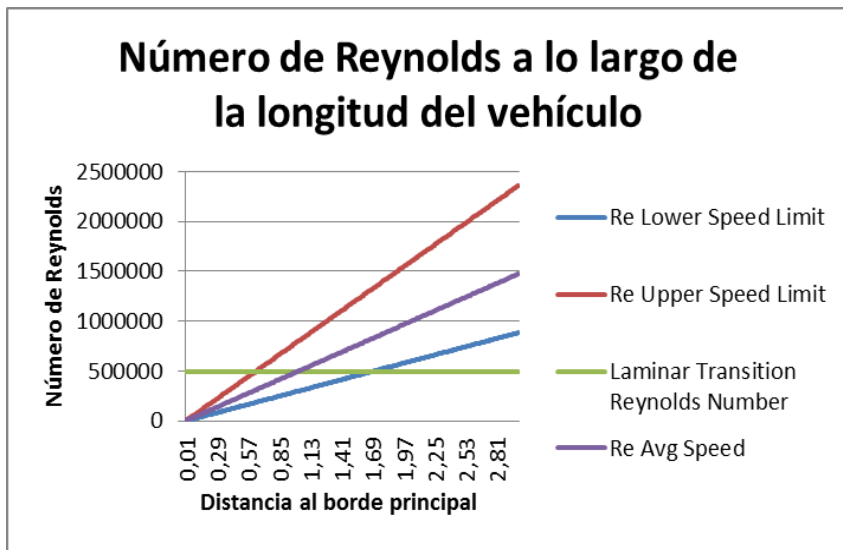


Figura 5-2 Número local de Reynolds.

De este gráfico podemos deducir que la transición entre laminar y turbulento sucede alrededor del centro del vehículo a la V_{min} . Manteniendo la velocidad media esta transición ocurre aproximadamente en el 30 % de la longitud del vehículo.

5.1.2 Flujo laminar vs turbulento

Previo a decidir qué perfil aerodinámico utilizar debemos seleccionar que tipo de flujo afectara a este tipo de vehículos.

Tabla 5-2 Flujo laminar vs turbulento para un vehículo prototipo.

Tipo de Flujo	Positivo/negativo	Razonamiento
Flujo Laminar	+	Sin fricción con la superficie
	-	Fácilmente confundible con turbulento
	-	Mal para el comportamiento por su separación rápida del flujo
	-	Presión contra el avance
Flujo Turbulento	+	Buena comportamiento ante la pérdida del flujo a lo largo del vehículo
	+	Reducir la presión de avance
	-	Presencia de fricción de avance

Según lo expuesto en la Tabla 5-2 deberías mantener el flujo laminar todo lo posible a lo largo de la longitud del vehículo, esto tendrá consecuencias para el diseño, ya que cualquier irregularidad por leve que sea en la superficie del vehículo cambiara el flujo a turbulento. En la parte trasera el vehículo con una extensión del flujo laminar sufrirá un aumento de la carga cuando experimente vientos laterales (causando una división del flujo) debido al mal paso entre flujo laminar y turbulento.

5.1.3 Selección de la familia de perfiles aerodinámicos

Seleccionar un perfil para un prototipo es totalmente distinto a la selección necesaria en un aeroplano. Cuando en aviación la L/D es muy importante, en el caso del prototipo se necesita un perfil simétrico que no producirá elevación con 0° de ángulo de ataque. La Tabla 5-3 puede dar una idea de las principales características de los perfiles NACA.

Tabla 5-3 Principales características de los perfiles NACA.

Family	Advantages	Disadvantages	Applications
4-Digit	<ol style="list-style-type: none"> 1. Good stall characteristics 2. Small center of pressure movement across large speed range 3. Roughness has little effect 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Low maximum lift coefficient 2. Relatively high drag 3. High pitching moment 	<ol style="list-style-type: none"> 1. General aviation 2. Horizontal tails <p>Symmetrical:</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Supersonic jets 4. Helicopter blades 5. Shrouds 6. Missile/rocket fins
5-Digit	<ol style="list-style-type: none"> 1. Higher maximum lift coefficient 2. Low pitching moment 3. Roughness has little effect 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Poor stall behavior 2. Relatively high drag 	<ol style="list-style-type: none"> 1. General aviation 2. Piston-powered bombers, transports 3. Commuters 4. Business jets
16-Series	<ol style="list-style-type: none"> 1. Avoids low pressure peaks 2. Low drag at high speed 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Relatively low lift 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Aircraft propellers 2. Ship propellers
6-Series	<ol style="list-style-type: none"> 1. High maximum lift coefficient 2. Very low drag over a small range of operating conditions 3. Optimized for high speed 	<ol style="list-style-type: none"> 1. High drag outside of the optimum range of operating conditions 2. High pitching moment 3. Poor stall behavior 4. Very susceptible to roughness 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Piston-powered fighters 2. Business jets 3. Jet trainers 4. Supersonic jets
7-Series	<ol style="list-style-type: none"> 1. Very low drag over a small range of operating conditions 2. Low pitching moment 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Reduced maximum lift coefficient 2. High drag outside of the optimum range of operating conditions 3. Poor stall behavior 4. Very susceptible to roughness 	Seldom used
8-Series	Unknown	Unknown	Very seldom used

Para mantener el flujo laminar todo lo posible es necesario obtener un gradiente de presiones negativas. El fluido permanecerá laminar si la presión decrece continuamente con el incremento de la longitud del vehículo. En la práctica esto quiere decir escoger una superficie sustentadora con la máxima anchura tan lejos como sea posible. Esta opción no sólo es favorable desde el punto de vista aerodinámico, el motor debe colocarse en la parte trasera, por tanto pasada la mitad del perfil es necesaria una anchura suficiente.

Por tanto la mejor opción será usar un perfil NACA modificado de la serie de 4 dígitos para iniciar el diseño. Esta familia de perfiles es básicamente la misma que los perfiles estándar de la serie de 4 dígitos pero la posición de la máxima anchura será alterada, así como la curvatura del borde principal de la superficie sustentadora.

Un ejemplo de perfil 4 dígitos modificado:

0012-65

Dónde:

- 1^{er} dígito = curvatura en % de la longitud del perfil.
- 2^o dígito = la posición de máxima curvatura en la décima parte de la longitud.
- 3^o y 4^o dígito = máxima anchura del perfil en % de la longitud.
- 5^o dígito = designación de radio de borde (0: agudo; 3: ¼ radio normal; 6: normal; 9: 3 veces normal).
- 6^o dígito = posición de máxima anchura en la décima parte de la longitud.

Por supuesto la generación de sustentación causaría una carga extra (carga inducida), por lo tanto se usará un perfil simétrico para el diseño del vehículo.

5.1.4 Optimización de los perfiles aerodinámicos en 2D

Antes de empezar con el diseño en 3D del cuerpo del vehículo, procederemos a determinar los perfiles básicos y las formas que serán usadas. En este apartado determinaremos los perfiles para el cuerpo del vehículo, así como para las defensas de las ruedas.

Cuerpo del vehículo

A través del software MATLAB[®] optimizaremos las ecuaciones de los perfiles NACA 4 dígitos AF, variando los parámetros: máxima anchura, localización de los puntos, longitud del perfil y radio de borde principal.

Teniendo siempre en cuenta que los resultados deben satisfacer las condiciones expresadas en los apartados 4 y 4.2, esos parámetros serán variados hasta obtener el perfil más pequeño posible.

Las ecuaciones para generar la parte superior de la serie de perfiles NACA 4-dígitos modificados serán las 5-2 y 5-3.

$$\frac{y_{0-T_{\max}}}{c} = a_0 \cdot \sqrt{\frac{x_1}{c}} + a_1 \cdot \frac{x_1}{c} + a_2 \cdot \left(\frac{x_1}{c}\right)^2 + a_3 \cdot \left(\frac{x_1}{c}\right)^3 \quad (5-2)$$

$$\frac{y_{T_{\max}-c}}{c} = d_0 + d_1 \cdot \left(1 - \frac{x_2}{c}\right) + d_2 \cdot \left(1 - \frac{x_2}{c}\right)^2 + d_3 \cdot \left(1 - \frac{x_2}{c}\right)^3 \quad (5-3)$$

Dónde:

- $a_0; a_1; a_2; a_3; d_0; d_1; d_2; d_3$ = coeficientes que se obtienen cambiando los parámetros AF.
- c = longitud del perfil.
- $y_{0-T_{\max}}$ = coordenadas y desde $x=0$ hasta T_{\max} .

La variación de los parámetros no puede hacerse directamente, los parámetros determinan las condiciones de contorno, usadas para encontrar los coeficientes de las ecuaciones. Las condiciones de contorno dadas en el apartado 3.2.2 se varían a través de los parámetros dentro de las condiciones de contorno originales. Las coordenadas en Y de la parte superior de un perfil son entonces generadas colocando los coeficientes obtenidos en las ecuaciones.

Para primera media parte del perfil sustituimos en la ecuación 5-2 las condiciones 5-4 y 5-5.

$$x = m ; y = T_{\max} \quad (5-4)$$

$$x = m ; \frac{dy}{dx} = 0 \quad (5-5)$$

Dónde:

- m = la localización de la máxima anchura a lo largo de la longitud del perfil.
- T_{\max} = máxima anchura dividida por 2.

Tabla 5-4 Radio de borde principal.

Radio de borde principal		
indice	tipo	a_0
0	agudo	0
3	¼ normal	0,14845
6	normal	0,2969
9	3 veces normal	0,514246

La segunda parte es calculada por la ecuación 5-3 con las condiciones de contorno 5-6, 5-7 y 5-8.

$$x = m ; y = T_{\max} \quad (5-6)$$

$$x = m ; \frac{dy}{dx} = 0 \quad (5-7)$$

$$d_0 = 0.002 \quad (5-8)$$

M	d ₁
0,2	0,2
0,3	0,234
0,4	0,315
0,5	0,465
0,6	0,7

Después de numerosas iteraciones el perfil aerodinámico idóneo es el 0020-65 que aparece en la Figura 5-3.

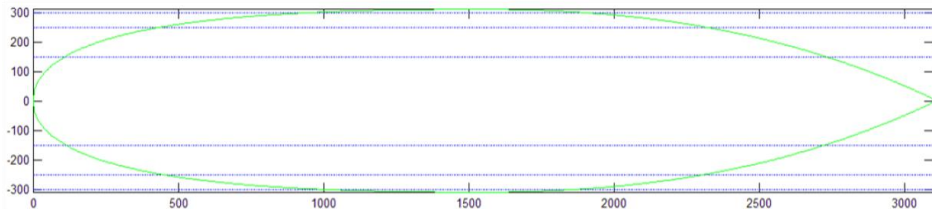


Figura 5-3 Perfil NACA 0020-65 utilizado en el diseño.

Defensas de ruedas

El prototipo tiene 3 ruedas, por tanto se necesitarán diseñar tres defensas. Las dos ruedas delanteras describen los mismo giros guiadas por la dirección del vehículo, así que únicamente son necesarios 2 perfiles. La rueda trasera al no girar necesitara una defensa distinta que se integrara posteriormente en el diseño de la carrocería.

Como los perfiles para la carrocería los perfiles de las defensas de las ruedas deben ser lo más pequeños posibles (cumpliendo con las condiciones

de contorno que se definan), así que el procedimiento es idéntico al seguido en el apartado anterior, por supuesto con unas condiciones de contorno distintas. Para generar una defensa de rueda se necesitan dos perfiles, uno para la parte superior (que coincidirá con la sección media de la rueda) y otro para la parte inferior la más cercana al suelo. En las imágenes de la Figura 5-4 puede observarse la anchura y longitud de las ruedas, así como la sección de corte en la parte inferior.

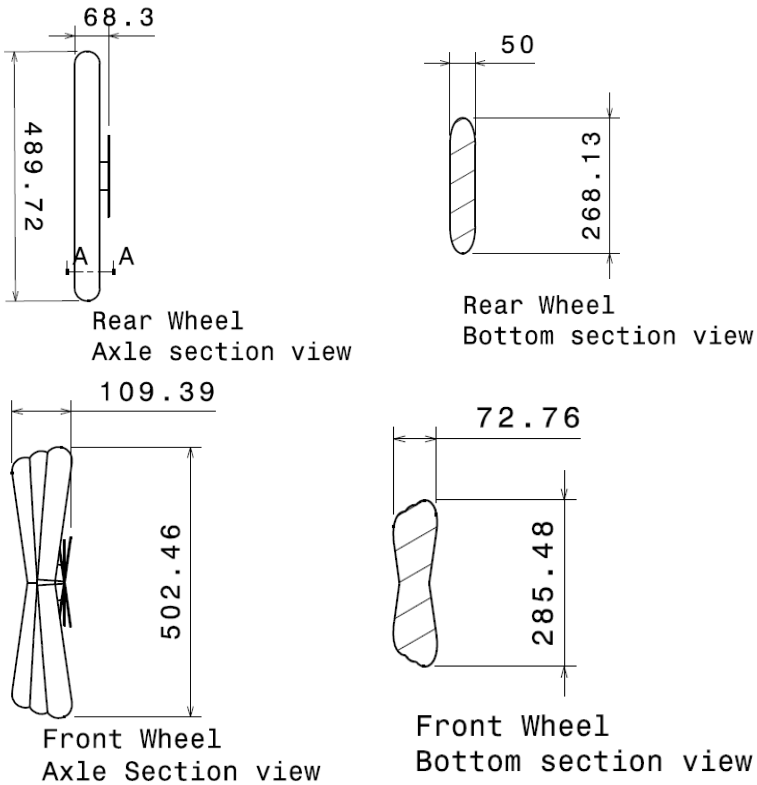


Figura 5-4 Vistas de las ruedas delanteras y traseras.

Estas áreas de la Figura 5-4 se han usado como condiciones de contorno para el diseño de los perfiles superior e inferiores de las defensas.

Para las defensas delanteras se utilizan los perfiles de la Figura 5-5 y Figura 5-6 respectivamente, ambos pertenecen a la serie NACA 4 dígitos modificada 0018-65.

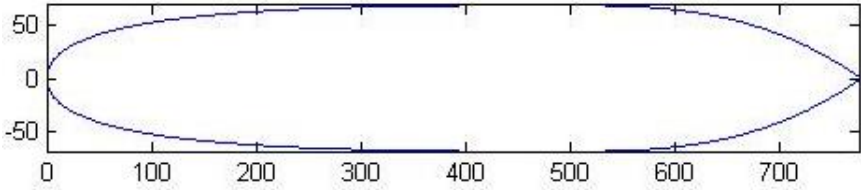


Figura 5-5 Perfil superior defensa delantera.



Figura 5-6 Perfil inferior defensa delantera.

En la Figura 5-7 podemos observar como quedarán los dos perfiles unidos creando la defensa de rueda.

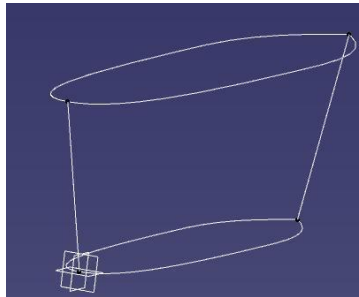


Figura 5-7 Defensa de rueda delantera.

5.2 Diseño 3D

En este apartado tomaremos los resultados del apartado 5.1 donde obtuvimos los perfiles aerodinámicos óptimos y los transformaremos en un modelo en 3D a través del Software Rhinoceros Versión 4.

Partiendo del perfil 2D el cual coincidiría con la longitud del vehículo, el modelado más sencillo para el 3D pasaría por crear un elipsoide de revolución, utilizando como eje la línea que une el principio y el final del perfil.

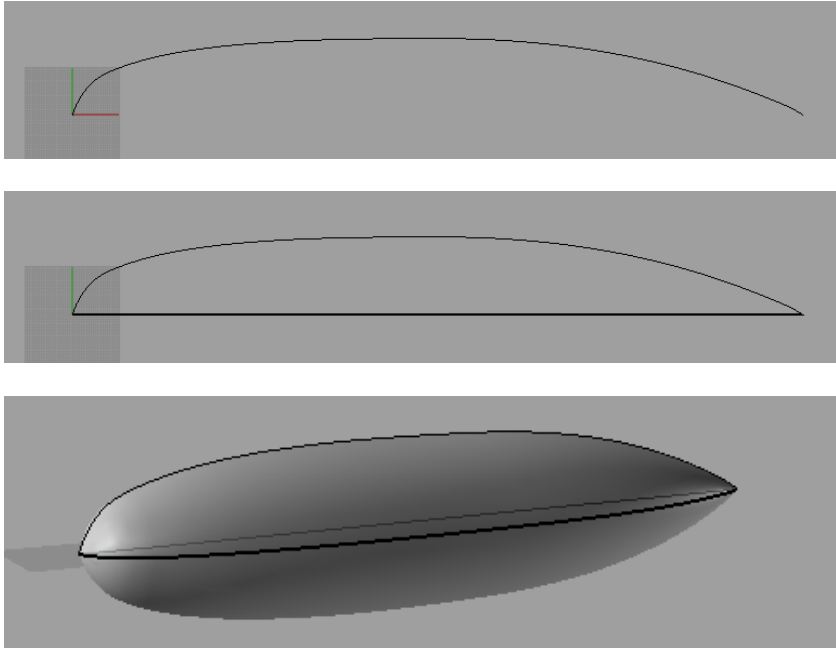


Figura 5-8 Transformación de un perfil en una superficie de revolución.

En este punto hay que analizar con detenimiento las restricciones del modelo y partiendo del perfil en 2D, generar un modelo desvirtuando lo menos posible la geometría de la curva obtenida, la cual resulta óptima.

El primer punto a solucionar es la anchura de las ruedas, las ideas obtenidas para esta resolución son en primer lugar modificar el perfil, creando una anchura máxima aproximadamente a la altura del eje de las ruedas delanteras, pero al realizar la operación de revolución, crearíamos una gran superficie frontal que generaría una pérdida aerodinámica excesiva, del mismo modo la altura total del vehículo sería innecesariamente alta, y elevaría el centro de gravedad del mismo, perdiendo estabilidad en curvas cerradas.

Sin modificar el perfil se obtiene otra solución, inevitablemente se aumenta la superficie frontal, pero en este supuesto esta superficie es menor que modificando el perfil completo. Esta variación consiste en girar el perfil sobre el plano horizontal, colocando el centro de rotación del mismo en lo que sería la cola y separando la parte delantera 90 mm de la horizontal.



Figura 5-9 Abertura delantera para el perfil 0020-65.

De esta manera obtenemos el contorno. Para continuar con el modelado y que nos resulte más sencillo dividiremos el trabajo en dos partes, superior e inferior, llevando más tiempo y dedicación la inferior, ya que son más las restricciones que la condicionan.

Para el modelado de la parte superior utilizaremos el contorno obtenido y el perfil en el plano vertical. Con estas curvas ya estamos en disposición de crear una superficie.

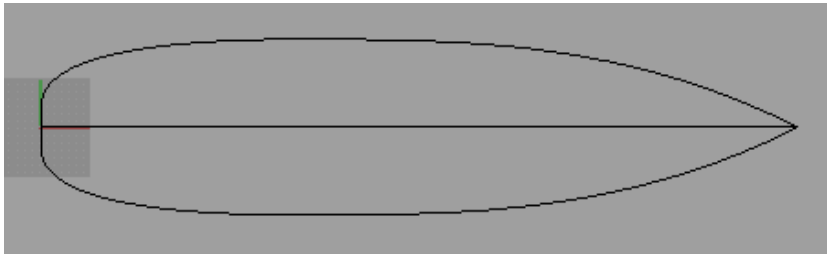
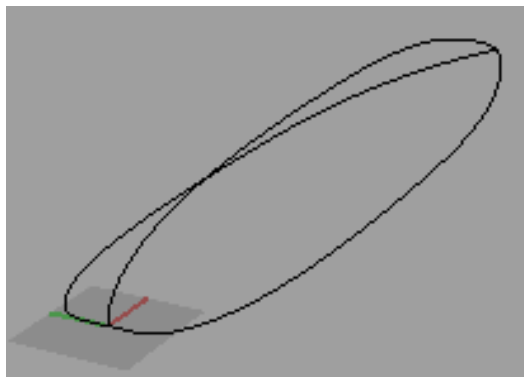


Figura 5-10 Contorno del plano horizontal.



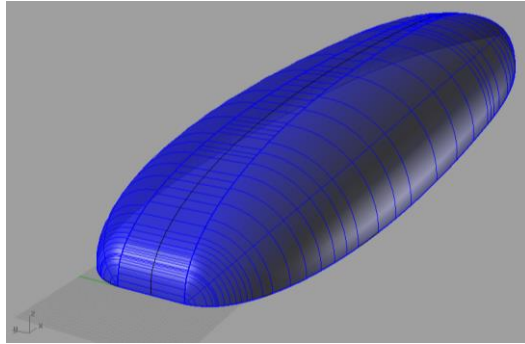


Figura 5-11 Visión alámbrica y conceptual de la superficie conseguida.

La superficie inferior se obtendrá por el mismo procedimiento, utilizando el contorno anteriormente obtenido, pero en vez de usar el perfil que teníamos, obtendremos uno nuevo, el cual coincide en longitud, pero no aporta la misma anchura(altura) máxima, de esta manera, quedará separado del suelo una distancia definida. Esta distancia es calculada para minimizar la fuerza de succión producida por el efecto suelo, apartado 5.4.2. del estudio de CFD.



Figura 5-12 Perfil Inferior.

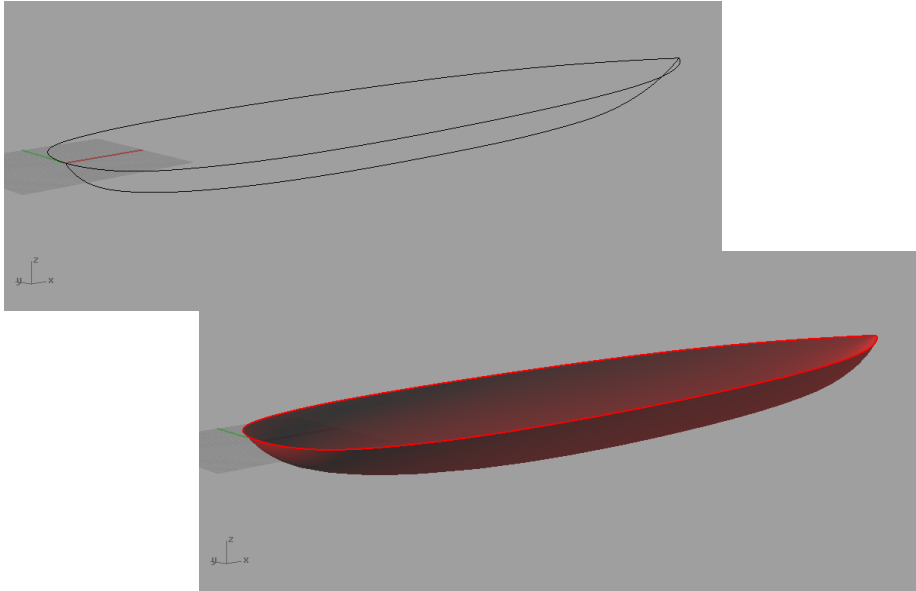


Figura 5-13 Visión alámbrica y conceptual de la superficie conseguida.

Una vez conseguida la superficie inferior, se completa el cuerpo del vehículo, pero aún no está completado el modelado, pues hay que realizar las aberturas para que las ruedas lleguen al suelo. Para no interrumpir el flujo de aire que se crea alrededor del prototipo, se tendrá que crear unas defensas cubre-ruedas que cumplan también con ciertos parámetros aerodinámicos, se han definido en el apartado 0.

Para las ruedas delanteras se ha utilizado otro perfil calculado, el cual, mediante una extrusión, generará una superficie para envolver la rueda. Este elemento llegará hasta escasos milímetros del suelo e irá tapado por su parte inferior, dejando simplemente la abertura mínima para permitir el giro de la rueda sin obstrucción, pero esta abertura se practicará por corte una vez se tenga el modelo, para la fabricación en carbono es conveniente dejar todo el hueco cerrado.

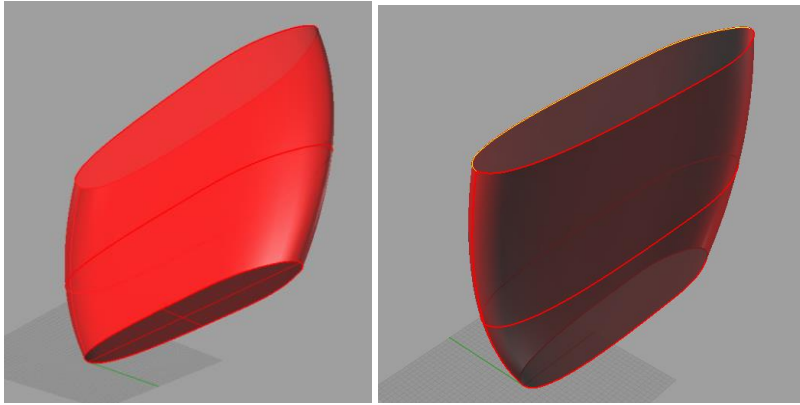


Figura 5-14 Vista de la defensa de rueda delantera.

La unión que forma el cubre-rueda con el monocasco resulta una arista y es incompatible con la fabricación, ya que la manufactura de las telas de carbono se realiza a mano, por patronaje y se requiere de un paso de curva suave, porque así no se producen acumulación de tensiones. Se ha realizado un empalme de superficies de forma variable, ya que no admite el mismo radio de curvatura la unión en todos los puntos de la arista, y tampoco es necesario. De esta manera han quedado mezcladas y unidas las tres superficies (los dos cubre-rueda delanteros y la superficie inferior).

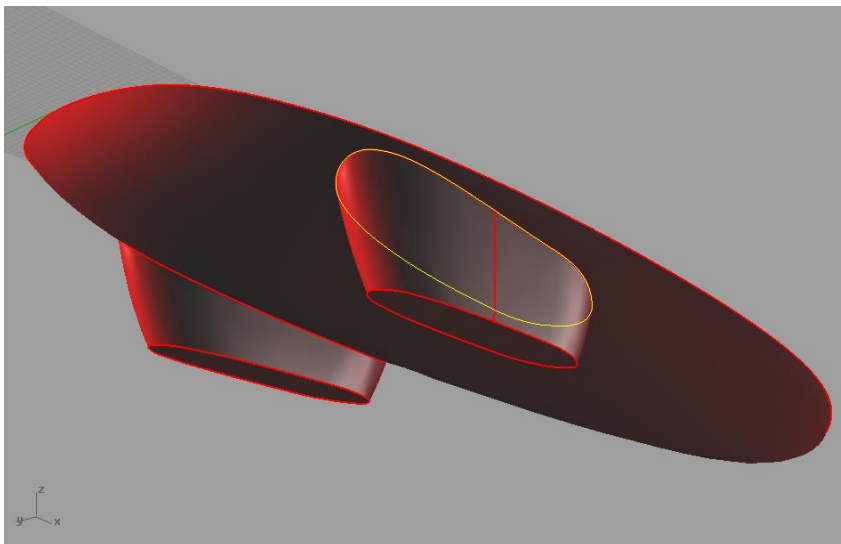


Figura 5-15 Detalle de la arista que forman el cubre rueda y la superficie inferior del monocasco.

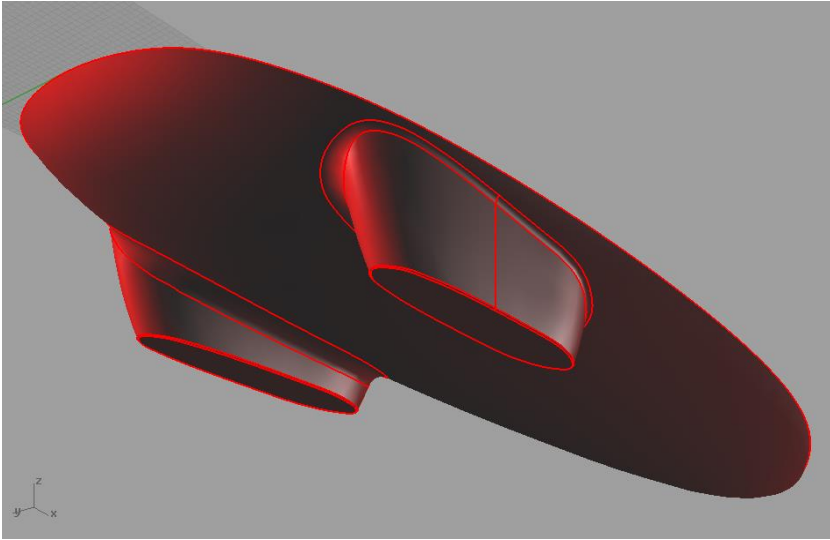


Figura 5-16 Detalle del empalme de superficies de radio variable aplicado.

El siguiente paso es unir las superficies que hemos obtenido, inferior y superior, conformando el monocasco final de una forma aproximada.

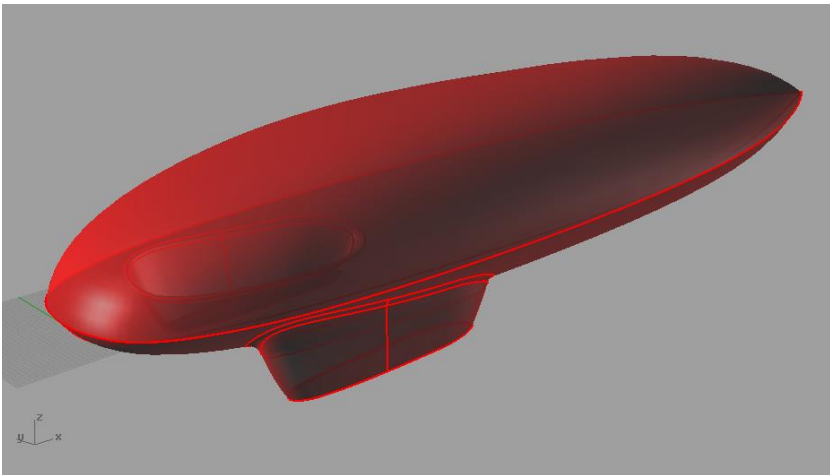


Figura 5-17 Vista general del modelo completo.

Para concluir el modelado quedan dos partes, una es muy influyente para el desarrollo aerodinámico, el cubrerrueda trasero, la otra es meramente estética, y es por la restricción debido a las normas de la competición en la cual se menciona que los vehículos no pueden contener formas con punta en vértice, por tanto hay que modificar el vértice que se forma en la parte posterior del monocasco.



Figura 5-18 Vista lateral del modelo.

Para resolver los problemas que pueda causar el cubrerrueda trasero en la aerodinámica debido al efecto suelo, hay que conseguir que el flujo de aire que sale de la parte inferior trasera del coche vaya paulatinamente en aumento, si no producirá el mismo efecto que un difusor y creará una fuerza de agarre entre el vehículo y el suelo. Como el espacio comprendido entre la superficie inferior del cubrerrueda y la altura media, donde se produce el vértice en la parte posterior, no es demasiada, se pretende unir con una superficie de paso. De esta manera se conseguirá el flujo de aire más constante y paulatino posible.

La curva ha sido creada manualmente, puesto que resulta innecesario calcular un perfil aerodinámico para tan pequeña superficie de actuación sobre el flujo. Lo importante es la fluidez con que el aire sale, y esto tiene que ser revisado posteriormente en cálculo CFD del apartado 5.3, y si fuera necesario volver a modificar el CAD hasta obtener unos valores adecuados.

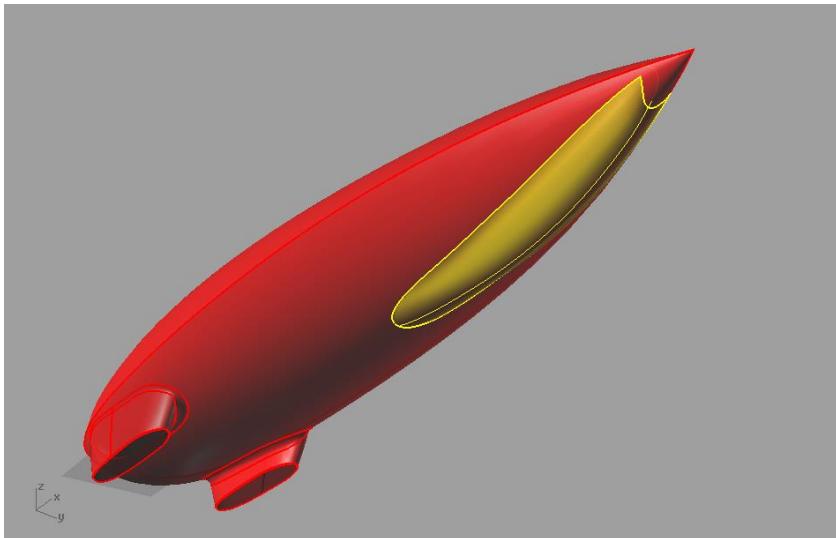


Figura 5-19 Construcción del cubrerrueda trasero.

La superficie generada se compone de la curva creada anteriormente y un perfil en el plano XY que envuelve el ancho de la rueda.

El resto de la curva corta la parte posterior del monocasco, creando una superficie que tape el agujero producido en el corte.

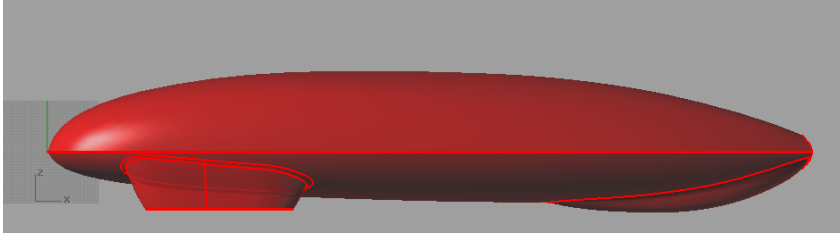


Figura 5-20 Nueva vista lateral.

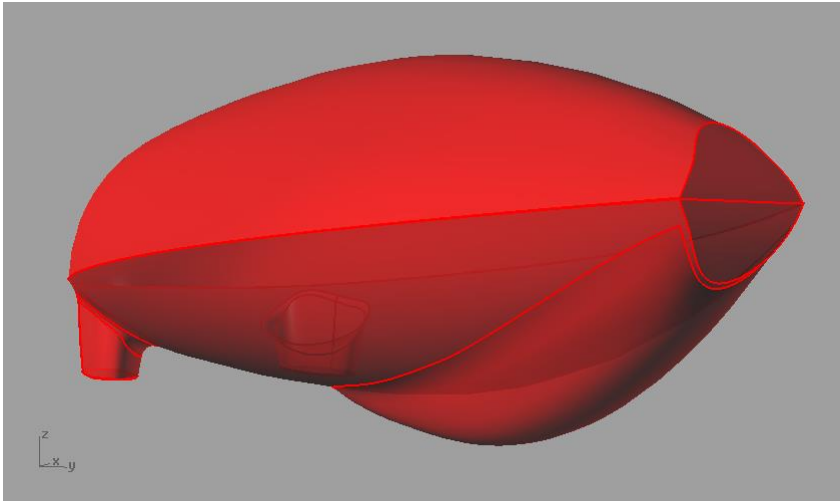


Figura 5-21 Detalle de la parte posterior del monocasco.

Para cumplimentar las formalidades estéticas y conseguir el mejor acabado posible en las telas de carbono, con las cuales que se fabricará el prototipo, se completará el modelado de la parte posterior del prototipo suavizando las aristas visibles mediante una mezcla de superficies, de esta manera se impedirá la creación de imperfecciones.

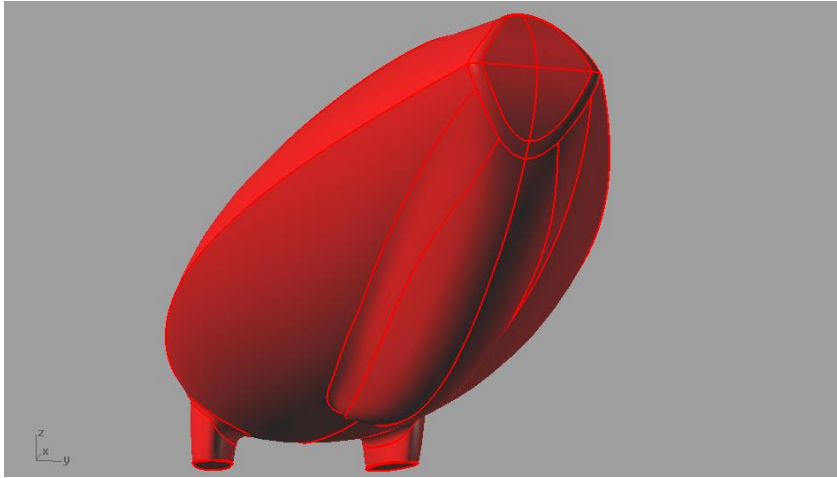


Figura 5-22 Detalle de la parte posterior del monocasco refinado.

5.3 Desarrollo de la simulación CFD

5.3.1 Establecimiento de la metodología a seguir

El siguiente apartado sigue el proceso llevado a cabo en la práctica con las simulaciones realizadas con el vehículo del IDF.

Generación del modelo 3D a estudiar

Se parte de la base que el modelo 3D no está realizado directamente en NX, sino que se exporta desde otra plataforma para importarse posteriormente a NX. El modelo generado deberá tener ciertas características de calidad de modelado mínimas:

- Superficies del modelo perfectamente unidas en el software original, es decir sin lo que se denomina “Naked edges” (límites de lámina libres, bordes desconectados, desnudos o descosidos dependiendo del software en que se trabaje), de tener alguno de los bordes estas condiciones presentará problemas al momento de mallar la superficie en NX, los que no se notarán hasta que se pretenda realizar la simulación CFD. Esto en la práctica significa que el espacio (que se puede denominar “interior”) delimitado por las superficies que conforman el modelo no tenga ninguna comunicación con el espacio “exterior” al modelo, por ello se habla de modelo “cerrado” o “abierto”.

- Es recomendable cerrar los espacios que por diseño de la forma puedan quedar abiertos, como guardabarras, ventanas, etc. para realizar un análisis correcto.
- Es recomendable que las ruedas y elementos complementarios a la forma principal se integren a ésta, vale decir, idealmente debe crearse un volumen tridimensional unitario y cerrado, y no un ensamble de partes, pues para efectos del análisis CFD, solamente la superficie del vehículo entra en juego, no la integración entre sus partes interiores. Para ello pueden eliminarse componentes internos, y recortarse mediante operaciones booleanas aquellos que posean zonas exteriores e interiores como ruedas, escapes, etc.
- La exportación desde el software nativo por no tratarse de NX, deberá idealmente hacerse en formato IGES, que corresponde a un modelo genérico de superficies compatible entre la mayoría de los software de CAD, o en caso de que se tenga la total certeza de que el modelo está cerrado y sin problemas de continuidad de superficies, podrá exportarse como STEP, formato también universal y compatible entre los diversos sistemas CAD, pero optimizado para sólidos, sean estos generados por modelado sólido o de superficies.

Modelado del sistema a estudiar

Como se mencionó previamente, cuando se realiza una simulación CFD, lo que se hace realmente es construir un túnel de viento virtual, por lo que en éste caso también deberá modelarse un entorno de éstas características.

Partiendo del modelo ya optimizado, deberá crearse un paralelepípedo que lo envuelva, y que deje suficiente espacio libre respecto a todos los lados del vehículo a excepción del suelo, el que quedará a nivel respecto al punto más bajo del modelo, que corresponderá a las ruedas.

No existe una dimensión estándar para el tamaño del volumen del “túnel”, pero en la imagen siguiente se puede apreciar la proporción que se considera adecuada para que las paredes no influyan en lo que será el recorrido del aire alrededor del vehículo. Esto último es el criterio a considerar para el modelado del túnel. Es importante que el vehículo quede ubicado exactamente en la mitad del túnel en los ejes X e Y, pues facilitará la posterior ubicación del centro de presiones del sistema.

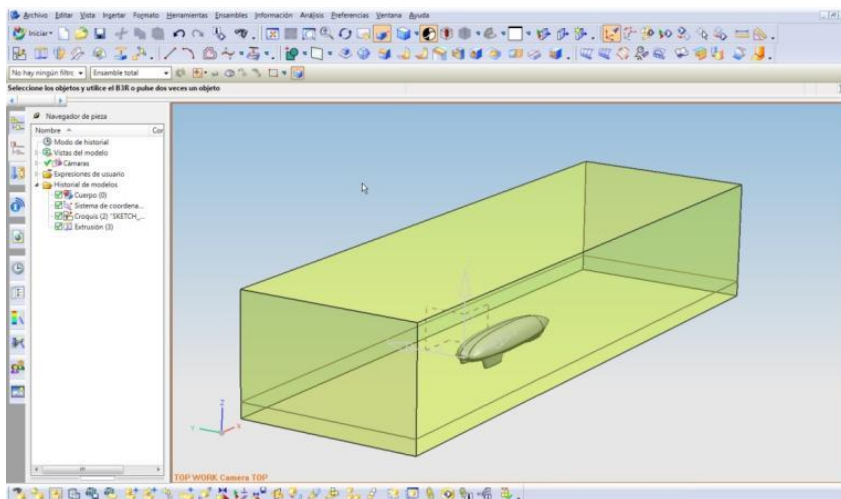


Figura 5-23 Paralelepípedo que representará el túnel de viento alrededor del vehículo. Obsérvese la proporción y distancia de las paredes.

El paralelepípedo será generado en NX por una simple extrusión de un rectángulo, y será sólido, puesto que posteriormente se utilizarán sus paredes para delimitar el flujo de aire.

Determinación de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno a establecer, ya sea utilizando NX u otro software con capacidad CFD, serán siempre similares, en NX como mínimo se deberá definir:

- La malla del vehículo. Para lo cual deberá utilizarse una **malla 2D** y el tipo de elemento **TRI3 Thin Shell** que permite la generación de una malla laminar, que en la práctica no posee espesor alguno, dada la característica del CFD de centrarse en el comportamiento del fluido sobre la superficie del vehículo, este tipo de elementos resultan ideales pues son simples, lo que agiliza el cálculo, y generan la discretización necesaria para el proceso mediante elementos triangulares de tres nodos ubicados justamente en los vértices de cada triángulo.
- Las condiciones de contorno del fluido, esto es sus zonas de entrada y de salida.
- La velocidad del fluido y el modelo de viscosidad-turbulencia ($k-\epsilon$ inicialmente, y una solución de tipo **estacionario**, ya que se desea

evitar que deba ser calculado cada instante del movimiento del flujo y que puedan existir variaciones de las condiciones).

- El dominio del fluido, que corresponderá al paralelepípedo completo, y será la zona donde el fluido estará presente y se desplazará a la velocidad configurada.
- Como parte del dominio fluido, deberá definirse la malla de la superficie del vehículo, que “restará” el vehículo al volumen total del fluido contenido en el paralelepípedo, informando al software que el fluido “choca” en esa zona con un volumen.
- También como parte del dominio del fluido, deberán volver a seleccionarse las zonas de entrada y salida, las que se mallarán definiendo los límites del flujo.
- Además podrá establecerse la temperatura del fluido en caso de ser relevante, variarse el tipo de resultados que se desee obtener además de los que se entregan por defecto, bastará con escoger las velocidades, las presiones y los vórtices, modificar la dirección de la gravedad y otro tipo de factores que pudiesen llegar a influir en la solución dependiendo de cada caso en particular.

Es una buena medida a considerar en esta etapa inspeccionar visualmente la malla generada en la superficie y revisar la relación de tamaño de sus elementos triangulares. Esta relación debe tender a triángulos equiláteros, es decir no debiesen aparecer elementos excesivamente alargados ya que generan imprecisión en el cálculo.

Otra consideración que debe tomarse en cuenta es el tamaño de los elementos de malla, este punto resultará clave para la calidad y precisión de la solución obtenida, una buena opción es seleccionar la forma a mallar y dejar que el software proponga un tamaño de elemento según el volumen a mallar, aplicarlo, y si el resultado no es satisfactorio, ir disminuyendo gradualmente el tamaño de elemento sin perder de vista que el tiempo de cálculo aumenta en relación inversa al tamaño de dichos elementos de malla.

Cálculo de la solución

Primeramente se calcularán las mallas para las zonas de fluido, pues previamente sólo se habrá calculado la malla de elementos finitos del vehículo, esto debiese demorar unos 5 a 15 minutos dependiendo de la capacidad del ordenador. De tardar más es muy probable que finalmente acuse un error y no termine el mallado.

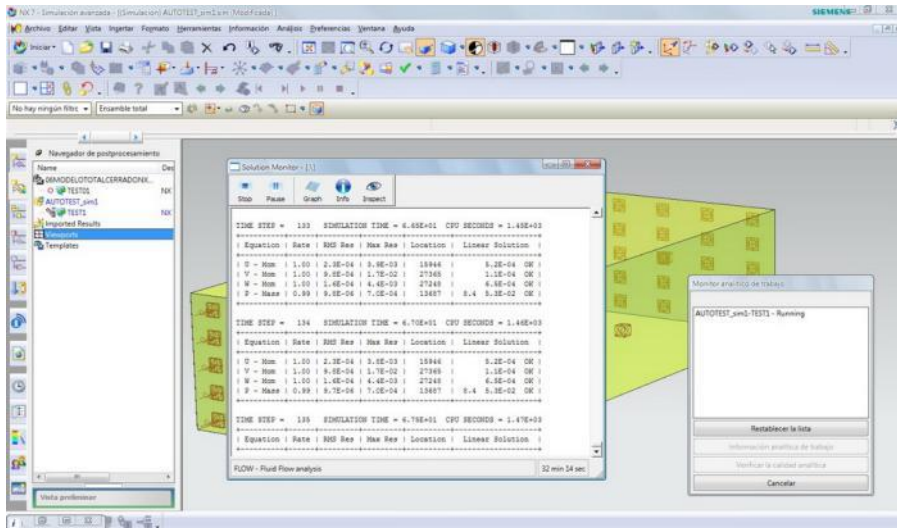


Figura 5-24 Monitor de Solución en pantalla mientras se realiza el cálculo de la solución al problema configurado.

Normalmente ese error estará provocado por el modelo del vehículo y la existencia de zonas cuyos elementos sean demasiado alargados. En este tipo de casos lo mejor será trabajar sobre el modelo original corrigiendo las formas para optimizar el mallado.

La siguiente etapa será la solución, esto puede ser realizado mediante mallado con tipo de tamaño de elemento relativo, que será adaptativo según la necesidad de realizar una malla más densa en zonas donde se requiere mayor precisión de cálculo y más basta en zonas de menos importancia, o bien con un tipo de tamaño de elemento absoluto, en cuyo caso se mallará de forma regular todas las geometrías. Las diferencias y ventajas de cada tipo de mallado se expondrán más adelante.

Lectura y presentación de los resultados

El software NX entregará dos tipos de resultados:

La forma más simple de obtener los mínimos datos que se espera obtener de una simulación CFD es acudir al directorio de trabajo del análisis realizado, es decir donde se encuentran los ficheros del vehículo, las mallas, y la simulación, y buscar el fichero de extensión LOG, que probablemente posea un nombre con el formato **“nombredelfichero delvehículo_sim1-Solution_1.log”**, hacia el final de dicho fichero, que es un simple archivo de texto y puede ser abierto mediante el block de notas del sistema

Windows, se podrá encontrar una sección denominada “Solution Summary”, que contiene entre otros datos que seguirán un formato como el siguiente:

	x-comp	y-comp	z-comp	R

GLOBAL FLOW SURFACE				
CG location (m):	1.371E+00	2.511E-05	2.856E-02	
CP location (m):	1.160E+00	3.419E-03	4.777E-01	
Total Force (N):	5.066E+00	1.347E-01	2.380E+00	5.598E+00
Total Torque (N-m):	-2.590E-04	2.779E+00	-2.112E-02	2.779E+00
Shear Force (N):	1.197E+00	7.226E-04	7.026E-03	1.197E+00
Shear Torque (N-m):	2.725E-05	3.679E-02	-7.092E-04	3.680E-02
Pressure Force (N):	3.868E+00	1.339E-01	2.373E+00	4.540E+00
Pressure Torque (N-m):	-2.863E-04	2.742E+00	-2.041E-02	2.742E+00

En color rojo y se destacan los datos más importantes, que se podrán obtener de éste fichero, en primer término la posición XYZ del centro de presiones del sistema, tiene una leve desviación en el eje Y pues el coche ha sido ubicado de forma visual en medio del túnel. En segundo término, y el dato clave para el cálculo del Cx, la fuerza de las presiones en el eje X, es decir el dato que en la fórmula para su obtención corresponde a Fx.

Estos datos pueden ser revisados directamente en el software NX si se tiene el cuidado de no cerrar el “Solution Monitor” cuando termina el cálculo de la solución, luego es posible cerrarlo y contar con los datos guardados en el fichero mencionado.

En este fichero se podrán encontrar también una serie de datos complementarios que pueden resultar muy útiles, como el valor de Reynolds, el tiempo utilizado en la solución, la calidad de la malla creada, y las condiciones de contorno que se hayan ingresado el momento de configurar el experimento.

Es muy importante controlar las unidades en las que están expresados los valores obtenidos, esto es Newton, Kilogramos-Fuerza para las presiones, y metros o milímetros para las dimensiones, en el caso de las unidades para la fórmula del cálculo del Cx, se deberá utilizar Newtons y Metros.

La segunda forma de revisar los resultados, es utilizando el post-procesador de la plataforma NX, ello se verá con mayor detalle en el apartado siguiente pero cabe señalar que las posibilidades son bastante amplias para comprender como actúan las fuerzas y presiones sobre la superficie del vehículo, pudiendo hacerse una idea al respecto, de modo complementario con los datos numéricos obtenidos previamente a través del fichero de solución.

La mayor utilidad de los modos de presentación de datos del post – procesador estará en la presentación de dichos datos hacia terceros, que necesiten comprender de forma rápida y sencilla lo que está detrás de todo el análisis realizado.

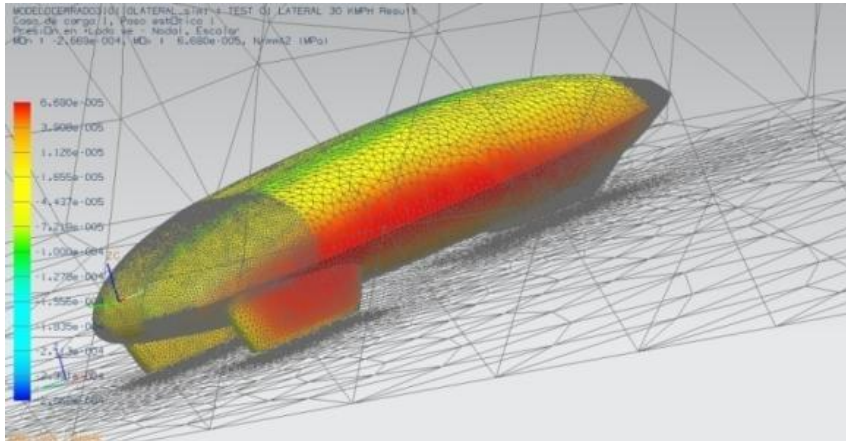


Figura 5-25 Presión en la superficie del vehículo - estudio de viento lateral.

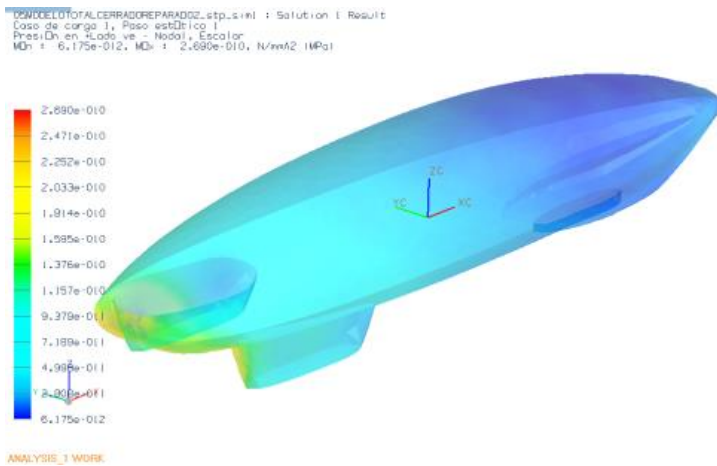


Figura 5-26 Presión en la superficie del vehículo - estudio de avance frontal.

5.3.2 Procedimiento seguido para la realización de los análisis

En este apartado se muestran los diferentes pasos seguidos para llegar a la realización de los análisis CFD. Como se ha detallado la teoría general y la metodología a seguir en el apartado previo, se muestran aquí la

explicación gráfica y la indicación sobre las opciones propias del software que se deben escoger en cada caso. Cuando se considera que la teoría general explicada antes resulta insuficiente para la comprensión de alguna etapa, se ahonda en el detalle y en las razones de tomar las opciones que se escogen.

Generación y optimización del modelo 3D

A partir del modelo recibido, en este caso generado en Rhinoceros v4.0, los primeros pasos efectuados consisten, para cada modificación que se realice, en revisar y reparar si se considerase necesario, la geometría del modelo haciéndolo apto para su exportación e importación a NX.

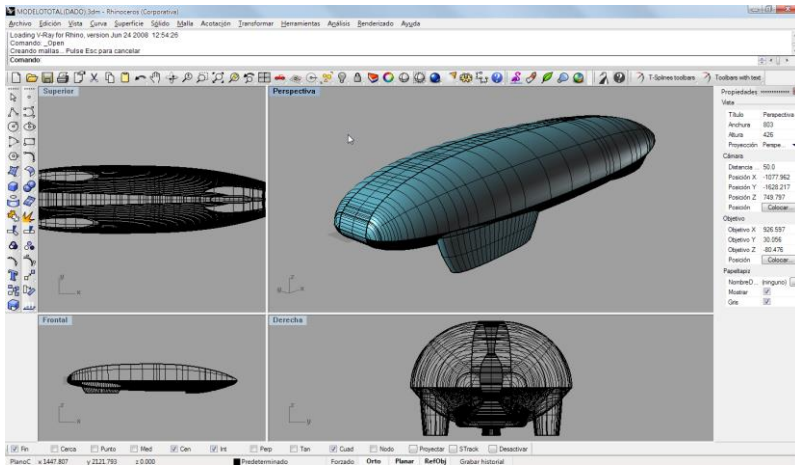


Figura 5-27 Modelo inicial en Rhinoceros 4.0.

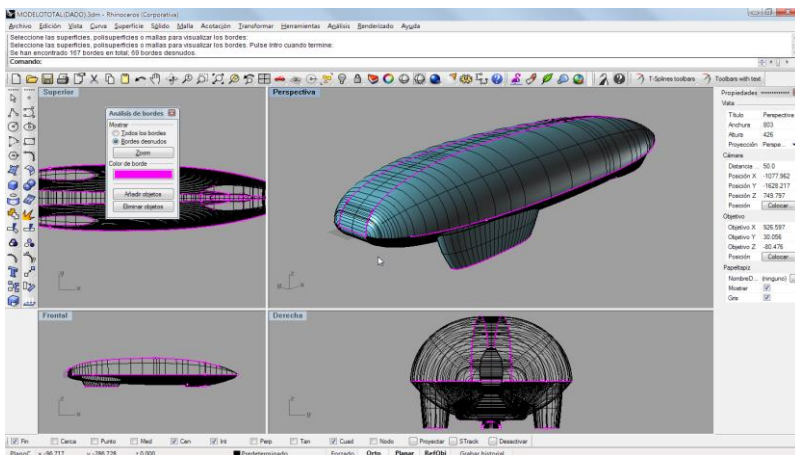


Figura 5-28 Análisis de bordes en Rhinoceros 4.0.

La reparación del modelo debe realizarse en su programa nativo, pues será más fácil obtener un resultado correcto. Para ello se han utilizado las herramientas de análisis que Rhinoceros posee como “análisis de bordes”. Primeramente se revisan los bordes desnudos del modelo, y gráficamente es posible apreciar que son varios los que están presentes.

Utilizando las herramientas de reparación como “unir bordes desnudos” se procede a ir seleccionando pares de bordes adyacentes para unirlos por sobre la tolerancia del software, “obligándolo” a acercarse y “coser” dichos bordes.

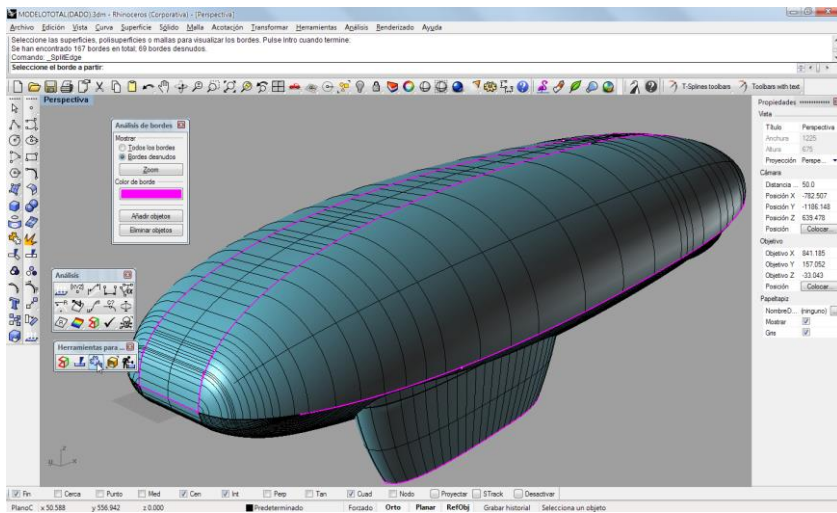


Figura 5-29 Análisis de bordes en Rhinoceros 4.0.

El software avisa de que la tolerancia estándar es transgredida, pero esto se acepta y los bordes son unidos. Este proceso es repetido hasta que se ha logrado unir todos los bordes y el análisis no produce ninguno.

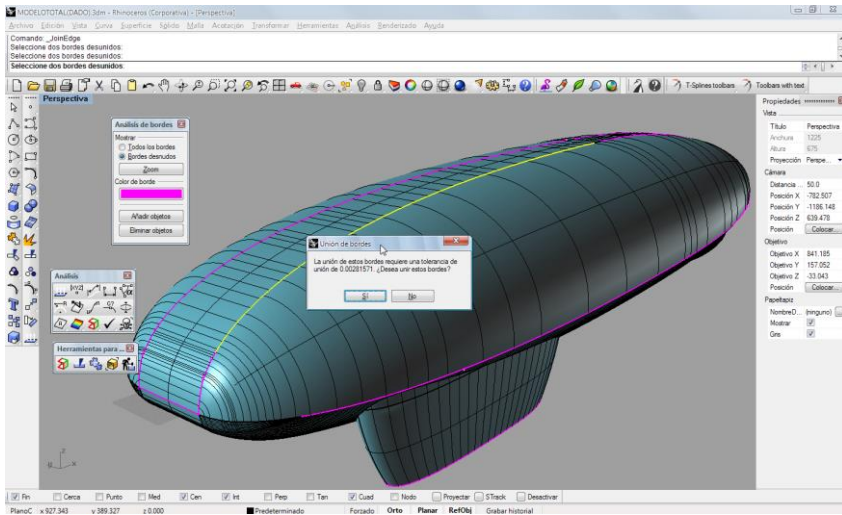


Figura 5-30 Unión de bordes desnudos en Rhinoceros 4.0.

Una vez realizada la unión como muestran la Figura 5-29 y Figura 5-30, el borde destacado en color magenta desaparece como borde desnudo.

Finalmente se vuelve a realizar un análisis de toda la forma y el software anuncia que no existen bordes desnudos que es lo que se deseaba lograr.

Con el modelo “cerrado” procedemos a tomar nota de las dimensiones principales que posee, dimensiones que posteriormente serán de utilidad para la generación del sistema modelo + túnel, y para comprobar que los procesos de exportación e importación no modifiquen las unidades de medida y en lugar de contar con un coche de 3 metros mida 3 centímetros o 3 kilómetros. Con ésto realizado el modelo se encontrará listo para ser exportado a NX.

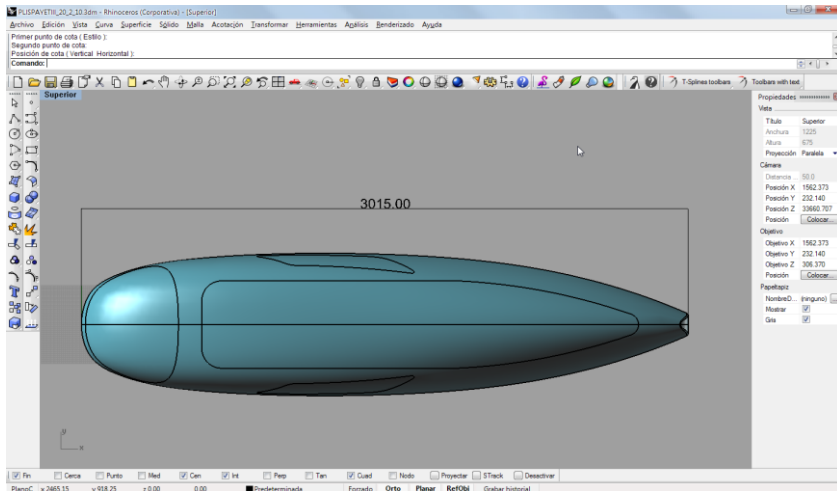


Figura 5-31 Análisis de las dimensiones del modelo.

Exportación e importación del modelo

Desde Rhinoceros, se podrá realizar la exportación del modelo de varias maneras, por ejemplo simplemente utilizando el comando “guardar como” y escogiendo el formato adecuado, o bien, utilizando los comandos de exportación como “exportar selección”, que realizará la exportación de la forma seleccionada y nada más, lo que puede ser útil si el modelo posee líneas auxiliares, o componentes que no se desea llevar a otro software.

En la amplia lista de formatos que el software puede importar y exportar, debe buscarse el formato STEP y el formato IGES, que serán los escogidos para la exportación.

En caso de escoger el formato STEP, que como se ha mencionado debe ser elegido solamente si se posee la plena certeza de que no hay errores de ningún tipo en el modelo, se optará por la alternativa “DiseñocontrolconfigAP203”.

En caso de escoger el formato IGES, se optará por “Unigraphics Surfaces”, estas elecciones tienen como principal razón mantener las tolerancias dentro de los límites de NX, y ofrecer al software receptor un lenguaje que pueda leer correctamente.

El siguiente paso será desde el software NX, utilizar el comando “Abrir” para acceder a los ficheros creados, ya sea el STEP o el IGES.

Preparación final del modelo

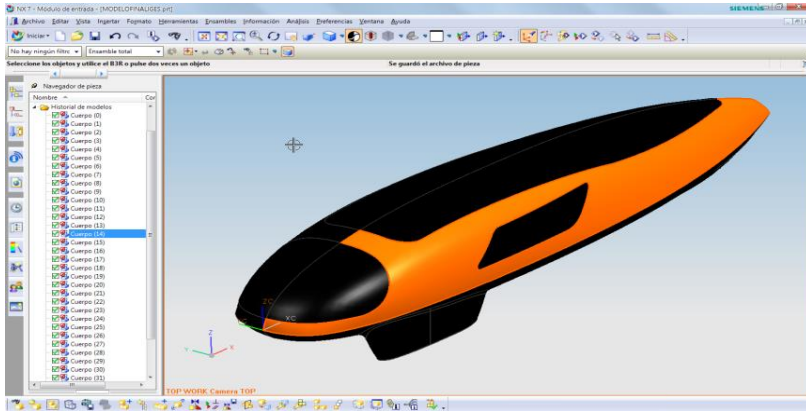


Figura 5-32 Modelo en NX.

En caso de que el modelo sea importado (abierto) en formato STEP, no habrá que hacer nada más, por lo que si se tiene un buen manejo del software donde se ha modelado inicialmente el vehículo, es recomendable utilizar ésta alternativa. En caso de abrir un archivo IGES se procederá a iniciar el módulo de modelado en NX. La Figura 5-33 muestra como el software considera que cada superficie, aun cuando se han unido adecuadamente en Rhinoceros, es una entidad separada, por lo que deben volver a unirse.

El proceso siguiente será utilizar la herramienta “coser” de NX.

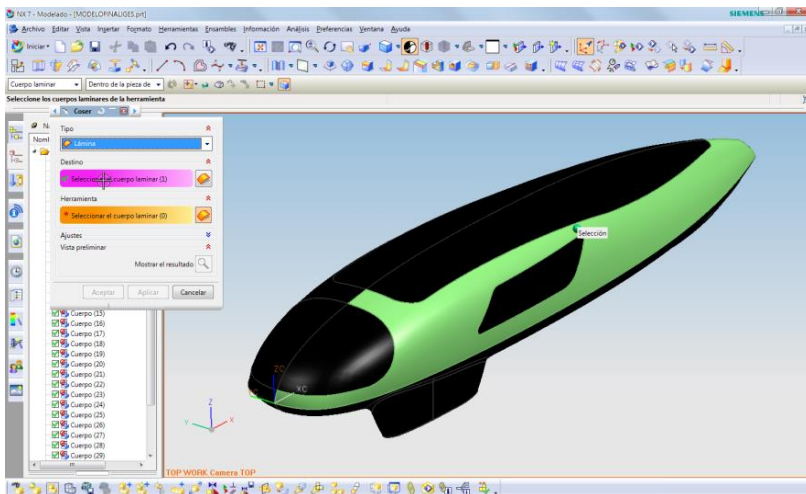


Figura 5-33 Selección de superficies a coser en NX.

La herramienta coser requiere la selección de alguna de las superficies desconectadas como “destino” entre las opciones del comando, y luego seleccionar todas las demás.

Esto al aplicar la herramienta generará una unión entre todas las superficies generando nuevamente un modelo totalmente cerrado. Lo anterior es posible de apreciar al seleccionar cualquiera de las superficies las que ahora se seleccionarán como un conjunto. El color con que se muestran las entidades también variará mostrando que el software las reconoce de modo diferente.

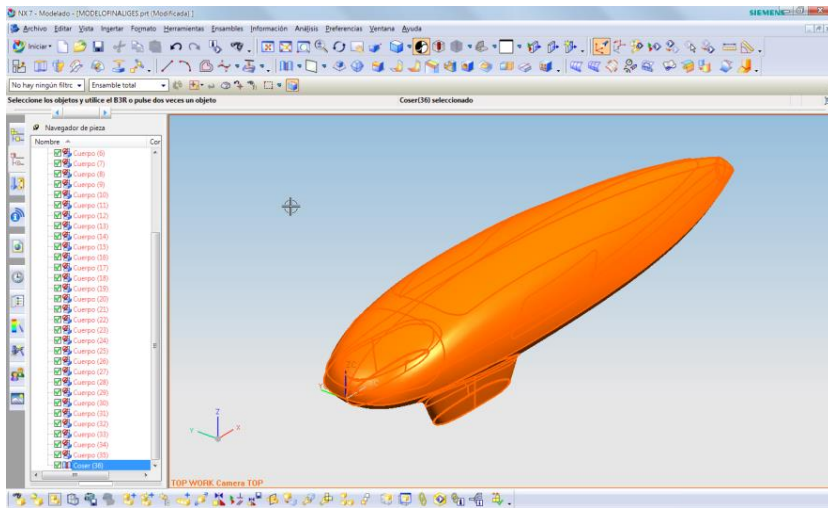


Figura 5-34 Modelo con todas las superficies cosidas en NX.

Generación de las geometrías complementarias

Una vez que las superficies se han unido en el paso previo, y sin salir aun del módulo de modelado del software, se creará el paralelepípedo que servirá como límite y volumen del fluido, es decir el túnel de viento.

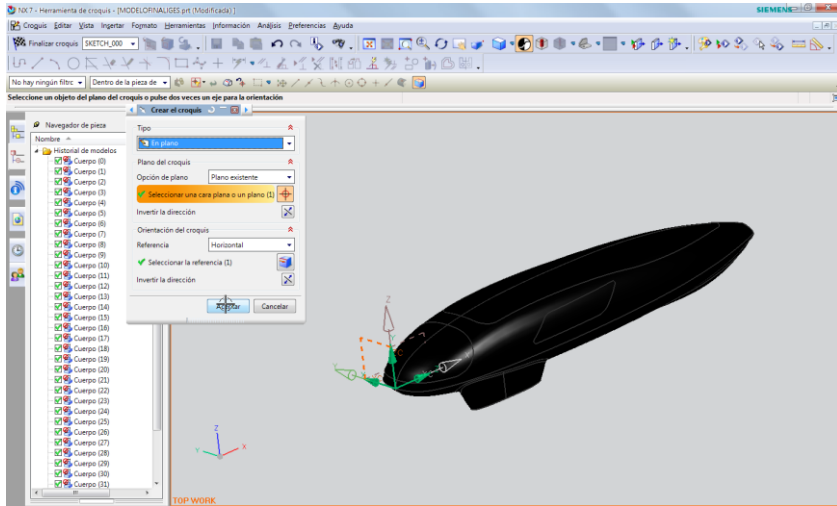


Figura 5-35 Creación del paralelepípedo para el túnel de viento.

Para ello se creará un croquis en el plano ZY, que definirá la forma del rectángulo que será extruido. Se realizará el rectángulo sin medidas determinadas ya que se utilizarán cotas paramétricas para su adecuado control de dimensiones.

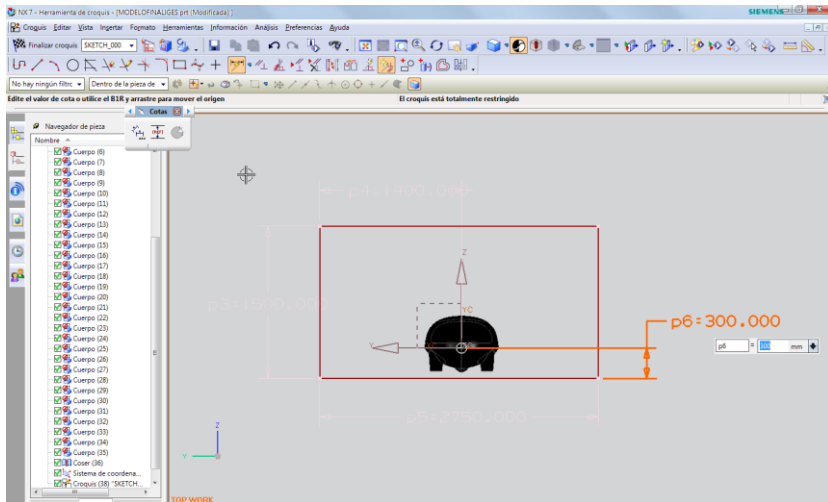


Figura 5-36 Creación del paralelepípedo para el túnel de viento.

Las cotas deberán permitir ubicar al vehículo exactamente al centro del rectángulo en la horizontal, y en contacto con suelo respecto a la altura, además debe considerarse medidas que logren que el flujo no se vea

perturbado por la cercanía de las paredes. En este caso se ha generado un rectángulo de 3.500 mm de ancho por 2.000 mm de alto.

La extrusión del rectángulo se hará considerando la medida del vehículo al largo, que se tomó previamente en Rhinoceros. Luego se realizará la extrusión en ambos sentidos, restando la medida del coche para que éste quede en el centro. Ello facilitará posteriormente la ubicación del centro de presiones del vehículo entre otros factores.

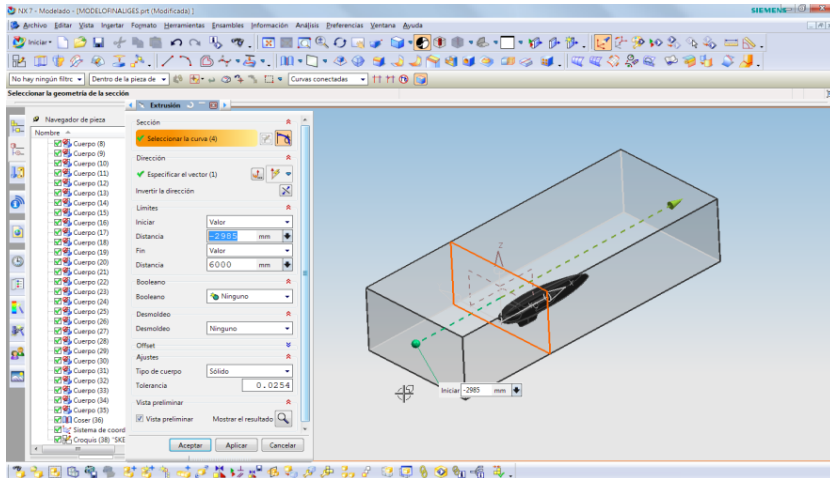


Figura 5-37 Creación del paralelepípedo para el túnel de viento.

Configuración de la simulación CFD

El proceso clave en el desarrollo de la simulación CFD, será la determinación de las condiciones de contorno para el problema que se busca solucionar. Estas condiciones son bastante fijas si lo que se busca es mecanizar el análisis, pero tienen muchas posibilidades de variación si se desea optimizarlo y darle mayor velocidad, precisión o correspondencia con el comportamiento real de los fluidos.

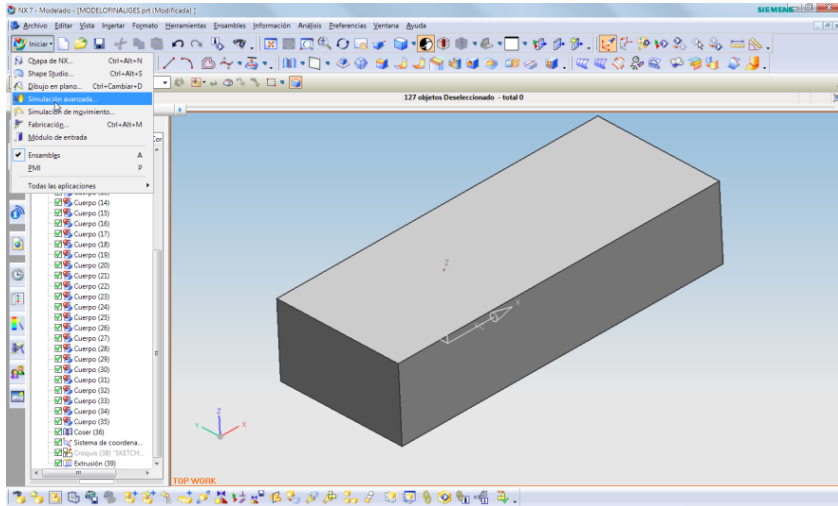


Figura 5-38 Activación del módulo de elementos finitos de NX.

El primer paso a realizar para configurar la simulación es activar el módulo de simulación avanzada como se muestra en la imagen anterior. Una vez en el módulo, se hará clic derecho sobre el modelo y se escogerá la opción “FEM nuevo y Simulación” para iniciar una nueva simulación basada en el modelo abierto.

Se abrirá el cuadro de diálogo para configurar el nuevo FEM y simulación, donde se deberá escoger “FLUJO/TÉRMICO DE LA APLICACIÓN NX” como solver de entre los que mostrará NX.

Se escogerá “flujo” entre las opciones que presenta NX, pues en este tipo de simulación CFD no tiene mayor relevancia la temperatura ni su transferencia.

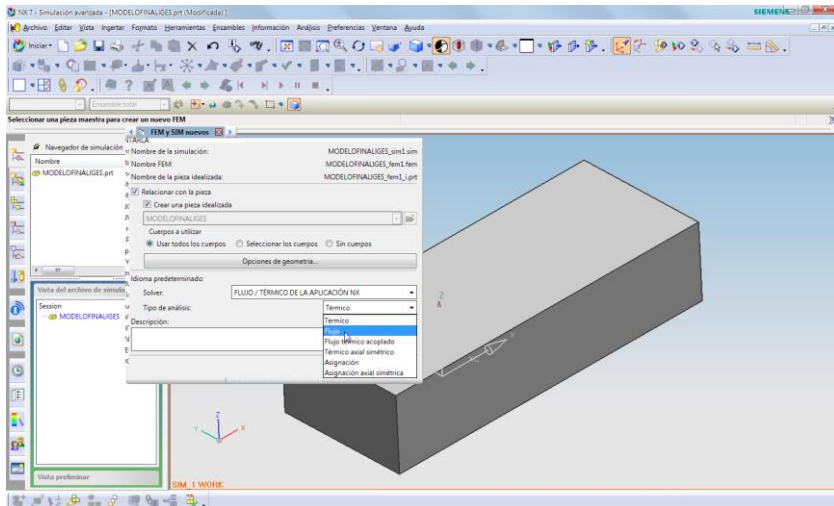


Figura 5-39 Elección de "flujo" en la simulación.

Finalmente se podrá añadir algún texto para describir la simulación y las características particulares de ésta. Es importante debido a que rara vez se realizará un solo análisis, y debe contarse con elementos que permitan diferenciar uno de otro con facilidad.

A continuación deberán escogerse las opciones adecuadas para el tipo de solución deseada, para esto el software presenta 8 pestañas y menús con múltiples alternativas:

Las primeras persianas ya se encuentran definidas desde el cuadro de dialogo previo y la información se traspasa de forma automática al nuevo. La única diferencia es que se deberá determinar la opción flujo entre las dos existentes. Para un análisis aerodinámico la opción "flujo" es suficiente pues no se calcularán parámetros complejos como flotabilidad avanzada o condensación por humedad y temperatura, ni distribución de flujos al aire libre de contaminantes, temas entre otros para los que se desarrolló el módulo "advanced flow"

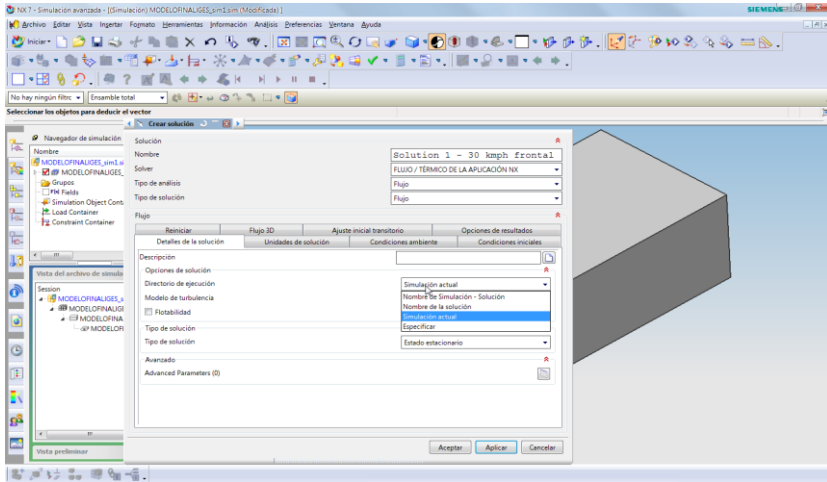


Figura 5-40 Configuración de la simulación.

Posteriormente ya en la pestaña “detalles de la solución” se escogerá el directorio de ejecución, permite escoger el directorio de salida de los ficheros de la simulación entre el por defecto “Simulación actual” que corresponde al directorio donde están los ficheros de piezas y componentes del sistema.

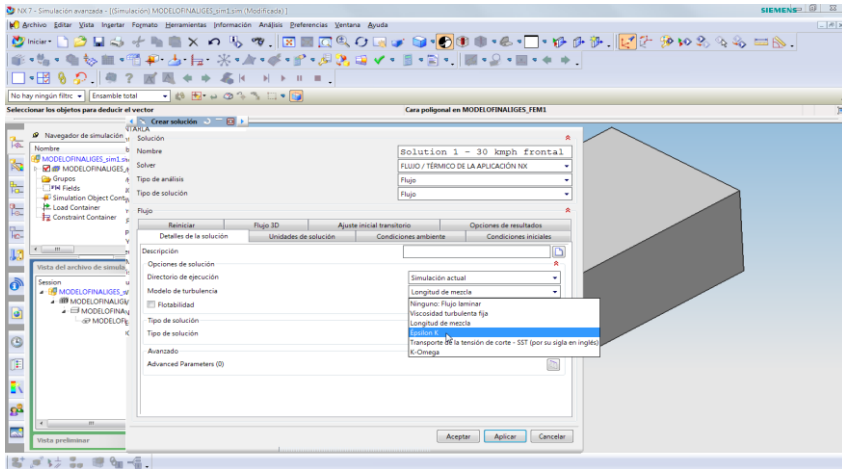


Figura 5-41 Elección del modelo de turbulencia.

Al escoger la opción para “Modelo de turbulencia” se deberá tomar en cuenta los aspectos teóricos expresados previamente en el marco teórico, este apartado tiene relación directa con el cómo NX calculará o interpretará la viscosidad, la densidad y la turbulencia del fluido alrededor del vehículo.

La documentación de NX sugiere comenzar los análisis utilizando el modelo “viscosidad turbulenta fija”, el que entregará resultados con menores tiempos de cálculo, sin embargo mucho menos ajustados. Una vez que el análisis con este modelo se realice, se sugiere continuar con el modelo “k- ϵ ” de dos ecuaciones. En la práctica este método de variar el modelo de turbulencia se utilizó en los primeros análisis pero si se cuenta con un ordenador que entregue una buena potencia de cálculo es recomendable utilizar directamente el segundo modelo ya que en los análisis realizados existe una diferencia cercana al 15% entre los resultados de los análisis realizados con el primer modelo de turbulencia y los del segundo que se supone de mucha mayor precisión.

Los demás modelos tienen otras aplicaciones más afines que el CFD aerodinámico, por ejemplo el de “flujo laminar” es casi puramente teórico pues los flujos no se mantienen laminares como ya se ha revisado previamente.

El modelo “Longitud de mezcla”, llamado a veces “modelo algebraico” da buenos resultados en muchos tipos de aplicaciones CFD, utiliza menos tiempo de cálculo que los modelos de dos ecuaciones como el k- ϵ , pero no es adecuado para velocidades bajas de flujo.

El modelo “k- ω ” es capaz de representar variaciones de la viscosidad a lo largo del fluido, es decir éste no se considerará estacionario, lo que implica elevar el tiempo de cálculo enormemente.

El modelo “SST” mezcla numéricamente los modelos “k- ϵ ” y “k- ω ”, utilizando cerca de las paredes el segundo y en el centro del flujo el primero. Provee de mejores resultados en flujos no confinados o con fuertes presiones adversas que no es el caso de los estudios aerodinámicos.

Como se ha definido también en el marco teórico, en “tipo de solución” se escogerá “estado estacionario” pues se supondrán condiciones uniformes durante toda la simulación, facilitando de éste modo el proceso de cálculo.

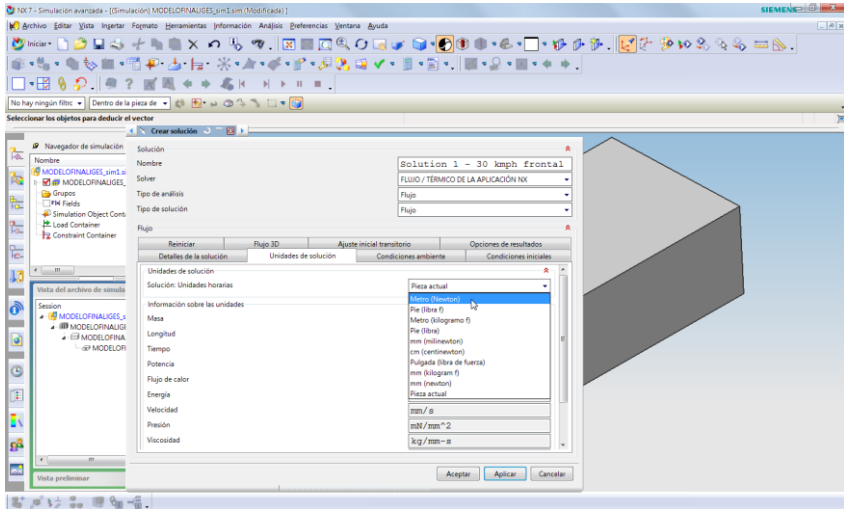


Figura 5-42 Elección de las unidades para la solución.

En la siguiente pestaña “unidades de solución” es recomendable escoger “Metro (Newton)”, pues son las unidades que se utilizarán para el cálculo posterior del Cx con los datos obtenidos en la simulación CFD.

En la pestaña “condiciones ambiente” se mantendrá los datos por defecto en la mayoría de las situaciones de simulación aerodinámica, a menos que la presión o la temperatura ambiente experimenten un cambio amplio que valga la pena reseñar en el experimento. Conviene confirmar que la dirección del vector de “aceleración gravitacional” sea la correcta.

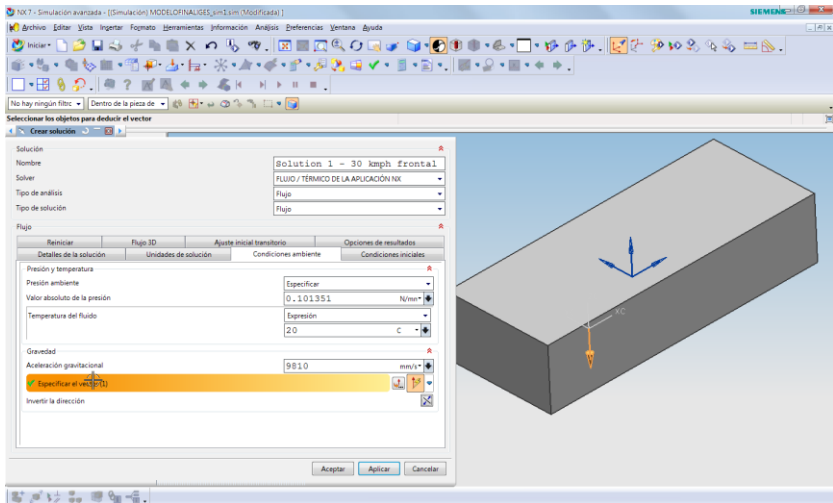


Figura 5-43 Elección de las condiciones ambientales.

Las “condiciones iniciales” en el caso de las simulaciones aerodinámicas mediante CFD serán automáticas pues se refieren al experimento en particular y no a su relación con eventos previos o posteriores.

En la pestaña de “flujo 3D” se escogerá suave con fricción, para declarar las características de la pared que deseamos, ya que no se ha determinado un material para el vehículo o el túnel ni es necesario hacerlo.

Deberá activarse la opción conectar “mallas desunidas de fluido”, para asegurar un flujo unitario y no flujos independientes en caso de que el vehículo limite el paso separando el flujo, y la opción “utilizar ley de pared” podrá activarse según el modelo de turbulencia utilizado. Esto es opcional pues si se usa un modelo que lo requiera la opción será activada automáticamente por el software al momento de realizar el cálculo de la solución.

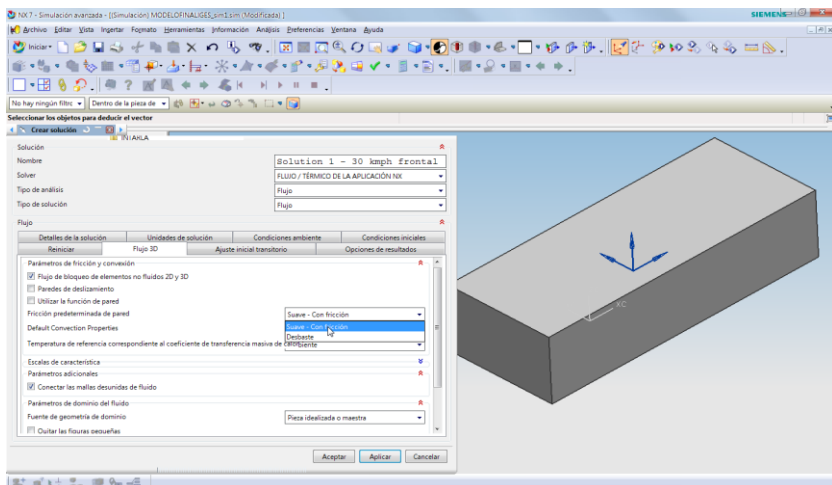


Figura 5-44 Elección de las condiciones de flujo en 3D para la solución.

Siempre en la misma pestaña se escogerá para “fuente de geometría de dominio del fluido” la opción pieza idealizada o maestra, para que el software cree la malla del flujo según el modelo que se ha preparado previamente (túnel y vehículo).

Para la pestaña “opciones de resultados” se activarán solamente las presiones, velocidades y vórtices, pues los otros resultados no serán de utilidad para el cálculo del C_x , sin embargo en caso de que se busque la obtención de más datos mediante el análisis puede resultar útil trabajar con las demás opciones.

Finalmente se deberá aplicar y aceptar para terminar de configurar los parámetros de la solución.

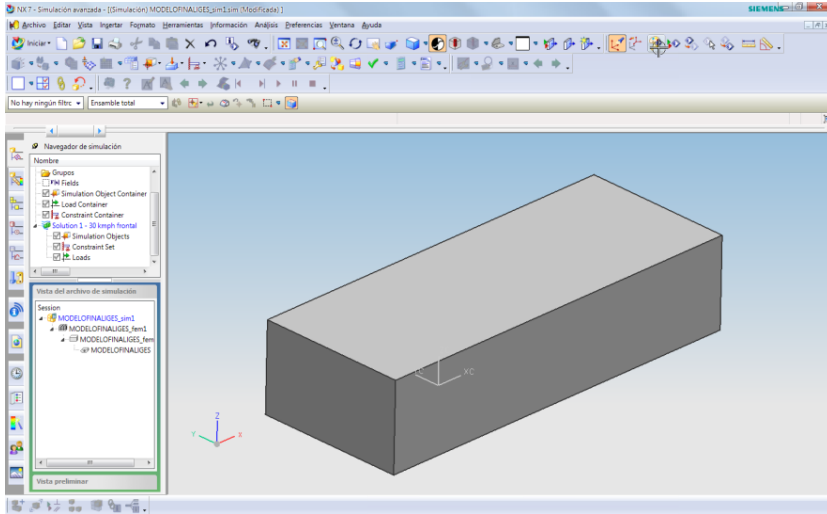


Figura 5-45 Visión del archivo previo a la simulación.

Puede ser útil para visualizar con mayor comodidad los elementos a analizar, utilizar las herramientas de NX para dar transparencia, por ejemplo, al túnel.

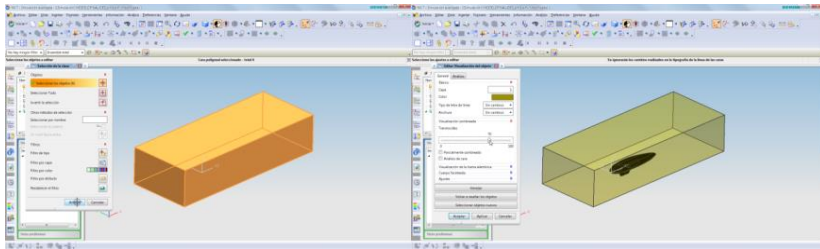


Figura 5-46 Añadir transparencia a las paredes del túnel.

Otra alternativa es simplemente ocultar el túnel, en la sección superior a la izquierda de la pantalla, desmarcando la marca de chequeo en la geometría que se quiera ocultar, ya sea estando en módulo de simulación o en el módulo de FEM.

Resulta importante notar que el análisis está constituido por varios componentes, esto es posible de visualizar en la zona inferior izquierda de la pantalla de NX, en “vista del archivo de simulación”, allí es posible notar que el vehículo y el túnel son los ficheros de “partes”, y existe un modelo

SIM y otro FEM, en el primero se realizará la simulación propiamente tal, pero en el segundo se deberá crear la malla de elementos finitos del vehículo.

Es posible desplazarse entre uno y otro dando doble clic en los nombres en la zona señalada. La ocultación del túnel o la asignación de transparencia son independientes para cada modelo y deberán aplicarse por separado a FEM y SIM.

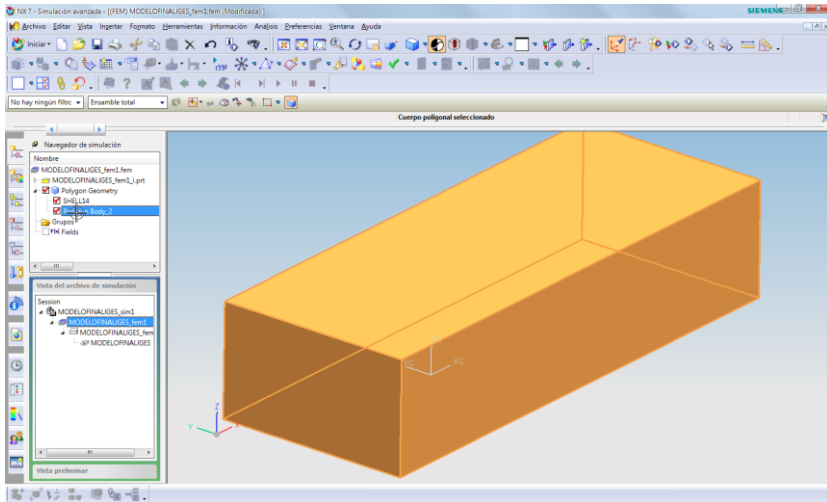


Figura 5-47 Visión sin túnel oculto.

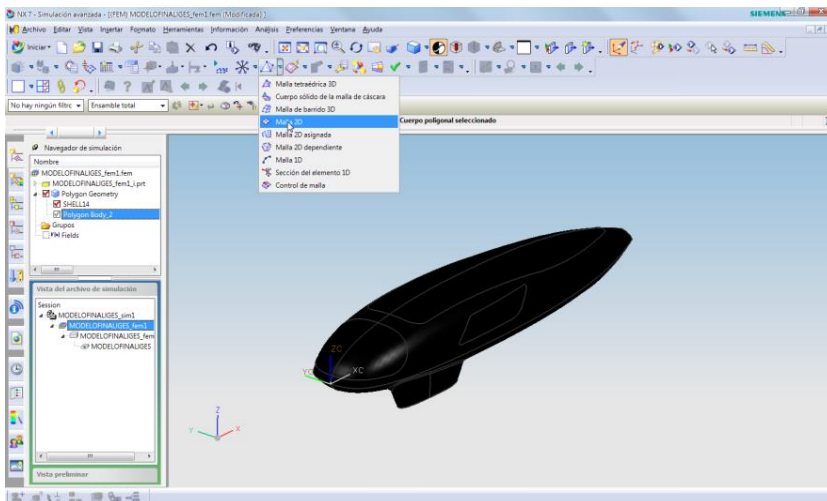


Figura 5-48 Visión con túnel oculto.

En éste caso se ha optado acceder al modelo FEM, y por ocultar el túnel. Accediendo al FEM se activarán una serie de opciones e iconos en las barras de botones y herramientas del software. Se escogerá “malla 2D” pues como ya se ha señalado, se creará una malla superficial, siendo irrelevante el interior del modelo.

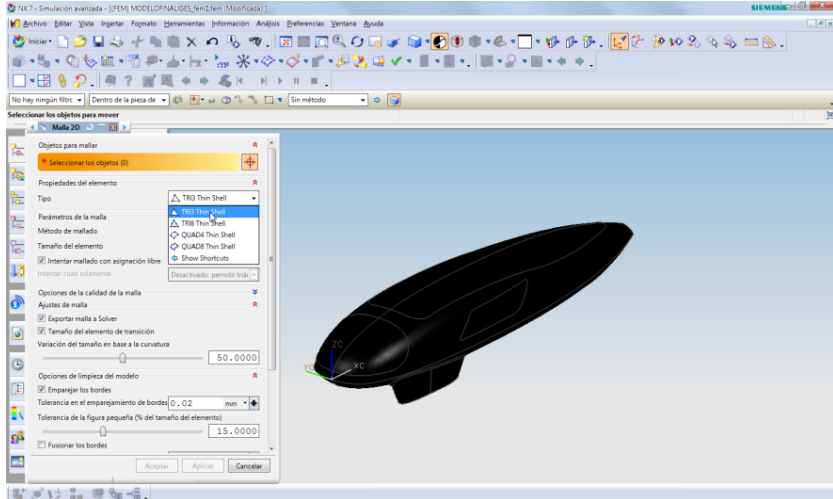


Figura 5-49 Elección del tipo de malla 2D para el modelo.

Como se ha explicado en la determinación de las condiciones de contorno, se escogerá el tipo de elemento TRI3 Thin Shell. El método de mallado podrá ser “adoquín” o “subdivisión”, teniendo cierta dependencia de la geometría del modelo, su tamaño, etc. la elección del método más adecuado. Sin embargo ambos métodos han dado resultados adecuados en los análisis efectuados en cuyo caso se ha escogido mayormente “adoquín”. El resto de las opciones serán las que el software define por defecto, pudiendo variar en caso de ser necesario la “variación del tamaño en base a la curvatura” a valores menores en caso de curvaturas complejas, y la “tolerancia en el emparejamiento de los bordes” y “tolerancia de la figura pequeña” si se requiere optimizar la malla.

El aspecto clave será la elección adecuada del tamaño de elemento, para ello como se ha comentado se deja al software sugerir un tamaño el que se va disminuyendo gradualmente hasta lograr una adecuada calidad de malla sin un tamaño demasiado pequeño de elemento que hará que el cálculo se prolongue demasiado tiempo.

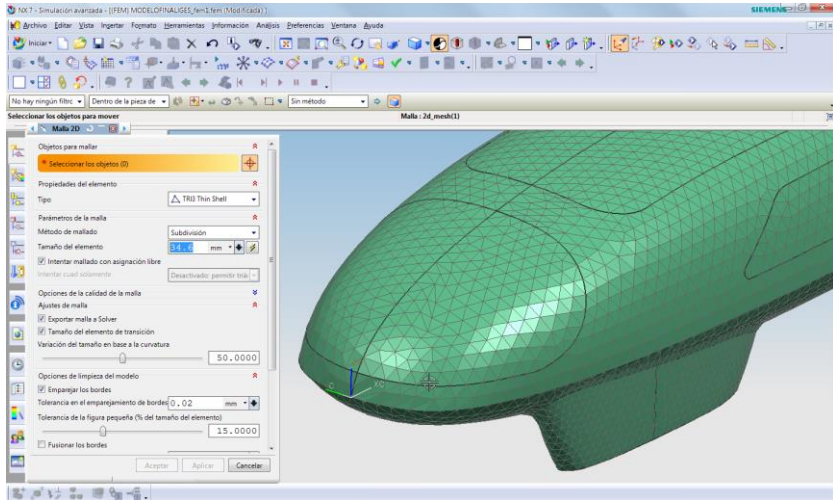


Figura 5-50 Modelo mallado con las opciones por defecto del software.

La Figura 5-50 muestra como con el tamaño de elemento sugerido por el software en base al tamaño del modelo a mallar, en las zonas más complejas no hay una buena resolución, no existe una buena correspondencia con la forma inicial.

Y más grave aún, existen triángulos de aspecto poco uniformes y muy alargados que restarán precisión al cálculo de los resultados.

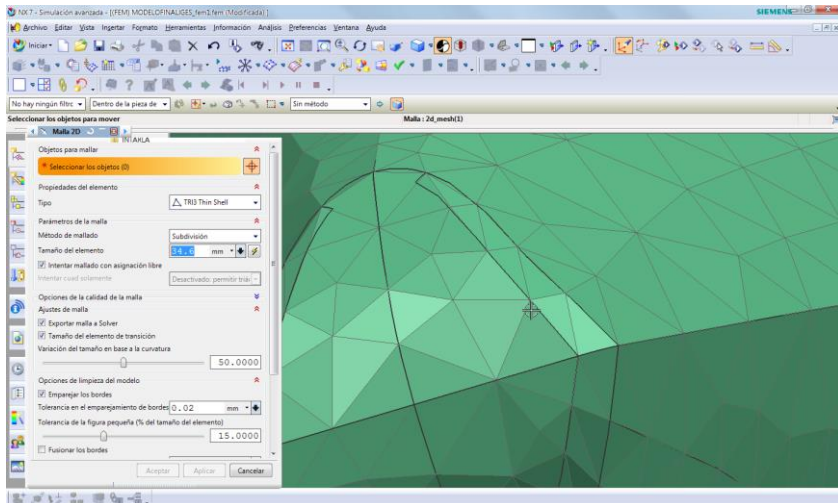


Figura 5-51 Modelo mallado con las opciones por defecto del software.

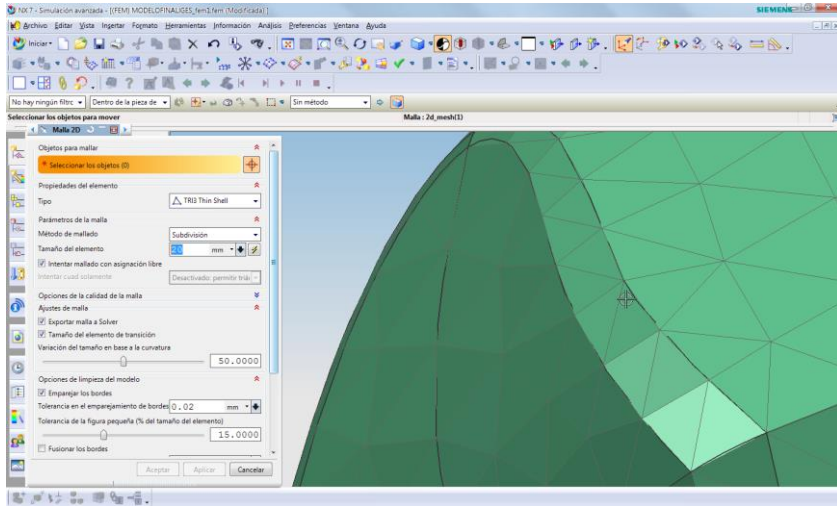


Figura 5-52 Modelo mallado con las opciones modificadas.

Al disminuir el tamaño de elemento se puede apreciar en la Figura 5-52 como ambos aspectos mejoran, los triángulos poseen un aspecto más uniforme y la correspondencia con la geometría real es también mejor.

Finalmente se opta por un tamaño de elemento de 25 mm para un coche que mide 3.000 mm de longitud, siendo esta la proporción aproximada que se debe considerar en la mayoría de los casos para obtener resultados con la precisión necesaria.

Es imprescindible para la simulación CFD que esté activada la opción “exportar malla a solver”, pues es la malla del vehículo la que permitirá obtener los resultados más importantes buscados.

Una vez creada la malla se accede con un doble clic en el inicio del árbol, al modelo SIM, con lo que se desplegarán nuevas barras de herramientas y se desactivarán otras. En este caso se mantendrá el túnel a la vista, pero se utilizará la condición de transparencia, esto permitirá aplicar condiciones al túnel, pero a la vez visualizar el vehículo en su interior, debido a que también se deberán aplicar condiciones al vehículo.

Si se ha activado correctamente en el paso anterior “exportar malla a solver” el vehículo deberá mostrar la malla verde creada en el FEM en lugar de verse negro como en la imagen, o gris en caso de que el fichero del modelo sea STEP.

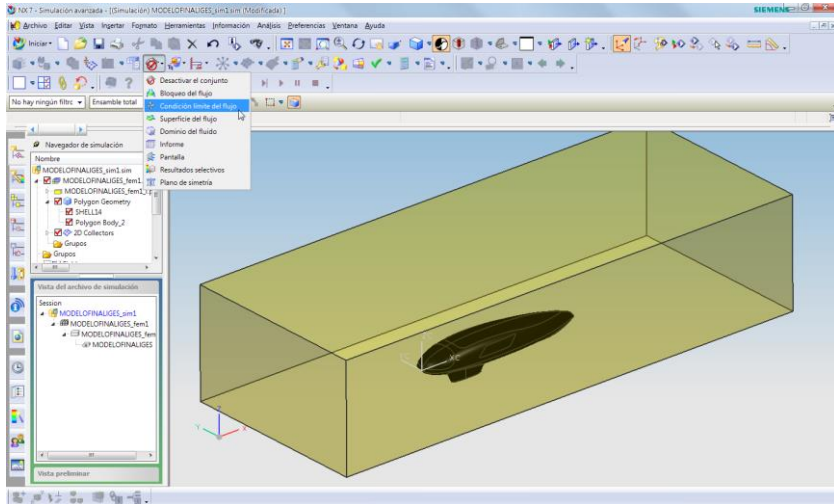


Figura 5-53 Activación de las condiciones límite del flujo.

El primer paso para la determinación de las condiciones del SIM será acceder al menú “condición límite del flujo”, donde se podrán escoger las zonas de entrada (equivalente en un túnel de viento al ventilador) y salida del flujo (equivalente a las mallas de apertura).

En primer término se escogerá el “Flujo de entrada” desde la pestaña “Tipo”, y en el espacio en blanco se podrá agregar un nombre que defina la condición límite de flujo en cuestión, en este caso simplemente se le da el mismo nombre “flujo de entrada”.

El paso siguiente será seleccionar el objeto que constituirá la zona de entrada del flujo, en este caso la pared que queda frente al vehículo.

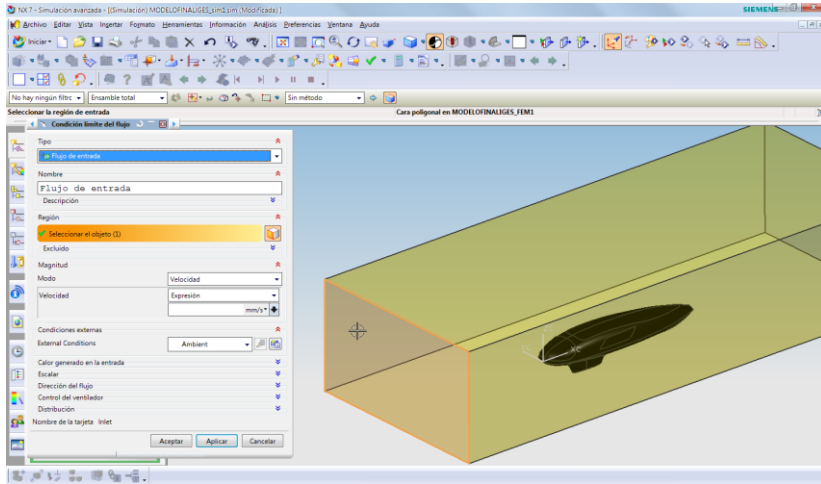


Figura 5-54 Ubicación de la entrada de flujo en el túnel.

A continuación se selecciona la velocidad del flujo, la que se determinará en base datos conocidos que constituyen los datos de entrada del problema a solucionar mediante la simulación, en esta ocasión se desea probar el vehículo a las velocidades normales a las que se desplaza, cercanas a los 30 km/h, por lo tanto se escogerá la opción “velocidad”, y luego en la pestaña inferior, escogiendo como unidades kilómetros por hora, se ingresará el valor 30.

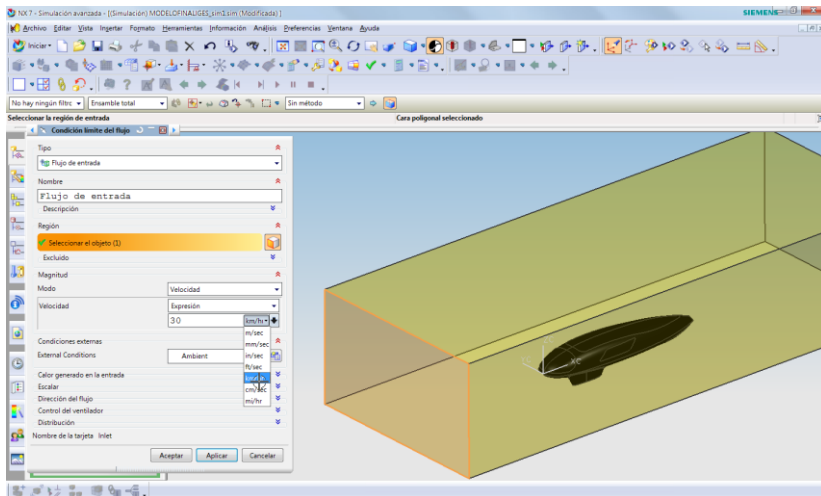


Figura 5-55 Selección de la velocidad de flujo y sus unidades.

Las “condiciones externas” serán las del “ambiente”, y la “alineación”, que determinará la dirección y el sentido del flujo tomará el vector “normal a la cara” para definir dicha alineación.

Como el flujo será continuo no será necesario añadir ningún control de ventilador o método de distribución diferentes a los por defecto, es decir “ninguno” y “uniforme”.

En el mismo menú anteriormente utilizado, “condición límite del flujo” se escogerá ahora la opción “Abriendo”, para definir la zona por la que el flujo escapará del túnel. Esto reviste importancia ya que lo que se desea es que el flujo pase sin alteraciones por el túnel a excepción de la presencia del vehículo, por ello el flujo saldrá al ambiente manteniéndose constante en todo el trayecto del túnel respecto a su velocidad, densidad, viscosidad, etc.

Por lo anterior, evidentemente las opciones a escoger, en “external conditions” y “presión externa absoluta” serán “ambiente”, el resto de las opciones se dejarán por defecto, y también podrá ser agregado un texto que defina y permita identificar rápidamente el tipo de condición de límite de flujo.

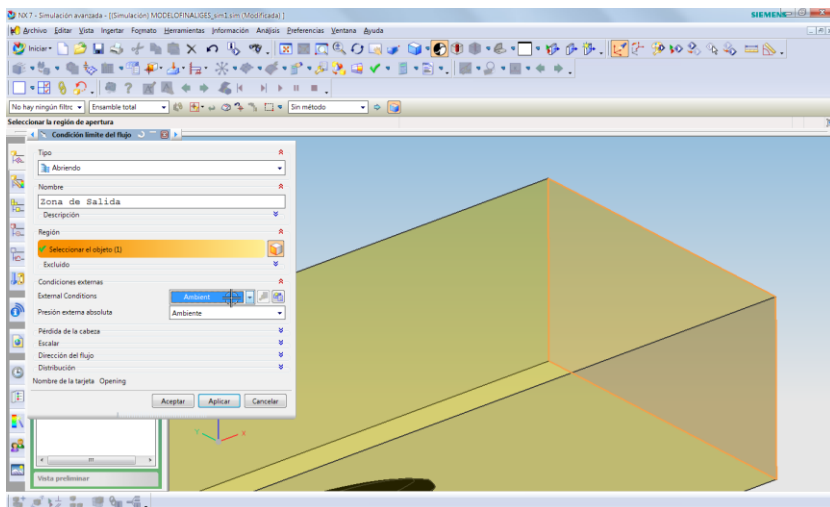


Figura 5-56 Selección de las condiciones externas.

Con la entrada y salida del flujo definidas, se deberá escoger a continuación, el dominio del fluido, es decir la zona donde estará presente y se desplazará el aire en movimiento.

Desde el mismo icono se accederá a “Dominio del fluido”, el que abrirá el cuadro de diálogo correspondiente.

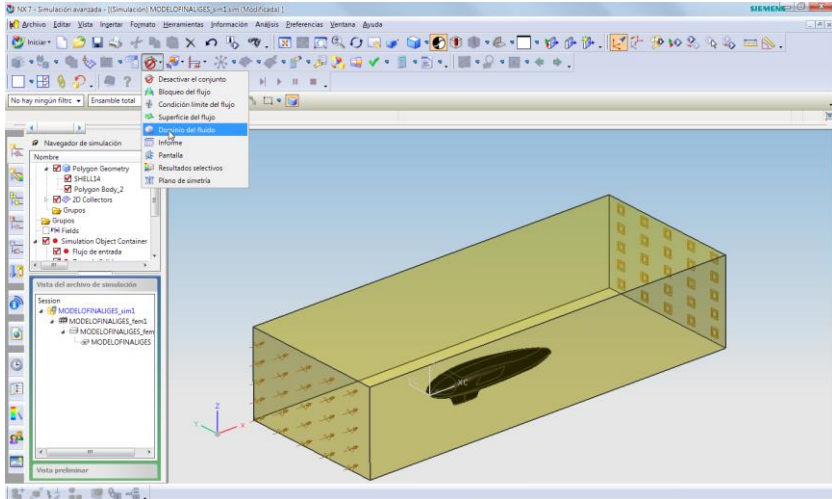


Figura 5-57 Selección del dominio de fluido.

De las opciones en la persiana “Tipo” se escogerá “Malla del fluido” pues se busca generar el mallado de la zona que está “llena” de éste fluido.

Con posterioridad se podrá dar un nombre como en los casos anteriores, dentro de las opciones el “material fluido” será aire para toda simulación aerodinámica.

El aspecto siguiente, donde se define la “Densidad de Malla” requiere un mayor detenimiento pues determinará el tamaño y tipo de los elementos de la malla, lo que incidirá de forma directa en los tiempos de cálculo y la precisión del cálculo realizado.

Si bien en los tutoriales revisados y en los trabajos previos sobre el tema consultadas al inicio de éste trabajo (Aguirre [35]) siempre se escoge como “tipo de tamaño de elemento” la opción “absoluto”, durante la realización la presente tesis se ha realizado una comparativa entre distintos análisis, respecto a valores obtenidos y tiempos de cálculo llegando a la conclusión de que la opción “relativo” entrega resultados igualmente precisos con una menor cantidad de tiempo de cálculo en determinadas configuraciones. Para efectos de ésta presente documentación de los trabajos realizados y a raíz de que se han utilizado ambos tipos de elemento se muestran en las imágenes las configuraciones que han dado un resultado adecuado en ambos casos.

La diferencia entre ambas maneras de calcular el tamaño de elemento está en que el concepto “absoluto” hace referencia a un mallado regular, cuyo tamaño de elemento es único y constante independientemente de que la zona del fluido este cerca de las paredes del vehículo o no. Esto uniforma el cálculo, y hace que se invierta la misma cantidad de tiempo calculando zonas complejas que zonas donde el fluido se mantiene prácticamente inalterable. Esto es más rápido que ir probando un valor relativo adecuado, y posee menos posibilidades de que el mallado falle al momento de la solución.

El tipo de tamaño de elemento “relativo” en cambio permite que el mallado se adapte a las zonas, y se haga más tupido en las zonas que requerirán mayor nivel de precisión, por ejemplo aquellas en la proximidad del vehículo, o en los puntos de contacto del vehículo con el suelo, y se realice con elementos de mayor tamaño en las zonas donde el fluido no se altera mayormente. Ello evidentemente libera procesos de cálculo y permite ganar tiempo sin sacrificar precisión. El único problema que puede conllevar trabajar con la opción “relativo” es definir los valores para un ajuste adecuado, lo que debe hacerse mediante la realización de test sucesivos hasta dar con los correctos, y por otro lado que resulta menos robusta que la opción anterior y presenta más probabilidades de fallo, Figura 5-58.

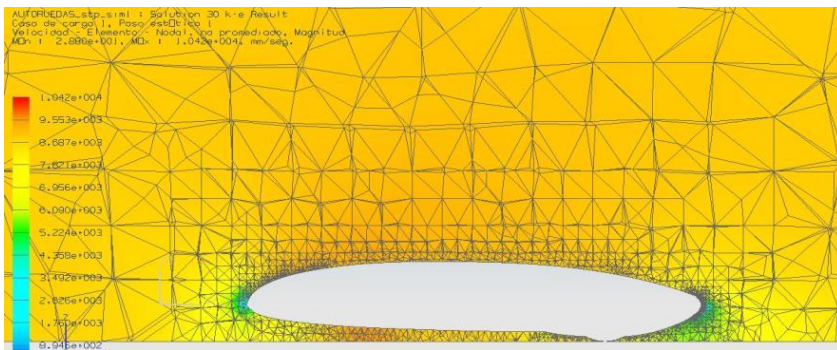


Figura 5-58 Mallado relativo.

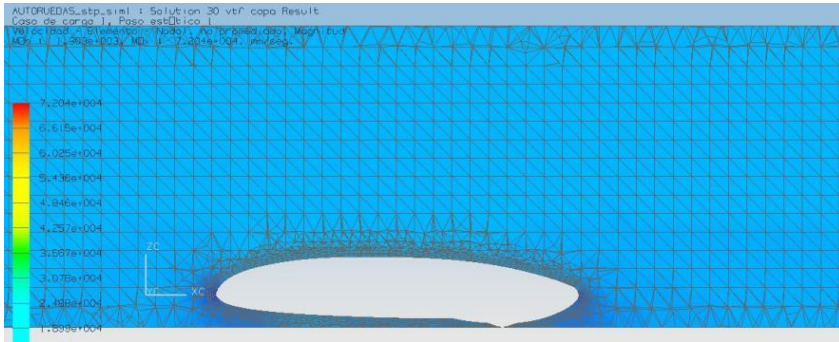


Figura 5-59 Mallado regular.

La Figura 5-59 muestra la configuración que se le ha dado, cuando se ha escogido la opción “absoluto” y que corresponde a un valor de 150 mm a cada elemento constituyente del fluido dentro del túnel

Los valores para la opción “relativo”, que en esta ocasión es 0.06.

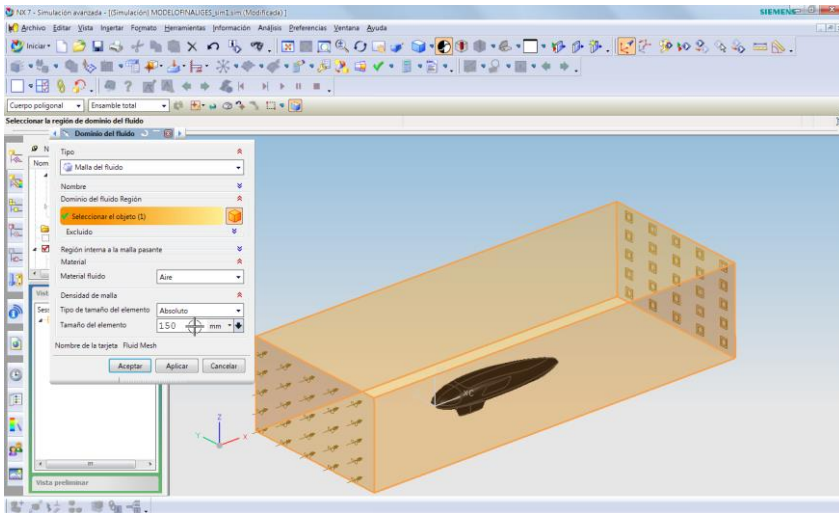


Figura 5-60 Configuración de mallado del fluido.

El paso siguiente será, en el mismo cuadro de diálogo Figura 5-60 (se recomienda usar la opción aplicar, de modo que el cuadro no se cierre y se pueda continuar trabajando directamente) escoger en “Tipo” la opción “Malla de la superficie del fluido”. Esto permitirá definir una malla especial, con otro tipo de elemento, normalmente más pequeño, para las zonas donde el fluido “choca” con otro elemento, por ejemplo el vehículo, y también deberá definirse para su entrada y salida. En esas zonas se podrá considerar

que el fluido posee una “superficie” que toma la forma de sus límites, la que será mallada con el tamaño de elemento que se defina en este paso.

Para seleccionar los parámetros de éste paso, se deberá repetir los pasos anteriores, ya que el cuadro de diálogo es similar, sin embargo tanto si se trabaja con valores absolutos o relativos deberán disminuirse, para obtener mayor precisión en el cálculo de la entrada y salida del flujo clave para que ya en el túnel, se comporte adecuada y establemente.

Los valores escogidos son 0.03 relativo y 70 mm absoluto. Estos valores tienen relación con el tamaño de los objetos en el sistema, por lo que pueden utilizarse como referencia para otros análisis con objetos diferentes, modificándolos de acuerdo al tamaño de éstos. La creación de la capa límite se dejara sin activar ya que no incide en estas zonas.

Posteriormente en el mismo cuadro de diálogo aún, se deberá escoger una nueva “malla de la superficie del fluido”, esta vez para la zona que envuelve al vehículo. En este caso interesa particularmente que el cálculo sea lo más preciso posible, por lo cual el tamaño de elemento escogido será aún menor.

Los valores utilizados corresponden a 0.015 para relativo y 50 mm para absoluto.

La siguiente opción en el cuadro de diálogo corresponde a la definición de la capa límite, que en éste caso si tendrá una incidencia, no enorme, pero si digna de considerar en el resultado final. Esta capa límite, podrá ser aquí definida en cuando a espesor, cantidad de capas, espesor de la primera capa y de las demás, pero solamente será recomendable utilizarse cuando el “tipo de tamaño de elemento” sea “absoluto”, en la opción “relativo” el mismo software creará la capa límite, aunque igualmente se podrá definir, el tiempo de cálculo y la robustez de la solución serán mayores y menores respectivamente, propendiendo a errores al calcular, dejando soluciones fallidas. Para los análisis realizados, se ha utilizado el valor 12 mm como espesor total de capa límite, con 4 capas y cuya primera capa es de 3 mm. Lo anterior es un valor aproximado e idealmente debe calcularse cada capa límite antes de configurar sus valores.

Ejecución de la solución

Con los parámetros del apartado anterior ya configurados es posible “lanzar” la solución. Para ello se dará clic con el botón derecho sobre el nombre de la solución, en la zona superior izquierda del panel lateral, y se escogerá “resolver”, posteriormente ya que todo se ha configurado

correctamente solo quedará dar en “aceptar” en el cuadro de diálogo que se abrirá. En caso de que se quiera editar algún parámetro previo se podrá acceder mediante los botones del mismo cuadro de diálogo.

El primer paso de la solución será realizar el mallado del fluido y sus superficies, ya que durante el proceso sólo se ha realizado el mallado del vehículo.

Los procesos de mallado podrán tardar un tiempo considerable y resulta difícil dar una referencia, pero dependen directamente de los tamaños de elemento usados y del tipo de tamaño de elemento. Serán en general más rápidos para procesos que usen tipo “relativo”, y en el caso de los análisis realizados, con los tamaños que se definieron en los pasos previos tardaron entre 7 a 25 minutos.

Con el proceso de mallado completo, se procederá a abrir automáticamente el “Solution monitor” que mostrará el progreso de la solución.

Además se abrirá el “Monitor analítico de trabajo y la ventana de “Información”, que aportarán información extra. En ésta etapa el usuario tendrá pocas posibilidades de incidir sobre el proceso, sin embargo podrá ir revisando los resultados mediante el botón “inspect” que detiene el vertido de datos al “Solution monitor” sin detener el proceso, para que se pueda leer sin problemas los que ya se hayan escrito. Al volver a clicar sobre el botón los datos se actualizan y se sincronizan con el proceso. También se podrá detener o pausar el proceso con los botones stop y pause.

Con el botón “Graph” se podrá acceder a los gráficos que muestran el progreso de la solución, la cantidad de iteraciones que realiza el proceso vs la convergencia del flujo, lo que dará una idea de la cantidad de datos procesados en los distintos puntos del proceso del cálculo de la solución.

Cuando la solución ha sido calculada con éxito, se deberán cerrar las ventanas que no lo hagan automáticamente, y se deberá cerrar finalmente el Monitor analítico de trabajo mediante el botón “Cancelar” solo cuando el estado de la solución diga “Completed”

Post procesamiento de los resultados

Una vez completado el proceso de cálculo, para acceder a la pestaña, denominada “Navegador de post-procesamiento” permitirá acceder a la solución, la que se encontrará sin los resultados inicialmente. Para que se carguen se deberá hacer doble clic sobre el nombre de la solución, lo que

luego de un tiempo de carga que puede alcanzar el minuto, hará aparecer un pequeño triángulo junto al nombre de la solución.

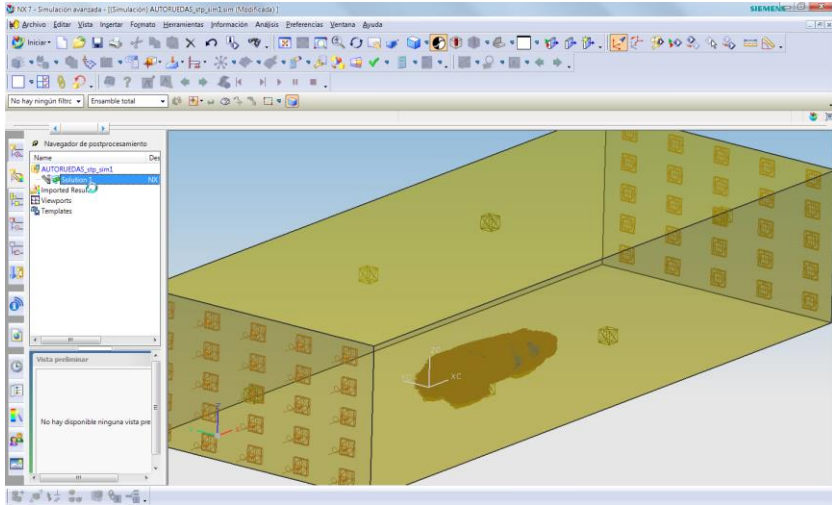


Figura 5-61 Navegador del post-procesador.

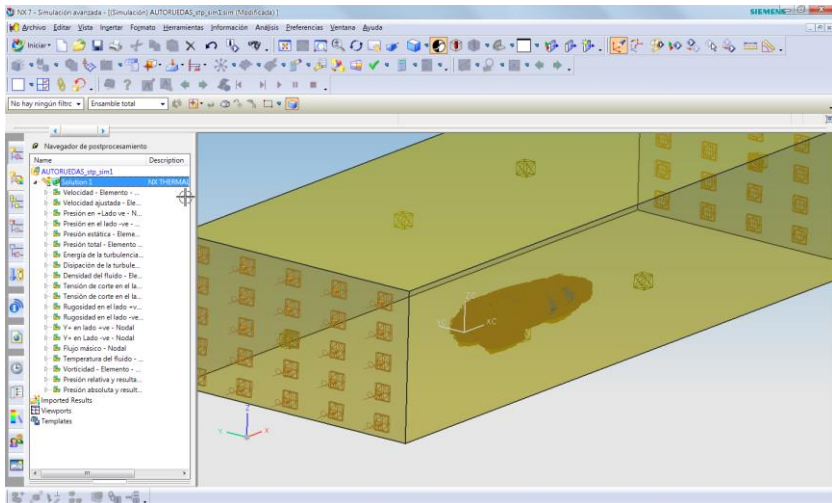


Figura 5-62 Soluciones en el árbol.

Si se hace doble clic sobre cualquiera de los resultados este será mostrado en la pantalla. Sin embargo habrá que configurar su visualización para que sea de utilidad. Es importante recordar que los resultados más importantes en formato numérico se podrán encontrar en el archivo LOG mencionado en el apartado 5.3.3.

En éste caso se ejemplificarán algunas de las posibilidades de post-procesamiento utilizando uno de los análisis realizados. Nótese el mallado con tipo de tamaño de elemento “relativo”, mucho menor en las zonas extremas del túnel.

Para editar la visualización se accederá a la zona inferior del panel, y se dará clic derecho para que se extienda el menú en el cual se escogerá “Editar” y se accederá a los cuadros de diálogo que permitirán manejar la forma en que los resultados se muestran.

Plano de corte – simetría

Una de las modalidades de visualización más utilizadas en CFD aerodinámico consiste en un plano que corte el vehículo en su eje de simetría, ya que de ese modo se podrá apreciar las características del flujo a todo su alrededor. Para ello en el cuadro de diálogo “Vista posterior”, en la pestaña “Visualizar” en la zona “visualización activada” se escogerá “plano de corte” y luego el botón “opciones” que se activará a su lado.

Con éste botón se podrá acceder a los ajustes del plano de corte. Para obtener el plano adecuado se escogerá “coordenadas rectangulares absolutas” y la opción “Y” en la zona superior del cuadro. En la opción “Recortar el lado” se escogerá ambas, y si se desea se podrán clicar las opciones “Mostrar los bordes de la figura” y “Mostrar el fantasma recortado”, que mantendrán una forma simplificada del vehículo a la vista. Luego se actualizarán en pantalla las opciones definidas con el botón aplicar y se cerrará el cuadro de diálogo con el botón aceptar.

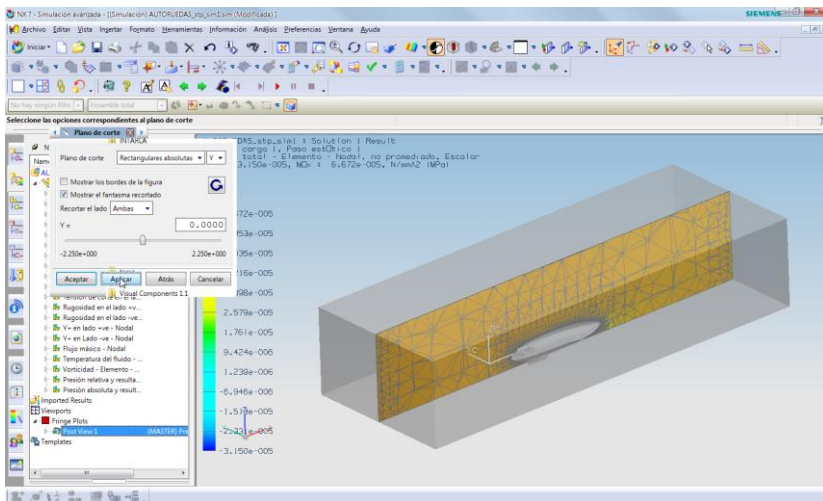


Figura 5-63 Visualización del plano de corte.

El resultado obtenido será como el que muestra la Figura 5-63. Esto podrá mejorarse, accediendo, en el cuadro Vista posterior” a la pestaña denominada “bordes y caras”, y escogiendo en “bordes” la opción ninguno, con lo que la trama alámbrica desaparecerá por completo como aparece en la Figura 5-64.

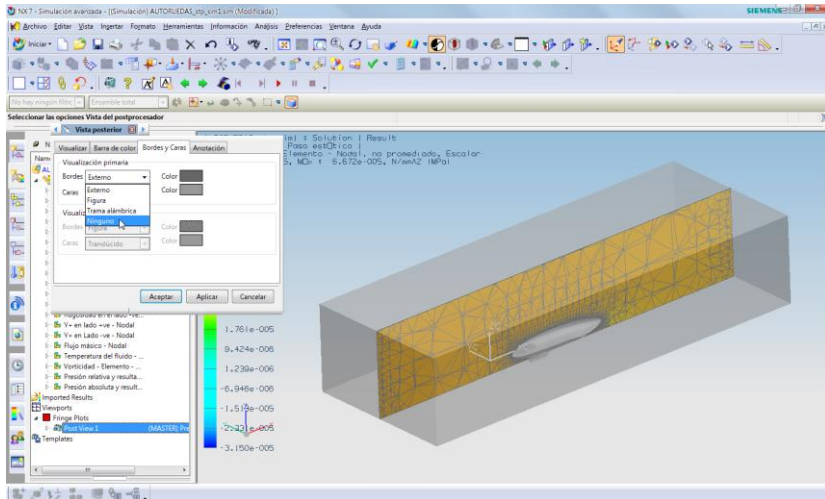


Figura 5-64 Eliminación del mallado en la visualización del resultado.

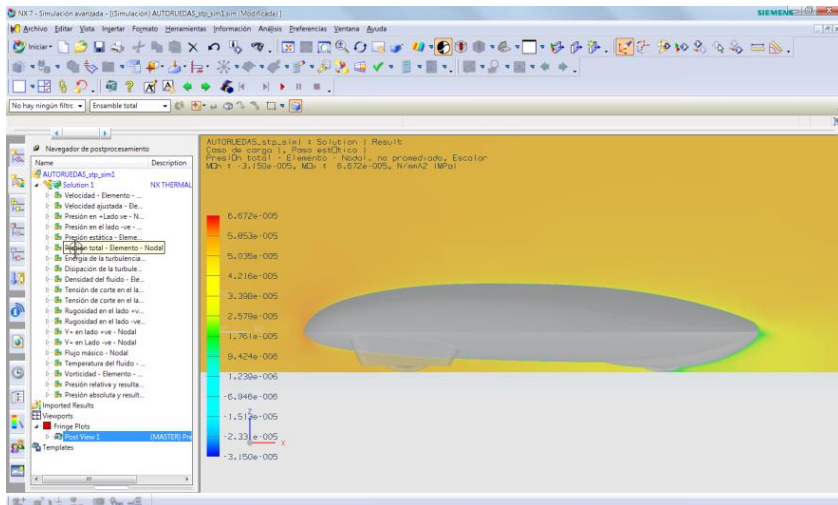


Figura 5-65 Visualización de la presión total sobre el modelo.

Posteriormente se podrá revisar gráficamente los datos con la configuración del plano de corte ya definida, por lo que incluso cambiando

de solución, por ejemplo de velocidades a presiones, se mostrarán de ésta manera. También la barra de color que muestra los datos aparece a un lado de la imagen para comprender que significa cada zona.

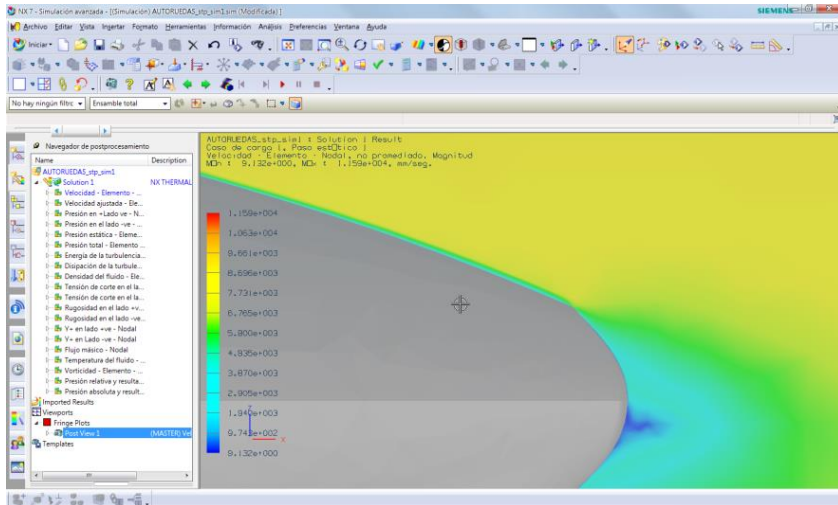


Figura 5-66 Visualización de la velocidad sobre el modelo.

En la Figura 5-66 se puede ver en el plano de corte creado, la zona de la capa límite donde la velocidad de las partículas del fluido desciende hasta ser casi nula, y la zona posterior donde el flujo se separa provocando disminución de la velocidad y algunos mínimos vórtices dada la forma aerodinámica del vehículo, su superficie lisa y la baja velocidad del análisis.

Líneas aerodinámicas

Otro de los estilos de visualización más utilizados en CFD aerodinámico, dada su utilidad al momento de explicar los resultados obtenidos es la denominada de “líneas aerodinámicas”. Para acceder a ellas en el post-procesado de NX, se deberá abrir nuevamente el cuadro “Vista posterior” de igual modo que para la creación del plano de simetría y en la pestaña de “Visualizar”, en la zona “visualización en color”, escoger la opción final “líneas aerodinámicas”

Para que las líneas sean mostradas deberá primero crearse uno o más “grupos de líneas” o “Seeds”, que son grupos de puntos que indican el nacimiento de líneas aerodinámicas. Para ello se dará clic al botón “crear” lo que permitirá acceder al modo de creación.

Este modo presentará todos los elementos translúcidos. Utilizando la tecla F8, se deberá ubicar el túnel en la vista ortogonal más adecuada para crear las líneas según la dirección del flujo.

Existen varias maneras de crear las líneas, por ejemplo mediante coordenadas, lo que permitirá una fila ordenada de líneas de flujo. En la Figura 5-67 muestra la modalidad más “libre” pero también la más versátil al momento de mostrar lo deseado, esto es para la opción “punto originador” escoger “seleccionar desde el modelo”, el resto de las opciones se deja por defecto, y simplemente haciendo clic con el ratón sobre la vista en pantalla se crean tantos puntos como líneas se desee mostrar. Una vez creado el “set de Seeds”, se aplica. Pueden crearse varios sets diferentes y almacenarlos.

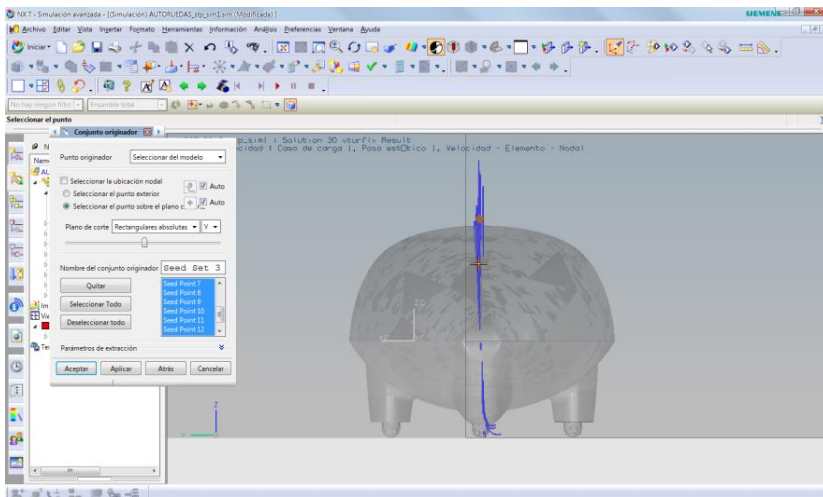


Figura 5-67 Ubicación de las líneas.

Una vez creada la cantidad de grupos de líneas que se desee, se acepta para cerrar el cuadro de diálogo “conjunto originador”, se podrán ver las líneas en pantalla. Aun así es probable que, según el resultado que se desee ver, aparezcan en gris, pues no todos los resultados mostrarán líneas coloreadas. Una alternativa para presentar las líneas aerodinámicas es activar las mallas alámbricas externas como muestra la Figura 5-68, para dar una mejor idea de la totalidad del sistema, principalmente del volumen en estudio como es el vehículo.

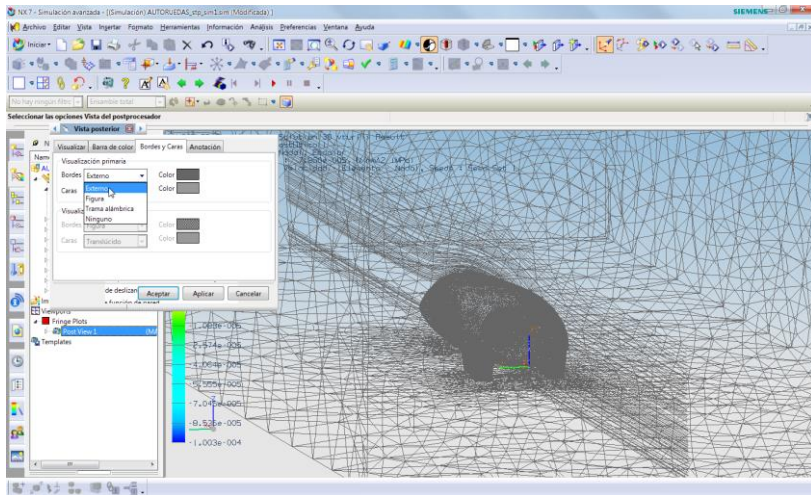


Figura 5-68 Grupos de líneas y mallas alámbricas activadas.

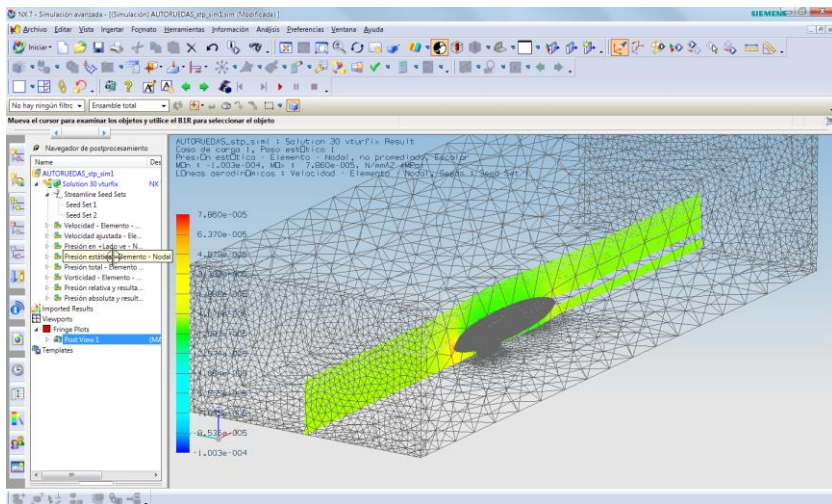


Figura 5-69 Representación de la presión estática.

Cambiando el tipo de resultado se podrá acceder a líneas coloreadas que ilustrarán convenientemente el paso del flujo de aire por el vehículo en las direcciones que se hayan escogido previamente.

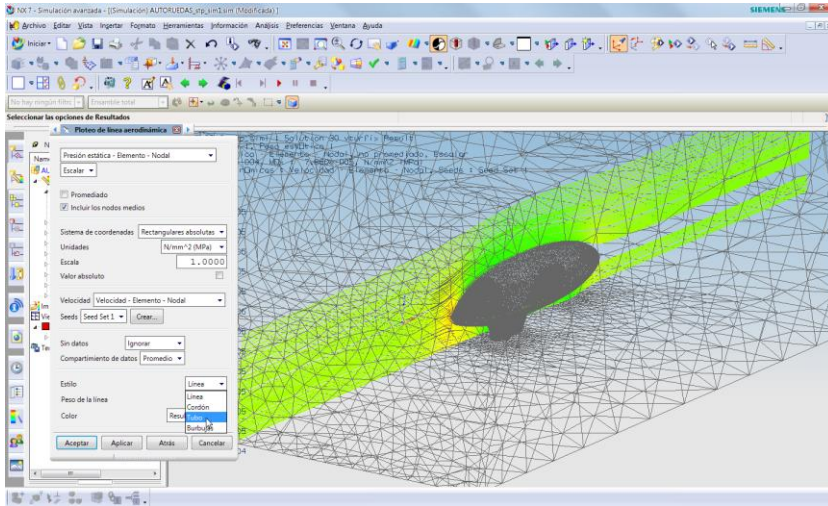


Figura 5-70 Modificación de línea a tubo o burbuja.

Las líneas podrán ser editadas desde el cuadro de diálogo “Vista posterior”, pestaña “Visualizar”, seleccionando el botón “resultados”, con lo que se accederá al cuadro de diálogo “Ploteo de línea aerodinámica”, desde allí y modificando la opción “Estilo” se podrá variar la forma de visualizar la línea, siendo particularmente útiles las opciones “Tubo” y “Burbujas”.

La Figura 5-71 muestra la opción “tubos activada”, la que permite una mayor visibilidad de las líneas.

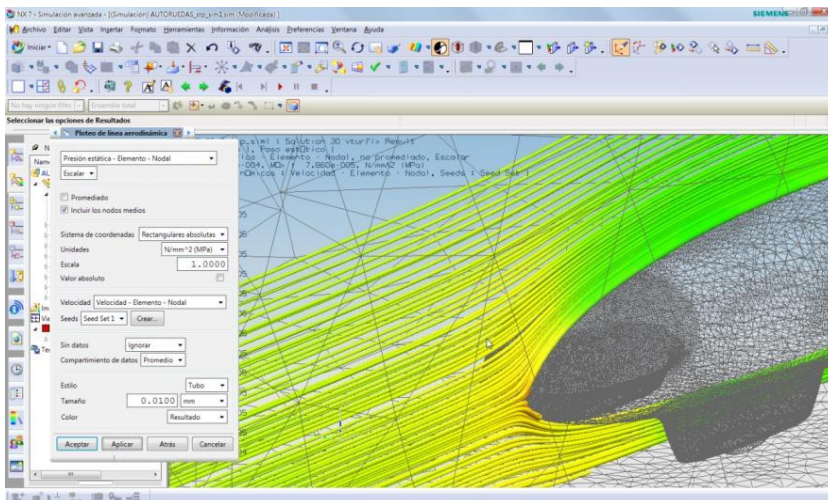


Figura 5-71 Tubos activados.

En todo momento se podrá variar entre los grupos de líneas creados previamente “Seed sets” para que se muestren en pantalla como se puede ver en las Figura 5-72 y Figura 5-73.

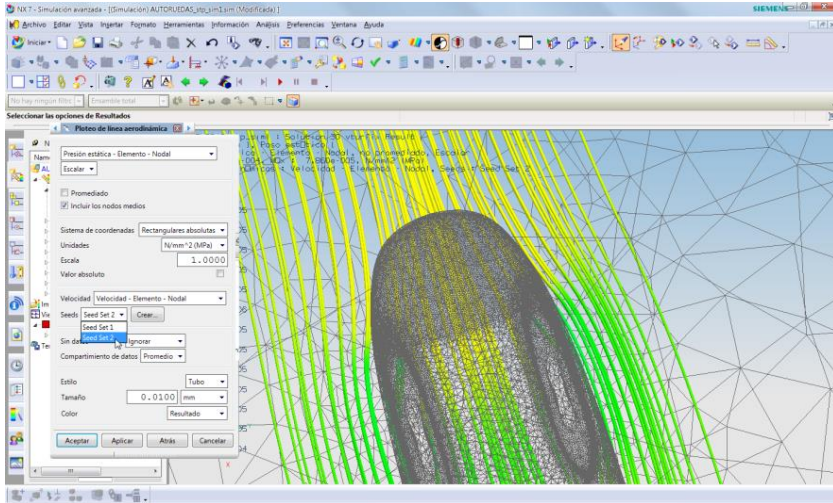


Figura 5-72 Grupos de líneas horizontales con forma de tubo.

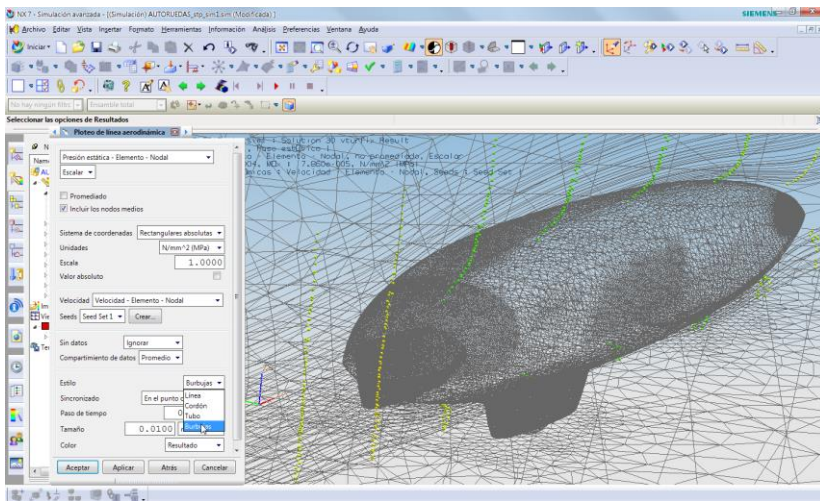


Figura 5-73 Modificación de tubo a burbuja.

La opción de burbujas, configurando adecuadamente su tamaño será la más adecuada para realizar animaciones.

En la Figura 5-74 se ve claramente el comportamiento de las partículas de aire, la formación de la capa límite y el desplazamiento del flujo gracias a la visualización mediante burbujas.

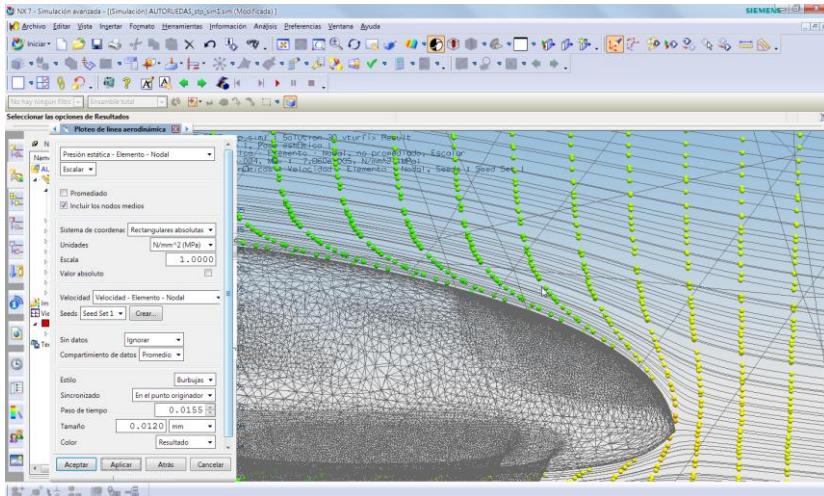


Figura 5-74 Desplazamiento del flujo sobre el vehículo.

Es posible realiza animaciones que podrá exportarse como GIF o AVI, y que serán un gran apoyo multimedia al momento de explicar los resultados obtenidos a terceros. En la Figura 5-75 es posible ver como se han combinado la técnica de líneas aerodinámicas, burbujas y plano de corte para crear una visualización y presentación de los resultados más atractiva.

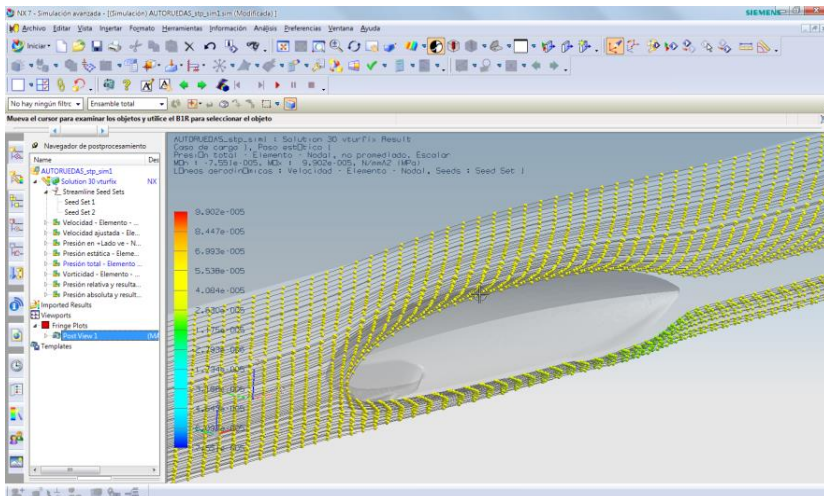


Figura 5-75 Visualización de líneas aerodinámicas con burbujas.

5.3.3 Detalle e interpretación de los resultados obtenidos

Se consignarán en éste apartado los resultados obtenidos sólo para el modelo definitivo del vehículo, y los métodos por los cuales han sido obtenidos, los que ya han sido esbozados en las referencias previas. En el apartado siguiente se detallará sobre las modificaciones que, a raíz de los resultados que las diversas simulaciones CFD entregaron, fueron incorporadas de modo progresivo al modelo, hasta llegar al modelo que fue finalmente fabricado y participó en la competición.

Coefficiente aerodinámico

El C_x se calculará mediante la fórmula correspondiente utilizando un dato clave obtenido en el análisis, más otros factores conocidos. El primer dato a considerar será la fuerza ejercida por el fluido en el eje X del vehículo, es decir el que recorre su longitud máxima. Este dato será obtenido mediante la revisión del fichero LOG generado en el análisis.

Simulación a 30 km/h – Modelo de turbulencia K-epsilon – Mallado tipo de tamaño de elemento relativo. Tiempo de cálculo 27 min. 26 seg. total (mallado + solución).

	x-comp	y-comp	z-comp	R

GLOBAL FLOW SURFACE				
CG location (m):	1.371E+00	2.511E-05	2.856E-02	
CP location (m):	1.160E+00	3.358E-03	4.762E-01	
Total Force (N):	4.365E+00	1.159E-01	2.053E+00	4.825E+00
Total Torque (N-m):	-2.070E-04	2.388E+00	-1.787E-02	2.388E+00
Shear Force (N):	1.046E+00	6.276E-04	6.139E-03	1.046E+00
Shear Torque (N-m):	2.373E-05	3.214E-02	-6.243E-04	3.214E-02
Pressure Force (N):	3.319E+00	1.152E-01	2.047E+00	3.902E+00
Pressure Torque (N-m):	-2.307E-04	2.355E+00	-1.725E-02	2.355E+00

De acuerdo a los datos obtenidos, donde el campo de presiones es lo más importante a revisar, el arrastre en X es 3,319 Newtons.

El valor del área frontal del vehículo se ha obtenido proyectando dos secciones, de manera que quede reflejada su geometría más importante:

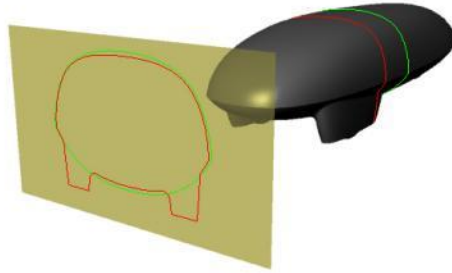


Figura 5-76 Método utilizado para la obtención del área frontal.

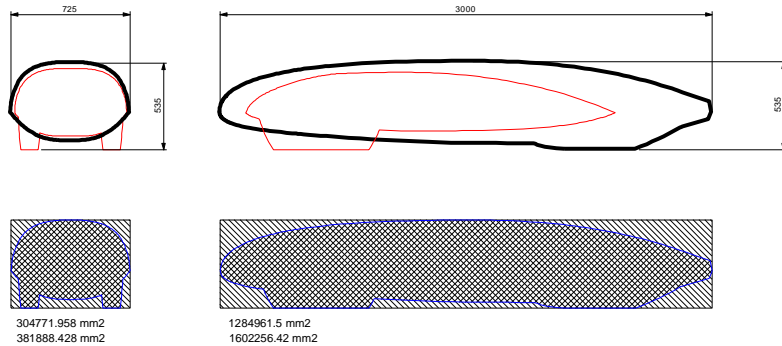


Figura 5-77 Proyecciones frontales y laterales del vehículo. Modelo previo al final.

Para el modelo final del vehículo, el área frontal equivale a 0,304 metros cuadrados, que será la unidad que se utilizará para la obtención del C_x .

Entonces de acuerdo a estos valores, se puede concluir que a partir de la fórmula para el cálculo del C_x

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} \tag{5-9}$$

F_x =Fuerza de Arrastre en X, en Newtons =3,319

ρ =Densidad del Aire en condiciones estándar, es un valor conocido de 1,204 Kg/m³

V =Velocidad del Vehículo/Aire en m/s, es decir 30 km/h=8,5 m/s, al cuadrado=72,25

S =Superficie frontal de referencia en m² = 0,304

Se tendrá que:

$$C_x = \frac{3,319N}{\frac{1}{2} \cdot 1,204 \cdot (8,5)^2 \cdot 0,304} = 0,25 \quad (5-10)$$

Este valor de 0,25 supera los obtenidos por todas las formas previas, y bajo la simulación CFD con los parámetros ajustados de la forma más precisa, es el mejor obtenido en todo el proceso. El valor de Cx no tiene relación con la velocidad a la que es medido.

No obstante lo anterior, el valor del Cx como tal, y como se apuntó en el apartado teórico al comienzo de esta tesina, no suele utilizarse como el valor a considerar como referencia, sino que al multiplicarse nuevamente por el área frontal del vehículo permite obtener el valor denominado SCx, que si servirá como referencia entre diversos modelos.

Como confirmación se realizarán idénticos cálculos considerando como velocidad del vehículo 50 km/h:

	x-comp	y-comp	z-comp	R

-				
GLOBAL FLOW SURFACE				
CG location (m):	1.621E+00	2.342E-02	-2.107E-01	
CP location (m):	1.315E+00	3.375E-02	2.729E-01	
Total Force (N):	1.159E+01	3.376E-01	7.345E+00	1.372E+01
Total Torque (N-m):	1.226E-03	7.860E+00	-1.671E-01	7.861E+00
Shear Force (N):	2.547E+00	6.616E-04	1.354E-02	2.547E+00
Shear Torque (N-m):	-1.706E-04	8.250E-02	-3.527E-03	8.258E-02
Pressure Force (N):	9.039E+00	3.370E-01	7.331E+00	1.164E+01
Pressure Torque (N-m):	1.397E-03	7.777E+00	-1.636E-01	7.779E+00

Integrando los resultados y condiciones a la fórmula ya utilizada, el resultado para el coeficiente en X es el mismo obtenido previamente a menor velocidad:

$$C_x = \frac{9,039N}{\frac{1}{2} \cdot 1,204 \cdot 14^2 \cdot 0,304} = 0,25 \quad (5-11)$$

El valor SCx obtenido en este caso es de 0,076, el que resulta equivalente al del coche de alto rendimiento PAC-Car II, que se considera una referencia en el ámbito, y que resultó ganador de la competencia de

Shell el 26 de Junio del 2005, recogiendo la experiencia de su desarrollo en el libro “The world’s most fuel efficient Vehicle” [23].

Considerando que se ha optado por sacrificar la reducción del área frontal del vehículo para obtener una adecuada maniobrabilidad de las ruedas y la mínima comodidad para el piloto, y que en la práctica se tiene un área superior a la del PAC-Car II ($0,304 \text{ m}^2$ v/s $0,254 \text{ m}^2$), obtener el mismo coeficiente aerodinámico es un éxito en el aspecto del diseño aerodinámico del vehículo.

Comportamiento del fluido alrededor del vehículo

Este aspecto resulta importante para predecir y comprender el comportamiento que tendrá el vehículo en las situaciones en que el flujo no sea completamente frontal. Para ello resulta vital comprender que así como existe un coeficiente de arrastre en la componente X de las fuerzas que inciden en el vehículo a su avance, también sucede esto en la componente Y, y en la Z. **En el caso de las fuerzas en Y deberán considerarse de modo similar a las que actúan en X, pero el área a tomar en cuenta deberá ser la proyección lateral del coche.**

Para obtener una idea completa del comportamiento del vehículo se realizarán simulaciones modificando la dirección del fluido a su alrededor, cada 30° , para obtener un coeficiente en dicha dirección. **Bastará con realizar esto en la mitad del vehículo dada su simetría.** Si bien resulta complejo definir el límite exacto dónde debe medirse C_x y donde C_y , y dónde utilizar la proyección frontal o bien la lateral, se ha optado por seguir un esquema de acuerdo a la siguiente imagen:

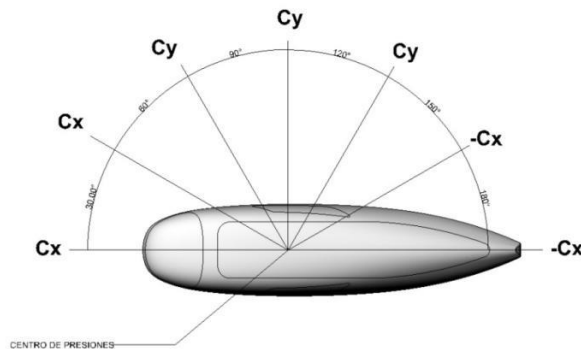


Figura 5-78 Relación que se utilizará entre los coeficientes alrededor del vehículo.

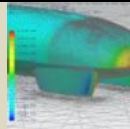
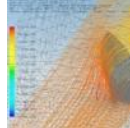
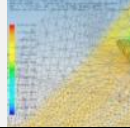
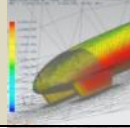
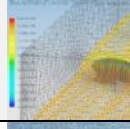
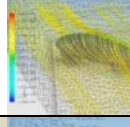
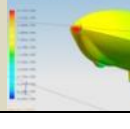
Como valores de referencia para las áreas frontal y lateral se considerarán 0,304 m² y 1,284 m² respectivamente.

El método de cálculo será mediante la misma fórmula previa, aplicando el área que corresponda de acuerdo a la imagen anterior. El valor F_x o F_y será obtenido mediante la simulación.

El resto de los valores se mantendrá constante. El punto que se usará como eje de coordenadas para el giro angular del vehículo será en éste caso su centro de presiones, determinado también en los análisis.

Las condiciones de los análisis serán a 30 km/h, con modelo de turbulencia $k-\epsilon$, y con tipo de tamaño de elemento de malla relativo con valor 0,06 para el túnel, 0,03 para las zonas de entrada y salida, y 0,015 para la superficie del fluido en contacto con el vehículo. El vehículo mismo será mallado con un tamaño de elemento del tipo malla de subdivisión, de 25 mm.

Tabla 5-5 Coeficientes de penetración del vehículo en diferentes ángulos frente al flujo [36].

Imagen del análisis	Ángulo	Área m ² a considerar (F=frontal, L=lateral)	F _x o F _y (N)	C _x o C _y	SC _x o SC _y
	0°	F 0,304	3,319 N-F _x	0,25 C _x	0,07 SC _x
	30°	F 0,304	16,280 N-F _x	1,23 C _x	0,37 SC _x
	60°	L 1,284	46,485 N -F _y	0,83C _y	1,07 SC _y
	90°	L 1,284	66,450 N-F _y	1,19 C _y	1,53 SC _y
	120°	L 1,284	47,82 N-F _x	0,85 C _y	1,10 SC _y
	150°	F 0,304	16,750 N-F _x	1,27 C _x	0,38 SC _x
	180°	F 0,304	3,305 N-F _x	0,25 C _x	0,07 SC _x

Resulta especialmente importante notar como a diferencia de los registros del comportamiento en X, en las imágenes obtenidas en el post-proceso en los diversos análisis en ángulos diferentes de incidencia del aire, se muestran claramente los vórtices y turbulencias producidas. Esto permite no solamente obtener resultados numéricos de las simulaciones, sino comprender intuitiva y visualmente como actúa el fluido, lo que reviste especial importancia en el proceso de diseño del vehículo y la propuesta de mejoras a la forma.

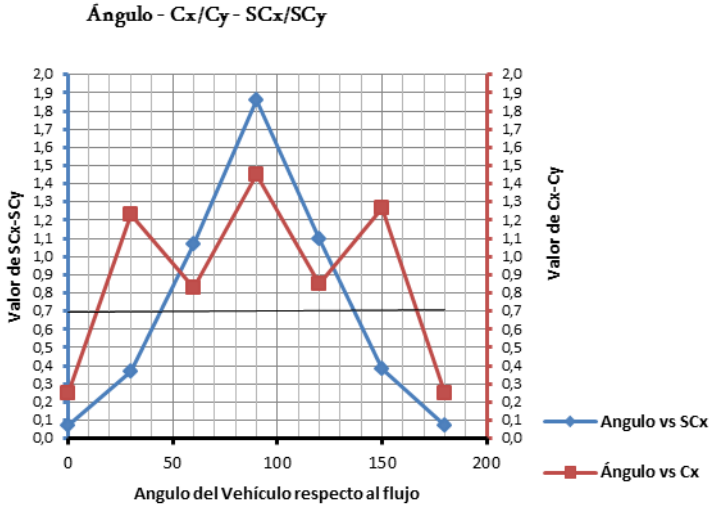


Figura 5-79 Gráfico de evolución del Cx/Cy frente al ángulo del viento.

La Figura 5-79 muestra cómo pese a que tienen una directa relación, los valores de Cx y SCx quedan condicionados por el área proyectada del vehículo y no se corresponden de modo exacto. Esto confirma el hecho de que si se quiere tener una referencia real entre dos vehículos debe considerarse el valor del SCx y no el del Cx solamente.

La curva descrita por la variación del Cx - Cy confirma además que se ha realizado su cálculo de forma correcta, utilizando las proyecciones correspondientes, pues su progresión y posterior decrecimiento obedece al comportamiento real del vehículo frente al flujo en diferentes direcciones.

Efecto suelo

En el caso de las fuerzas que actúan en Z, se ha optado como método la realización de dos simulaciones en idénticas condiciones de contorno a excepción de la posición del vehículo, ubicado junto al suelo primero y posteriormente en el centro del túnel, lo que permitirá notar cuál es el esfuerzo generado por el efecto suelo.

La diferencia entre los resultados de Fx será el valor buscado, pues equivaldrá al arrastre extra generado por el necesario “empuje hacia abajo” que produce el efecto suelo, el que desaparece al montar virtualmente el vehículo en el aire, alejado del suelo.

Tabla 5-6 Incidencia del efecto suelo en el arrastre ejercido sobre el vehículo a 30 km/h.

Posición del Vehículo	Test 1- Túnel 4500x2500	Test 2 - Túnel 3500x2000
A ras de suelo	3,306 N	3,354 N
Elevado al centro del túnel	3,102 N	3,143 N
Diferencia	0,204 N	0,211 N
<i>Condiciones de los análisis: Tipo de elemento de Mallado Fluido relativo, valores 0,06 para el fluido, 0,03 para los límites, 0,015 para el fluido en contacto con el vehículo. Análisis a 30 Km/h – Mod. Turbulencia k-ε.</i>		

De acuerdo a los resultados obtenidos, bastante coherentes y sostenidos, pese a ser solamente dos los análisis realizados, el arrastre aumenta en 0,2 N aproximadamente, exclusivamente a causa del efecto suelo sobre el vehículo.

Tabla 5-7 Incidencia del efecto suelo en el arrastre ejercido sobre el vehículo a 50 km/h.

Posición del Vehículo	Test 1- Túnel 4500x2500	Test 2 - Túnel 3500x2000
A ras de suelo	9.524 N	9.386 N
Elevado al centro del túnel	9.039 N	8.694 N
Diferencia	0.485 N	0.692 N
<i>Condiciones de los análisis: Tipo de elemento de Mallado Fluido relativo, valores 0,06 para el fluido, 0,03 para los límites, 0,015 para el fluido en contacto con el vehículo. Análisis a 50 Km/h – Mod. Turbulencia k-ε.</i>		

Para validar los resultados anteriores se han repetido los test aumentando la velocidad a 50 km/h, lo que a pesar de no tener mayor incidencia sobre el Cx del vehículo, entrega nuevos valores de referencia respecto al efecto suelo. A medida que la velocidad aumenta el efecto suelo deberá también ser mayor, lo que se confirma en los presentes análisis, que además mantienen la tendencia de los anteriores.

Las siguientes imágenes, obtenidas en el post-proceso del análisis realizado en el túnel menor, que se utilizó para la mayoría de los análisis, muestras de forma gráfica como las altas y bajas presiones actúan alrededor del vehículo, empujando hacia abajo en el caso del vehículo a ras de suelo, y de forma más equilibrada cuando el vehículo está suspendido en el aire sin que la cercanía del suelo lo afecte.

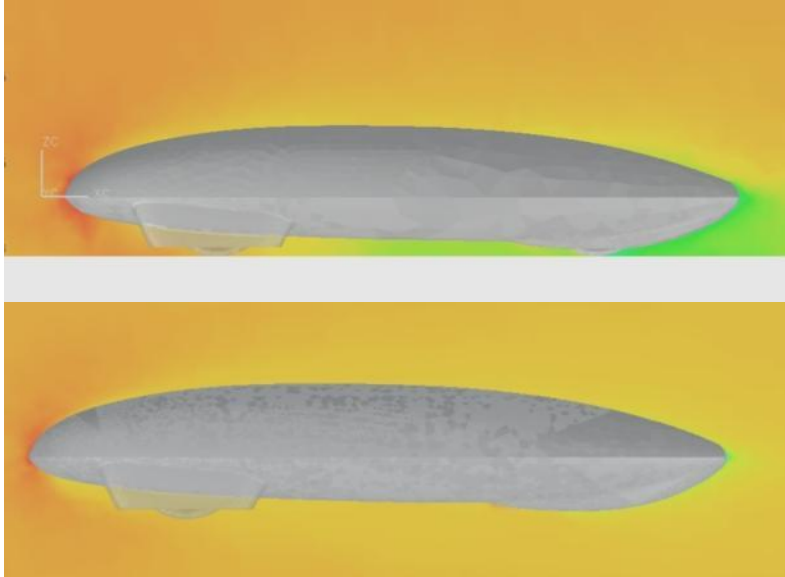


Figura 5-80 Imágenes que muestran el efecto suelo sobre el vehículo.

5.4 Propuestas para modificaciones

En la Figura 5-81 se muestra la concepción inicial del coche, modelado en CATIA, dejando ver además ciertos aspectos, que además de los factores aerodinámicos, condicionaron su diseño.

Es imprescindible que un vehículo de competición tenga una adecuada maniobrabilidad y que su piloto tenga una mínima comodidad y una excelente visibilidad. Todos estos factores se han tenido en cuenta en todo momento para el planteamiento de propuestas de modificación a los diversos modelos que se han sucedido para llegar al modelo final.

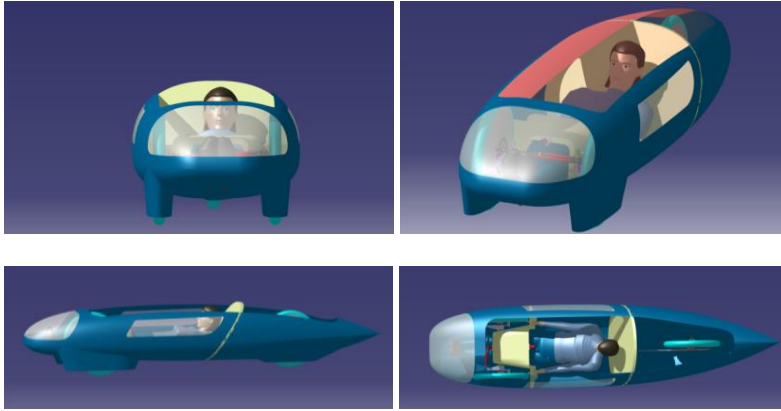


Figura 5-81 Renders del primer modelo del coche mostrando piloto y zonas de visibilidad.

5.4.1 Evolución de la forma del vehículo

Modelo 01

El primer modelo fue básicamente utilizado para pruebas con el software y el módulo de elementos finitos de NX, obteniéndose las primeras referencias de sus valores de arrastre en X y sus coeficientes. Posteriormente para la realización de la tabla comparativa, debieron realizarse nuevos análisis utilizando condiciones de contorno idénticas para éste y los demás modelos. Condiciones que el momento de la realización de los primeros análisis no se encontraban plenamente definidas.

Características de forma

- Este modelo en particular poseía una zona posterior terminada de forma totalmente aguda, como muestra la Figura 5-82, lo que dirigía correctamente el flujo, manteniéndolo prácticamente laminar hasta escapar del vehículo, pero ese tipo de formas en la práctica resulta compleja de fabricar y más aún de mantener en buenas condiciones por lo delicado de su geometría.
- Poseía también protector de la rueda trasera que se caracterizaba por ser una geometría que rompía bruscamente la continuidad de la forma del cuerpo. Esto rompía también el flujo de aire alrededor del vehículo, generando vórtices y presiones que tendían a restar penetración.

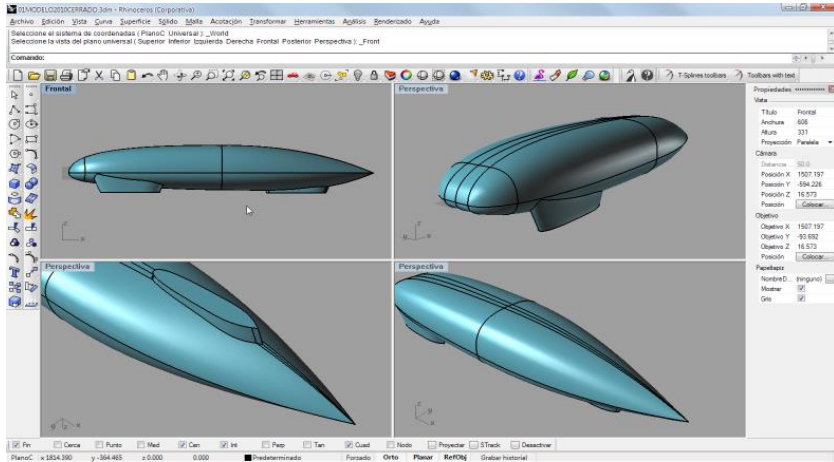


Figura 5-82 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 01.

- La zona frontal del vehículo era ancha y poseía un frente de ataque plano que ofrecía una superficie de “choque” con el aire demasiado amplia para lo deseado.
- El modelado presentaba importantes defectos de continuidad de las superficies de la zona superior y frontal del coche, lo que también provocaría un menor rendimiento aerodinámico.

Modelo 02

El segundo modelo también fue provisto por el equipo del vehículo, y corregía algunos defectos de modelado y las zonas más complejas de fabricar que poseía el primero.

Características de forma

- Incorporaba como principal diferencia una nueva geometría de la zona del protector de la rueda posterior, más ancho y “pegado” a la forma del cuerpo principal, pero aún bastante amplia y que rompía con la curvatura natural de la forma.
- Al centro de éste protector sobresalía otro protector más pequeño que seguía el mismo patrón del modelo anterior.
- La terminación de la zona posterior se varió, quedando menos aguda, pero en esta ocasión presentaba aristas rectas que también contribuían a generar turbulencias en el flujo.

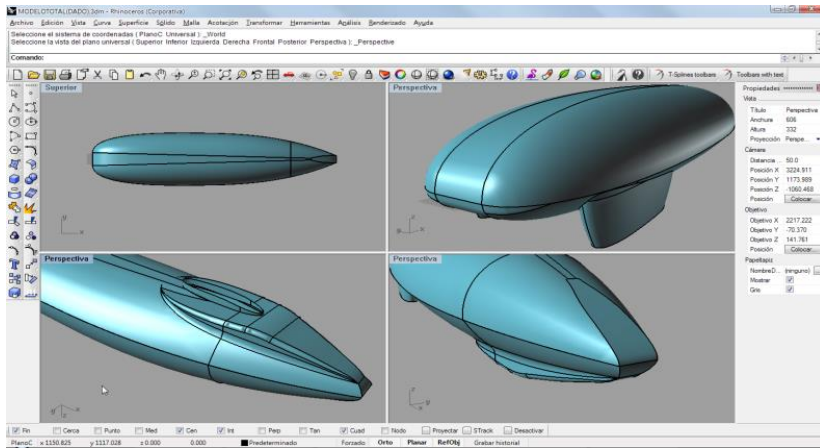


Figura 5-83 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 02.

Modelo 03

El modelo 03 constituía un re-modelado del anterior

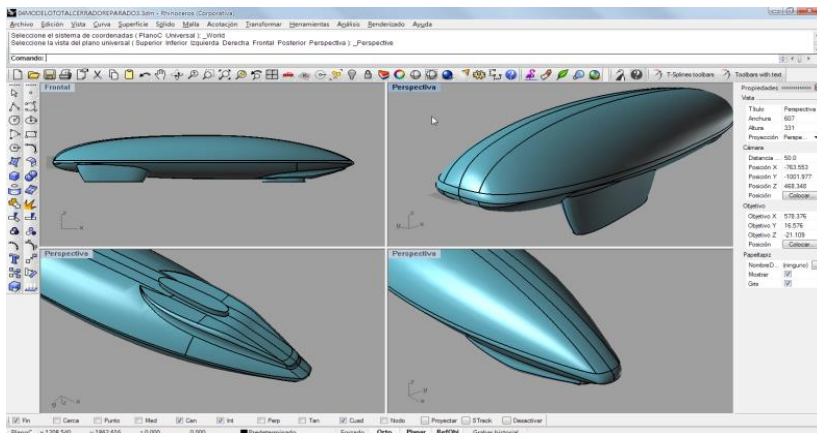


Figura 5-84 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 03.

Características de forma

- La zona de la rueda posterior se remodeló para hacerla más regular y suave, pero sin modificar su geometría principal, que seguía sin ser adecuada a raíz de los cambios en el flujo que mostraban los análisis realizados hasta ese punto.
- Se eliminó la arista que recorría la forma en todo su perímetro, integrando un redondeo suave.

- Este redondeo integraba también la zona final del vehículo en una forma más orgánica y suave que contribuía a la adecuada recepción del flujo en todo el perímetro del coche.
- Se remodeló totalmente la parte superior, reduciendo a 4 superficies limpias la serie de “parches” que habían hasta el momento. A la poste ésta modificación comenzaría a integrarse a los posteriores modelos pues permitía una superficie capaz de incidir en mucho menor medida en el flujo de aire.
- Se rebajó el perfil de ataque de la zona frontal, haciéndola más aguzada para lograr un mejor coeficiente de penetración.

Modelo 04

Este modelo mantenía la geometría principal del Modelo 02, pero modificaba la zona posterior.

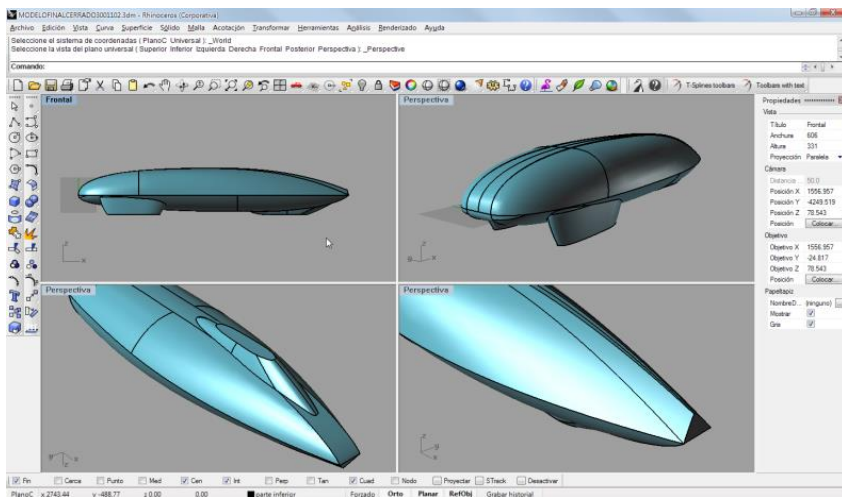


Figura 5-85 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 04.

Características de forma

- La zona del protector de la rueda trasera pasaba a integrarse más suavemente a la geometría principal, aunque aún presentaba bordes rectos y zonas no completamente integradas.
- La zona posterior se rediseñó con una integración adecuada en la parte inferior del vehículo y un corte recto en la superior, junto a un

nervio central. Este nervio parecía una buena idea pues aumenta la rigidez de la carrocería lo que permitía un menor espesor de material en su fabricación, aunque esto estaba en buena medida logrado por la condición de monocasco de la forma.

Modelo 05

El modelo 05 corresponde a una propuesta que integraba algunas correcciones de modelado realizadas arreglo a los recientes análisis realizados.

Características de forma

- En la zona que unía las superficies que conformaban la parte frontal del coche con las que formaban la posterior se integró una superficie de transición que permitió una unión continua (por curvatura) de todos los “parches”. La diferencia entre la zona del protector de la rueda trasera y el remate del vehículo generaba una zona donde el fluido “penetraba” antes de fluir hacia el final de la forma como se ve en la Figura 5-80.
- También se integró un redondeo entre el protector de la rueda trasera y el cuerpo del vehículo, y redondeos en las aristas rectas que se encontraban en la zona trasera del vehículo.

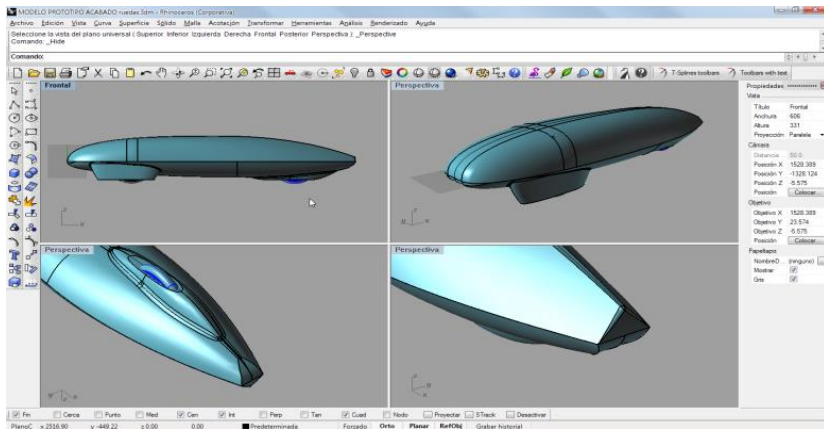


Figura 5-86 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 05.

Modelo 06

El modelo 06 fue propuesto integrando todo lo adquirido hasta ese punto, a través de los análisis CFD, sus resultados numéricos y la observación del comportamiento del flujo de modo animado, lo que resultó un factor clave para implementar mejoras que provocaran diferencias objetivas en la forma y su desempeño aerodinámico.

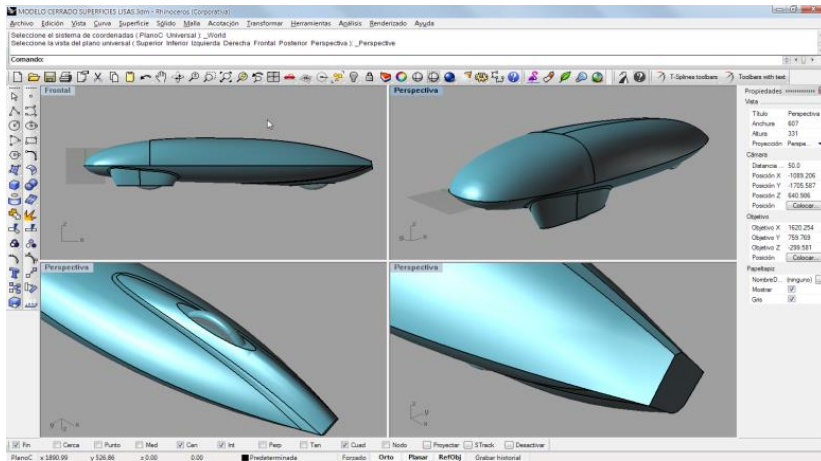


Figura 5-87 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 06.

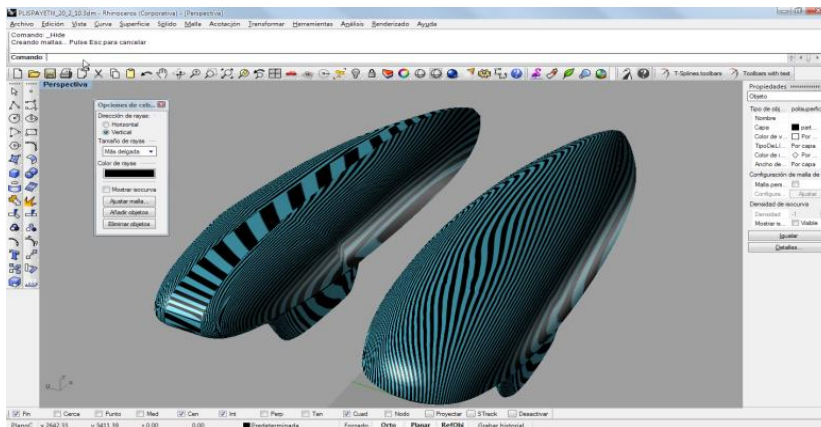


Figura 5-88 Comparativa de la continuidad entre los modelos 04 y final.

Características de forma

- El modelo modificó la geometría frontal, manteniendo el perfil más agudo propuesto previamente, pero además se agudizó también su

forma vista en planta, eliminando la zona recta que presentaban los modelos previos, lo que distribuiría el flujo de mejor manera, presentando una menor superficie de choque.

- La zona se modeló con una sola superficie, lo que garantizaba una suavidad total de la forma, tanto aerodinámicamente como para efectos de fabricación automatizada.
- La zona del protector de la rueda trasera también se rediseñó por completo, integrándola a la forma ya no sólo a través de redondeos sino de una coherencia formal mayor, lo que mantenía el flujo constante y sin sobresaltos.
- La zona se integraba después al final del vehículo. El que aún presentaba un corte recto como remate.

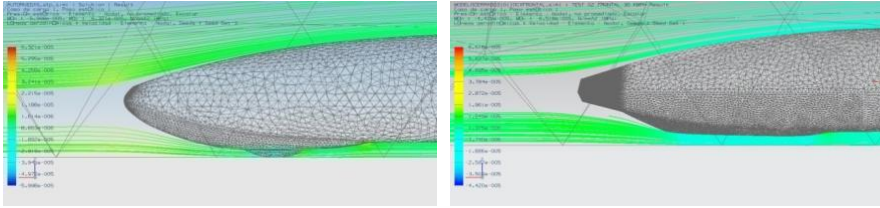


Figura 5-89 Comparación entre el comportamiento del fluido en la zona posterior en los modelos 04 y final. Nótese la diferencia de presiones y la continuidad de las líneas de flujo.

Modelo definitivo

El modelo definitivo recoge todas las mejoras previas integradas al vehículo y a la luz de los análisis realizados es el que presenta un mejor rendimiento aerodinámico, confirmando que el proceso de desarrollo se ha visto beneficiado por la realización de las simulaciones CFD y las propuestas planteadas.

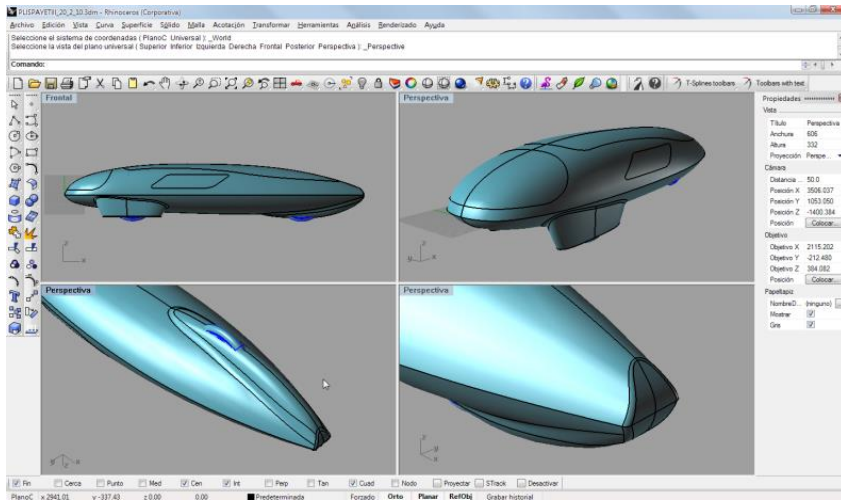


Figura 5-90 Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 – Modelo Definitivo.

Características de forma

- La zona frontal presenta un ángulo más agudo en todas sus proyecciones, y está construida con superficies unitarias que aseguran su continuidad por curvatura en toda la geometría como muestra la Figura 5-88.
- Toda la forma se ha remodelado eliminando toda superficie innecesaria y construyéndola con la menor cantidad posible de “parches”
- La zona del protector de la rueda trasera se ha mantenido integrada, acortándola ligeramente respecto al modelo anterior.
- El remate posterior de la forma se ha suavizado y adaptado a los movimientos del flujo de aire, permitiendo que este fluya más suavemente al despegarse del vehículo, como muestra la Figura 5-89.
- Se han integrado las ruedas y ventanas para confirmar la adecuada movilidad de las primeras al situarse en su posición de montaje, y para revisar que la adecuada visibilidad para el piloto se pueda lograr mediante las zonas de ventanas que posteriormente serán de material transparente.

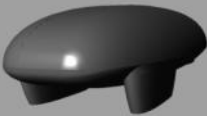
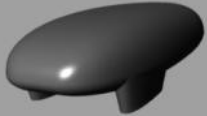
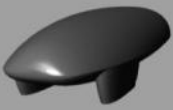
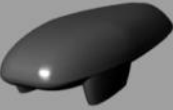

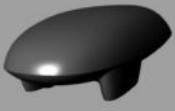
5.4.2 Comparación de los resultados de las simulaciones CFD para cada uno de los modelos propuestos

La Tabla 5-8 muestra gráfica y numéricamente la evolución de la forma del coche, con las modificaciones introducidas y descritas entre el apartado 5.4.1 .

Si bien se han privilegiado las modificaciones basadas en criterios aerodinámicos obtenidos a partir de la simulación CFD en la selección de los modelos para la construcción de la presente tabla, pues evidentemente resulta improcedente incluir la totalidad de las modificaciones realizadas, a veces casi imperceptibles, se incluyen algunos cuyo principal criterio de modificación ha sido mejorar la continuidad de las superficies, lo que tiene también una incidencia importante en el rendimiento aerodinámico del vehículo.

La Tabla 5-8 registra los valores C_x y SC_x , el arrastre en X , y el área frontal de cada uno de los modelos. Debe notarse que a pesar de que existe una mejora gradual de los parámetros, no existe una coincidencia plena entre una menor área frontal y un menor C_x , pues éste coeficiente depende en mayor medida de la forma total del vehículo, de la calidad y continuidad de sus superficies y la suavidad de sus formas. Se adjunta una serie de capturas desde el software con el que se modeló el vehículo, Rhinoceros 3D v4.0, con los diferentes modelos.

Tabla 5-8 Evolución de la forma del vehículo, y sus coeficientes de penetración.

Modificación de la Forma		Valor del Área frontal	Fx	Cx	SCx
1		0.316 m ²	3.991 N	0.291	0.091
2		0.305 m ²	4.151 N	0.313	0.095
3		0.303 m ²	3.968 N	0.302	0.091
4		0.307 m ²	3.497 N	0.262	0.080
5		0.306 m ²	3.463 N	0.261	0.079
6		0.304 m ²	3.319 N	0.251	0.076

5.5 Modelo definitivo

Una vez que se contó con el modelo definitivo, éste fue posteriormente exportado y utilizado para la creación de los renders que se muestran en este apartado, los que se generaron teniendo como objetivo una adecuada presentación gráfica.

5.5.1 Dimensiones definitivas del modelo final

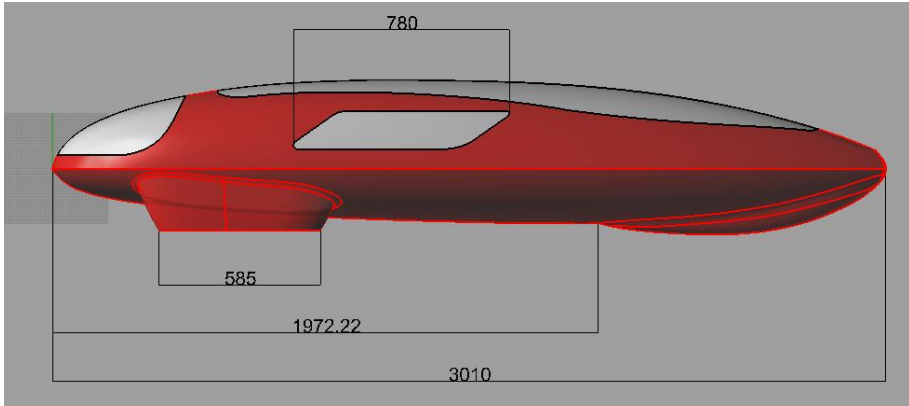


Figura 5-91 Vista alzado acotada.

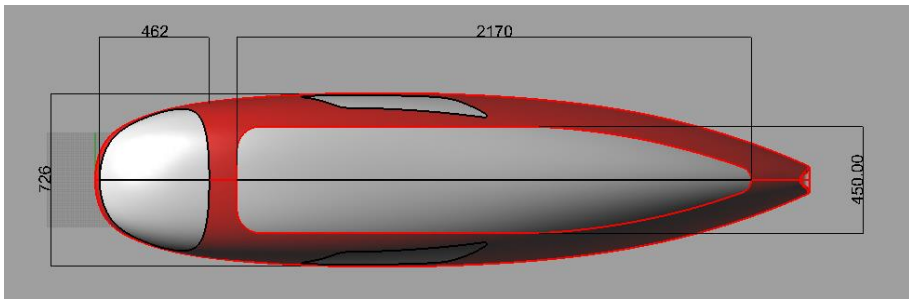


Figura 5-92 Vista planta acotada.

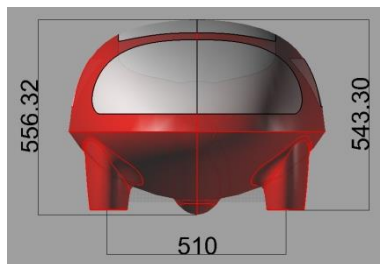


Figura 5-93 Vista frontal acotada.

5.5.2 Representación foto-realista del modelo final

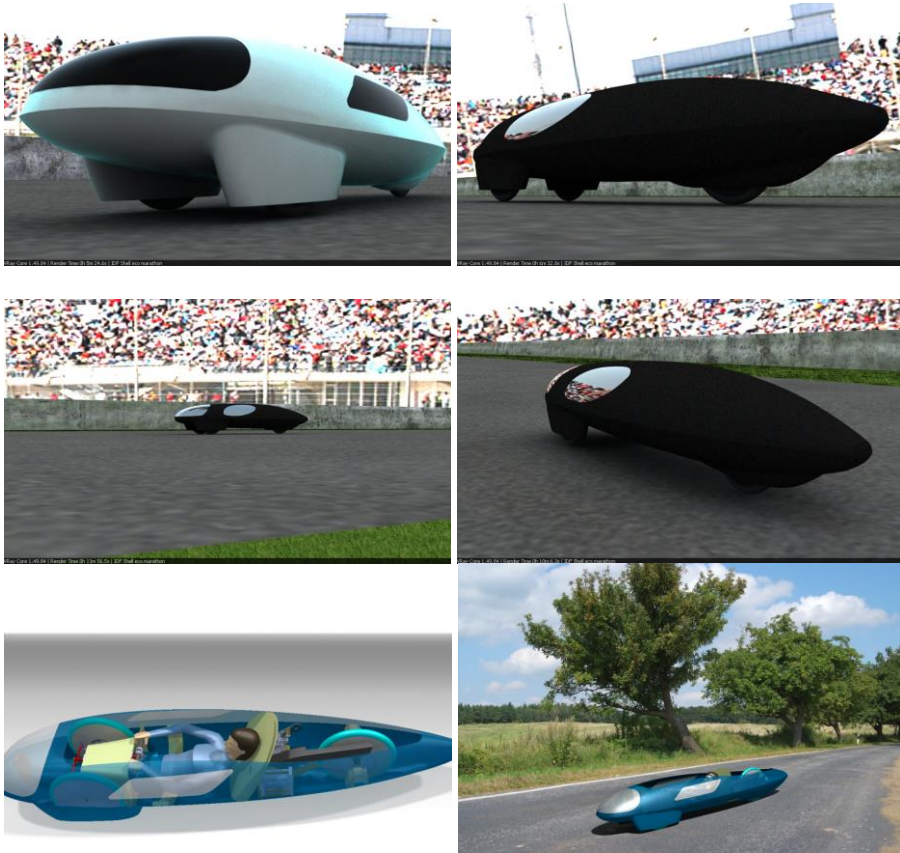


Figura 5-94 Diversos renderizados foto-realistas.



Figura 5-95 Imagen del IDF-10 en pista, en la Shell Eco-Marathon Europe 2010.

5.6 Ergonomía

Aunque el tiempo real de conducción para un piloto en este vehículo es mínimo en comparación con los coches de carretera cotidianos, debe realizarse un estudio ergonómico mínimo. El objetivo no es más que proporcionar un mínimo de confort y garantizar una utilización óptima del espacio interior del vehículo, pero principalmente para cumplir con algunas normas técnicas sobre la visión del piloto. Como resultado de este estudio se obtendrá, principalmente el diseño de la ventana del vehículo y el alcance de los mandos al piloto.

Se ha introducido en el programa dos “dummies” con las medidas de nuestros pilotos, para así verificar que los estudios realizados con el dummy que exige la normativa se adaptan a la antropometría de nuestras pilotos.

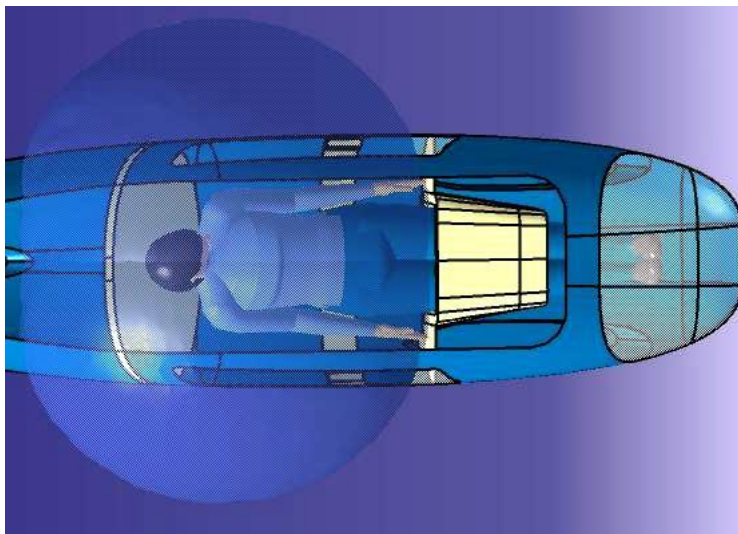


Figura 5-96 Simulación del alcance de las manos del piloto.

Es importante determinar la colocación de los mandos que el piloto deba accionar (por ejemplo: dirección, interruptores de motor, bocina, etc.). La simulación nos ofrece una visión del alcance de ambas manos, izquierda y derecha, del piloto en el puesto de conducción.

El “dummy” utilizado para la simulación del alcance del piloto es el mismo que fue empleado posteriormente para el cálculo del campo de visión apartado 5.7. Este cálculo muestra que el piloto será capaz de abrir la “escotilla” del vehículo y proporciona información importante de su colocación para el posicionamiento de los elementos de conducción.

5.7 Diseño de las ventanas

Comenzando con el diseño de las ventanas, la primera tarea es determinar exactamente lo que el piloto tiene que ver y poner ésto en relación con el diseño del monocasco. El estado de la regulación técnica es el siguiente: “An inspector will check visibility of the vehicles in order to assess on-track safety. This inspector will check good visibility with seven 60cm high blocks spread out every 30° in a half-circle, with a 5m radius in front of the vehicle.”

Una representación de este ensayo se realizó en un entorno 3D, como puede verse en la Figura 5-97.

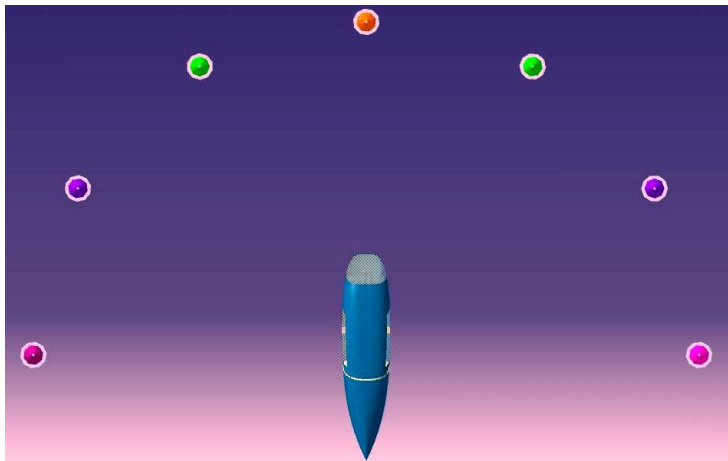


Figura 5-97 Recreación de la prueba de visibilidad.

Por supuesto, ésto se puede comprobar fácilmente con el producto terminado. La determinación del tamaño de las ventanas durante la fase de diseño resulta ser mucho más compleja. Mediante el uso de los módulos de Catia, diseño ergonómico y análisis hace que sea posible colocar un piloto virtual (dummy) en el prototipo virtual. Una mujer del décimo percentil de la población fue elegido con una altura de aproximadamente 1,55 m y un peso de alrededor de 50 kg. Una de las ventajas que ofrece Catia es poder simular la visión del “dummy”.

El diseño conceptual de las ventanas fue creado y a continuación, fue adaptada al tamaño y ubicación, de acuerdo a los datos recibidos de la prueba de visibilidad virtual.

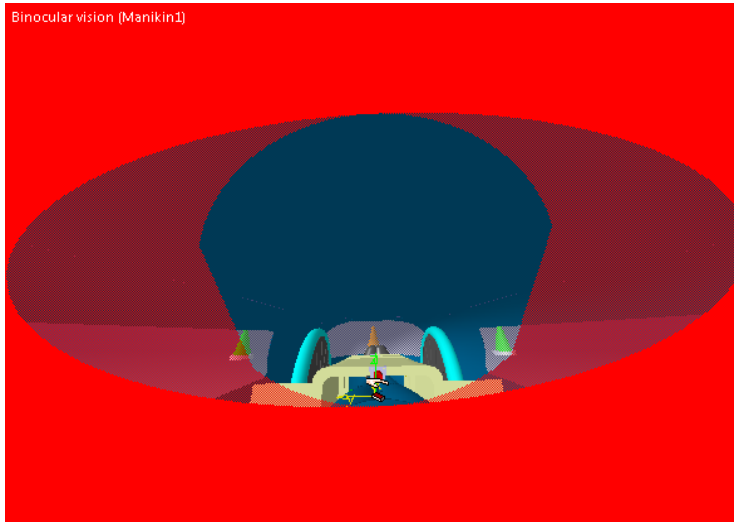


Figura 5-98 Visión del piloto. Vista al frente.

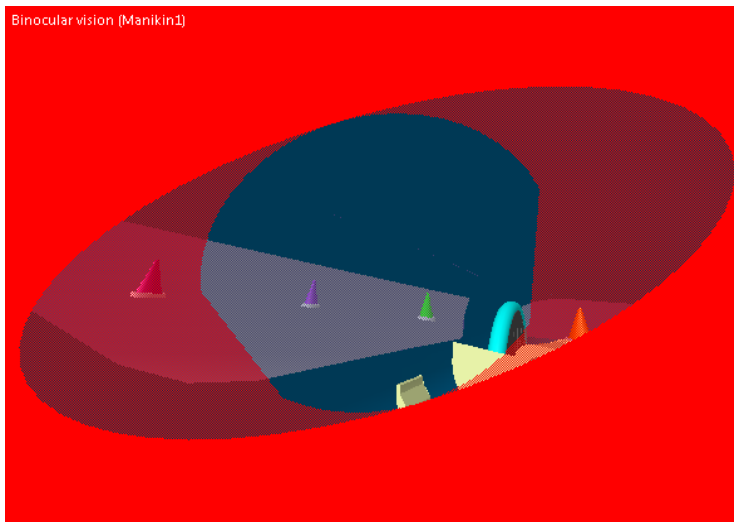


Figura 5-99 Visión del piloto. Vista lateral.

La optimización de las ventanas garantiza un campo de visión que es suficiente para la inspección. Tal y como establece la normativa, los 7 conos pueden ser vistos desde el interior del monocasco sin ningún problema. Por supuesto, las ventanas deben ser lo más pequeñas posible para que no pongan en peligro la resistencia y rigidez del monocasco.

***Capítulo 6: PROCESO DE
FABRICACIÓN DE LA
CARROCERÍA***

6 PROCESO DE FABRICACIÓN DE LA CARROCERÍA

6.1 Modelado CNC

El comienzo del proceso de fabricación es la preparación de un modelo a escala real, del cual sacar el molde mediante un negativo directo. Gracias a los programas CAM, se puede implementar con un error de décimas de milímetro el archivo CAD del prototipo. El mecanizado mediante control numérico se lleva a cabo en varias piezas, pegando las partes después.

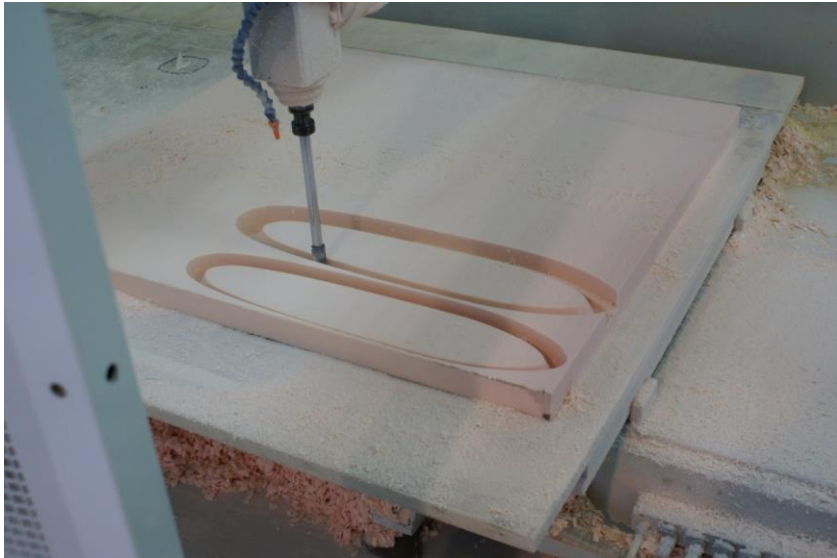


Figura 6-1 Mecanizado de los cubre ruedas.

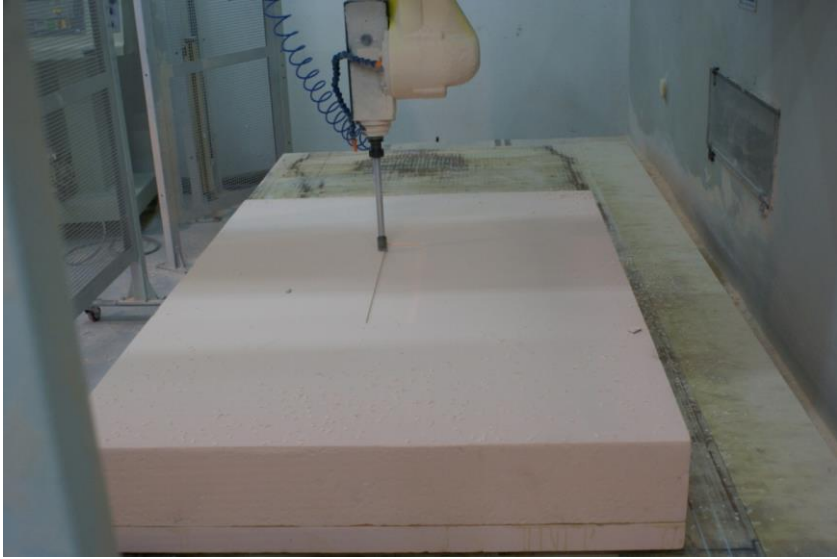


Figura 6-2 Comienzo del mecanizado.

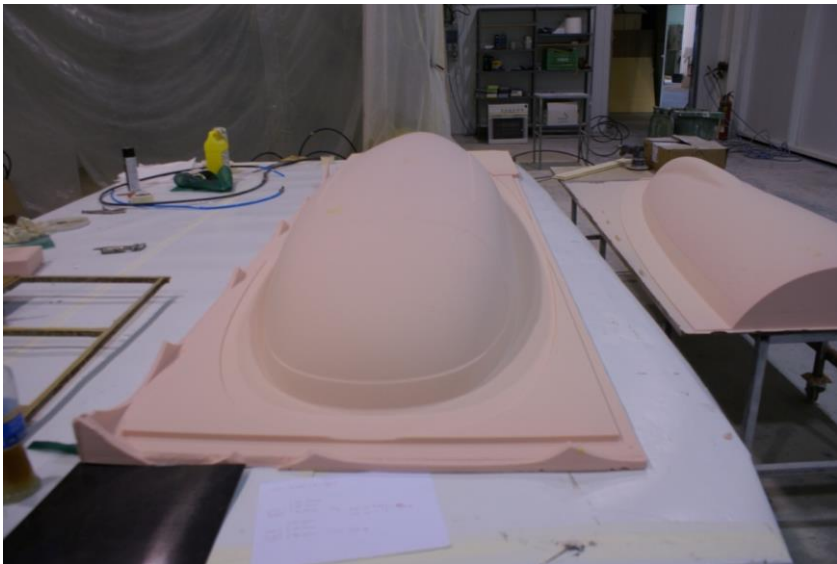


Figura 6-3 Vista de las espumas mecanizadas por CNC.

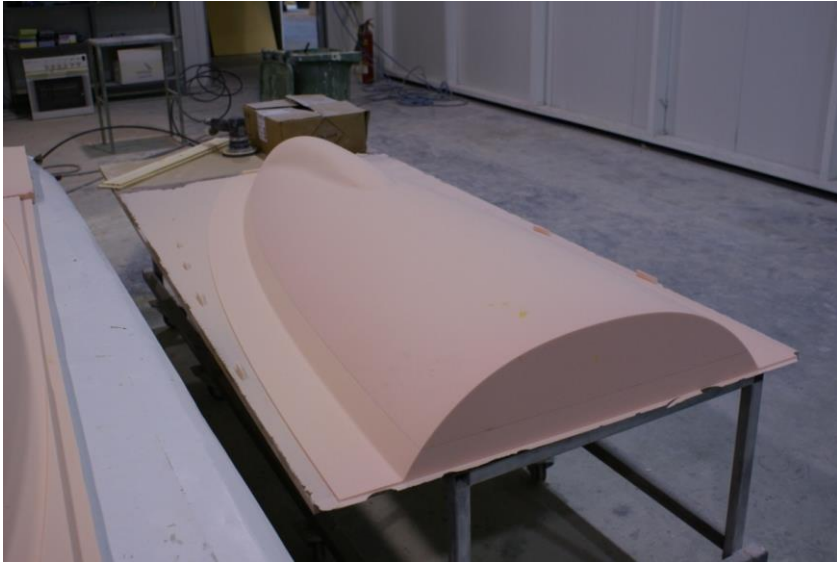


Figura 6-4 Vista de la parte trasera inferior.



Figura 6-5 Mecanizado terminado.

6.2 Fabricación del modelo

Una vez pegadas las diferentes partes, hay que ajustar el modelo, de esta manera no habrá que refinar el molde geoméricamente hablando. Se le

aplica una imprimación para tapar el poro de la espuma y se pule hasta conseguir una superficie lisa y continua, con un efecto espejo. También es necesario ajustar las partes que después serán de contacto y cierre entre la tapa, las ventanas y el monocasco. Este ajuste se hace con cera calibrada.



Figura 6-6 Ajuste de bordes con cera calibrada.



Figura 6-7 Pulido de la imprimación.



Figura 6-8 Detalle del acabado superficial.

6.3 Construcción de los moldes

Con el modelo a escala real acabado, la construcción del molde resulta muy sencilla. El modelo se ha conservado en dos partes, las mismas que va a tener el molde, la inferior y la superior.



Figura 6-9 Modelo de espuma parte inferior.

El proceso de fabricación del molde consiste en cubrir con fibra de vidrio ambas partes del modelo, superior e inferior. Con una pistola se va proyectando la fibra sobre la superficie pulida, este acabado se copiará sobre la fibra que conforma el molde y se obtendrá un acabado de molde muy bueno, esto ahorra tiempo del operario en pulir y ajustar el molde después. Estas operaciones se suelen realizar sobre el modelo si es posible porque resulta más cómodo de trabajar al operario y conlleva menos horas de trabajo.

Una vez desmoldeada la fibra, se trabajara un poco más la superficie interior si fuera necesario, dejando un brillo espejo para que no haya defectos en modelos posteriores y para facilitar el desmoldeo.

El último paso para concluir el molde es montar las dos partes, rellenar y ajustar la línea de partición del mismo y atornillar las partes entre sí para que no se muevan mientras se realiza la colocación de las telas y la infusión.



Figura 6-10 Colocación de la fibra de vidrio para la creación del molde.



Figura 6-11 Interior de la parte inferior del molde.



Figura 6-12 Pulido a espejo del interior del molde. Interior de la parte superior.



Figura 6-13 Vista general del molde acabado.

6.4 Proceso de infusión

En el proceso de fabricación con materiales compuestos con molde abierto existen 2 tipos de fabricación fundamentalmente la laminación y la infusión.

En el proceso de laminación las telas de material compuesto se depositan sobre el molde impregnadas en resina, y se van añadiendo capas de tela y resina impregnadas hasta conseguir el espesor deseado. En este proceso la cantidad de tela es controlada, pero la cantidad de resina no es posible controlarla dado que se realiza de forma manual, aproximadamente se aplica 2 veces más resina en peso que tela.

En el proceso de infusión las telas se depositan y orientan en el molde secas. El molde es cerrado por una bolsa hermética y un conjunto de tuberías y rejillas de difusión, a través de las cuales se generará vacío en el interior de la bolsa. Es entonces cuando la resina se introduce a través algunos de los tubos y se mantiene el vacío por otros, de este modo se consigue el mojado del conjunto de las telas depositadas en el molde.

La ventaja más notable del proceso es el control casi absoluto de la cantidad de resina o matriz que se le añade a las telas. Si el proceso finaliza con éxito, la calidad del producto supera con creces al manual. El pre-proceso es más lento y conlleva más trabajo, pero la fabricación de la pieza es más rápida que el manual.

La cantidad de resina utilizada en peso igual o menor que el peso de la telas empleadas, de este modo podemos controlar el peso de las piezas generadas con este proceso.

Se empleó este método dada la necesidad de conseguir un prototipo los más ligero posible.

La elección de este proceso se lleva a cabo después del estudio de diversos artículos como los de Ouagne et al [37] sobre proceso de permeabilidad de las fibras, Leclerc et al sobre proceso de impregnación de las fibras [38], García et al sobre la simulación del proceso de infusión [39], Ghnatios et al sobre optimización del proceso de simulación computacional de los materiales compuestos [40] y Alfonso et al sobre la aplicación del método de infusión a la fabricación de materiales compuestos biocomposites [41].

El desarrollo del proceso consiste en una serie de pasos:

- Tratamiento del molde para después conseguir un fácil desmoldeo, en nuestro caso también se le aplica un tratamiento para el acabado superficial.
- Colocación de manera adecuada de las telas de carbono en el molde.
- Colocación de una guía (tela mallada con celdillas). Esta malla permite que la resina fluya una vez se le aplique vacío.
- Colocación de films plásticos cubriendo las telas y malla, y sellado de las mismas contra el molde.
- Colocación de los tubos por los que se va a inyectar resina y por los que va a salir el aire.



Figura 6-14 Corte de la tela de carbono tras hacer el patronaje.

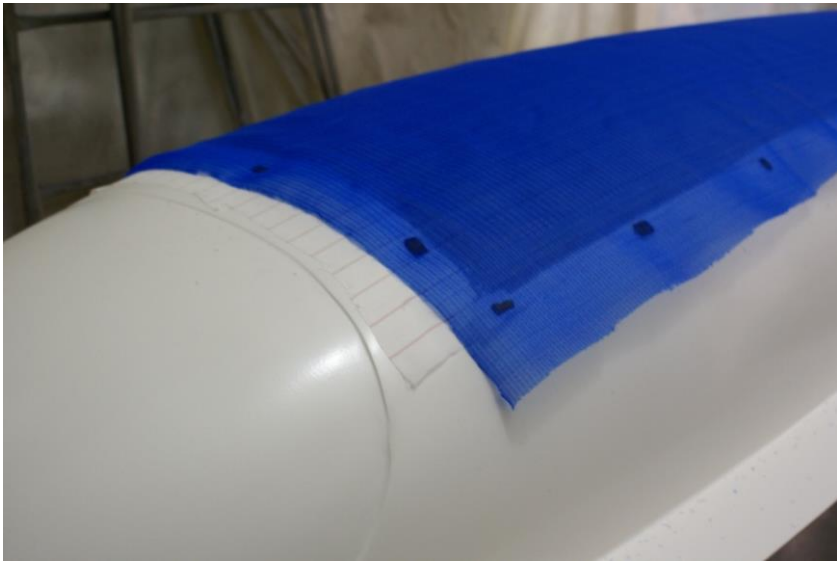


Figura 6-15 Malla para que corra la resina.



Figura 6-16 Colocación del film.



Figura 6-17 Vista general de los tubos para la infusión.



Figura 6-18 Vista general del molde mientras se realiza la infusión.

Todos estos pasos enumerados anteriormente conforman el pre-proceso de infusión. La infusión en sí consiste en la aplicación de la resina provocando vacío en la bolsa que hemos formado en las telas, de esta manera controlamos la cantidad de resina que entra en las telas y mediante la ayuda del vacío conseguimos distribuirla casi uniformemente por todas las partes del molde.

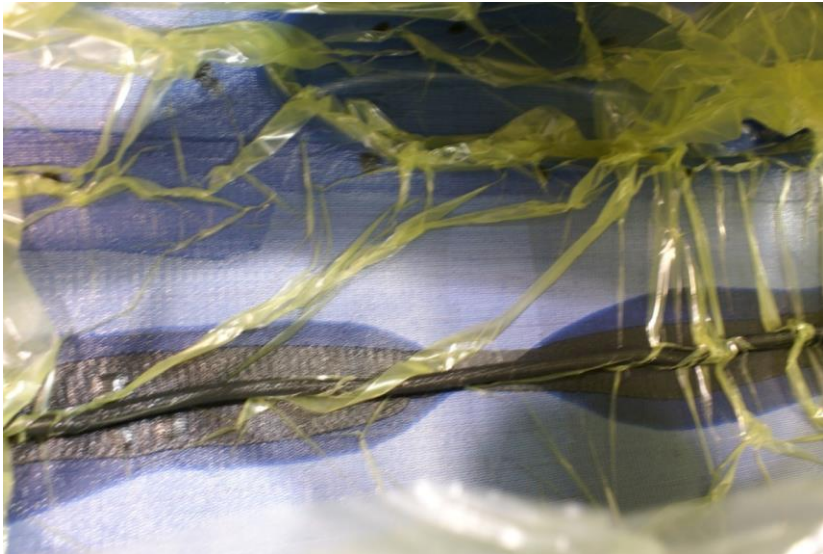


Figura 6-19 Frente de avance de la resina.



Figura 6-20 Frente de avance de la resina.



Figura 6-21 Frente de avance de la resina.



Figura 6-22 Detalle de uno de los tubos que efectúa vacío.



Figura 6-23 Vista general del molde mientras se realiza la infusión.

El proceso finaliza una vez ha solidificado la resina epoxi. El beneficio de este proceso es que no es necesario un autoclave para curar la resina. El pre-proceso se realiza en un horno normal, manteniendo el vacío en el molde. Pasado el tiempo de curado, ya se encuentra la pieza en predisposición para ser desmoldeada.



Figura 6-24 Tapa del prototipo en el horno mientras cura la resina.

El carbono se presenta en la industria en forma de tela que se sirve en rollos. Como tejido es manejable y no ofrece resistencia alguna. Es necesario realizarle un procesado para que el carbono adquiera la apariencia y resistencia a la que se está acostumbrado a ver. En este caso el proceso ha sido la infusión y el material que ha funcionado como matriz para la tela de carbono ha sido una resina epoxi, en particular el Prime 20LV v6, de la casa SP Gurit.

Esta resina es específica para el proceso de infusión. La gran particularidad que tiene se encuentra en el post-proceso ya que en el curado no necesita autoclave. El curado se realiza en un horno cualquiera a 50°C durante 16 horas. Otra ventaja por la que ha sido seleccionada esta resina es por su bajo peso y su alto módulo de resistencia.

El peso del monocasco es de 6'2 kilos y el peso de la carrocería completa de 11'5 kilos. El peso de la carrocería anterior era de 42 kilos, hemos reducido el peso casi a una cuarta parte que el modelo anterior.



Figura 6-25 Carrocería desmoldeada a falta de barnizado de protección.



Figura 6-26 Carrocería desmoldeada, se puede apreciar la tapa superior sin recortar.



Figura 6-27 Carrocería dispuesta para la ubicación de piezas interiores.

Capítulo 7: RESULTADOS

7 RESULTADOS

7.1 Resultados

La utilización del método descrito en el diseño y la fabricación del prototipo 2010 permitieron los siguientes avances:

1. Reducir la carga aerodinámica entre el vehículo existente y el actual en un **50 %**.
2. Mejorar la penetración lateral.
3. Reducir el peso del vehículo en más de 22 kilos de un total de 39 kg actual frente a los 64 kg precedentes, una disminución de **39 %**.
4. Aumentar la visibilidad del vehículo en un **30 %**.
5. Aumentar nuestra marca de **544 km por litro** en 2009 a **891 km por litro** en 2011 (**39 %**), ambas a velocidad media de 30 km/h en la Shell Eco-Marathon Europe Lausitz, esta marca supone el record de España de bio-combustibles.
6. Permitiendo ser tercer mejor equipo en la categoría Etanol y 20º mejor equipo en motores de combustión interna (2011).
7. En el año 2012, nuestro equipo ha participado en tres carreras de bajo consumo:
 - a. Madrid Eco-City quedando en primer puesto en la categoría Etanol y en motores de combustión.
 - b. Shell Eco-Marathon quedando 5º puesto en la categoría etanol y 19º en motores de combustión con una marca de **831 km/l** en el circuito urbano de Rotterdam (Países Bajos), con media de velocidad 25 km/h.
 - c. Murcia Solar Race quedado 3º en la categoría etanol.

8. En el año 2013, nuestro equipo ha participado en la Shell Eco-Marathon quedando 6º puesto etanol y 16º en motores de combustión con una marca de **973 km/l** en el circuito urbano de Rotterdam (Países Bajos), con media de velocidad 25 km/h.

Imágenes del vehículo finalizado.



Figura 7-1 Vehículo ensamblado.

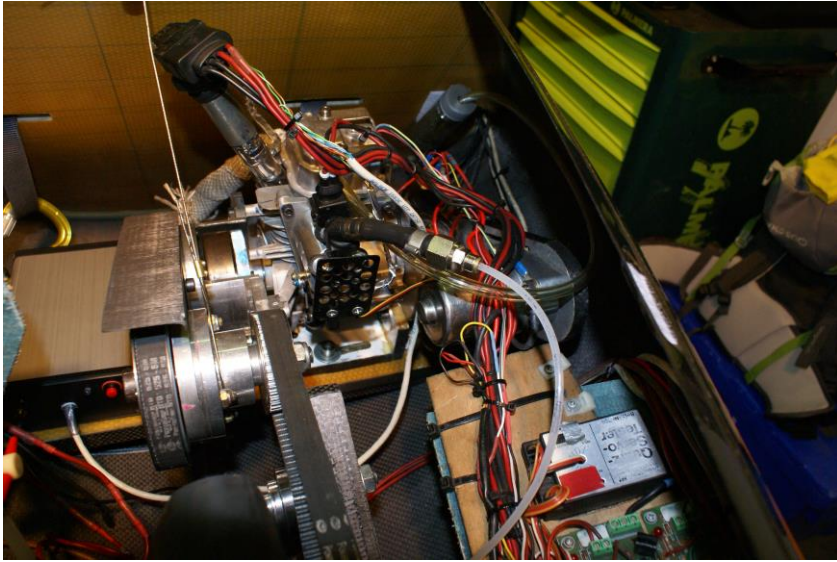


Figura 7-2 Detalle ubicación del motor.

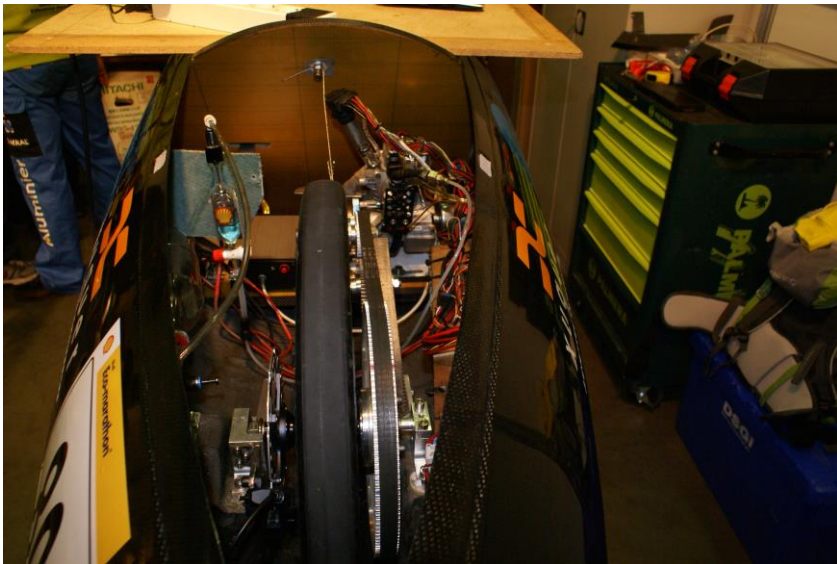


Figura 7-3 Detalle habitáculo motor y eje trasero.



Figura 7-4 Detalle mangueta delantera izquierda.

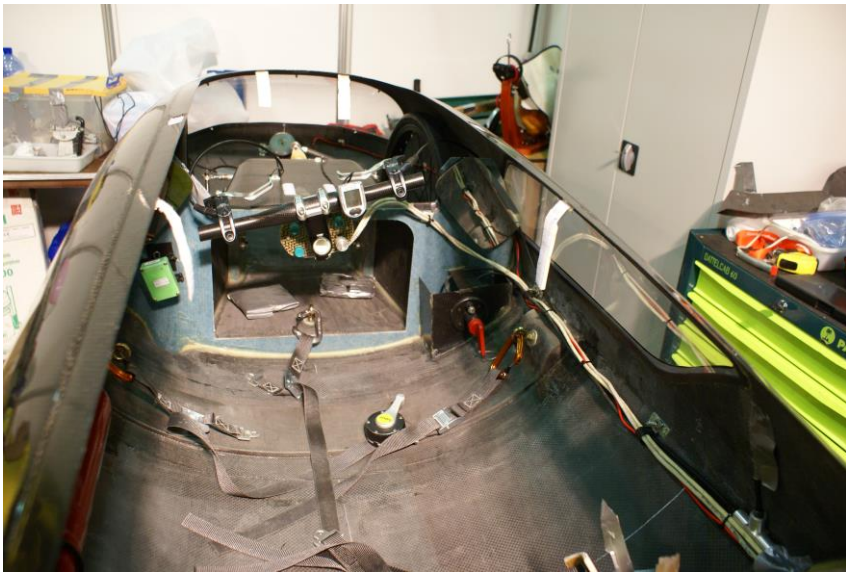


Figura 7-5 Detalle habitáculo del piloto.



Figura 7-6 Vista de la posición del piloto.



Figura 7-7 Vehículo sobre banco de potencia a la rueda.



Figura 7-8 Vehículo preparado para salir a pista.



Figura 7-9 Vehículo en pista en la Shell Eco-Marathon 2013.

7.2 Publicaciones

Ponencias presentadas en el 13th European Automotive Congress EAEC 2011 (ISSN 9788461517947) de Junio de 2011.

ESTABLISHMENT METHODOLOGIES FOR CFD ANALYSIS USING NX, AND PROPOSED FOR RE-DESIGN THE CAR BODY FOR COMPETITION “SHELL ECO-MARATÓN 2010”.

Jacob Dazarola, Rubén; Colomer Romero, Vicente; Martínez Sanz, Antonio. V.; Plá Ferrando, Rafael

Universidad de Valparaíso Chile, Design and Manufacturing Institute of the Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, 46022 Valencia, Spain. vicoro@mcm.upv.es

Keywords: CFD, NX, computational fluid dynamics, aerodynamics, high efficiency car.

Abstract

The present study focuses in the establishment of a procedure for the accomplishment of analysis of aerodynamic computational performance by means of the software Siemens NX and, on the basis of the results obtained in the above mentioned analyses, in the exposition of offers of optimization of the body of the vehicle for the competition "*Shell eco marathon 2010*" that develops the *Institute of Design and Manufacture of Universidad Politècnica of Valencia*.

To achieve the objectives of this work has been carried to the completion, from the model CAD of the vehicle, to the accomplishment of a series of simulations under conditions in which the vehicle will compete, which later have been registered and compared to establish trends in the aerodynamic behavior of the existing vehicle. Along with this, and taking advantage of the wide range of analysis carried out, has generated a first approach to establishing performance graphic of solver CFD from NX software relating the size of element used for finite element meshing of vehicle and fluid, with the precision and calculation speed of the solving problem. With posteriority this study has proposed modifications to the original geometry of pursuing improvements in behavior observed through the applied analysis CFD (Computational Fluid Dynamics), being incorporated new models CAD.

This procedure has been carried out to reach optimization with the expected level for the vehicle during its performance validated tools to perform aerodynamic analysis that has the NX application, and allowing both the definition of a method to follow in the development of this type of analysis.

An equally important achievement is the generation of specific documentation that enables engineers and automotive designers not CFD experts, but who often require this information, the analysis of such a method and accuracy appropriate to their needs.

In terms of concrete results, the present study has provided a vehicle optimization, reducing its drag coefficient (C_x) from 0.31 to 0.25, which is reflected in a decrease in air resistance to 0.6 N.

TECHNICAL PAPER

INTRODUCTION

Conducting computer simulations of fluid dynamics (CFD) to optimize the aerodynamic performance of vehicles has progressed rapidly in recent years and has been since considered a highly complex discipline and reserved for large companies or research centers be available in commercial applications of medium complexity, not necessarily understood by professional experts in the field and, thanks to its decreasing cost, to be an increasingly useful resource in the development process of various products. The variety of CFD software, specialized or general purposed is very wide, creating the need to evaluate and make decisions about what are appropriate according to the requirements of each situation. This work evaluates the capabilities of the platform from Siemens PLM, NX v7, in particular its advanced simulation module and the CFD resolution module ("Flow/Thermal NX application"), working on Rhinoceros 3D v4.0 native model, imported to NX as STEP format.

The case in question is the process of development of the vehicle monocoque that the Institute of Design and Manufacture of the Polytechnic University of Valencia has been submitted for international competition "Shell Eco-marathon 2010", an event that encourages and rewards vehicle development high performance, for which the aerodynamics is essential. In this work the initial geometry that has been proposed for this carbody is aerodynamically evaluated through CFD analysis to simulate similar conditions to the competition, while defining a method to continue performing CFD simulations using NX. Subsequently, some improvements that will be able to optimize its aerodynamic performance are proposed, after the results of the analysis performed.

The most important changes, the method for carrying out the analysis and conclusions drawn on the various aspects of the CFD simulations carried out are described below.

THEORETICAL FRAMEWORK

Research falls within the area of aerodynamics and fluid dynamics, and search for a simple and clear approach towards these disciplines through the NX software computational tools

Principles of Aerodynamics

By interacting two solid bodies in a mechanical process, the forces between them are registered and operating in the contact point, however when a solid act with a fluid molecules the latter is a distortion, and start moving along the surface, around the solid body, maintaining close physical contact between all "points", so the forces in this system should be considered in all parts of the vehicle's surface, in practice almost infinite, as determined by the extremely small size of the molecules of the fluid (1). Because of this, there are always two forces to consider a "pressure force", normal to the surface of the body, due to the relative velocity between the two, and a "friction force", tangent to the surface of the body, due to the viscosity of air.

Daniel Bernoulli in 1738 established the physical principle that bears his name and notes that in a moving fluid, the sum of the pressure and velocity at any point remains constant, so if the speed increases, decreases pressure, and vice versa. If we add up all the pressure forces acting on the different elements of the surface is obtained as a result, a total force that is applied on an imaginary point, called "*center of pressures*", It will always be known as the direction of movement of the fluid, or in the case of the study area, the mobile, is possible to decompose the total force into two components, one in the direction of fluid motion (always it know) and the other perpendicular to the first. These forces are the "drag force" that opposes the motion of the vehicle and the second called "lift force", which makes the vehicle has a tendency to "stick" or "lift" off the ground.

Drag Coefficient

Due to complexity of the effects of air over the vehicle, and for to enable its study, these relations of forces are dependent upon in a *single variable* (coefficient) allowed, knowing the effects that are present. The value of these coefficients is determined experimentally in a controlled environment (eg wind tunnel). The most important factor in this area is the "drag coefficient", also called "aerodynamic coefficient" or "penetration rate" and known for its notation C_x , which is determined by the following formula (2):

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho \times V^2 \times S}$$

C_x = Drag Coefficient, is a dimensionless number, i.e., without units.

F_x = Drag force was obtained in a wind tunnel or CFD, in Newtons, N

ρ = Air density, is a known value of 1.2 kg/m³

V = Vehicle Speed/Air, it is known, is in meters per second, m/s

S = Frontal area of reference for the projected area of the vehicle front.

C_x coefficient obtained will only be a reference value to determine the degree of efficiency of a given airfoil, to compare the aerodynamic efficiency among different vehicles is more appropriate to compare the value known as SC_x , which results from multiplying again C_x value and frontal projection area of vehicle (3). This will not only consider the profile of the vehicle, but also their size, because although C_x is independent of the size and has a closer relationship with the shape, smoothness and transitions in the surfaces of the vehicle, the real performance is to some extent conditioned by the size.

CAE, FEA, FEM y CFD

The finite element method or FEM (and therefore the CFD that is performed by this method), involves taking a body and dividing it into small pieces adjacent to each other, and together correspond geometrically with the original body. Therefore, the smaller the size of each element is, the increasingly perfect and numerous are its elements. This basic idea allows, when the calculation becomes impossible, because there are needed infinite computations, it becomes possible to calculate even when these items are small and many can be counted and their number is finite, and are also defined finitely by its edges. These elements allow, with the individual resolution of each of them, the resolution of the global problem. This enable to resolution model is only approximate to the real model; there will always be a slight difference between the initial geometry and the shape composed by the elements. This transformation is called "discretization" of the model (4). In a more technical definition, this is referred to the process of transferring continuous models (and equations) into discrete counterparts. The FEM method itself was considered originally developed in 1943 by *Richard Courant* [3], then remained almost exclusively a method of field

research, primarily in the aerospace industry and could only present a practical and efficient from the arrive of powerful computers in recent years, beginning his rise from research conducted by NASA in the early '60s, and became a method for analyzing complex situations. These tests are called FEA (Finite Elements Analysis) and are part of the discipline known as Computer Aided Engineering (CAE). Currently, FEA is used in a wide range of applications, such as for troubleshooting mechanical strength and structural behavior of filled polymer injection molds, prediction of deformation in machining processes, and of course in simulating the behavior of fluids, so-called CFD, which is based on the *Navier-Stokes* equations, a set of partial differential equations describing the nonlinear motion of a fluid, postulates in 1825, the mentioned Bernoulli's ideas, and other approaches with a long history in traditional physics and fluid mechanics (5).

The method consists of three generic stages (6):

- The first stage is *pre-processing*, is to take a geometric model and proceed to its discretization in the computing environment. This process is known as "meshing". Subsequently determining "boundary conditions", this is to provide the software the necessary info to assimilate data to the actual conditions of the problem in the real world.
- The next stage is the *processing*, performed using software commonly known as "solver" or "*resolution module*" (of which there are many available by type of problem solving) that solves the mathematical equations that determine the present situation.
- Last stage is called *post-processing* using graphical tools of each software application, is possible review the results calculated using color scales, lines and numerical tables that allow a clearer understanding of visual and performance elements of the problem is this structural, fluid dynamics and others.

RESEARCH APPROACH.

As a working hypothesis have raised questions that will answered through the implementation of this action research. Based on these questions is structured the following hypothesis to confirm or not, by developing work objectives:

"The use of the NX platform, and its solver NX THERMAL/FLOW is appropriate and sufficient for the development of CFD analysis to provide accurate and useful information to the process development and optimization of a ground vehicle aerodynamics, and is possible to approach a specific method to follow for implementation."

Along with this hypothesis, we seek to achieve some specific objectives, which will supplement the extent that the study aims to:

- Perform proper documentation of the followed procedures.

- Establish a clear and consistent method for the proper implementation of this type of analysis in NX.
- Build documentation to serve as an introduction to the field of CFD analysis to the researchers or professionals not experts in this area but with the need for this type of simulations.
- Define the scope and actual capacity to perform CFD analysis of the NX platform for its accuracy and usability, and against other applications.

PROCEDURE FOLLOWED BY THE CONDUCT OF THE ANALYSIS

Preparation of the Model.

The first step of this method for carrying out the analysis using NX requires the preparation of the 3D model in the native software which has developed the modeling process, checking details such as continuity of surfaces, edges disconnected and troubled areas. The model should then be exported in compatible formats with NX as IGES or STEP ideally.

Pre-Processing - Generating "Wind Tunnel" Representation in NX.

Based on the size and geometry of the vehicle or shape to analyze, create the parallelepiped representing the wind tunnel in the system. Must be large enough so that the flow around the vehicle is not disturbed by the walls and allow for meaningful analysis.

Pre-Processing - Generation of the Simulation – Meshing the vehicle.

When the system modeling is complete, the simulation is generated by activating the module NX "advanced simulation" that allows access to the icons necessary to start the process, enter in software interface the details of the solution to obtain the flow-thermal solver in NX, and then meshing the geometry of the vehicle to study.

Pre-Processing- Boundary Conditions Determination.

This stage of the process determined the fluid velocity equal to the vehicle in the real world, the area of inlet and outlet flow, the fluid domain (space filled by the fluid), the target zones of flow and surfaces contact of the vehicle. NX provides tools for carry out each step unequivocally.

Processing - Solution Calculation.

This step lets the user without further involvement and is needed to perform the necessary iterations and the calculation of equations for the solution according to the conditions imposed. It has two key steps, the meshing process of the fluid and the solution itself. Later is get a LOG file (is a simple*.txt) to be located in the previously selected working directory, containing the calculated values.

Post-Processing - Presentation of the Results

Finally, once the calculation of the solution is over, you get the graphical presentation of results, can be seen the flow using streamlines, pressure by colored fields, and values in the color scale built into the graphics windows.

RELATIONS BETWEEN THE DISCRETIZATION PROCESS AND ACCURACY OF THE RESULTS

A section from which get some of the most important results and conclusions from this research is that in determining the relationship between the discretization process and accuracy of the results. In NX are two ways to make the meshing process in relation to the way it determines the size of the element, may be the size of element "relative" or "absolute", if this is added to the size chosen as such elements determines a variation in the solution.

The robustness and hence less likelihood of failure of the solution during the calculation process are larger in "absolute" element size mesh, but in general the "relative" element size mesh offers less time on calculations.

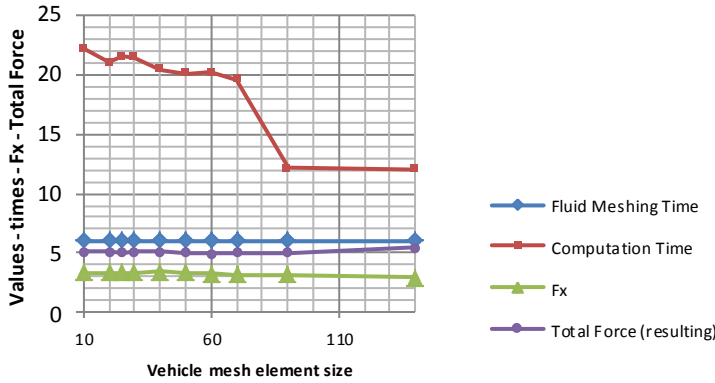
The following tables and figures shows the results achieved in this regard and find that despite the seemingly small differences between the results they may generate a variation of more than one point in the calculation of a vehicle C_x

Variation of Element Size in Vehicle Mesh

<i>FEM meshing element size (mm)</i>	<i>Time for meshing the fluid (min and sec)</i>	<i>Calculation time for the solution (min and sec)</i>	<i>Result for Fx (Newtons)</i>	<i>Results for resulting total force XYZ (Newtons)</i>
140	6.00	12.01	2,988	5,479
90	6.00	12.11	3,200	5,073
70	6.00	19.56	3,194	5,042
60	6.00	20.14	3,268	4,960
50	6.00	20.08	3,381	5,067
40	6.00	20.37	3,413	5,111
30	6.00	21.42	3,378	5,085
25	6.00	21.45	3,354	5,041
20	6.00	21.00	3,377	5,086
10	6.00	22.15	3,382	5,102

Fixed conditions: Type of Fluid meshing element is relative, values 0.06 for the fluid and 0.03 for the limits, 0.015 for the fluid in contact with the vehicle. Analysis at 30 km/h – Turbulence Mod. k-ε

Figure 1: Variation of Element Size in Vehicle Mesh



According also to the accuracy factor of the mesh representation with respect to the original form (this is called correspondence or mesh matching), which has been mentioned previously, we have considered the values from 40 to 20 mm as the acceptable range for the size element.

Variation of Element Size “Relative” in Fluid Mesh

Size of mesh elements of the fluid is “relative” (fluid - boundaries - the area in contact with the vehicle)	Time for meshing the fluid (min and sec)	Calculation time for the solution (min and sec)	Result for Fx (Newtons)	Results for resulting total force XYZ (Newtons)
0,9 – 0,2 – 0,1	0.30	1.00	5,077	6,457
0,50 – 0,10 – 0,05	1.00	2.54	4,385	6,071
0,25 – 0,05 – 0,035	2.00	6.42	3,867	5,637
0,12 – 0,04 – 0,020	4.00	8.09	3,584	5,234
0,06 – 0,03 – 0,015	6.00	21.45	3,354	5,041
0,04 – 0,02 – 0,012	10.00	26.49	3,298	4,927

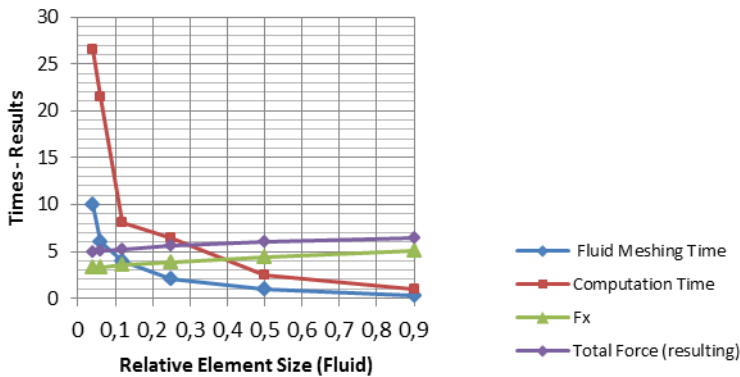
Fixed conditions: Type of Element of Fluid Meshing is relative, Size of FEM mesh element for the vehicle 25 mm., Analysis at 30 km / h – Turbulence Mod. k-ε

Figure 2: Variation of Element Size “Relative” in Fluid Mesh

An important fact that can be obtained by observing the previous charts is the point where the value obtained is maintained within an acceptable range without sacrificing too much computing time or meshing of the fluid. This point, for the mesh type on item size can be set close to the value 0.12 for the

"relative" size of element of the fluid mesh (0.04 to 0.02 for its limits and the area in contact with the vehicle). After passing this point the gap between computation time and accuracy of the result begins to be much higher.

According to the following table and the Fig.3 for the mesh element type and size of all values will be chosen 150-50-40 as the ideal for optimal relationship between precision and calculation time, and 85-65-35 as optimal values when you want more accuracy at the expense of increased computation time.

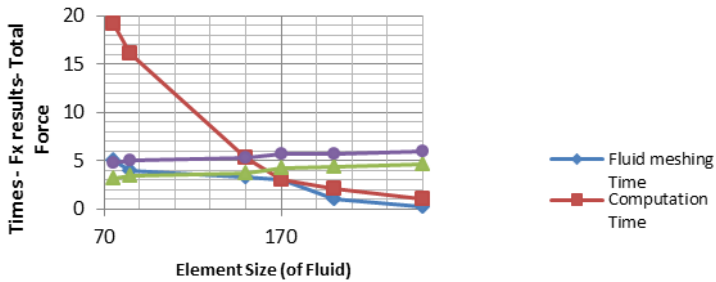


Variation of Element Size “Absolute” in Fluid Mesh.

<i>size of mesh elements of the fluid “Absolute” (fluid - boundaries - the area in contact with the vehicle)</i>	<i>Time for meshing the fluid (min and sec)</i>	<i>Calculation time for the solution (min and sec)</i>	<i>Result for Fx (Newtons)</i>	<i>Results for resulting total force XYZ (Newtons)</i>
250 - 150 - 75	0.30	1.09	4.635	6.047
200 - 95 - 60	1.00	2.07	4.336	5.732
170 - 75 - 50	3.00	3.05	4.310	5,721
150 - 50 - 40	2.30	8.48	3.794	5,294
85 - 65 - 35	4.00	16.11	3,480	5,074
75 - 55 - 30	5.00	19.22	3,224	4,801

Fixed conditions: Type of Element of Fluid Meshing is Absolute, Size of FEM mesh element for the vehicle 25 mm., Analysis at 30 km / h – Turbulence Mod. k-ε

Figure 3: Variation of Element Size “Absolute” in Fluid Mesh



It is also remarkable the least computing time provided by the mesh with "relative" element sizes v/s "absolute" element size type with 12 minutes against 20 minutes in results of similar accuracy. However, for ranges where the elements are made smaller is the "absolute" meshing which offers lower computation time.

RESULTS AND DEFINITION OF THE END OF THE VEHICLE GEOMETRY

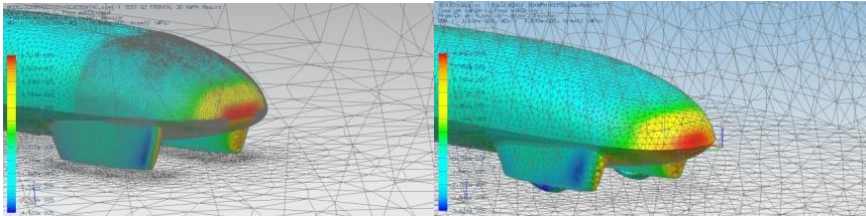
Once simulations were conducted, initial vehicle geometry has gradually changed, based on the results of such variations, both numerical and visual delivery software, and allow a thorough understanding of the behavior of the fluid that surrounds the vehicle's surface. The conditions for the analysis are:

Speed fluid/vehicle: 30 km/h, Model of turbulence: $k-\varepsilon$ (K-Epsilon), meshing the vehicle: subdivision type, element size of 25 mm on STEP model, 2D mesh element type: TRI3 Thin Shell. Solver: Flow/Thermal Application NX. Solution Type: flow - steady state. Units of the solution: Metro/Newton. Fluid mesh: disconnected, Union of smooth mesh activated, Type on item size, 0.06 for total fluid, 0.03 for the input and output limits, and 0.01 for fluid contact area/vehicle. The tunnel used has a dimension of 6000 mm long, 2000 high and 3000 wide.

Having identified two key areas for their impact on air flow: *the tip of the vehicle*, where is the "sticking point", and the area that forms the cover of the rear wheel. The images obtained in the post-processing of data in NX clearly show the difference between the first vehicle geometries and final. Besides a quantitative difference between the air pressure on the vehicle could be seen with the naked eye in these images, how the high pressure zone (red) is somewhat lower in the second model, and focuses on a rounded point, while in the first is more elongated and covers more surface. The transition zone between the pressures is also more widespread in the second model, and is represented by a larger green area equivalent medium pressure,

while the initial model has a larger area represented in yellow, a higher pressure.

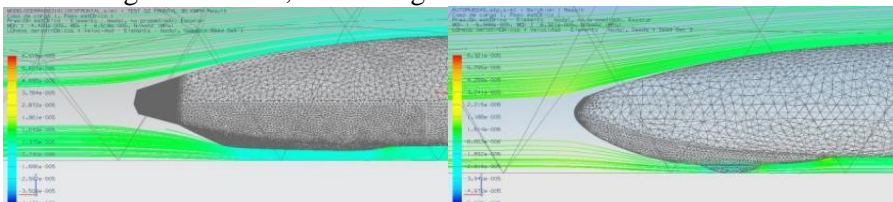
A numerical level of the drag force on the X axis is 3.991 N for the initial model and 3.319 N for the final model, and higher pressures are obtained $6,516 \cdot 10^{-5}$ and $4,642 \cdot 10^{-5}$ N/mm² for the initial model and final respectively. Besides the formal improvement allows the second model presents a more reduced projection of his frontal area from 0.304 m² against 0.316 m² in the first model, allowing the C_x is also lower. C_x values obtained show a decrease from 0.31 to 0.25 and values from 0.095 to 0.076 SC_x .



Previous 3D modeling is certainly a factor that proved decisive when getting a proper analysis and subsequently a accuracy manufacturing process. Differences were detected between the initial and final models through the making of "Zebra analysis" to measure the quality of the continuity of the surfaces, i.e. detects irregularities and areas where there are naked edges or changes of form, completely absent in the final model and present at the earliest models. These irregularities are a source of turbulence and shocks in the desired "laminar" air flow running around the vehicle.

The second area of extreme importance to the aerodynamic performance of the vehicle corresponds to that which determines how the fluid "leaves" the shape. This area is one that consists of the "tail" of the vehicle in his rear, the union of the top of the monocoque, the area covered by the rear wheel, and the bottom of the monocoque. The union of these three main areas is wanted so smooth and integrated as possible to allow the fluid to move smoothly and remains attached to the vehicle, delaying the point at which is "take off" from the car body.

The images obtained from the analysis show the behavior of the fluid in that area using streamlines, and let to identify how the changes incorporated in the final model, have a direct impact on slowing and smoothing the separation of the fluid on the wall vehicle. This results in less generation of turbulence in the rear, and therefore a lesser creation of low pressure that act "suctioning" the vehicle, decreasing its acceleration.



Conclusions

To carry out this work we have conducted 14 rounds of analysis with CFD simulations over 150 in total, using, as stated, Siemens NX software v7 and advanced simulation module. This has led to the generation of inputs such as the establishment's basic values, compared to certain conditions, produce accurate results at lower cost in computing time or define the connection points where the results sacrificing too long no gain in precision. Breaking up the ideas in the initial hypothesis, we can say that without doubt the NX software and advanced simulation module are suitable and adequate for the development of these tests. The overall software delivers robust and reliable results, consistent with each other at the time of changing external conditions.

Regarding the possibility of establishing a specific method to NX to continue to implement this type of analysis, it has been possible, and was also, as mentioned above, the initiation of an investigation that has gone a little beyond it originally sought. It has raised a number of steps to recreate in order to achieve successful development of the analysis without going through a process of "discovery" of the software application.

It is also relevant to critique the mode of data delivery. If one compares the data delivery NX CFD software specializing in aerodynamics it is less straightforward. To find the numerical data that are key to their analysis should see a file that is contained in the working directory, which is quite "dry" to understand. This is only possible to know in advance the procedure to follow, because it is impossible in an intuitive way.

On the other hand, it should be noted that the tools of "Help" NX software are poor and very unclear. Such is the scale of information to be included and the software's capabilities so that the issues are difficult to find and your organization and hyperlinking is not optimal for these purposes.

The specific objectives raised for research have been developed and successfully completed:

- It documents the process undertaken.
- It has posed a particular method for conducting this type of analysis.
- We set a background document to the CFD and aerodynamics of vehicles for professionals who are not experts in the field, and even do not originate from areas related to physics or fluid mechanics, but that may be involved in the vehicle development process and face the consequent need for analysis of this type.

References

- (1) S.B. Hazra, "An Efficient Method for Aerodynamic Shape Optimization," *New York*, 2004, pp. 1-12.

- (2) J.A. Francisco Peña, "En el túnel de viento. Importancia de la aerodinámica en el diseño de carrocerías.," *CESVIMAP*, vol. 59, *Madrid*, 2007, pp. 12-15.
- (3) F. Giuggioloni and C. Sacco, "Análisis de la Aerodinámica de un Automóvil de Competición.," *Mecánica Computacional*, vol. XXV, *Barcelona*, 2006, pp. 83- 94.
- (4) J.D. Anderson, *Computational Fluid Dynamics The Basics With Applications*, Mc Graw Hill, *New York*, 1995. pp . 116-120
- (5) T. Briet Blanes, "Simulación CFD y Túnel de viento," *www.The F1.com*, visit June 2009.
- (6) J.M. Perrier, E. Bonvín, and E. Ibarrola, "Verificación del rendimiento aerodinámico de un vehículo terrestre aplicando técnicas de cálculo y experimentales," *Mecánica Computacional*, vol. XXIII, *Buenos Aires*, 2004, pp. 1-21.

GENERAL REFERENCES.

- F. Aguirre, "Análisis Aerodinámico del Vehículo para la Competencia Eco-Shell," Tesina de Máster UPV, *Valencia*, 2009, pp. 19-36.
- R. Duquette and K. Duffy, "NX4 Tutorial – External Flow Application: Flow over selected ATV parts," 2006, p. 23.
- L.G. PHD J.J. Santin, PHD C.H. Onder, J. Bernard, D. Isler, P. Kobler, F. Kolb, N. Weidemann, "The world's most fuel efficient vehicle, Design and development of PAC car II.Capitulo Aerodinámica," VFD, *Zurich: VDF*, 2007, pp. 101-123.

DESIGN OF A FUEL EFFICIENT PROTOTYPE'S MONOCOQUE

Rogiest D, Colomer Romero V, Martínez Sánchez, JI, Martínez Sanz AV.

Design and Manufacturing Institute of the Universitat Politècnica de València, Camí de Vera, 46022 Valencia, Spain. vicoro@mcm.upv.es

Keywords: Composite design, low-speed aerodynamics, fuel efficiency, Shell eco-marathon, monocoque, concurrent engineering

Abstract

Designing a prototype for the Shell eco-marathon competition contains a huge amount of different engineering disciplines. The goal in the end is to design and create a prototype that pushes the boundaries of ultra-low energy consumption. This report studies the entire design process of a prototype's monocoque, built for entering this famous competition. The conceptual design of the vehicle is mostly limited by the competition's technical regulations. With the concept fixed, the detailed design could start. Since aerodynamic drag is a very important factor in improving fuel efficiency, we decided to use a 2D wing profile from the aerospace industry as a basis for the monocoque's design. A design loop resulted in a typical airfoil (NACA 0020-65), with minimal drag coefficient, taking into account the vehicle's low velocities. Revolving this 2D profile basically gives the ideal 3D shape for the prototype. The combination of the monocoque's main 3D form and wheel fenders then has been subjected to CFD calculations, to verify the 3D design. Some minor changes to the 3D design had to be made, decreasing C_d with 2.4%.

Another important factor for improving fuel efficiency is the vehicle's weight. To minimize the weight of the monocoque it we had to integrate the subcomponents' design into the design of the monocoque at a very early stage. This has the advantage that the design of the CFRP monocoque can be optimized already in the design phase.

Concurrent engineering was therefore indispensable to obtain a fully integrated design. Design integration along with some FEM-calculations and a -for the competition- unique fabrication method resulted in a monocoque weight of around 7kg.

Next to the numerous aerodynamical and structural calculations the ergonomics of the vehicle where studied. Focused lied on optimizing the

window surface and investigate whether the pilot would be able to reach all necessary controls of the vehicle. All the efforts made during the design process paid off since the vehicle passed the technical inspections on the 2010 Shell eco-marathon without any problems.

Introduction

Designing and building a vehicle that pushes the boundaries of fuel efficiency is not only a very “hot” topic nowadays, it is also a very good engineering exercise to push the boundaries of existing materials and personal engineering skills. The Shell eco-marathon is one of the most known competitions in this area. Being one of more than 200 [5] competing teams the IDF eco-marathon team is not a newcomer; they’ve built prototypes before with good results. For the 3rd generation prototype the team wants to improve the performance drastically so the designing process will embrace every step; from basic concept design to advanced aerodynamical calculations.

Design of the new prototype’s monocoque

Designing a prototype for the Shell Eco-marathon contains a huge amount of different disciplines. The goal in the end is to create a prototype that pushes the boundaries of low energy consumption. In this chapter a description of the design approach will be given, along with some detailed calculations and design trade-offs.

Conceptual Design



Figure 1: General lay-out

The conceptual design of the prototype is based both on in-house experience and the SEM’s technical regulations [6]. Most vehicles in the competition tend to have the same lay-out; this is mostly driven by the regulations and the quest for optimal aerodynamics.

Equilibrium in Steady Motion

Let us now take a look where exactly the energy consumption of this vehicle can be minimized in the design phase. This process begins with the determination of the different drag sources at a steady motion ($dV=0$).

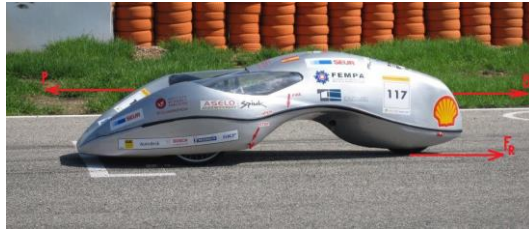


Figure 2: Steady motion

As can be seen in [1] the force equilibrium of the vehicle in a steady motion equals: $\sum F_x: 0 = P - D - F_r$, where P is the propulsion force, D represents the aerodynamic drag force and F_r equals rolling resistance force, caused by tire friction. This force equilibrium shows us that there are 2 drag forces when the vehicle is in steady motion: the aerodynamic drag on one side and the friction effect of the tires on the other.

Determination of the Design Parameters

In the previous chapter it was concluded that there are two drag forces to be taken into account. Defining both drag forces will give the design parameters needed to start the design of the prototype. The aerodynamic drag is the main drag force that will have to be minimized. In contrast to what you might think the aerodynamic drag for a vehicle (that is moving at a relatively low speed) of this type is of great importance. To determine what can be done -in the design phase- to minimize the aerodynamic drag of the vehicle, a description is needed of the drag.

$$D = C_d * \frac{1}{2} * \rho * V^2 * S \quad (1)$$

In equation (1) C_d is the profile drag coefficient, ρ represents air density, V equals the airspeed and finally S equals the total projected cross sectional area of the vehicle.

Since the average speed is fixed in this competition and the air density cannot be influenced, the only two parameters that can be altered are: the frontal surface, S and the drag coefficient C_d . Both are to be minimized in order to achieve a good result.

The rolling resistance is the 2nd and also last drag force to which the vehicle is subjected. Similar to the drag, the rolling resistance is not a force that can be influenced directly. The rolling resistance equals:

$$F_r = \mu * F_n \quad (2)$$

Where F_r is the rolling resistance force, μ the rolling friction coefficient – assuming the no-slip condition- of the tires and F_n equals the normal force exerted by the vehicle's mass.

The prototype’s rolling resistance can thus be influenced by varying the friction coefficient. This can be achieved by improving the tires, or minimizing the vehicles weight.

Minimizing profile drag

The profile drag or Cd is a direct result of the basic form of the vehicle. There are a lot of airflow properties that have a huge influence on the airflow behavior and as a result the reaction of the airflow will be different with varying properties and profile. To find a solution to this problem (in the end the Cd has to be as low as possible) first the properties of the airflow around the vehicle have to be determined. Once these properties are known a choice in profile will be made.

Laminar vs. Turbulent Flow

Before decisions can be made regarding the overall profile of the new prototype, it has to become clear which type of airflow is favorable for this type of vehicle.

Laminar airflow	+	No surface friction
	-	easily tricked into turbulent flow fast flow separation Pressure drag
Turbulent airflow	+	longer attached flow Lower pressure drag
	-	Presence of friction drag

From Table 1 [7] it can be concluded that it will be beneficial to keep the airflow laminar for as long as possible.

Table 1: Laminar vs. Turbulent airflow

This will have consequences for the vehicle design, since the slightest irregularity in the vehicle’s surface will lead to turbulent airflow. On the downside the vehicle with an extended laminar airflow would suffer from a severe increase in drag when experiencing crosswind (and thus causing the profile to stall) due to the bad stall behavior of laminar airflow.

2D design

Extensive data on aircraft wing profiles is available; taking all demands into account the ideal wing profile for this application is a so-called NACA modified 4-digit airfoil. Of course the generation of lift would result in extra drag (induced drag) [8], therefore a symmetrical profile will be used for the design of the vehicle. Before starting the 3D CAD design of the vehicle’s body, the basic profiles and shapes that will be used to do this have to be determined. The determination of the profiles of both the monocoque and the wheel fenders are determined in this chapter.

Monocoque

The NACA modified 4-digit AF series equations are solved numerically by MATLAB

®,
varying
parameter
s like:
max.

thickness,
the

location of this point, chord length and leading edge radius. Keeping in mind that the result of this solution has to satisfy the design boundary conditions set by the technical regulations, these parameters are varied over and over again to obtain the “smallest” airfoil possible.

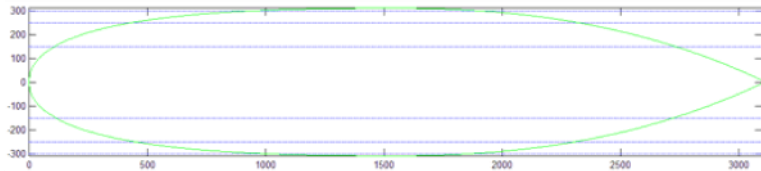


Figure 3: Modified NACA 4 series airfoil

Wheel Fenders

The prototype has 3 wheels, so 3 wheel fenders need to be designed. Since both front wheels describe the same displacement due to the steering system, the 2 front wheel fenders are the same. The rear wheel doesn't describe this steering motion and will therefore have a different wheel fender.

Like the profile for the monocoque the profiles for the wheel fenders need to be as small as possible, so the process of designing these profiles is completely the same as before with exception of the boundary conditions off course. For making a wheel fender 2 profiles have to be

generated, one has to cope with wheel section area at the wheel axle, whereas the 2nd profile has to cope with the wheel

section area close to the ground. Figure 4 gives shows the wireframe of a front wheel fender, made of two, differently sized, NACA modified 4 series 0018-65 profiles.

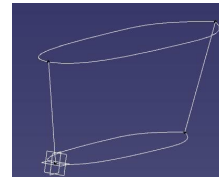


Figure 4: Front wheel fender wireframe

3D design

With all the profiles determined by MATLAB the time has come to start the 3D design. The powerful CATIA V5 package will be used as a 3D CAD tool. To be able to use the generated profile a way has to be found to import the coordinates of the profiles into CATIA. The MATLAB data is exported in the form of x-, y-, z- coordinates, as a txt file format. After writing a

macro, the data from the txt file could directly be imported into the CATIA environment.

Designing the Main Body

From an aerodynamical point of view (and to be more precise from a CD point of view) the best way to form a 3D body out of the airfoil is to revolve the profile along its longitudinal axis [5]. The problem with this configuration (front wheel steering) is that the vehicle has to be very wide. Revolving automatically results in a vehicle with a big volume, with a very large frontal surface area as a result. On the other hand due to the fact that there is a maximum vehicle height in the regulations the vehicle would have to be very near to the ground, which is good for vehicle stability but very bad because of increasing ground effect [5]. The frontal surface area of this body equals 0.302m^2 .

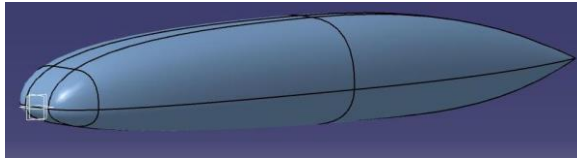


Figure 5: Modified main body, 3D drawing

Taking into account that the wheel fenders are still missing this frontal surface area is big if compared to the total frontal surface area ($0,25\text{m}^2$ [2]) of the current record holder in the competition. Although the concept of the car is different to that of the PAC-Car II [2] something has to be done to make the frontal surface area smaller. Therefore it was decided to split the car up in 2 parts, an upper part and a lower part. Whereas the upper part uses the same profile as before, the lower part will be constructed with an identical, but less wide airfoil (a NACA modified 4 series 0012-65). This lay-out permits the designers to get a reasonable ground clearance, in combination with a much smaller frontal surface. Figure 5 gives an idea of what the main body of the new prototype will look like. This design change results in a frontal surface area drop of $0,04\text{ m}^2$ which is a 13% improvement.

Creation and addition of wheel fenders

As explained before there are 3 wheel fenders to be created. All three of these fenders are created individually from a wireframe like in Figure 4.



Figure 6: Monocoque, 3D drawing

Now to add these 3 basic forms to the main body of the monocoque an intersection has to

be made. This intersection is then used to join everything together

into one smooth object. What the final result of these operations looks like can be seen in Figure 6.

Computational Fluid Dynamics

For further development of the monocoque –the determination of the CFD simulations are done by the use of Siemens NX. A first set of simulations bring promising results:

CFD Calculations							
Test	1			Test	2		
Properties	S [m ²]	V[m/s ²]	ρ [kg/m ³]	Properties	S [m ²]	V[m/s ²]	ρ [kg/m ³]
	0.304	9	1,225		0.304	14	1,225
Results	Fx [N]	Cx (= Cd)	SCx	Results	Fx [N]	Cx (= Cd)	SCx
	4,27	0.289	0.0864		10,29	0.287	0.0875

Table 2: CFD results

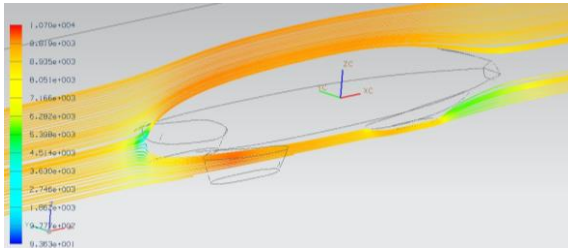


Figure 7: Flow velocity

But by taking a closer look at the velocity profile near the trailing edge of the vehicle it becomes clear that the interaction between the rear-wheel-fender and the rest of the body isn't optimal. Figure 7 gives a clear insight in the velocity difference of

the airflow. As a result the pressure difference between the upper and lower part of the trailing edge is fairly large, resulting in higher drag of the vehicle. Note that these CFD calculations are done with a vehicle with a "perfect" finish, a relatively high change in airflow behavior is to be expected if the finish of the real vehicle doesn't meet the requirements. Minimizing the pressure difference seen in Figure 7 can only be obtained making changes to the aft section of the vehicle. Therefore -to smoothen the pressure difference- alterations have to be made to the interference region between the rear part of

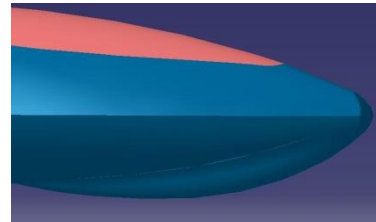


Figure 8: Rear modifications

the rear wheel fender and the vehicle tail. In Figure 8 it can be seen that in the new design the curvature of the wheel fender results seamlessly in the tail of the vehicle, this to minimize pressure gradient changes. Note also the smoothing of the tail section to comply with the technical regulations [6]. With this model a new set of CFD simulations are done with some positive -though minor- improvements of the drag properties. These minor changes in the vehicles' aerodynamical properties are summarized in Table 3.

CFD Calculations							
Test	1			Test	2		
Properties	S	ρ		Properties	S	ρ	
	[m ²]	V[m/s ²]	[kg/m ³]		[m ²]	V[m/s ²]	[kg/m ³]
	0.304	9	1,225		0.304	14	1,225
Results	Fx	Cx (=	SCx	Results	Fx	Cx (=	SCx
	[N]	Cd)			[N]	Cd)	
	4,25	0.282	0.0857		10,26	0.281	0.0854

Table 3: Modified tail section CFD results

When the results of Table 2 are compared with those of table Table 3, an improvement in aerodynamic drag of around 2,4% can be noted. Compared to the CFD calculations executed on the previous vehicle, the drag has been reduced by 63.9% [2].

Ergonomics

Although the actual time that a pilot will driving the vehicle is minimal compared to everyday road cars, a minimal ergonomic study has to be done. The goal is not only to provide a minimal of pilot comfort and to ensure an optimal usage of vehicle interior space but mainly to comply with some technical regulations regarding the pilot's view envelope. As a result this study will have its consequences mainly on the vehicle's window design and the reach envelope of the pilot.

Window Design

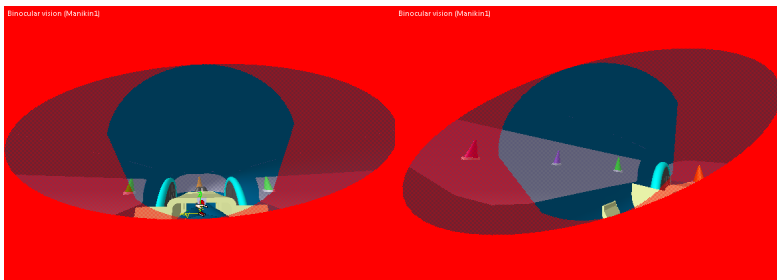


Figure 9: Field of vision

Starting off with the design of the windows, the first task is to determine exactly what the pilot has to see and bring this in relation to the monocoque design. The technical regulations state: “An inspector will check visibility of the vehicles in order to assess on-track safety. This inspector will check good visibility with seven 60cm high blocks spread out every 30° in a half-circle, with a 5m radius in front of the vehicle.” A representation of this test was made in a 3D environment. Using Catia's Ergonomics Design & Analysis workbench makes it possible to put a virtual pilot in the virtual prototype. A woman of the 10th population percentile was chosen with a height of roughly 1,55m and a weight of around 50kg. The advantage of this is that Catia permits seeing what the virtual woman can see. Than a conceptual design of the windows was made, of which the size and location was then adapted according to the data received from the virtual visibility test. The optimizing of the windows guarantees a field of view which is sufficient for the inspection, see Figure 9. As prescribed all 7 cones can be seen from

within the monocoque without any problems. Of course on the other hand the windows need to be as small as possible so that they don't compromise the strength and stiffness of the monocoque too much.

Reach envelope

Important for the placing of certain driver interfaces (e.g.: steer handle, engine switches,...) is the calculation of the reach envelope of the pilot's hands. The same virtual woman was used for calculating the reach envelope as was previously used for computation of the field of vision. This calculation shows that the pilot will be able to

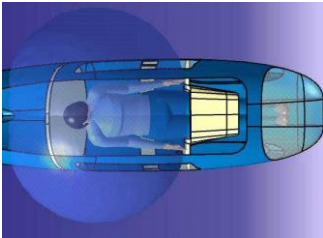


Figure 10: Pilot reach envelope

positioning of driving organs.

open the “hatch” of the vehicle and gives important information for the placement for

Structure

The body resulting from the previous aerodynamic and ergonomic studies now has to be converted into a self-carrying Carbon fiber Reinforced monocoque.

Load Bearing Structure

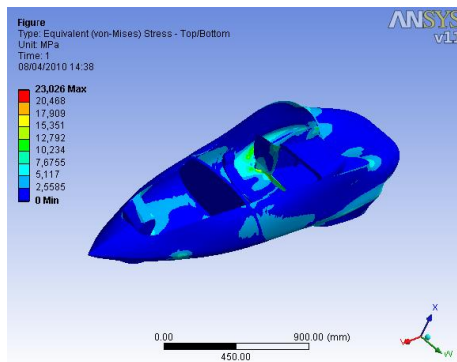


Figure 11: Von Mises stresses of monocoque under loads

Like the previous vehicle, a CFRP monocoque architecture is preferred because of numerous reasons: it is the lightest and stiffest solution, and it is easy to mount the inside hardware. To get an insight in the way the load-

carrying structure behaves under loads, Finite element calculations are conducted. The FEM-simulation is conducted using a uniform shell thickness. This means in composite terms that the number of fiber layers (3) is equal over the entire vehicle surface. While being far from optimal it provides a clear insight in the material behavior. Figure 11 shows both the deformation behavior of the monocoque under load and the resulting internal stresses. Note that a maximum Von Mises stress of 23 Mpa is low for a carbon fiber structure [3]; a lot of optimization can be done in this area. On the other hand sufficient out-of-plane stiffness has to remain for the pilot to be able to get in and out of the vehicle without assistance, as the technical regulations describe.

Reinforcements

Because of the intrinsic properties of the monocoque design it doesn't need reinforcements to enhance the stiffness nor the strength of the chassis. The problem is; that the shell structure alone doesn't permit mounting the essential mechanical components. Thriving on experience it is decided to use aerospace-like inserts to mount the hardware inside the monocoque. So the shell structure has to be reinforced locally where mechanical components need to be mounted. Reinforcing the monocoque will be done by creating a sandwich panel locally.

Production of the new prototype

The production phase of a composite structure is the most important phase of the entire process. Already in the design phase the fabrication techniques have to be taken into account in order to get the optimal result. In cooperation with a company specialized in advanced composite production the different options for the production process were analyzed. After a large trade-off the manufacturing process would encompass the following phases:

1. Making of a 1/3 scale wind tunnel model of the vehicle
2. Fabrication of a 1/1 scale model of the vehicle
3. A 3-way separable negative mould has to be produced
4. Vacuum infusion of the entire monocoque in 1 piece
5. Thermoforming of the polycarbonate windows
6. Window integration
7. Adhesive bonding of all interior sandwich panels & inserts

Results & recommendations

The production process turned out to be a great success, as can be seen in Figure 12 the finish of the new vehicle is exemplary.



Figure 12: Finished vehicle

Making a very detailed design allowed total vehicle production and assembly within a time span of just 4 weeks. With a measured total vehicle weight of 42.57kg the vehicle belongs to one of the lightest of the entire competition.

Aerodynamically the vehicle can be optimized by testing the actual prototype in a wind tunnel, and use this data to modify the model. The aerodynamics would also benefit from mounting the steering at the back of the vehicle, while both the width of the monocoque at the front end and both front wheel fenders could be made considerably smaller. This however would bring serious problems for the drivetrain from the vehicle.

References

- (1) Fredy Alexander Aguirre Gomez, Director, Juan Antonio Garcia, "Analysis aerodinamico del vehiculo para la competencia eco-shell", Master cad cam cim Universidad Politécnica de Valencia, 2009
- (2) "The world's most fuel efficient vehicle design and development of pac car II", ETH Zurich, 978-3-7281-3134-8, 2007
- (3) Megson, "Aircraft structures for engineering students" (third edition), 0-340-705884, Elsevier, 1999
- (4) Joseph Katz, "Race car aerodynamics", 0-8376-0142-8, Bentley publishers, 2006
- (5) <http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/>, Shell, 13-09-2009

- (6) http://www.shell.com/home/content/ecomarathon/europe/for_participants/european_rules/, Shell, 13-09-2009
- (7) Frank M. White, “Viscous fluid flow” (third edition), 007-124493-X, Mc Graw Hill, 2006
- (8) Anderson, “Fundamentals of aerodynamics” (third edition), 0-07-237335-0, Mc Graw Hill, 2001.

***Capítulo 8: CONCLUSIONES Y
TRABAJOS FUTUROS***

8 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1 Conclusiones

La mecatrónica ofrece los potenciales del éxito para la creación de nuevos productos. Plantea sin embargo requisitos especiales al proceso de diseño: Los sistemas mecatrónicos se caracterizan por su alta complejidad debido al gran número de elementos conectados además de diversos ámbitos de la ingeniería (heterogeneidad).

Para manejar estos requisitos es necesaria una metodología para el diseño sistemático de sistemas mecatrónicos. La tarea individual de diseño tiene que ser apoyada para asegurar la aceptación y el uso en la industria.

La contribución presenta los elementos principales del modelo flexible de procedimiento como parte de la nueva guía VDI 2206. Los elementos son: 1) ciclo general de la solución de problemas en micronivel, 2) modelo de forma de V en el macronivel, 3) macro-ciclos según el grado de madurez y 4) módulos de proceso especificados por el usuario para los pasos de la operación que se repiten.

La guía es un paso hacia una metodología específica mecatrónica que comprende: la base de sistemas mecatrónicos, modelo del procedimiento, métodos de modelado y análisis del modelo, herramientas de automatizados y aspectos seleccionados de la organización mecatrónica.

El presente documento tuvo como objetivo principal el establecimiento de un metodología para el diseño de sistemas mecatrónicos y su aplicación para el diseño y la fabricación de un vehículo de bajo consumo. No se ha abordado la fabricación completa del vehículo dado que

el diseño de la carrocería era suficientemente representativo en la aplicación del método descrito.

Las conclusiones y contribuciones de la presente tesis doctoral son:

- Se estableció el marco teórico y experimental en el que basar este trabajo (Capítulo 2 y 3).
- Se propone una metodología general para la resolución de diseños mecatrónicos (Capítulo 4).
- Se ha aplicado la metodología general para el caso particular del proceso de diseño de la carrocería, analizando a través de un estudio de fluidodinámica la forma de la carrocería hasta optimizarla. Asimismo se ha realizado un estudio ergonómico y de visión del modelo generado (Capítulo 5).
- Se ha realizado un estudio de los distintos tipos de fabricación posible para definir cuál es el idóneo para la forma del vehículo en aras de optimizar el peso, la resistencia y la rigidez del mismo, empleando la infusión y el post-curado en horno (Capítulo 6).

8.2 Líneas de investigación futuras

La evolución de nuestro vehículo pasa por las siguientes líneas de investigación:

1. Desarrollar un estudio de CFD con suelo rodante.
2. Realizar pruebas en túnel de viento de nuestro prototipo, para comprobar la eficacia de nuestros cálculos de CFD.
3. La fabricación de un monocasco un 30 % más ligero en biocomposites (cáñamo) y bioresinas epoxis.

4. El diseño y fabricación de un motor de combustión interna que permita reducir el consumo. Nótese que nuestro record actual se ha conseguido con un motor desarrollado en el año 2008, que no ha sido evolucionado por falta de medios económicos.
5. Desarrollar un MCI propio para conseguir superar los 2.000 km/l.
6. Desarrollar una herramienta de optimización de carrera a través de algoritmos genéticos.

Capítulo 9: BIBLIOGRAFÍA

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Gausemeier, R. Dumitrescu, S. Kahl, and D. Nordsiek, "Integrative development of product and production system for mechatronic products," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 27, pp. 772-778, Aug 2011.
- [2] V. 2221, "Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte," in *Beuth Verlag, Berlin*, ed, 1993.
- [3] H. Birkhofer, U. Lindemann, A. Albers, and M. Meier, *Product development as a structured and interactive network of knowledge - A revolutionary approach*, 2001.
- [4] U. Lindemann, *Flexible adaptation of methods within the design process*, 2002.
- [5] V. 2422, "Entwicklungsmethodik für Geräte mit Steuerung durch Mikroelektronik," in *Beuth Verlag, Berlin*, ed, 1994.
- [6] V. 2206, "Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme," in *Entwurf, Beuth Verlag, Berlin*, ed, 1993.
- [7] J. Gausemeier, M. Flath, and S. Mohringer, *Modelling and evaluation of principle solutions of mechatronic systems, exemplified by tyre pressure control in automotive systems*, 2001.
- [8] X. Liu-Henke, J. Luckel, and K. P. Jaker, "An active suspension/tilt system for a mechatronic railway carriage," *Control Engineering Practice*, vol. 10, pp. 991-998, Sep 2002.
- [9] R. Radkowski, U. Frank, and J. Gausemeier, *Using evolutionary algorithms to support the design of self-optimizing mechatronic systems*, 2007.
- [10] J. Gausemeier, "From mechatronics to self-optimizing concepts and structures in mechanical engineering: new approaches to design methodology," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 18, pp. 550-560, Oct-Nov 2005.
- [11] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen, and K.-H. Grote, *Engineering design—a systematic approachy*, 2007.
- [12] J. Gausemeier, U. Frank, J. Donoth, and S. Kahl, "Specification technique for the description of self-optimizing mechatronic systems," *Research in Engineering Design*, vol. 20, pp. 201-223, Nov 2009.
- [13] A. Fluent, "A Brief History of Computational Fluid Dynamics," ed, 2008.
- [14] J. A. Francisco, "En el Túnel de Viento. Importancia de la Aerodinámica en el Diseño de Carrocerías," *CESVIMAP*, vol. 59, pp. 12-15, 2007.
- [15] M. D. Soso and P. A. Wilson, "Aerodynamics of a wing in ground effect in generic racing car wake flows," *Proceedings of the*

- Institution of Mechanical Engineers Part D-Journal of Automobile Engineering*, vol. 220, pp. 1-13, Jan 2006.
- [16] T. Briet, *Simulación CFD y Túnel de Viento*, 2009.
- [17] Z. Zhang, Y. Zhang, J. Li, and J. Wang, "Numerical Simulation on Aerodynamic Characteristics of Heavy-duty Commercial Vehicle," in *Sustainable Construction Materials and Computer Engineering*. vol. 346, W. S. Hu, Ed., ed, 2012, pp. 477-482.
- [18] M. Perraudin and Cstp, *Wind tunnel testing of low consumption vehicle Consomini*, 2004.
- [19] X. Zhang, W. Toet, and J. Zerihan, "Ground effect aerodynamics of race cars," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 59, pp. 33-49, 2006 2006.
- [20] J. Katz, "Aerodynamics of race cars," in *Annual Review of Fluid Mechanics*. vol. 38, ed, 2006, pp. 27-63.
- [21] W. H. Hucho and G. Sovran, "AERODYNAMICS OF ROAD VEHICLES," *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 25, pp. 485-537, 1993 1993.
- [22] K. S. Song, S. O. Kang, S. O. Jun, H. I. Park, J. D. Kee, K. H. Kim, and D. H. Lee, "AERODYNAMIC DESIGN OPTIMIZATION OF REAR BODY SHAPES OF A SEDAN FOR DRAG REDUCTION," *International Journal of Automotive Technology*, vol. 13, pp. 905-914, Oct 1 2012.
- [23] C. H. O. J.J. Santi, J. Bernard, D. Isler, P. Kobler, F. Kolb, N. Weidemann, *The world's most fuel efficient vehicle. Design and development of PAC-Car II*, J.J. Santi ed. Zurich: VFD, 2007.
- [24] M. Malerba, M. Argento, A. Salviuolo, and G. L. Rossi, *An approach for numerical validation of aerodynamic effects through thermography*, 2007.
- [25] M. Argento, S. Barone, F. Bianconi, P. Conti, and E. Rosati, *Reverse engineering and CFD analysis: A case study*, 2004.
- [26] X. Chen, D. Wang, Y. Wu, and Z.-D. Ma, *Simulation of the Autobody Aerodynamics for Car Interior Noise Control*, 2009.
- [27] M. Chen, W. Tang, B. Yang, and X. Hu, "Computer-aided Front and Rear Wings Aerodynamic Design of a Formula SAE Racing Car," in *Product Design and Manufacture*. vol. 120, J. B. Wen, F. X. Chen, Y. Han, and H. X. Zhang, Eds., ed, 2012, pp. 20-25.
- [28] Y. Zhang, Z. Zhang, S. Luo, and J. Tian, "Aerodynamic Numerical Simulation in the Process of Car Styling," in *E-Engineering & Digital Enterprise Technology Vii, Pts 1 and 2*. vol. 16-19, K. Cheng, Y. X. Liu, X. P. Xu, and H. L. Xie, Eds., ed, 2009, pp. 862-865.
- [29] Y.-C. Zhang, J. Zhao, J. Li, and Z. Zhang, "Wind tunnel tests and aerodynamic numerical simulations of car opening windows,"

- International Journal of Vehicle Design*, vol. 58, pp. 62-78, 2012
2012.
- [30] C. D'Anca, A. Mancuso, and G. V. Mariotti, "Optimisation of a vehicle shape by CFD code," *International Journal of Vehicle Design*, vol. 38, pp. 26-41, 2005 2005.
- [31] L. Valette, L. Savourie, and P. Kaunas Univ Technology, "Stimulation of Creativity and Innovation in Engineering: a Case Study of Mechanical Department of the Angers-Cholet Polytechnics in France," in *Global Cooperation in Engineering Education: Innovative Technologies, Studies and Professional Development - International Conference Proceedings*, ed, 2008, pp. 60-63.
- [32] P. Conti, M. Argento, and Asme, *CFD integration into design process of motorcycles*, 2006.
- [33] G. Wasselynck, B. Auvity, J.-C. Olivier, D. Trichet, C. Josset, and P. Maindru, "Design and testing of a fuel cell powertrain with energy constraints," *Energy*, vol. 38, pp. 414-424, Feb 2012.
- [34] A. Airale, M. Carello, and A. Scattina, "Carbon fiber monocoque for a hydrogen prototype for low consumption challenge," *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, vol. 42, pp. 386-392, May 2011.
- [35] F. Aguirre, "Análisis aerodinámico del vehículo para la competencia Eco-Shell," Máster en Diseño y Fabricación Integrados Asistidos por Computador, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2009.
- [36] R. Jacob, "Establecimiento de metodologías para la realización de CFD mediante NX y planteamiento de propuestas de re-diseño en la carrocería del vehículo para la competición "Shell eco-maratón 2010";" Máster en Diseño y Fabricación Integrados Asistidos por Computador, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2010.
- [37] P. Ouagne and J. Breard, "Continuous transverse permeability of fibrous media," *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, pp. 22-28, Jan 2010.
- [38] J. S. Leclerc and E. Ruiz, "Porosity reduction using optimized flow velocity in Resin Transfer Molding," *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, vol. 39, pp. 1859-1868, Dec 2008.
- [39] J. A. Garcia, L. Gascon, and F. Chinesta, "A flux limiter strategy for solving the saturation equation in RTM process simulation," *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, vol. 41, pp. 78-82, Jan 2010.
- [40] C. Ghnatios, F. Chinesta, E. Cueto, A. Leygue, and A. Poitou, "Optimizing Composites Forming Processes by Applying the Proper Generalized Decomposition," in *International Conference on Advances in Materials and Processing Technologies, Pts One and*

- Two*. vol. 1315, F. Chinesta, Y. Chastel, and M. ElMansori, Eds., ed, 2010, pp. 197-202.
- [41] A. Alfonso, J. Andres, and J. A. Garcia, "Study of the Proper Sintering Conditions of Anionically-Polymerized Polyamide 6 Matrices for the Fabrication of Greencomposites," in *Advances in Non Conventional Materials Processing Technologies*. vol. 713, M. Marcos, J. A. Sanchez, and J. Salguero, Eds., ed Stafa-Zurich: Trans Tech Publications Ltd, 2012, pp. 121-126.