

## TESINA DE MÁSTER.

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".



ALUMNO: RUBEN JACOB D.

TUTOR DE TESIS: VICENTE COLOMER R.

5 DE JULIO DE 2010



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

A mi esposa, Carola

A mis padres, Silvia y Rubén.

A mi perro, Troll

## ÍNDICE.

1.	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1.	Aerodinámica y CFD.....	8
1.2.	Evolución histórica.....	8
1.3.	Tema de la investigación.....	9
1.4.	Enfoque de la tesina.....	10
2.	MARCO TEÓRICO.....	10
2.1.	Aerodinámica de automóviles.....	10
	Efecto suelo.....	14
	Capa límite.....	14
2.2.	Túnel de viento.....	15
2.3.	El método de elementos finitos.....	17
	Pre-proceso.....	19
	Cálculo de la solución.....	20
	Post-procesado.....	20
2.4.	Análisis CFD.....	22
2.5.	Relación entre la forma y la aerodinámica.....	26
2.6.	Investigación en aerodinámica de automóviles mediante CFD.....	29
2.7.	Centros de Investigación en CFD.....	30
3.	BREVE REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL SOFTWARE CFD.....	45
3.1.	NX Nastran.....	46
3.2.	CD ADAPCO Star+ CCM.....	48
3.3.	FloEFD.....	50
3.4.	PAM-FLOW.....	51
3.5.	Ansys CFD (Fluent y CFX).....	53

3.6. Flow-3D.....	55
3.7. CFD de código abierto.....	56
Open FOAM.....	57
Free CFD.....	58
4. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	59
4.1. Problemática de la investigación.....	59
4.2. Justificación y viabilidad.....	60
4.3. Hipótesis y preguntas de la investigación.....	61
4.4. Objetivos.....	62
General.....	62
Específicos.....	62
5. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN CFD.....	62
5.1. Establecimiento de la metodología a seguir.....	62
Generación del modelo 3D a estudiar.....	63
Importación y preparación del modelo en NX.....	64
Modelado del sistema a estudiar.....	64
Determinación de las condiciones de contorno.....	65
Cálculo de la solución.....	66
Lectura y presentación de los resultados.....	67
5.2. Procedimiento seguido para la realización de los análisis.....	69
Generación y optimización del modelo 3D.....	69
Exportación e importación del modelo.....	72
Preparación final del modelo.....	75
Generación de las geometrías complementarias.....	77
Configuración de la simulación CFD.....	79
Ejecución de la solución.....	104
Post procesamiento de los resultados.....	107

5.3. Realización de un análisis CFD como comprobación de la precisión del software y el método empleado.....	120
5.4. Detalle e interpretación de los resultados obtenidos.....	122
Coeficiente aerodinámico.....	122
Comportamiento del fluido alrededor del vehículo.....	124
Efecto suelo.....	127
6. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE ELEMENTO, TIEMPO DE CÁLCULO Y RESULTADOS OBTENIDOS.....	129
6.1. Influencia de la malla sólida del vehículo.....	129
6.2. Influencia de la malla fluida con tipo de tamaño de elemento relativo.....	131
6.3. Influencia de la malla fluida con tipo de tamaño de elemento absoluto.....	132
7. PROPUESTAS PARA MODIFICACIONES.....	134
7.1. Evolución de la forma del vehículo.....	135
Modelo 01.....	136
Modelo 02.....	136
Modelo 03.....	137
Modelo 04.....	138
Modelo 05.....	139
Modelo 06.....	139
Modelo definitivo.....	141
Representación foto-realista del modelo final.....	142
8. CONCLUSIONES OBTENIDAS.....	143
Revisión de la hipótesis.....	144
Logro de objetivos.....	145
Tareas futuras.....	146
9. BIBLIOGRAFÍA.....	148
10. ANEXOS.....	151
Propuesta de Paper.....	151

Glosario de términos.....	162
Tabla de Ilustraciones.....	164



INSTITUTO  
DE DISEÑO Y  
FABRICACIÓN



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

# 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1. 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 de alta competencia, 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.

Para ello se recurrirá a la asistencia del software NX versión 7, y su solver de cálculo por elementos finitos NX THERMAL / FLOW, y el post procesador del mismo NX. Con ellos se realizará lo que se denomina análisis CFD.

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. Aun 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.

## 1.2. Evolución histórica.

*Aunque los primeros análisis matemáticos de un flujo fluido comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XVIII, cuando Laplace, Bernouilli 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.<sup>1</sup>*

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's, 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's también es que comienza 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.<sup>2</sup>

Lo que en la reciente década de los 90's era solo 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.

### 1.3. Tema de la investigación.

La presente tesina que se presenta para optar al título de "Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos Por Computador", consiste como lo señala su título, en establecer metodologías para la realización de análisis CFD mediante el software NX y en base a los resultados obtenidos en dichos análisis, plantear de propuestas de re-diseño en la carrocería del vehículo para la competición "Shell eco maratón 2010" que desarrolla el IDF.

Además del trabajo concreto que significa la realización de dichos análisis y las propuestas realizadas, se pretende realizar una investigación, a nivel de tesina, del estado del arte de éste tipo de análisis, los programas informáticos utilizados actualmente y sus características, las metodologías aplicadas en ello, y las condiciones de entorno que son comunes para todos éstos análisis, pudiéndose definir así una base general para enfrentar éstas problemáticas, de forma independiente al software utilizado.

---

1 [1]

2 [2]

#### 1.4. Enfoque de la tesina.

Esta tesina ha sido desarrollada por un Diseñador Industrial, es por ello que el enfoque que se le pretende dar junto al rigor técnico necesario, es el de lograr una mayor accesibilidad hacia el tema de la Ingeniería asistida por computador y en particular el análisis por elementos finitos y el análisis del comportamiento de fluidos por este medio, para profesionales que no tienen una formación rigurosa en la ingeniería, la física y las matemáticas, sino una comprensión más generalista del tema.

Es por lo anterior que se buscará un enfoque práctico, en una metodología comprensible para quienes no hemos estado inmersos en el mundo de la ingeniería "dura", y se incluirán aspectos explicativos durante todo el texto, como una breve introducción a la aerodinámica en automoción, un glosario de términos técnicos propios del área, y un lenguaje accesible al neófito en ésta área.

Lo anterior no debe entenderse como el que no se haya mantenido un rigor científico cuando éste se necesite, ni que no se haya desarrollado el trabajo con la seriedad necesaria, buscando obtener resultados ajustados y precisos, y la realización de una recopilación de antecedentes y una delimitación de marco teórico exhaustiva y dedicada, sino como que la presente tesina servirá de base para el estudio y acercamiento a sus contenidos para profesionales de áreas diversas, que requieran en algún momento de sus carreras, el conocimiento contenido en éste documento.

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1. Aerodinámica de automóviles.

En la introducción a ésta tesina se ha dado una breve reseña histórica de los orígenes de las disciplinas que convergen para hacer posible el desarrollo de los actuales análisis CFD, por lo que a continuación el enfoque será completamente técnico y se darán a conocer los principales aspectos a dominar antes de poder realizar un estudio aerodinámico mediante software.

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.<sup>3</sup>

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

---

<sup>3</sup> [3]



Ilustración 1- Efecto Coanda

“puntos”, por ello las fuerzas en éste 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 “pega” a ésta chorreando por ella hasta llegar al límite inferior, donde se separa gradualmente, esto también permite notar que la forma del sólido en cuestión, colabora 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. Esto es llamado efecto *“Coanda”*.

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 triédro 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**.

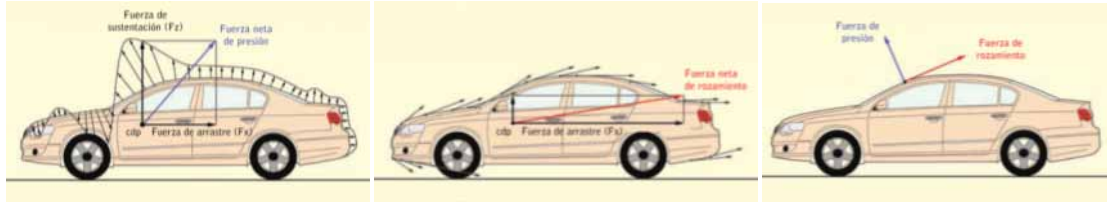


Ilustración 2 - Fuerzas Aerodinámicas, centro de presiones, y componentes en cada dirección.<sup>4</sup>

Debido a 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, lo cual resulta ser el tema principal de ésta tesina.

Es importante considerar para que éstos 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 (Ver glosario de términos incluido), 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, obteniéndose entonces la siguiente fórmula:

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

$C_x$ =Coeficiente de Arrastre, será un número adimensional, es decir sin unidades.

$F_x$ =Fuerza de Arrastre, se obtendrá en túnel de viento o mediante CFD, en Newtons, N

$\rho$ =Densidad del Aire, es un valor conocido de 1,2 Kg/m<sup>3</sup>

$V$ =Velocidad del Vehículo/Aire, se supone conocido, y se expresa en metros por segundo, m/s

$S$ =Superficie frontal de referencia, se obtiene por medición o proyección del vehículo mediante ordenador, o si no se cuenta con el modelo 3D del vehículo, por la multiplicación de su altura por su ancho y por 0.8 - 0.85. Se expresará en metros cuadrados, m<sup>2</sup>

<sup>4</sup> [3]

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.<sup>5</sup>

*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.*

Como referencia se adjunta la siguiente tabla con valores de  $C_x$  para algunas formas y vehículos conocidos, algunos suministrados por los fabricantes otros calculados previamente.

**Tabla 1 - Coeficientes aerodinámicos de algunas formas y vehículos.<sup>6</sup>**

Cuerpo	Superficie frontal ( $m^2$ )	$C_x$	$SC_x (m^2)$
Audi A3 (2003)	2,13	0,32	0,68
BMW Serie 1 (2004)	2,09	0,31	0,65
Citröen CX (1974)	1,93	0,36	0,71
Citröen C4 coupe		0,28	
Opel Astra (2004)	2,11	0,32	0,68
Peugeot 807 (2002)	2,85	0,33	0,94
Renault Vel Satis (2002)	2,37	0,33	0,79
Hispano Divo (2003) <sup>1</sup>	9,2	0,349	3,21
Irizar PB (2002) <sup>1</sup>	9,2	0,55	5,06
Camión con deflectores <sup>1</sup>	9	0,70	
Autobús <sup>1</sup>	9	0,49	
Motocicleta <sup>1</sup>		0,70	
Fórmula 1 en Mónaco (el mayor) <sup>2</sup>		1,084	
Fórmula 1 en Monza (el menor) <sup>2</sup>		0,7	
Perfil alar simétrico <sup>1</sup>		0,05	
Esfera <sup>1</sup>		0,5	
Cubo valor de referencia <sup>1</sup>		1	

<sup>5</sup> [4]

<sup>6</sup> Tabla obtenida desde Wikipedia ([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)). Los  $C_x$  son solamente aproximados y referenciales.

### 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 imagen siguiente muestra los dos tipos de capas límite existentes, vale decir, laminar o turbulenta, dependiendo del flujo que exista, la viscosidad del fluido, y la calidad superficial de la pared.

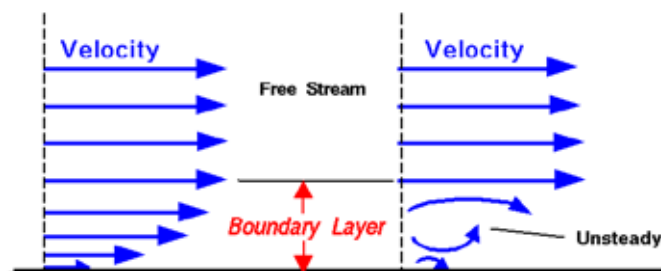


Ilustración 3 - Esquema de Capa Límite Laminar y Turbulenta.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> Imagen difundida en internet hallada mediante Google.

El concepto de capa límite resulta importante pues determinará en cierta medida, dependiendo también del tamaño del vehículo en movimiento, el que 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.

## 2.2. 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 aun, de túneles que tengan las condiciones adecuadas para pruebas rigurosas el cálculo por ordenador es un excelente reemplazo y con un costo enormemente menor. Por ejemplo Ferrari cuenta con los túneles de viento más sofisticados de la Fórmula Uno, aunque el de McLaren (inaugurado a finales de 2000 en Surrey, Inglaterra) y el de Benetton (capaz de admitir monoplazas de tamaño real y simular velocidades cercanas a los 480 km/h) no son mucho menos eficientes. Toyota ha diseñado y construido un complejo de más de 30.000 m<sup>2</sup> equipado con los últimos avances en tecnología, y así cada fabricante de automóviles, de competición y urbanos depende aún de éste tipo de tecnología, sin embargo la integran con pruebas virtuales que ahorran muchos de los valiosos minutos en túnel de viento, dejando éste para ensayo claves, y recuperando los datos obtenidos para alimentar los software cálculo con valores precisos, actuales y pertinentes a cada ensayo.



Ilustración 4 - Vista exterior del Túnel de Viento de Ferrari.<sup>8</sup>

---

<sup>8</sup> Imagen difundida en la red, hallada a través de buscador Google.

Existen muchos tipos de túneles de viento, dependiendo de sus objetivos de ensayo, algunos sirven para paracaidismo, de modo que tienen una configuración vertical, otros están destinados a aeronáutica, por lo que sus dimensiones son mayores, etc. pero de forma genérica pueden describirse como conductos que poseen un ventilador, accionado por un motor, que genera un flujo constante y definido de aire. *Los tipos más comunes son los Abiertos o Eiffel y los Cerrados o cíclicos.*<sup>9</sup>

Para simular las condiciones reales, es necesario simular las condiciones atmosféricas normales, sin alteraciones producidas por el clima o situaciones particulares. Estas se caracterizan por un grado bajo de turbulencia (definida como perturbaciones alrededor de un valor medio de velocidad de el aire y que quedan retratadas por el valor de Re). Es necesario entonces contar con un túnel que produzca aire en condiciones similares de turbulencia, es decir, con niveles bajos.

Los túneles de viento poseen varios sectores dentro de su trayecto. La parte de interés para la experimentación es la llamada **“sección de pruebas”**, que debe normalmente es transparente para permitir la observación y la filmación fácilmente, y comúnmente ya tiene incorporadas a ella cámaras, surtidores de humo, sensores y otros elementos estratégicamente ubicados, en ella se instala el modelo del vehículo o forma cualquiera, y diferentes sensores miden las fuerzas que experimenta éste y las condiciones del aire que atraviesa esta sección.

La sección de pruebas suele ser de menor área que el resto del túnel, así por “conservación de caudal” genera una velocidad mayor cerca del modelo sin aumentar la velocidad del ventilador. Para visualizar el comportamiento del fluido este se suele “teñir” mediante humo coloreado, o bien se adhieren a la superficie del vehículo pequeñas cintas que al recibir el aire se levantan dando un indicio de su comportamiento.



Ilustración 5 - Túnel de Viento<sup>10</sup>

<sup>9</sup> [5]

<sup>10</sup> Imagen ubicada en la web de Armfield, fabricante del túnel de viento mostrado. (<http://www.armfield.co.uk>)



En la imagen superior se ven con claridad las diversas secciones que conforman el túnel de viento, y el pequeño porcentaje que constituye realmente la sección de pruebas. En un extremos se encuentra el ventilador y el otro el cono difusor.



Ilustración 6 - Túnel de Viento de Audi, y preparación de una banda de suelo rodante.<sup>11</sup>

A pesar de que normalmente los ensayos son realizados, como se mencionó previamente, en condiciones climáticas neutras, el túnel de Audi tiene las capacidades para simular diferentes climas, y poder estudiar así, el comportamiento del automóvil frente a condiciones adversas.

Uno de los aspectos más importantes de un túnel de viento es el denominado “suelo rodante”, donde una banda rodante se desliza bajo las ruedas del vehículo inmóvil, simulando el efecto que se produce en la realidad al avanzar el coche.

### 2.3. El método de elementos finitos.

La comprensión de lo que los métodos de cálculo por elementos finitos significan, es un proceso complejo, sin embargo de modo coloquial, es posible decir que el MEF o FEM (y por ende el CFD que se realiza por MEF), por su sigla en español e inglés, consiste en tomar un cuerpo y dividirlo en pequeños elementos, adyacentes entre sí, y que entre todos se corresponden con el cuerpo original en su geometría de modo cada vez más perfecto a menor tamaño y mayor cantidad de elementos.

Esta idea básica permite que situaciones cuyo cálculo real resulta imposible de realizar dada justamente la infinidad de operaciones que requiere, se vuelven posibles de calcular dado que si bien éstos elementos son pequeños y muchos, tienen un número finito, y están también delimitados finitamente, por sus bordes sean bi o tridimensionales, obteniéndose con la resolución individual de cada uno de ellos da como resultado la resolución del problema inicial.

---

<sup>11</sup> Imágenes difundidas en la red, halladas mediante buscador Google.

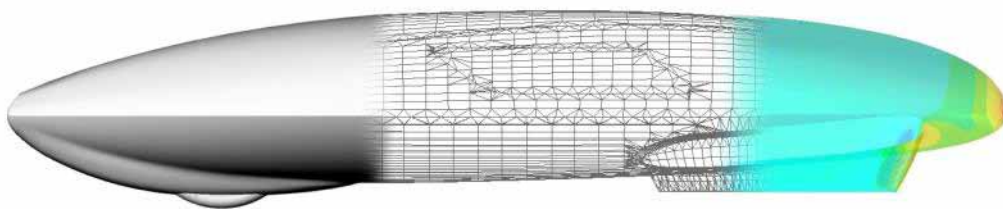
El procedimiento que se utiliza es el siguiente:

- El continuo se divide en un número finito de partes, "elementos", cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados "nodos". Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación ó funciones de forma.

El MEF, por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo **aproximado que se acerca al modelo real**, esta transformación se denomina "**discretización del modelo**". El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.<sup>12</sup>

Si bien éste método fue desarrollado inicialmente en 1943, por Richard Courant, quien utilizó el método de Ritz de análisis numérico y minimización de las variables de cálculo para obtener soluciones aproximadas a un sistema de vibración, no fue hasta la aparición de las primeras supercomputadoras en los 60's que empezó su desarrollo con miras a una aplicación comercial y realmente de utilidad.

El actual algoritmo de resolución FEM se divide en 3 etapas:



**Ilustración 7 - Etapas del FEM. Geometría CAD, Malla de Elementos Finitos, Resultados Gráficos.**<sup>13</sup>

---

<sup>12</sup> [6]

<sup>13</sup> Ilustración del autor de ésta tesina.

## Pre-proceso.

### Creación de la malla

En la práctica el proceso de discretización es realizado mediante software específico, dada la complejidad que significa realizarlo mediante cálculo manual. Para realizar éste proceso el cuerpo a analizar, normalmente proveniente de un software de CAD, es “**mallado**”, convirtiéndose en pequeñísimos elementos que pueden tener diversas formas, bi o tridimensionales, las formas más comunes suelen ser triángulos, pero también se utilizan tetraedros para simulaciones tridimensionales que requieran mayor exactitud por ejemplo, la predicción del flujo de un material polimérico en un proceso de inyección. Actualmente muchas aplicaciones están implementando nuevas formas de malla basadas en hexágonos, hexaedros tridimensionales o incluso figuras más complejas, ya que dichas figuras permiten una mayor exactitud en la reconstrucción del modelo original, una correspondencia plena entre la malla y la geometría inicial.

Cuando la malla, es decir los elementos están definidos, se realiza el cálculo individual, obteniéndose el resultado para el conjunto. Estos cálculos, aun con los potentes ordenadores actuales suelen llevar bastante tiempo, a mayor cantidad de elementos, el tiempo aumenta de forma exponencial, pero también la exactitud del resultado. En la imagen siguiente podemos ver cómo influye la cantidad de celdas en la malla, es decir los elementos, en la calidad del resultado en un análisis CFD, pudiendo diferir valores cercanos al 10%, lo que en la mayoría de los casos podría ser un nivel de error inadmisibile.<sup>14</sup>

### Definición de condiciones de contorno.

Además el software especializado en FEM, posee la capacidad para ingresar lo que se conoce genéricamente como “**condiciones de contorno**”, ello incluye diferentes condiciones dependiendo del tipo de análisis FEM realizado, y podrán ser fuerzas, zonas de fijación, vínculo o rozamiento, momentos flectores, tipo de fluido en el caso de CFD, etc. y también las condiciones propias como materialidad, características de superficie, etc.

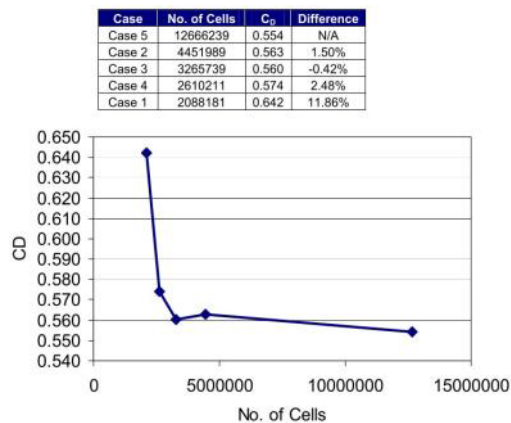


Ilustración 8 - Tabla Drag Coefficient (Cx) vs N° de Elementos de malla.<sup>15</sup>

<sup>14</sup> [7]

<sup>15</sup> [7]

## Cálculo de la solución.

Esta etapa, prácticamente "invisible" para el usuario promedio de un software FEM, es realizada por el denominado "solver", el núcleo de cálculo del programa informático, que busca la solución para las ecuaciones del sistema obteniendo los resultados parciales que permiten la generación del resultado total.

## Post-procesado.

En la etapa final del análisis FEM, dependiendo de las características del software utilizado, se podrá visualizar los resultados calculados mediante una serie de recursos gráficos como escalas de colores que definen los resultados para cada zona del vehículo, líneas aerodinámicas en el caso del CFD, que muestra el comportamiento del fluido entorno al vehículo, resultantes vectoriales, notaciones de zonas mínimas y máximas, etc. Las siguientes imágenes ilustran un proceso de CFD realizado en NX para el desarrollo de ésta tesina.

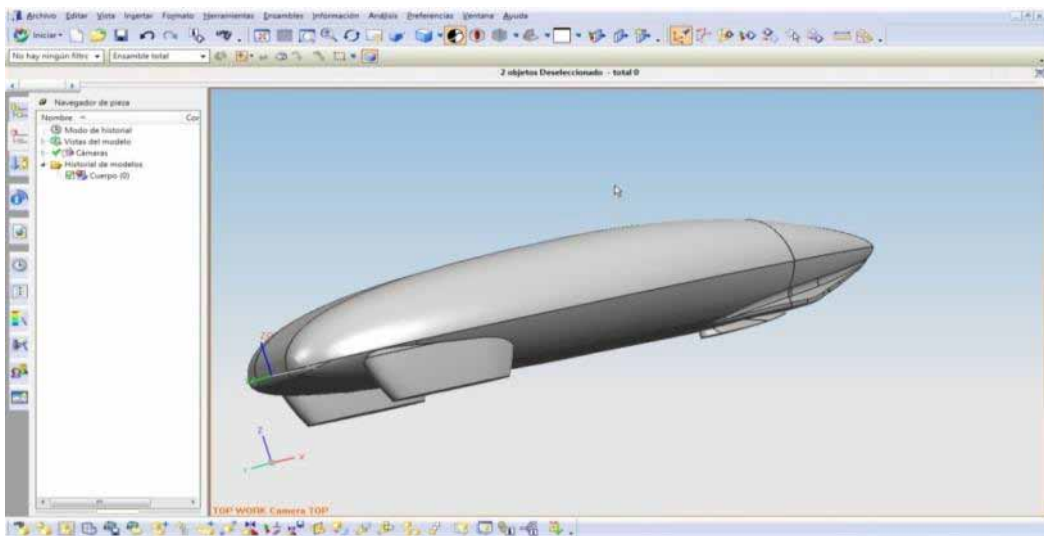


Ilustración 9 - Geometría CAD - Pre-procesado en NX

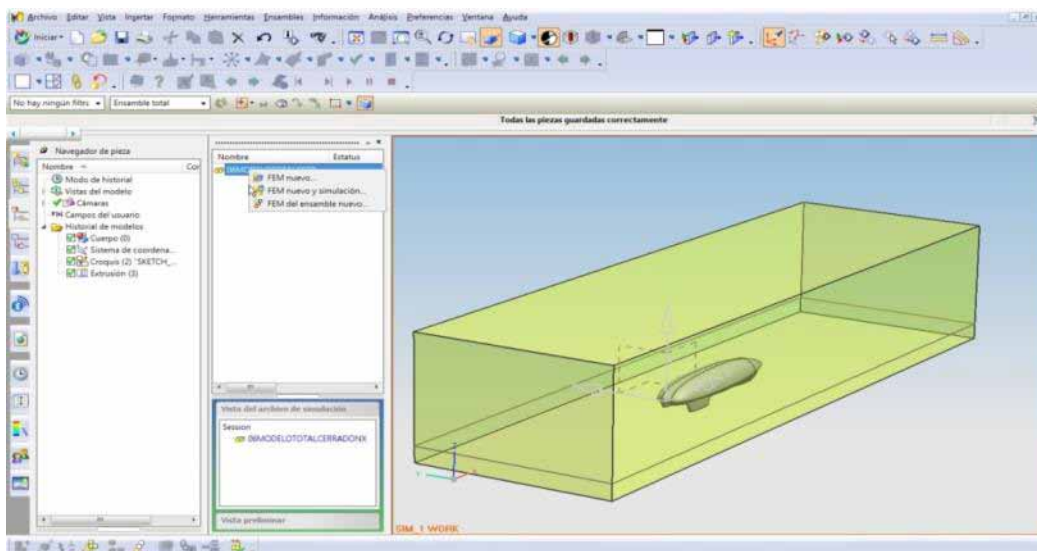


Ilustración 10 - Establecimiento de condiciones de Contorno - Pre-procesado en NX

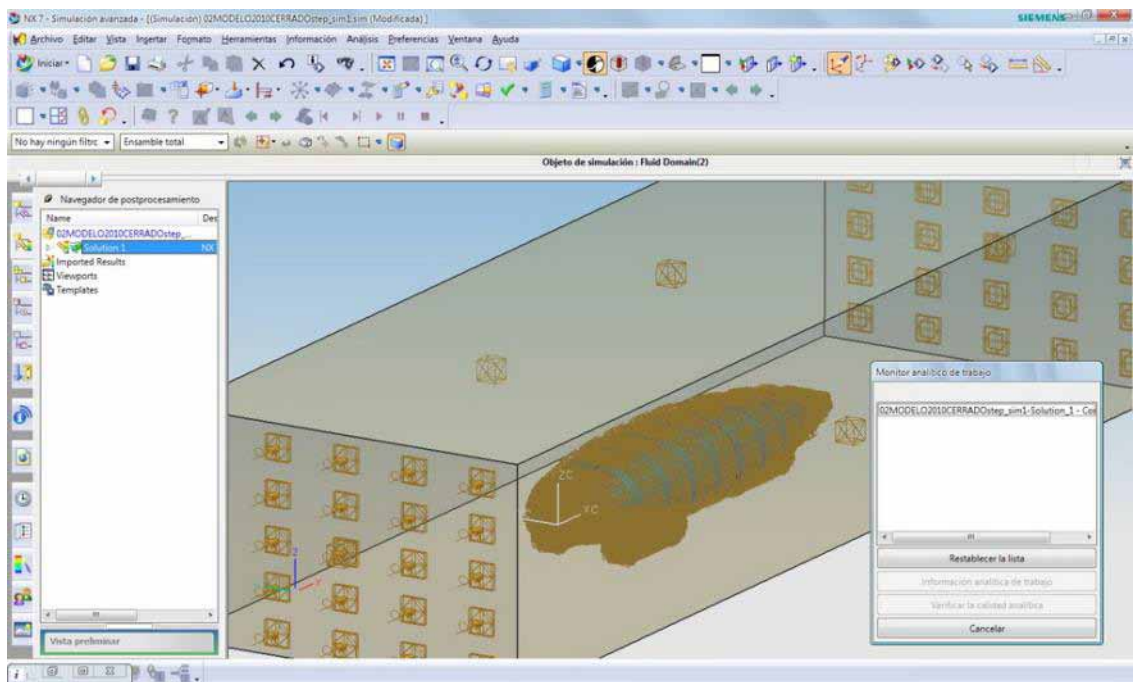


Ilustración 11 - Mallado de la geometría - Pre-Procesado en NX

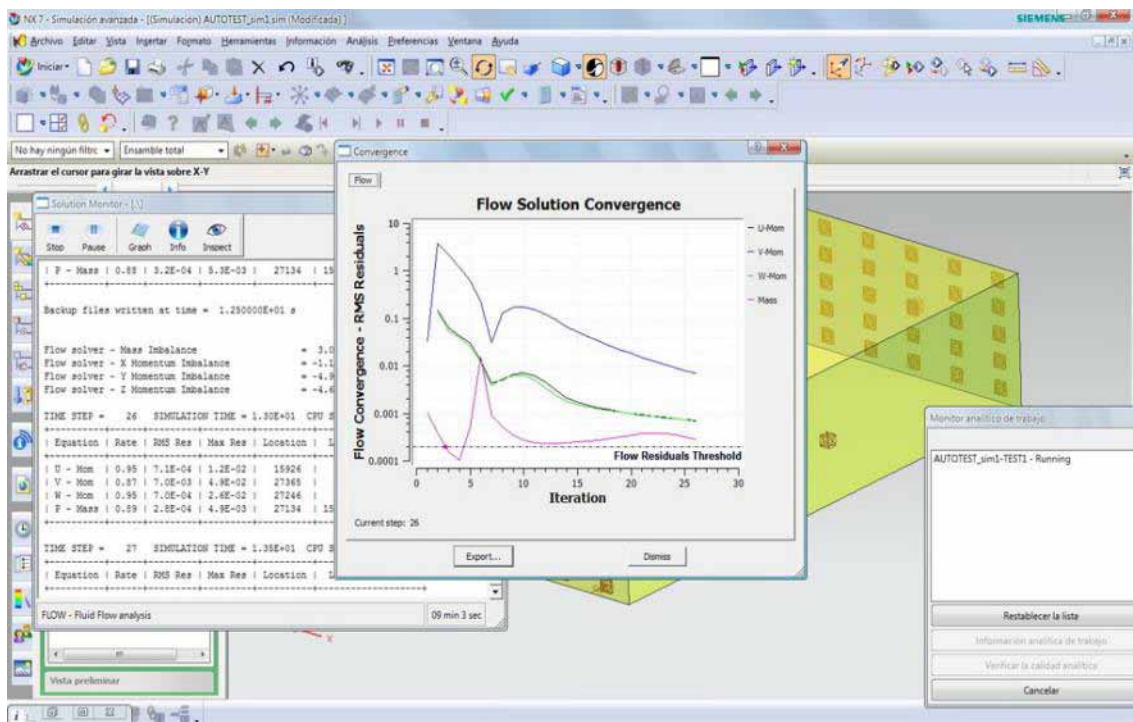
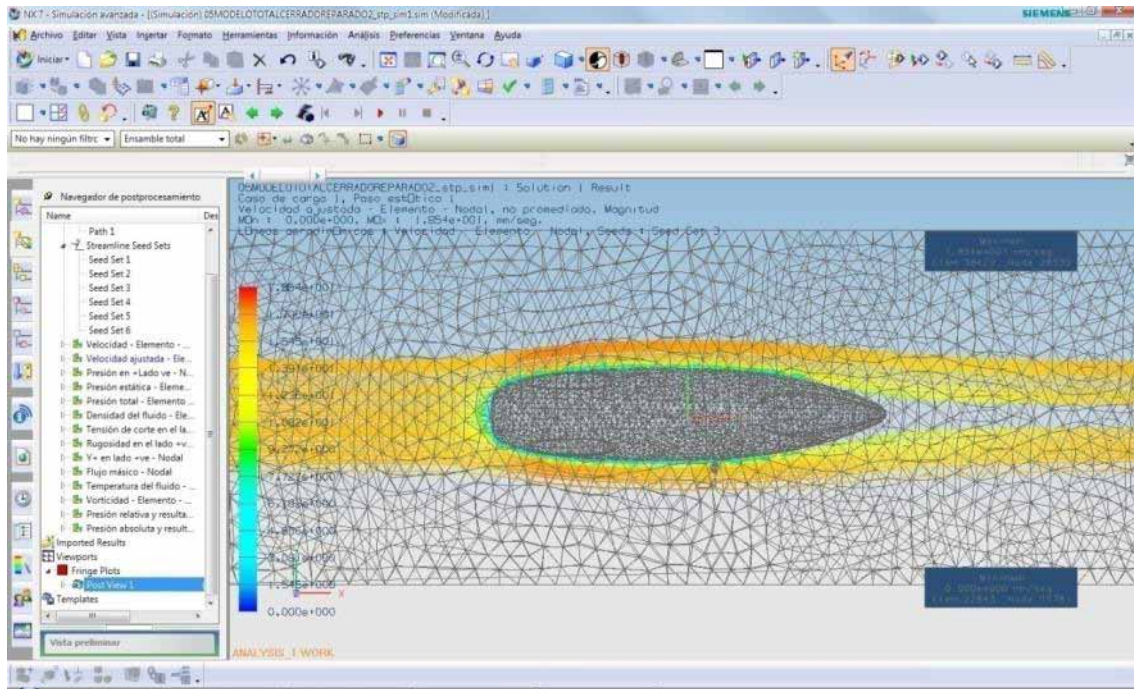


Ilustración 12 - Cálculo de la solución – Procesado en NX



**Ilustración 13 - Visualización de los resultados - Post-Procesado en NX**

Dentro de las aplicaciones actuales más conocidas en el ámbito del FEM podemos encontrar software genérico, que posee una amplia variedad de posibilidades de cálculo de éste tipo, como ANSYS, ALGOR, COSMOS, NASTRAN y ABAQUS cuyos solvers son capaces de resolver problemas de tipo estructural, dinámico o estático, así como CFD, incorporando para ello algunos solvers especializados, o bien software específico como FloEFD, Star CCM+ FLUENT Y CFX (integrados actualmente a ANSYS), enfocados en CFD y con amplias capacidades en esa área, MoldFlow y ESI PAM-RTM para el cálculo de inyección de polímeros, Deform 3D para el cálculo y simulación de procesos con extracción de viruta como taladrado, la gama especializada de ESI Group con PAM-CRASH a la cabeza para simulación de impactos de vehículos. Además de ello deben contarse también los solvers incorporados a los softwares CAD, como CATIA, NX, ProEngineer, y también en los de gama media como Solidworks y SolidEdge.

**Hoy es posible encontrar inclusive programas gratuitos de código abierto que son capaces de realizar FEM tridimensional a niveles aun menores, pero con una calidad cercana a la comercial como OpenFOAM y Dolfyn.**

Esta enorme variedad refleja también el amplio campo comercial que tiene éste tipo de programas informáticos hoy en día, surgido a su vez de la necesidad de emplearlos en la industria de forma cotidiana.

#### 2.4. Análisis CFD.

Es importante comprender que el análisis **aerodinámico** de un vehículo mediante un software de elementos finitos es solo 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 mas directamente relacionados al análisis aerodinámico.

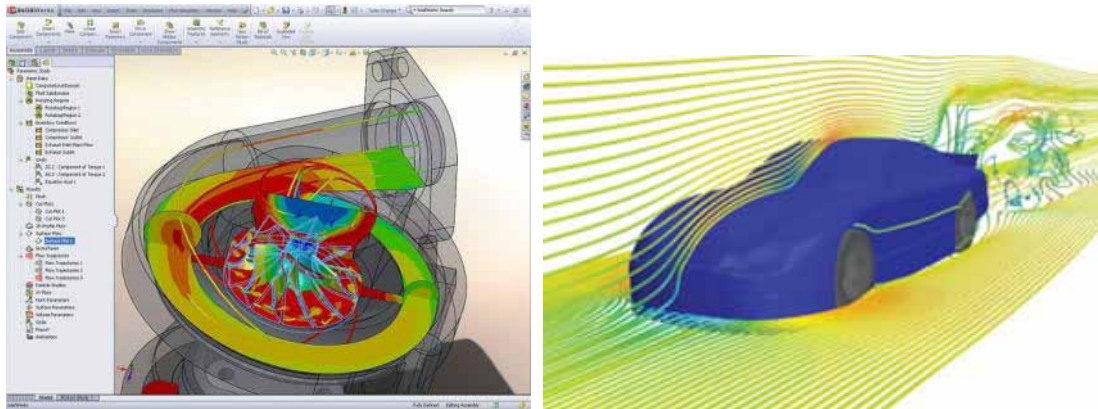


Ilustración 14 - CFD de un distribuidor y de un automóvil en Solidworks (Cosmos) y Ansys respectivamente.<sup>16</sup>

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, etc.<sup>17</sup>

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 ducto, 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. **Timoteo Briet Blanes**, uno de los principales estudiosos de las técnicas CFD, con quien se ha tenido la fortuna de tener contacto para la realización de ésta tesina, y contar con su consejo en algunos temas, señala lo siguiente:

*“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*

<sup>16</sup> Imágenes difundidas en la red, halladas mediante el buscador Google.

<sup>17</sup> [8]

son mayores pues, como vimos, la densidad es mayor; para evitar este tipo de problemas de escalaridad, 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 "m" la viscosidad, sea "A" el área o superficie" y sea "r" la densidad:

$$Re = \frac{V \times A\rho}{\mu}$$

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".<sup>18</sup>

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. Aún 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, la quimera es 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.

---

<sup>18</sup> [5]



Briet Blanes 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.<sup>19</sup>*

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 modelo "k-epsilon" (k-ε) 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.<sup>20</sup> 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-ε.*

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 aun 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

---

<sup>19</sup> [9]

<sup>20</sup> [10]

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.<sup>21</sup>

## 2.5. Relación entre la forma y la aerodinámica.

Este apartado que viene a ser un complemento al 2.1, se ha postergado hasta este punto de la tesina, pues se ha considerado adecuada la lectura o conocimiento previo de los factores tratados hasta ahora, para lograr una mejor comprensión del tema que aquí se desarrolla.

Punto de estancamiento y zona frontal.

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.<sup>22</sup>*

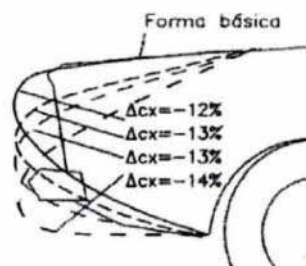


Ilustración 15 - Influencia de la altura del punto de estancamiento.<sup>23</sup>

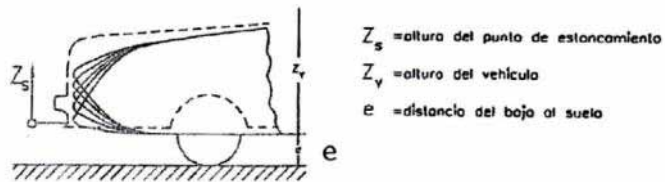
En la ilustración anterior es posible ver que el descenso del punto de estancamiento resulta un factor que contribuye a la disminución del coeficiente  $C_x$  de un vehículo, sin embargo pasado un cierto punto, esta mejora desaparece. Esta gráfica, en rigor, es válida solamente para la forma del ejemplo 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 éstas situaciones.

---

21 [5]

22 [11]

23 [12]



**Ilustración 16 - Alturas que influyen en el punto de estancamiento.<sup>24</sup>**

Siempre la disminución del punto de estancamiento tiene que estar en directa relación con la evolución de la altura del vehículo, obteniéndose reducciones máximas de  $C_x$  cuando:

$$\frac{Z_s}{Z_v} \approx 0.5$$

Si bien existe una serie de estudios relativos a los ángulos de inclinación del parabrisas y la luneta trasera, estos, 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.



**Ilustración 17 - Punto de estancamiento en el vehículo del IDF.<sup>25</sup>**

Geometría de la zona posterior.

El factor que 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.

<sup>24</sup> [13]

<sup>25</sup> Imagen obtenida durante la realización de análisis CFD en los modelos preliminares del vehículo del IDF.

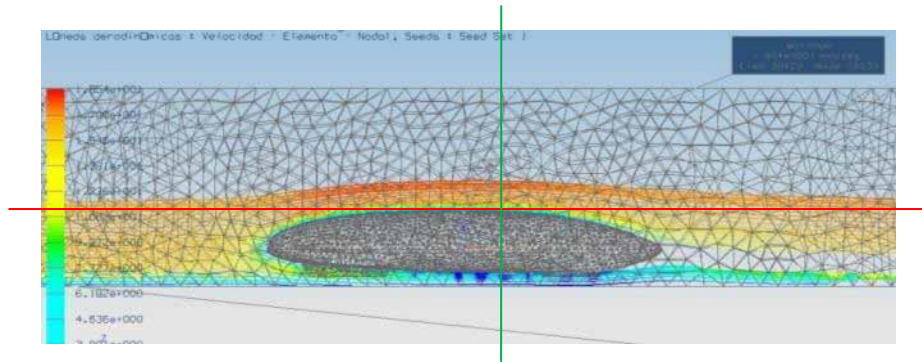


Ilustración 18 - Análisis preliminar vehículo IDF.<sup>26</sup>

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 autos 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  $C_x$ . **Para efectos de la determinación de las fuerzas laterales, el que será llamado  $C_y$ , o coeficiente de empuje lateral, el área proyectada a considerar será el área lateral y no la frontal usada para el cálculo del  $C_x$ .**<sup>27</sup>

<sup>26</sup> Imagen obtenida durante la realización de análisis CFD en los modelos preliminares del vehículo del IDF.

<sup>27</sup> Santin, J.J. et al., *The world's most fuel efficient vehicle, Design and development of PAC Car II. Parte 2.pdf* (VDF, 2007).

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.

## 2.6. Investigación en aerodinámica de automóviles mediante CFD.

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. En España se debe destacar el trabajo de **Timoteo Briet Blanes**, enfocado en el CFD para automoción y competencia, y que difunde en cursos como *“Aerodinámica y CFD”, y más recientemente en la implementación del programa de “Máster en Aerodinámica y CFD de Coches de Competición y Dinámica Vehicular.”*

Se debe distinguir al momento de revisar la investigación más reciente relacionada con ésta tesis, la investigación CFD general, la investigación orientada a fenómenos de transmisión térmica, 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, 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 maratón 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<sup>28</sup>.

Al respecto cabe destacar los trabajos de **M. Argento<sup>29</sup>, Xin Chen<sup>30</sup>, Yingshao Zhang<sup>31</sup>, y Masaru Koike<sup>32</sup>** donde se analizan diferentes aspectos para los que el CFD puede

---

<sup>28</sup> [15]

<sup>29</sup> [16]

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, y presentados en conferencias del área del Diseño Industrial como 2009 la "10th International Conference on Computer-aided Industrial Design & Conceptual Design", y que, en su mayoría, han servido como documentos de consulta para ésta tesina.

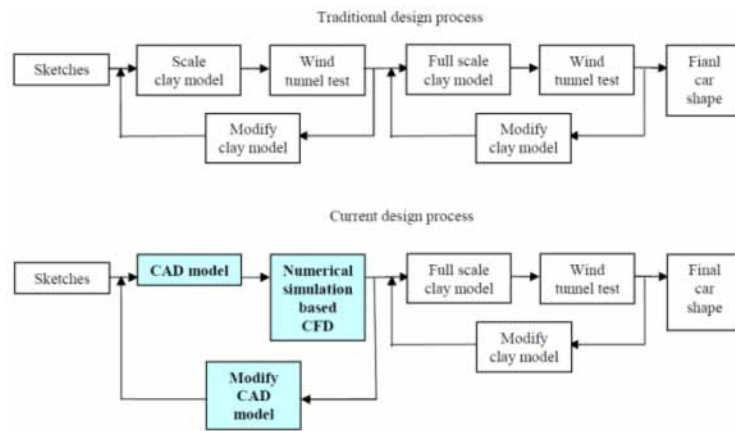


Ilustración 19 - Comparativa en el proceso de la forma de un vehículo con y sin la utilización de simulación CFD, fuente "Applied Mechanics and Materials Vols. 16-19 pág. 863.<sup>33</sup>

Resulta importante además destacar la aplicación de las simulación CFD en áreas afines al diseño, como la biomecánica, como muestra el trabajo de **Thijs Defraeye y Bert Blocken**<sup>34</sup>, "Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches", donde se revisa la influencia de los cambios posicionales del un ciclista en el coeficiente aerodinámico del vehículo.

## 2.7. Centros de Investigación en CFD.

En las siguientes páginas se detallan mediante una tabla que consigna su nombre, procedencia, principales investigadores, líneas de investigación, proyectos en curso y publicaciones más recientes, los centros de investigación dedicados al CFD en el mundo.

Cabe destacar que la mayoría de estos centros está dedicado al CFD para aplicaciones como la turbo-maquinaria, la hidrodinámica y otras áreas diferentes de la aerodinámica, y los que apuntan a ésta área lo hacen principalmente a través de estudios para aeronaves y no hacia vehículos terrestres, siendo extremadamente escasos los centros de estudios que utilicen el CFD para desarrollo de vehículos terrestres experimentales.

<sup>30</sup> [17]

<sup>31</sup> [18]

<sup>32</sup> [19]

<sup>33</sup> [18]

<sup>34</sup> [20]

Nombre	Estado / País	Grupo de Investigación	Líneas de Investigación	Últimas Publicaciones
NEAR inc. pertenece a Nielsen Engineering & Research	California, EE.UU.		<p>Error and Uncertainty Modeling or Solution Quality Assurance (under construction).</p> <p>MDO Design Aeroelasticity MDO Design Configuration</p> <p>Unstructured MacroCell.</p> <p>Methodology for Dynamic Stall Kinetic-Based CFD Algorithm</p> <p>High-Order Accurate Implicit. Method for Rotor Aerodynamics. Turbulent Flow Aero-Optical Distortion. CFD Information Management.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Robert. E. Childs and Patrick H. Reisenthel Probabilistic Error Modeling in Computational Fluid Dynamics,</b> [disponible como RTO-MP-AVT-147 Paper 1]  Copyright © 2007</li> <li>• <b>Robert. E. Childs, John A. Ekaterinaris, and Patrick H. Reisenthel A High-Accuracy Solution-Adaptive Unstructured Macro-Cell Algorithm for CFD,</b> [disponible como AIAA Paper 99-0917 Copyright © 1999</li> <li>• <b>Patrick H. Reisenthel and Robert E. Childs Wave Number-Based Criterion for Dynamic Mesh Refinement in CFD,</b> [disponible como AIAA Paper 99-0300] Copyright © 1999</li> <li>• <b>Burke Treidler, John A. Ekaterinaris and Robert E. Childs Efficient Solution Algorithms for High-Accuracy Central Difference CFD Schemes,</b> [disponible como AIAA Paper 99-0302] Copyright © 1999</li> <li>• <b>Patrick H. Reisenthel Novel Concepts for a CFD-Enhanced ASTROS Capability,</b> [disponible como NEAR TR 510] Copyright © 1996</li> </ul>
<b>Fluid Dynamics Research Group</b>	Quebec, Canadá.	<b>Profesor Tony Lucey</b> FDRG Director	Fluid Flow & Heat Transfer	

		<p><b>Profesor Asociado Tilak Chandratilleke</b>  Jefe de Departamento de Ingeniería Mecánica  <b>Prof Richard Horsley</b>  Profesor Emérito de Ingeniería Mecánica  <b>Prof M.O. Tade</b>  Decano de Ingeniería</p> <p><b>Dr. Tim Gourlay</b></p>	<p>Fluid Structure Interaction</p> <p>Marine Vehicle Hydrodynamics</p> <p>Non-Newtonian Fluid Flow</p> <p>Fluid Systems Design</p> <p>Renewable Energy</p> <p>Bio-medical Engineering</p> <p>Cleaner Production Processes</p> <p>Marine Vehicle Hydrodynamics</p>	
Vienna University of Technology, Chemical Engineering, CFD-Group	Viena, Austria.			<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Horvath, C. Jordan, M. Harasek</b>, "Influence of Vortex-Finder Diameter on Axial Gas Flow in Simple Cyclones"; <i>Productos Químicos y Procesos de Modelado</i>, 3 (2008), 1; 26 S</li> <li>• <b>M. Miltner, A. Makaruk, M. Harasek, A. Friedl</b>: "Computational fluid dynamic simulation of a solid biomass combustor: modelling approaches"; <i>Clean Technologies and Environmental Policy</i>, 10 (2008), 2; S. 165 - 174</li> <li>• <b>C. Jordan, M. Harasek</b>: "Improvement of a combustion unit based on a grate furnace for granular dry solid biofuels using CFD methods"; "PRES 2008 and System Engineering", (2008)</li> <li>• <b>C. Jordan, M. Harasek, C. Maier, F. Winter, G. Aichinger, C. Feilmayr, S. Schuster</b>: "CFD Simulation of Heat Transfer and High Temperature Conversion of Plastic Particles after Injection into Blast Furnace Raceway"; "</li> </ul>



<p><b>University of Toronto. Institute for Aerospace Studies</b></p>	<p>Ontario, Canadá.</p>	<p><b>David W. Zingg.</b>  Profesor y Director</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Propulsión Unsteady Gasdynamics, Prof. J.J. Gottlieb.</li> <li>· Computational Fluid Dynamics and Propulsion, Prof. C.P.T. Groth.</li> <li>· Combustion and Propulsion , Prof. O.L. Gulder.</li> <li>· High-Speed Vehicle Propulsion Systems , Prof. J.P. Sisljan.</li> <li>· Computational Aerodynamics , Prof. D.W. Zingg.</li> <li>· Experimental Fluid Dynamics , Prof. A. Ekmekci.</li> <li>· Flow Control &amp; Experimental Turbulence , Prof. P. Lavoie</li> </ul>	
<p><b>ESTACA FRANCIA asociada a Escuela Técnica Superior de Ingenierías Industrial y Aeronáutica de Terrassa (ETSEIAT) Universidad Politécnica de Cataluña</b></p>	<p>Francia.</p>	<p><b>Jean Le Guen</b> Responsable de Laboratorio  <b>Michaël Chauvin</b>  Profesor Investigador  <b>Stéphane Gillet</b>  Profesor Investigador</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <b>Parametric modelling</b></li> <li>· Comfort</li> <li>· Roadworthiness</li> <li>· <b>Functional specification of road-holding systems</b></li> <li>· Power-assisted steering</li> <li>· Front and rear axles</li> <li>· Suspension</li> <li>· <b>Experimental qualification of road-holding and comfort</b></li> <li>· Drivability</li> <li>· Active safety</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· <b>Michaël Chauvin (ESTACA), Matthieu Amblard (ARCELOR MITTAL), "Allègement des liaisons au sol par introduction d'Acier THR : méthodologie et résultats"</b>, SIA- Dynamique du véhicule, 14<sup>ième</sup> Congrès international, Lyon, le 21 juin 2007</li> <li>· <b>Michaël Chauvin (ESTACA), Matthieu Amblard (ARCELOR MITTAL), "A Weight reduction study of chassis parts on the elasto-kinematic behavior and using Advanced High Strength steel"</b>, Vehicle Dynamics Expo, Stuttgart, 9<sup>th</sup> May 2007</li> <li>· <b>Michaël Chauvin, Bertrand Lascoup (ESTACA), "Influence of composite parts on the dynamics behavior of an automotive steering column"</b>,</li> </ul>

				<p>16<sup>ième</sup> journée nationales sur les composites, Toulouse, juin 2009</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stéphane Gillet, Ahmed Chaïbet (ESTACA), Zoran Dimitrijevic (PSA), "Impact Harshness and steering input response on a twist beam axle : Improvement by using magneto rheological bushing" SIA- Dynamique du véhicule, 15<sup>ième</sup> Congrès international, Lyon, le 24 septembre 2009</li> </ul>
<p>CFD Research Corporation (CFDRC)</p>	<p>Alabama, EE.UU.</p>	<p><b>Dr.-Ing. Jochen Marzi</b> Director del Departamento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerospace and defense</li> <li>• biomedical and life sciences</li> <li>• energy and materials technologies</li> <li>• Hydrodynamics</li> <li>• wave resistance and free surface flow</li> <li>• hull form optimisation</li> <li>• wake predictions</li> <li>• propeller flow</li> <li>• submarine hydrodynamics</li> <li>• manoeuvring</li> <li>• aerodynamic flow</li> </ul>	
<p>Computational Fluid Dynamics and Aeroacoustics Universidad</p>	<p>Berlin, Alemania.</p>	<p><b>Frank Thiele</b>  Profesor Doctor en Ingeniería</p>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mockett, C.; Perrin, R.; Reimann, T.; Braza, M.; Thiele, F. <i>Analysis of detached-eddy simulation for the flow around a circular cylinder with reference to PIV data,</i> <i>Journal of Flow, Turbulence and Combustion,</i></li> </ul>

Berlin		Jörn Sesterhern  Prof. Doctor en Ciencias Técnicas		<p>2010</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Bake, F.; Richter, C.; Mühlbauer, B.; Kings, N.; Röhle, I.; Thiele, F.; Noll, B.</b> <i>The Entropy Wave Generator (EWG): A Reference Case on Entropy Noise.</i>, <i>Journal of Sound and Vibration</i>, Vol. 326, 2009</li> <li>• <b>Berns, A.; Buder, U.; Obermeier, E.; Wolter, A.; Leder, A.; Frederich, O.; Thiele, F.</b> <i>Aero-Micro-Electromechanical System sensor arrays for time resolved wall pressure measurements</i>, <i>AIAA Journal</i>, Vol. 47, 2009</li> <li>• <b>Buske, C.; Richter, C.; Thiele, F.; Yu, C.; Zhuang, M.</b> <i>Validation of a Zonal Method Computing the Sound Radiation from Lined Ducts</i>, <i>Proceedings of the the 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference)</i>, Miami, Florida, May 11-13, 2009</li> <li>• <b>Busse, S.; Richter, C.; Kückens, C.; Müller, U.; Enghardt, L.; Thiele, F.</b> <i>Experimental and Numerical Characterisation of a Non-Locally Reacting Liner</i>, <i>Proceedings of NAG/DAGA 2009 International Conference on Acoustics</i>, Rotterdam, The Netherlands, 2009</li> </ul>
Computational Mechanics Laboratory de la Universidad de Ciencias	Kiel, Alemania.		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Biomedical engineering</li> <li>• Aerodynamics of wind-turbine</li> <li>• Topical wind turbine projects</li> </ul>	<p><b>M. Schrumpf, P. Schaffarczyk</b>, <i>Untersuchungen der transsonischen Durchströmung eines Ejektors</i>, Bericht des Labors für numerische Mechanik 21, Kiel, Feb. 2001. <b>M. Schrumpf, P. Schaffarczyk</b> <i>Erarbeitung</i>,</p>

Aplicadas de Kiel			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unconventional wind-turbines</li> <li>• Thick airfoils for wind energy turbines at high reynolds numbers</li> <li>• Actuator disk modelling</li> <li>• Low frequency turbulence and loads</li> <li>• Darrieus rotors</li> <li>• High frequency turbulence and aerodynamical modelling of transition</li> </ul>	<p><i>Simulation und Bewertung von Lösungsvarianten zur Vermeidung des Beschlagens der Sichtscheibe der HPS-Atemschutzmaske ohne Verwendung von Steuerventilen durch gezielte Umlenkung.</i>, Bericht des Labors für numerische Mechanik 20, Kiel, November 2000.</p> <p><b>M. Schrumpf, P. Schaffarczyk, J. Koch</b>, <i>Numerical Investigations of Heat Exchange of dry Air with Overheated Steam.</i>, FLUENT Anwendertreffen 2000, Bingen, 18/19 Sept. 2000.</p> <p><b>M. Schrumpf, P. Schaffarczyk</b>, <i>Numerische Untersuchungen zu den Wärmetauschvorgängen bei der Anfeuchtung trockener Beatmungsluft durch Dampf.</i> Bericht des Labors für numerische Mechanik 18, Kiel, April 2000.</p> <p><b>M. Schrumpf, P. Schaffarczyk</b>, <i>Vergleich von Kegeln und Sieben als Strömungsvergleichmäßiger in einem Durchflusssensor einschließlich y-förmigen Anschlußstück zum Beatmungsgerät.</i> Bericht des Labors für numerische Mechanik 17, Kiel, Oktober 1999</p>
Indian Institute of Science	Kamataka, India.	<p><b>Kulkarni P. S.</b> Investigador Científico Principal</p> <p><b>Surendranath V.</b> Investigador Científico Principal</p> <p><b>Vasudevan B.</b></p>	<p>Aerodynamics</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Basic Fluid Dynamics</li> <li>• Computational Fluid Dynamics</li> <li>• High Speed Flows</li> <li>• High Enthalpy Aerodynamics</li> <li>• Experimental Aerodynamics</li> </ul>	

		<p>Investigador Científico Principal</p> <p><b>Ramachandra Bhat M.</b></p> <p>Investigador Científico Principal</p> <p><b>Omkar S. N.</b></p> <p>Investigador Científico Principal</p>		
<b>John Holland Research Center</b>	Limerick, Irlanda		<p>Fluid dynamics</p> <p>Unsteady gas flow within high performance IC engine manifolds Numerical modelling of flashing flows</p> <p>Design of hydraulic pumps.</p>	<p><b>Marsh, C., Niven, A., Frawley, P.</b>, 2003, <i>"Flashing Flow past Orifice Plates"</i>, 7th Int. symp. On Fluid Control, Measurements and Visualization, Sorrento, Italy, Aug 25-28</p> <p><b>O'Mahony, A., Marsh, C., Niven, A., Frawley, P.</b>, 2003, <i>"Determination of empirical erosion constants using a sand-blast type erosion rig"</i>, 7th Int. symp. On Fluid Control, Measurements and Visualization, Sorrento, Italy, Aug. 25-28</p> <p><b>A.R. Ansari, A.F. Hegarty &amp; G. I. Shishkin</b>, 2003, <i>"Parameter-uniform numerical methods for a laminar jet problem"</i>, International Journal for Numerical Methods in Fluids, Vol. 43, 937-951</p> <p><b>Niven, A.J. &amp; Fogarty, D.E.</b>, 2003, <i>"Turbine Blade Design for the Minimisation of Viscous Entropy Generation per Unit Work Output"</i>, CEAS Aerospace Aerodynamics Research Conference, R.Ae.S Headquarters, London, 10-12 June 2003</p>
<b>Universidad Técnica de Delft</b>	Delft, Holanda	<b>Prof. dr. ir. P.G. Bakker</b>	Aerodynamics	

		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prof. Dr. Ir. Drs. H. Bijl</li> <li>• Prof. Dr. Ir. B. Koren</li> <li>• Prof. Dr. F. Scarano</li> </ul>		
<b>J.M. Burgerscentrum</b>	Delft, Holanda	<b>Prof.dr.ir. G Ooms</b>  Director Científico de JMBC	Fluid mechanics <ul style="list-style-type: none"> <li>• Complex dynamics of fluids</li> <li>• Complex structures of fluids</li> <li>• Mathematical and computational methods for fluid flow analysis</li> </ul>	
<b>Center for Fluid Mechanics, Turbulence and Computation.</b>  <b>Brown University.</b>	Rhode Island, EE.UU.	Prof. Kenneth S. Breuer  Prof. Bruce Caswell  Prof. Joseph T. C. Liu  Prof. Thomas R. Powers  Prof. Peter D. Richardson	Microfluidics <ul style="list-style-type: none"> <li>• Micron and nanometer scale fluid mechanics</li> <li>• Animal motion, in particular, bat flight and bacterial motility</li> <li>• Turbulent shear flows and shear flow control</li> <li>• Diagnostic methods for fluid mechanics</li> </ul> Scientific Computing and Numerical Analysis <ul style="list-style-type: none"> <li>• Modeling and analysis of problems in</li> </ul>	

			<p>computational biology, electromagnetics, high speed flows, material science, semiconductor device simulations</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Problems in optical communication systems and fiberoptics.</li> </ul>	
CFD lab. Taiwan Tech		Ming-Jyh Chern, B.S., M.S., D.Phil. Profesores Asociados	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Simulations of free surface flows</li> <li>• Bio-medical fluid dynamics</li> <li>• Bio-logical fluid dynamics</li> <li>• Rayleigh-Bénard PCR reactor</li> <li>• Fluid flow inside a valve</li> <li>• Freely falling cylinder inside unbounded medium</li> <li>• Interaction of fluids and structures</li> <li>• Numerical simulation of a swirling jet behind a circular disk</li> <li>• Elevated jet in cross flow</li> <li>• Numerical simulation of a swirling jet behind a circular disk</li> <li>• Thermal module of</li> </ul>	

			<p>Light Emitting Diode lamp</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Industrial ventilation</li> </ul>	
<b>Institute of Fluid Dynamics</b>	Zürich, Suiza	<b>Prof. Leonhard Kleiser</b>  <b>Prof. Thomas Rösgen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fluid mechanics.</li> <li>Currently transitional, turbulent and particle-laden flows</li> <li>Origin of aeroacoustic noise</li> <li>Direct Numerical Simulations Large - Eddy Simulations</li> <li>Modern electro-optical diagnostics</li> <li>Image processing with application to fluid dynamics.</li> <li>Physics of fluids in general</li> <li>Flow phenomena in constrained geometries</li> </ul>	<p><b>G. Bonfigli and P. Jenny.</b> <i>An efficient multi-scale poisson solver for the incompressible navier-stokes equations with immersed boundaries.</i> J. Comp. Phys., 228(12), 2009. doi: 10.1016/j.jcp.2009.03.032.</p> <p><b>F. Boselli, D. Obrist, and L. Kleiser.</b> <i>Numerical simulation of the flow in semicircular canals with the method of fundamental solutions.</i> Proc. Appl. Math. Mech., 2009. submitted.</p> <p><b>H. Hajibeygi and P. Jenny.</b> <i>Multiscale finite-volume method for parabolic problems arising from compressible multiphase flow in porous media.</i> J. Comp. Phys., 2009. doi: 10.1016/j.jcp.2009.04.017.</p> <p><b>R. Henniger, D. Obrist, and L. Kleiser.</b> <i>High-order accurate solution of the Navier–Stokes equations on massively parallel computers.</i> J. Comp. Phys., 2009. submitted.</p> <p><b>F. Keiderling, L. Kleiser, and C. Bogey.</b> <i>Numerical study of eigenmode forcing effects on jet flow development and noise generation mechanisms.</i> Phys. Fluids, 21:045106, 2009.</p> <p><b>D. W. Meyer and P. Jenny.</b> <i>A mixing model</i></p>



			<ul style="list-style-type: none"> <li>• Development of advanced numerical simulation techniques (DNS, LES and PDF methods) for engineering flows</li> <li>• Development of quantitative flow imaging diagnostics for research and industrial applications</li> </ul>	<p><i>providing joint statistics of scalar and scalar dissipation rate.</i> Proceedings of the Combustion Symposium, 32(1):1613–1620, 2009. doi: 10.1016/j.proci.2008.06.091.</p>
<p><b>Centre for Computational Fluid Dynamics. Leeds University.</b></p>	<p>Leeds, Reino Unido.</p>	<p>Professor M. Pourkashanian Professor D. B. Ingham Professor A. Williams Dr. K.J. Hughes Dr. L. Ma Dr W. Nimmo Dr. D. Borman Dr. S.R. Gubba Dr Z. Liu Dr. R.T.J Porter</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alternative Fuels for Power Generation &amp; Transport</li> <li>• Carbon Capture &amp; Sequestration</li> <li>• Intelligent Computing for Process Optimisation</li> <li>• Enabling Technology (Fuel Cells)</li> <li>• Enabling Technology (Advanced Wind Turbines)</li> <li>• Advanced Power Generation and Aero-Engines</li> <li>• Numerical Modelling of Gravity and Turbidity</li> </ul>	

			<p>Currents</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• CFD Modelling of Gas Turbine Combustion Chambers</li> <li>• Ignition</li> <li>• Novel Gas Turbine igniters/Fuel Injectors based on Bombardier Beetle ejection system</li> </ul>	
<p>Aerospace Computational Design Laboratory Department of Aeronautics &amp; Astronautics.</p> <p>Massachusetts Institute of Technology</p>	<p>Massachusetts, EE.UU</p>	<p>Jaume Peraure, Professor of Aeronautics &amp; Astronautics          Director, Aerospace Computational Design Laboratory          Co-Director, Program in Computation for Design and Optimization          Program Chair, Computational Engineering</p> <p>Douglas Allaire</p> <p>Marcelo Buffoni</p> <p>David Darmofal</p>	<p>Immersed Interface Methods</p> <p>Flapping Flight</p> <p>The 3DG Group</p>	<p><b>Arkilic, E.B.</b>, "<i>Measurement of the mass flow and tangential momentum accommodation coefficient in silicon micromachined channels</i>", Ph.D. Thesis, Dept. of Aeronautics &amp; Astronautics, MIT, December, 1996.</p> <p><b>Lorkowski, T. and Breuer, K.S.</b>, "<i>Small-scale forcing of a turbulent boundary layer</i>", Fluid Dynamics Research Laboratory Technical Report 97-2, Dept. of Aeronautics &amp; Astronautics, MIT, January, 1997.</p> <p><b>Ahn, J.</b>, "<i>Analysis and design of axisymmetric transonic flow with linearized three-dimensional flow prediction</i>", Ph.D. Thesis, Dept. of Aeronautics &amp; Astronautics, MIT, February, 1997.</p> <p><b>Vailong, H.J.B.</b>, "<i>A posteriori bounds for linear functional outputs of hyperbolic partial differential equations</i>", MS Thesis, Dept. of Aeronautics &amp; Astronautics, MIT, February, 1997.</p>
<p><b>Advanced CFD Group, University of Kentucky.</b></p>	<p>Kentucky, EE.UU.</p>	<p><b>Prof. J. M. McDonough</b></p>	<p>Development of new computational algorithms and techniques.</p> <p>Turbulent fluid flow,</p>	<p><b>J. M. McDonough and Shao-Jing Dong</b>, "<i>2-D to 3-D conversion for Navier-Stokes codes: parallelization issues</i>," presented at Parallel CFD</p>

			<p>combustion chemistry, phase-change phenomena and combinations of these developing and characterizing new, advanced computational procedures. <b>3-D General-Purpose CFD Code Development Turbulence Modeling</b> Fitting Experimental Data to Chaotic Maps</p>	<p>2000, Trondheim, Norway, May 22–25, 2000.</p> <p><b>J. M. McDonough and M. T. Huang</b>, "<i>A low-dimensional model of turbulence-chemical kinetics interactions</i>," Proceedings of the Third International Symposium on Scale Modeling, Nagoya, Japan, September 10–13, 2000</p> <p><b>S. A. Bible and J. M. McDonough</b>, "<i>Basins of attraction for a discrete dynamical system derived from the 3-D Navier–Stokes equations</i>," Bull. Amer. Phys. Soc. <b>46</b>, 206, 2001.</p> <p><b>S. A. Bible and J. M. McDonough</b>, "<i>Study of the 2-D discrete dynamical system derived for use in 2-D Navier–Stokes simulations</i>," presented at National Conference on Undergraduate Research, Lexington, KY, March, 2001.</p> <p><b>J. M. McDonough and D. L. Joyce</b>, "<i>A low-dimensional discrete dynamical system model of small scales of thermal convection</i>," Bull. Amer. Phys. Soc. <b>46</b>, 206, 2001.</p>
<b>Aerodynamics and CFD Lab</b>	Miami, EE.UU.	<p>Dr. Gecheng Zha Director y Profesor asociado.</p> <p>Dr. Xiangying Chen, Research Associate Professor</p> <p>Dr. Yiqing Shen, Research</p>	<p>Aerodynamics, Aircraft Design, Flow Control, Co-Flow Jet Airfoil, Computational Fluid Dynamics (CFD), Fluid-Structural Interactions, Supersonic Inlets,</p>	<p><b>Wang, B.-Y. and Zha, G.-C.</b>, "<i>Numerical simulation of transonic limit cycle oscillations using high-order low-diffusion schemes</i>", Journal of Fluids and Structures, (2010),doi:10.1016/j.jfluidstructs.2010.02.003</p> <p><b>Shen, Y.-Q., Zha, G.-C. and Xiangying Chen</b>, "<i>High Order Conservative Differencing for Viscous Terms and the Application to Vortex-</i></p>

		<p>Scientist</p> <p>Dr. Bertrand Dano, Adjunct Faculty</p> <p>Mr. Hongsik Im, Ph.D. Candidate, Jan 2008- present</p> <p>Ms. Danah Kirk, Master Student</p> <p>Mr. Billy Bartow, Master Student</p> <p>Mr. Daniel Espinal, Accepted as Ph.D. Student</p>	<p>Turbomachinery, Design Optimization, Propeller Design Wind Dynamic Loads on Structures</p>	<p><i>Induced Vibration Flows</i>", Journal of Computational Physics, 2009, 228(2):8283-8300</p> <p><b>Shen, Y.-Q., Zha, G.-C.</b>, "<i>Improvement of the WENO Scheme Smoothness Estimator</i>", International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2009, DOI:10.1002/flid.2186.</p> <p><b>Shen, Y.-Q. and Zha, G.-C. and Wang, B.-Y.</b>, "<i>Improvement of Stability and Accuracy of Implicit WENO Scheme</i>", AIAA Journal, Vol. 47, No. 2, 2009, pp331-344</p> <p><b>Wang, B.-Y., Hu, Z.-J. and Zha, G.-C.</b>, "<i>A General Sub-Domain Boundary Mapping Procedure For Structured Grid CFD Parallel Computation</i>", AIAA Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication, Vol. 5, No. 11, Nov., pp425-447, 2008.</p>
<p><b>Centro de Mecánica de Fluidos y Aplicaciones de la Universidad Simón Bolívar, CEMFA</b></p>	<p>Caracas, Venezuela.</p>		<p>Estudio de las vías fluviales y su navegación a fin de establecer las mejores rutas para el transito fluvial en todos sus ámbitos.</p> <p>Modelado y análisis computacional para el estudio y optimización de sistemas o equipos que operen con fluidos.</p>	

Otros aspectos destacables dentro del estudio del CFD, y que ya ha sido mencionado es, ya en Enero de 2012, el inicio del primer **MÁSTER DE AERODINÁMICA Y CFD DE COMPETICIÓN** enfocado directamente en vehículos de competición y a realizarse en la comunidad valenciana. Algunas de sus características son:

- Prácticas de escaneo tridimensional.
- Paso a formato CAD (ingeniería inversa) con Catia.
- Prácticas en Túnel de Viento de 1.25 x 1.25 metros, hasta 200 km/h.
- Prácticas con los coches de las más importantes categorías de competición, tanto a nivel español como europeo.
- Visitas a fábricas de automóviles y equipos de competición.
- prácticas reales con todos los trabajos que tecnicaf1.es tiene y tendrá en un futuro; los alumnos participarán de todos esos trabajos como trabajadores de la propia empresa.
- Al final de éste máster, los mejores alumnos se quedarán en plantilla en tecnicaf1.es también se realizarán prácticas en equipos de competición y en fábricas de coches.
- Dinámica Vehicular de Competición, al igual que un curso de "Análisis de Datos";

Otros másteres impartidos en el área de la aerodinámica automotriz son:

- **Máster de Ingeniería de Competición MASTAC (SUN-RED). Empresa privada dedicada al desarrollo de automoción**
- **Máster de Ingeniería de Competición ISMANS (Le Mans).**
- **Máster de Ingeniería de Competición MIC (Universidad Politécnica de Valencia – Campos Grand Prix).**

### 3. BREVE REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DEL SOFTWARE CFD.

La existencia de una constante y amplia necesidad de análisis CFD en el desarrollo de ingeniería y de productos, ya sea para análisis aerodinámico u otras áreas, ha implicado un amplio crecimiento del software para éstos efectos.

Si hace algunos años solamente se podía contar con Fluent-Gambit, Star CCM, el grupo de aplicaciones CFD de ESI Group, y poco más en el mercado, hoy en día existen más de 15 aplicaciones comerciales dedicadas en específico a CFD y muchas otras de uso general con capacidades CFD, sin contemplar las variaciones de éstas aplicaciones solicitadas por grandes empresas o software propietario desarrollado para temas de alta especificidad.

El coste actual de estas aplicaciones que puede fluctuar entre los US\$25000 a 50.000, más unos US\$5000 anuales en formación, mantenimiento y servicios<sup>35</sup>, ha permitido una explosión en el desarrollo de éste tipo de programas informáticos ya que aunque es un coste alto para usuarios particulares o empresas pequeñas, para las empresas que necesitan éste tipo de análisis resulta un coste accesible.

En éste apartado se revisarán algunas de ellas intentando definir sus características principales, el enfoque que los desarrolladores le han dado, y establecer una primera comparativa con NX. Si bien éste apartado debiese pertenecer estructuralmente al marco teórico de ésta tesina, se ha postergado e incluido en ésta etapa pues para la comprensión adecuada de algunas de las características de los softwares revisados, y su comparación informada y objetiva con el utilizado se ha considerado que se hacía necesario contar con un mínimo de información y práctica para la obtención de una mirada más objetiva y calificada.

Esta revisión será un primer acercamiento y no una crítica exhaustiva a cada aplicación, aunque con posterioridad a la revisión total se intentará implementar una simulación sobre el vehículo del IDF en algunas de las que se pudo disponer, así mismo es necesario decir que en el caso de las aplicaciones que se pudo probar directamente el detalle de las características será evidentemente más amplio y de primera mano, mientras que en las demás aplicaciones será producto solamente de la investigación realizada.

Es muy importante comprender antes de realizar esta revisión de aplicaciones CFD que, como se ha mencionado antes, existen 3 etapas clave en un análisis por elementos finitos, pre-procesado, solución y post-procesado, y que la central, vale decir la solución es efectuada por una "parte" del software llamado "Solver" el que en muchos casos no es propio de la aplicación sino compartido por diversos softwares comerciales, que buscan su diferenciación en las herramientas de modelado de la geometría, de generación de mallas, y de post-procesado.

En algunos casos, dada la importancia del solver por sobre las aplicaciones que lo utilizan se dará mayor énfasis a sus características. En otros casos donde el solver forma parte integral y única de la aplicación el énfasis estará en esta.

### 3.1. NX Nastran<sup>36</sup>.

Desarrollo.

El solver FEM para cálculo estructural y mecánico utilizado por el PLM NX de Siemens es NASTRAN, que fue desarrollado para la NASA a fines de los años '60s por MSC *Software (MacNeal-Schwendler Corporation formada originalmente por Richard MacNeal y Roberto Schwendler)*<sup>37</sup> y se convirtió en el emblema de ésta compañía y uno de los softwares FEM más utilizados del mercado.

Su nombre es un acrónimo de *NA*sa *STR*uctural *AN*alysis, lo que permite comprender los objetivos iniciales de su creación.

---

<sup>35</sup> Valores obtenidos por el autor de ésta tesina a través de consultas telefónicas y vía e-mail a los distribuidores

<sup>36</sup> [21]

<sup>37</sup> [22]

Un serio problema de licencias y una demanda en contra de MSC privó a ésta compañía de la exclusividad sobre NASTRAN, y fue cuando Unigraphics (posteriormente Siemens NX) adquirió sus derechos sobre el solver, que en el caso de NX se basa en el código desarrollado en el año 2001.

En el año 2003 MSC cedió el monopolio sobre NASTRAN al vender el código fuente a EDS Software.

NX ha desarrollado alrededor del núcleo del solver una serie de aplicaciones que han ido evolucionando en los últimos años, pudiendo ser adquiridas como el módulo FEM en NX o bien por separado como un software FEM independiente en el que posee capacidades CFD, pues como se ha mencionado, en la aplicación utilizada para ésta tesina el solver CFD es NX THERMAL / FLOW.

En la actualidad existen 4 plataformas principales de software cuyo solver es NASTRAN:

- MSC.Nastran y MD.Nastran, es el propietario inicial del software.
- NEi Nastran, es un paquete de software FEM para uso general.
- NX/NASTRAN, el desarrollo sobre el código del año 2001 que utiliza NX
- NASTRAN-xMG , es el desarrollo de una nueva compañía de Richard McNeal.

Características Observadas.

- La mayoría de las plataformas que utilizan NASTRAN son actualmente desarrolladas para Windows, en particular la de NX, esto las obliga a presentar una interface con un nivel de usabilidad adecuado para cualquier usuario. FEMAP por ejemplo, utiliza la distribución de NASTRAN de NX para integrarla como software a la plataforma.
- La cantidad de recursos que utiliza el software es baja en comparación con la mayoría de los programas FEM, lo que nuevamente, es un factor que lo hace adecuado para Windows, y lo capacita para ser ejecutado en ordenadores de gama media con buenos resultados y tiempos de cálculo.
- Las herramientas de mallado varían bastante entre las aplicaciones basadas en NASTRAN, presentando algunas excelentes capacidades de mallado basado en elementos complejos como poliedros o polígonos de hasta 12 lados, mientras que algunas solamente cuentan con los mallados tradicionales basados en triángulos o tetraedros, disminuyendo las posibilidades de la aplicación frente a problemas complejos o cuando se cuenta con alta potencia de cálculo en ordenadores potentes.
- Ninguna de las aplicaciones que utiliza NASTRAN como solver está enfocada específicamente en CFD, sin embargo las amplias capacidades que éste posee las hacen aptas para la resolución de simulaciones aerodinámicas con resultados precisos y buenos tiempos de solución.

### 3.2. CD ADAPCO Star+ CCM<sup>38</sup>.

Desarrollo<sup>39</sup>.

STAR CCM+ es una herramienta CAE específicamente desarrollada para simulación CFD, y actualmente es la líder en éste ámbito cuando se trata de alta exigencia, por ejemplo el desarrollo de vehículos de carreras o deportivos de gama alta de las más diversas empresas.

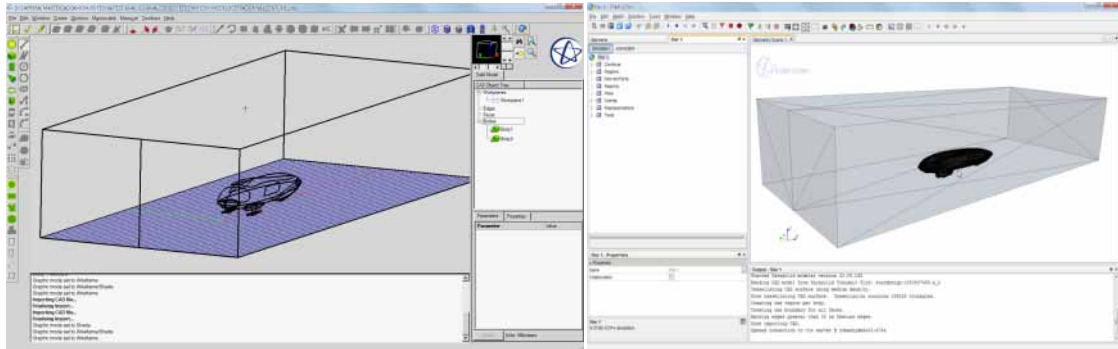


Ilustración 20 - Interface de Star CCM+ v.4.0 4 con el vehículo del IDF preparado para el análisis<sup>40</sup>.

Presenta un paquete de aplicaciones independientes entre sí pero compatibles, para que en un único entorno de software integrado pueda crearse desde la geometría hasta la solución de ingeniería.

Además de una preparación de la superficie y herramientas de mallado tridimensional avanzadas, proporciona una amplia variedad de modelos y métodos para simular el flujo de fluidos, turbulencias, reacciones químicas y combustión, flujo multifase, interacción de cuerpos de fluido dinámico y otros fenómenos.

STAR CCM+ fue distribuido por primera vez en Mayo del 2004 convirtiéndose rápidamente en el estándar de la gama alta del software CFD superando incluso a FLUENT que tenía el monopolio en ese entonces y muchos años de presencia.

Fue creado y desarrollado por CD-Adapco, y primeramente como muchos de los softwares de ingeniería actuales se creó para UNIX, por ello su interface resulta bastante débil gráficamente, lo que hace que el software sea a primera vista complejo de utilizar para el usuario promedio y sin la formación adecuada.

---

<sup>38</sup> [23]

<sup>39</sup> [24]

<sup>40</sup> Imágenes obtenidas por el autor de ésta tesina durante la revisión de algunos de los softwares.



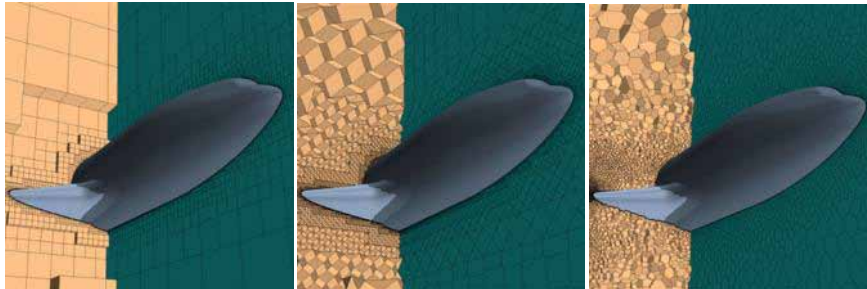
Actualmente se distribuye para ser instalado en Windows (la versión más reciente 5.04 está optimizada para Windows 7, 32 y 64 bits), UNIX y Linux.

*Recientemente, en Abril del 2010, y de acuerdo a fuentes en internet, CD-Adapco ha generado una alianza estratégica con Microsoft, lo que asegura que el software se enfocará en sus distribuciones para Windows en las siguientes versiones.*

Su nombre, al igual que el de muchos softwares es un acrónimo, en este caso de la frase en inglés: *“Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions”*.

#### Características Observadas.

- Una de las características más potentes y diferenciadoras de STAR CCM+ es lo que sus desarrolladores han llamado *“surface wrapping”*, que permite, aun cuando la superficie original importada desde otro software presente errores como aperturas, traslapes, bordes desconectados, etc., “envolverla” en una nueva superficie mallada, cerrada y adecuada para el cálculo CFD.
- Como muchos softwares no sólo del ámbito del CAE, se distribuye también como un paquete que se integra al instalarse a plataformas CAD de gama media y alta como CATIA, Pro|Engineer, NX o Solidworks, funcionando dentro de la misma interface del programa original, o bien agregando menús que permiten preparar los modelos CAD para una exportación directa.



**Ilustración 21 - Refinamiento progresivo de una malla tridimensional basada en poliedros.**

- Posee la mayor cantidad de modelos de turbulencia de entre los diversos softwares específicos de CFD, permitiendo la simulación precisa de la realidad, en prácticamente cualquier situación presentada, desde aire alrededor de vehículos, agua alrededor de embarcaciones, hasta situaciones complejas como metal fundido deslizándose por la pared de un tubo, con transferencias de temperatura, interrupciones de flujo, etc.

### 3.3. FloEFD<sup>41</sup>.

Desarrollo.

Este software ha sido creado por la empresa **Mentor Graphics**, especializada en aplicaciones industriales, FloEFD forma parte de su línea de software **FloX**, que abarca estudios térmicos, de ráfagas de viento y CFD convencional.

FloEFD es un software de aparición reciente, desarrollado para Windows, y creado específicamente para funcionar “dentro” de plataformas CAD de gama alta, en específico de CATIA y Pro|Engineer, y como plug-in de otras como NX, Inventor, Solid Edge y Solidworks, convirtiéndose en su solver de CFD.

Se ha introducido para su descripción por parte de Mentor Graphics el concepto de “CFD concurrente” dado que no es necesaria la exportación o preparación del archivo de CAD, sino que una vez terminado el modelado se pasa directamente a la etapa de análisis, lo que significa un ahorro de tiempo de hasta un 50% o 70% de acuerdo a los fabricantes.

Se ha desarrollado esta aplicación para convertirse en el área del CFD, en un asistente de simulación, similar a los que se encuentran ya incorporados a softwares como Solidworks y que simplifican el proceso de aplicaciones más potentes como Moldflow o COSMOS Design Star en Solidworks e Inventor respectivamente, convirtiéndolos en pequeños ayudantes que simplemente permiten hacer los cálculos básicos, antes de derivar los proyectos a especialistas que los revisarán en detalle.

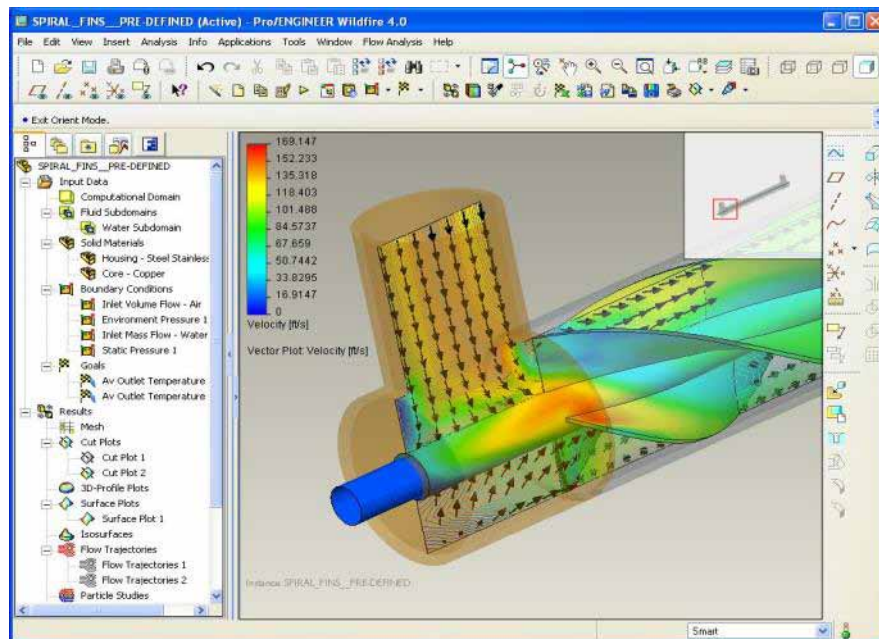


Ilustración 22 - FloEFD Integrado a Pro|Engineer Wildfire.

<sup>41</sup> [25]

## Características.

- Interface integrada en diferentes plataformas de CAD, que lo hace apto para usuarios de éstos softwares, facilitando su uso. La filosofía con que fue desarrollado FloEFD es justamente facilitar el acceso a simulación de CFD a ingenieros y diseñadores de diversas áreas, la que suele ser compleja de entender en un comienzo, para ello además de la integración de interfaces posee iconos gráficos, un **asistente de proceso**, y una ayuda gráfica clara y sencilla.
- Las aplicaciones de la línea de software Flo abarcan todo el espectro normalmente solventado por el software CFD como la transferencia de calor, el estudio de caídas de presión, dispositivos de enfriamiento para aplicaciones electrónicas o de microelectrónica, más módulos especialmente dirigido al estudio CFD eólico.
- Una característica que puede ser considerado un defecto en el software es su entrega de resultados, que resulta clara y sencilla, pero quizás debido a un extremo énfasis en la sencillez, no existe una salida numérica, una ventana de proceso, datos que quedan ocultos en el motor del software y que un usuario más avanzado puede requerir.
- También en aras de la sencillez presenta pocas alternativas en determinadas aplicaciones las que sin duda se extrañarán al momento de requerirse una mayor versatilidad al software, por ejemplo solamente posee tres modelos de turbulencia para el cálculo CFD, laminar, turbulento y transicional, que permitirán un cálculo sencillo pero no tan preciso frente a condiciones de contorno cuyos datos provengan de cálculos manuales o información surgida de experimentaciones previas.

### 3.4. PAM-FLOW<sup>42</sup>.

#### Desarrollo.

Este software de aparición relativamente reciente viene a reemplazar en ciertos aspectos a la suite ESI CFD que se distribuyó hasta el 2009, y que se ha simplificado en una menor cantidad de productos, los que ahora resultan más potentes y versátiles.

Los productos destinados a mallado de geometrías y re-topología CAD se encuentran ahora integrados a los diversos paquetes específicos y PAM-Flow es uno de ellos, sin embargo también continúan existiendo por separado.

La suite CFD típica de ESI, aún en funcionamiento y con asistencia técnica por parte de los desarrolladores incluye:

- CFD-ACE+, Constituye uno de los solvers de la suite CFD
  - CFD-FASTRAN, El otro solver enfocado en CFD
- 

<sup>42</sup> [26]

- CFD-GEOM, Es un modelador CAD y generador de mallados
- CFD-VisCART, es un corrector de mallado y generador de mallas cartesianas basadas en cuadriláteros.
- CFD-VIEW el postprocesador de ESI para CFD y todas las demás aplicaciones como PAM-Crash, PAM-Flow y otros.

PAM-Flow integra las características de muchas de las aplicaciones de la suite pero a un nivel más específico y monolítico, y un solver propio que el da el nombre a la aplicación.

PAM-Flow es un CFD que apunta a un segmento de mercado de gama alta, y ser utilizado para aplicaciones industriales, ya que su precisión permite la simulación de problemas de gran tamaño a escala real (*simulaciones de tipo large-eddy or very large-eddy (LES)*) de flujos estacionarios o turbulentos.

El objetivo del software es proveer precisión en el testeo de prototipos virtuales en industrias como la automotriz, maquinaria pesada o rodante, aeronáutica y biomedicina.

#### Características.

- La aplicación posee un túnel de viento virtual ya incorporado, con una serie de configuraciones prefijadas, con diversos tipos de suelo y capaz de soportar una serie de formatos de importación para utilizar modelados con altos niveles de detalle, inclusive en las zonas normalmente ocultas de los vehículos como bajo el capó o bajo el chasis, pero que tienen una influencia importante en su desempeño aerodinámico.
- Algunas de las aplicaciones comunes del software actualmente son la simulación de inestabilidades en vehículos frente al viento cruzado, la seguridad y el confort a velocidades crucero, y el rendimiento aerodinámico bajo diversas condiciones.

También son testeados elementos automotrices que utilizan fluidos como airbags, sistemas de escape de gases, tanques de gasolina, etc. para los que se realizan simulaciones de altísima precisión que predicen su comportamiento de forma exacta.

- Uno de los aspectos más particulares de PAM-Flow es la capacidad para integrar fluidos y ondas bajo el mismo módulo de la aplicación lo que permite por ejemplo el análisis de ruido al interior del vehículo, para estimar su confort frente a altas velocidades, al sonido de ductos interiores, ventiladores, etc.
- Otro aspecto de confort que el software puede medir es el comportamiento del sistema de aire acondicionado y climatización interior de los vehículos.
- La aplicación está integrada con las demás de la marca, y pueden intercambiar formatos de ficheros y datos entre sí para realizar una simulación a nivel de prototipo virtual integral si actúa junto a PAM-CRASH, PAM-SAFE y PAM-SHOCK, que miden los niveles de seguridad ante impactos, confort y vibraciones.

### 3.5. Ansys CFD (Fluent y CFX)<sup>43</sup>

Desarrollo<sup>44</sup>.

ANSYS fue concebido como concepto por el Dr. John Swanson 1966 (*PhD. in Applied Mechanics, University de Pittsburgh, donde actualmente aun ejerce como profesor*), quien buscaba una herramienta para disminuir el tiempo de cálculo y análisis de los ingenieros de Westinghouse y otras compañías. Comenzó su desarrollo en los '60s pero abandonó la compañía antes de completarlo, sin embargo se llevó consigo el código fuente en el que trabajaba.

**Swanson Analysis Systems, Inc** se formó a mediados de los '70s, y continuó trabajando en STASYS (que era el nombre que tenía el software que venía desarrollando para Westinghouse), retomando el código que había creado para Westinghouse previamente.

La primera versión de ANSYS fue programada a finales de 1970. Westinghouse fue el primer cliente que usaba ANSYS como programa principal de análisis en el diseño. De acuerdo a Swanson, el nombre ANSYS (*ANalysis SYSTEM*) se escogió porque los abogados le aseguraron que ANSYS era solo un nombre y que nada podía afectar los derechos de autor sobre el código ya creado. Durante ese período los programas informáticos eran escritos en tarjetas perforadas, por lo que el proceso de instalación incluía el traslado de personal para hacer las adaptaciones necesarias a las enormes y poco versátiles máquinas que eran las computadoras en ese entonces, para poder insertar físicamente las tarjetas.

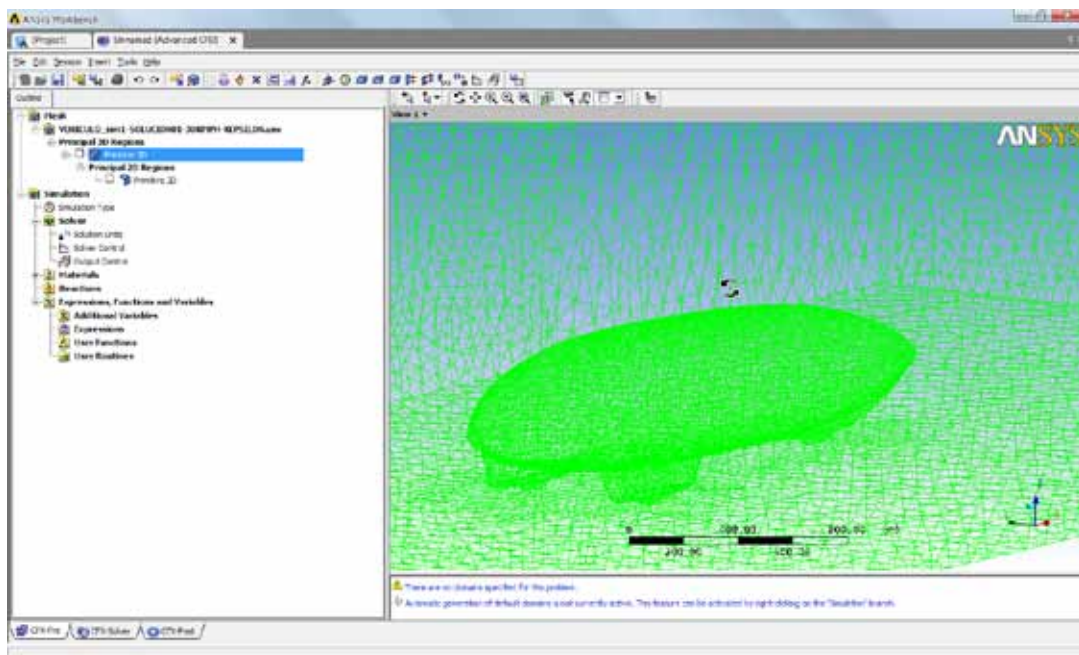


Ilustración 23 – Mallado del vehículo del IDF realizado en Ansys v.11 CFX.

<sup>43</sup> [21]

<sup>44</sup> [27]

Posteriormente el software se convirtió en el más utilizado y popular en el área de los elementos finitos, principalmente para cálculo estructural, incorporando progresivamente nuevas funciones. Es en esta búsqueda de abarcar al completo el mercado de los elementos finitos que comienza a sumar módulos que se integran completamente, generando un software más potente. Como todos los FEM en sus primeros tiempos de desarrollo su interface y características de usabilidad no presentaban una gran facilidad de aprendizaje ni usabilidad para el usuario, manteniendo su estructura inclusive después de la aparición de sistemas operativos de 32 bits que facilitaban la mejora gráfica de los softwares.

En este proceso de evolución se desarrolla **ANSYS CFX**<sup>45</sup>, el módulo de CFD exclusivo de la aplicación durante mucho tiempo, y que está basado en el software Flow3D (que se reseñará posteriormente) en 1990 Flow3D cambia su nombre a CFX-4, siendo entonces adquirida la licencia por ANSYS, pero manteniéndose como una compañía independiente en Norteamérica, donde aún existe como Flow3D.

Paralelamente al desarrollo de ANSYS, el software CFD **FLUENT**<sup>46</sup> es creado y comienza su evolución a partir de los inicios de los '80s, cuando el CFD aun era de interés casi puramente académico. En una pequeña compañía llamada **Creare Inc.** el *Dr. Ferit Boysan* comenzaba el desarrollo de un código CFD fácil de utilizar para ingenieros del área, siendo uno de los pioneros en la tecnología junto a *Bart Patel* de la Sheffield University en el Reino Unido. Al mismo tiempo *Michael Engelman* forma **Fluid Dynamics International (FDI)** en Chicago, Illinois. Estos tres personajes serían claves para el desarrollo de FLUENT en los siguientes 20 años, cuya primera versión salió al mercado en 1983.

Tal fue el éxito de la aplicación que el grupo creador se separa de Creare para formar FLUENT Inc., en 1988, donde comienza a convertirse en el referente de los softwares de CFD por sobre todos los demás. Hoy en día, aun cuando existen softwares específicos para aerodinámica, algunas escuderías de alta competición como Ferrari aun utilizan FLUENT para sus análisis CFD. Junto a FLUENT se desarrolló GAMBIT, que se distribuía de forma paralela con la aplicación para la generación de las mallas FEM necesarias para el cálculo.

Luego de varias compras por compañías mayores, finalmente en mayo del 2006 Fluent Inc. es adquirida por ANSYS, pasando a ser integrado a la aplicación emblema de la compañía como uno de los solvers CFD que se ofrecían, y finalmente integrándose completamente en la reciente versión 12 del software.

#### Características

- Actualmente ANSYS constituye un paquete de aplicaciones que contiene varios solvers y dos entornos de trabajo, el tradicional, devenido de las aplicaciones de UNIX y DOS de los años '70 y '80, y el Workbench que ofrece una interface actualizada y una usabilidad mucho más adaptada a los parámetros de facilidad de uso y aprendizaje que se les exige a los softwares de la actualidad.
- Dentro de sus módulos ANSYS ofrece uno denominado ANSYS CFD, el que utiliza los dos solvers de CFD mencionados, CFX y FLUENT, y el usuario puede escoger, de acuerdo a la aplicación específica o situación el más adecuado. FLUENT ya no depende de GAMBIT para la creación de las mallas de elementos finitos, pues al integrarse

---

<sup>45</sup> [28]

<sup>46</sup> [29]

completamente a ANSYS en la última versión es capaz de aprovechar el sistema de mallado propio de la aplicación, esto junto a su integración a Workbench permite un trabajo que no obliga a cambiar de programa en cada acción, sino que entrega un flujo continuo.

- Junto con la robustez de las soluciones de ANSYS, y la precisión de sus resultados, sus algoritmos de mallado de elementos finitos son actualmente uno de los más rápidos y versátiles a geometrías provenientes de diversas plataformas. Además posee capacidades de modelado 3D autónomas que permiten modelar desde cero o bien corregir modelos previamente creados.

### 3.6. Flow-3D<sup>47</sup>.

Desarrollo.

Como se mencionó previamente ésta aplicación fue la base para el desarrollo de lo que hoy es ANSYS CFX, uno de los solvers de la suite para CFD, y por bastante tiempo el único que ofrecía.

En 1963, en *“Los Alamos National Laboratory”*, en Estados Unidos, el Dr. *C. W. Hirt*, pionero en varios métodos de análisis fluido dinámico a nivel teórico, estableció una técnica única de seguimiento de superficies que denominó **“Volume of Fluid o VOF”**. En 1980 Hirt dejó LANL para formar **Flow Science Inc.** con la idea de desarrollar una nueva generación de software CFD para aplicaciones científicas e industriales. Esta compañía aun es la desarrolladora y única distribuidora del software.

La primera versión de FLOW-3D sale al mercado en 1985, siendo un sistema robusto y flexible enfocado en fluido-dinámica y transferencia del calor, y como hoy utilizaba las técnicas creadas por Hirt, que le permitían una precisión extrema para flujos en superficies libres.

Características.

- FLOW-3D es una aplicación “todo incluido”, no necesita módulos extra para cumplir con su labor de cálculo CFD, pre-proceso y post-proceso, poseyendo una interface gráfica que reúne cada componente del software de forma comprensible y sencilla.

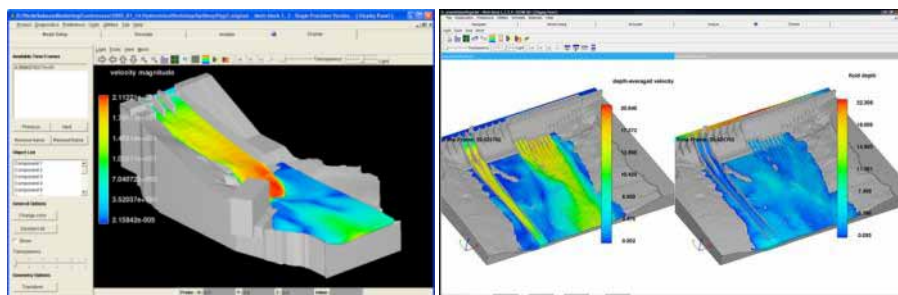


Ilustración 24 – Flow-3D utilizado para cálculo de caudales de agua.

<sup>47</sup> [30]

- El software utiliza una malla de aproximación geométrica que reúne las ventajas de las mallas de elementos rectangulares simples con la flexibilidad de las mallas deformables de elementos irregulares. Esto se denomina “Free-Gridding” o “mallado libre” por los desarrolladores, pues la geometría cambia libremente de acuerdo a la necesidad de representación de la geometría base. Luego esta misma malla es utilizada como malla de elementos finitos y no necesita ser re-creada sino que queda preparada desde la apertura de la geometría original. También es posible optar por un mallado rectangular pues en situaciones de geometrías simples o de tolerancias amplias servirá para ahorrar tiempo de cálculo y recursos de los ordenadores utilizados.
- Dentro de las técnicas exclusivas desarrolladas por Hirt, se incorpora al software una llamada FAVOR (Fractional Area Volume Obstacle Representation) que determina cuales serán las zonas de la geometría que no utilizarán mallado rectangular, esto lo realiza mediante un algoritmo basado en condiciones de presión, velocidad y temperatura para cada volumen a mallar, permitiendo mantener la simplicidad del mallado rectangular cuando es posible.
- Una diferencia de la aplicación con otros softwares de CFD es el tratamiento del modo de flujo de las superficies del fluido, que aplica condiciones de contorno de modo automático, una vez que las principales se han definido por el usuario, para adecuar cada zona independientemente para luego generar la convergencia de la solución, es una suerte de “elementos finitos dentro de elementos finitos”.
- La técnica VOF previamente comentada es exclusiva de Flow Science y aunque algunos softwares competidores señalan incorporarla a sus aplicaciones, de acuerdo a Hirt estas técnicas Pseudo-VOF entregan resultados incorrectos a altos niveles de precisión. Debido a ello actualmente FLOW-3D denomina a su metodología Tru-VOF.
- Otra técnica de mallado única de la aplicación de Flow Science es denominada “*multi-block meshing*”, y apunta a la misma dirección de las ya descritas, la generación de zonas que permiten definir resoluciones, tipos de elemento y tipo de mallado diversas de acuerdo a la complejidad de cálculos necesarios en cada una de ellas.

### 3.7. CFD de código abierto.

Pese al alto costo que presentan las aplicaciones CFD comerciales y el enorme proceso que involucra su desarrollo hasta las versiones que se pueden obtener comercialmente, hoy en día existen aplicaciones CFD gratuitas, y además de código abierto, que permiten entonces su utilización e integración a nuevas aplicaciones, modificando y generando mejoras a dichos códigos sin pagar licencias de ningún tipo.

Evidentemente dichas aplicaciones se han desarrollado originalmente para plataformas de código abierto como las basadas en distribuciones de Linux, sin embargo también es posible encontrar para sistemas operativos comerciales como Windows.

De entre la amplia gama existente solo algunas de éstas aplicaciones son capaces de rivalizar por ahora con las aplicaciones comerciales que llevan mucho más tiempo de desarrollo y presencia en el mercado, sin embargo es fácil pensar prospectivamente y augurar un amplio desarrollo de ellas en un corto plazo, ya que son muchas las industrias y empresas que se verían beneficiadas de la utilización de software CFD de bajo o ningún costo, y que al



día de hoy no tienen posibilidades de realizar éste tipo de análisis en su proceso de desarrollo de productos.

### Open FOAM<sup>48</sup>.

Desarrollo<sup>49</sup>.

OpenFOAM (**OPEN** Field **O**peration **A**nd **M**anipulation) CFD Toolbox es un paquete gratuito y de código abierto producido por una compañía que posee otros softwares que comercializa en el mercado, OpenCFD Ltd.

Fue desarrollado inicialmente a fines de 1980 en el Imperial College de Londres, motivado por la necesidad de crear una plataforma de simulación genérica en el lenguaje informático utilizado en la época: Fortran.

Posteriormente evolucionó al desarrollo de características avanzadas en C++, lo que obligó a la necesidad de ser reescrito desde sus bases en varias ocasiones.

El resultado fue vendido bajo el nombre de FOAM a la compañía inglesa NABLA Ltd. Antes de ser lanzado como código abierto en el 2004.

Actualmente OpenFOAM es el único CFD gratuito que puede competir con softwares comerciales en cuanto a prestaciones, interface y robustez, y cuyo desarrollo está respaldado por una compañía estable y aportes de los usuarios.

Características.

OpenFOAM ha sido pionero en diversas formas:

- Es uno de los más grandes paquetes de aplicación científica escrito en lenguaje C++, actualmente las compañías líderes en CFD están desarrollando aplicaciones en C++ o evoluciones del lenguaje.
- Fue el primer paquete de CFD genérico que utilizó la idea de mallado poliédrico, como consecuencia natural de la jerarquización de las geometrías para simulación.
- El primer software CFD de nivel comercial gratuito y de código abierto lanzado.
- Posee capacidades para la resolución de simulaciones complejas de fluidos, reacciones químicas, turbulencias y transferencia de calor.

---

<sup>48</sup> [31]

<sup>49</sup> [32]

- Actualmente OpenFOAM es utilizado como base para la creación de nuevos solvers de código abierto para problemáticas específicas en áreas como la ingeniería mecánica, química y aeronáutica.

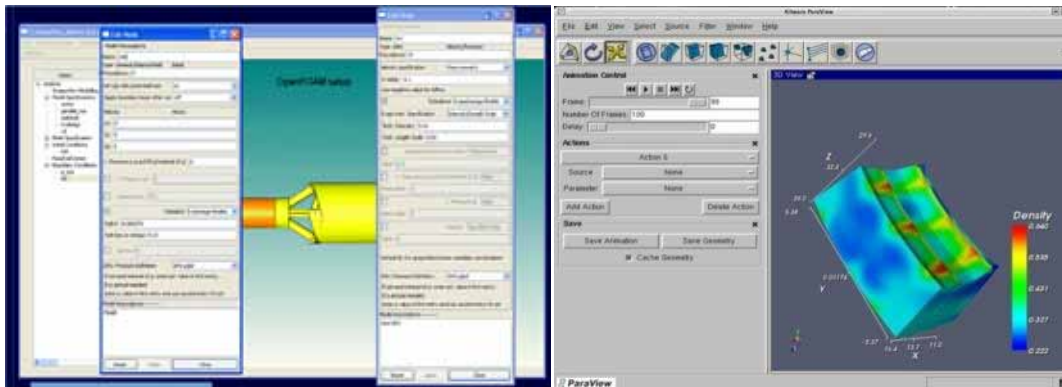


Ilustración 25 - OpenFOAM, etapa de configuración de la solución y corrector de mallado.

- OpenFOAM se distribuye con varios solvers pre-configurados para diversos usos. Posee utilidades y librerías de materiales como cualquier paquete de simulación.

Al ser de código abierto permite incorporar nuevos solvers, nuevas librerías y es totalmente extensible.

- Actualmente se distribuye para Linux solamente, optimizado para sus distribuciones Debian y Ubuntu.

### Free CFD<sup>50</sup>.

#### Desarrollo.

Es otro paquete gratuito y de código abierto para CFD, menos potente que el anterior pero en pleno desarrollo, su primera versión fue lanzada en el 2009.

Su filosofía es generar un programa gratuito y con un código programado de tal manera que sea re-utilizable y ampliable basado en su legibilidad y estructura de programación, tal como los sistemas operativos de código abierto actuales. Busca facilidad de uso y facilidad de posterior desarrollo, con una curva de aprendizaje accesible.

#### Características.

- 3D desestructurado, que permite un mallado poliédrico y tridimensional que se puede acentuar a voluntad del usuario o de acuerdo a parámetros preestablecidos.

---

<sup>50</sup> [33]

- “ParMETIS” es el nombre de la técnica utilizada para la descomposición del dominio del fluido lo que permite simplificar su cálculo.
- Permite simulaciones subsónicas y supersónicas, es decir con número Mach superior a 3 y sobre 0.001
- Posee el algoritmo denominado “Linear MUSCL reconstruction” que permite la reconstrucción de elementos de malla defectuosos al momento del cálculo, lo que provee una precisión sin precedentes.
- Pose una amplia variedad de modelos de turbulencia con los más utilizados en CFD como k-epsilon, SST (Shear Stress Transport) por defecto en los análisis.

## 4. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.

### Consideraciones iniciales.

La presente tesina, escogida por su autor de entre los temas planteados por la dirección del Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos por Ordenador, consistía originalmente en repetir los análisis realizados al modelo anterior del vehículo del IDF en el nuevo modelo, para a raíz de los resultados obtenidos, poder proponer algún tipo de mejora previamente a su fabricación.

Desde que la tesina fue asignada a quien escribe éste documento se ha intentado darle un enfoque donde la investigación tenga un papel más preponderante, sin modificar su nivel de tesina, pues no se pretende realizar una tesis doctoral en éste documento ni a consecuencia de éste posteriormente. Esto se ha plasmado ya en la etapa de fundamentación teórica previa a través de una constante presencia de autores y literatura científica citada que ha aportado a la elaboración de dicho texto.

Sin embargo si se ha buscado que, además de realizar adecuadamente el trabajo práctico que involucra, que se ha desarrollado principalmente en el mes de enero, dada la premura que había por obtener los resultados y proponer las modificaciones previamente a la fabricación del vehículo, y la intención de que éstos fuesen de real utilidad para quienes desarrollaban el vehículo en último término.

Por lo anterior es que se ha optado por plantear la tesina a modo de trabajo de investigación, siempre con la idea comentada inicialmente de que sirva como material introductorio a neófitos en el CFD, y se plantea el apartado nº2, como un marco teórico simplificado. Definido el marco teórico, se procede a continuación a elaborar la estructura de tesis propiamente tal, donde se definen los objetivos, la problemática y las preguntas de trabajo:

### 4.1. Problemática de la investigación.

La amplia existencia de plataformas CAD, con sistemas CAE incorporados, junto a la variedad ya comentada de software CAE, específicamente FEM, y de forma aún más específica software CFD, conlleva la necesidad de realizar una elección adecuada e informada al momento de escoger la herramienta que se utilizará para éste tipo de análisis.

En el mundo académico y aun más en el mundo laboral no resulta factible la utilización indiscriminada de software ilegal, lo que si se realiza muchas veces de forma privada mediante software "pirata", práctica bastante extendida, y también utilizada por muchas empresas. Sin embargo incluso quienes utilizan dicho tipo de aplicaciones sin licencia oficial, suelen tener como principal objetivo a corto o mediano plazo, el poder testearlas adecuadamente y finalmente escoger las que serán adquiridas de forma legal, dadas sus capacidades o conocimiento de su utilización por parte de quienes serán sus usuarios.

- El altísimo costo de las licencias de las aplicaciones más extendidas y potentes hace que el adquirir un abanico amplio de programas sea utópico en la mayoría de los casos.
- Otro factor determinante es las largas horas de entrenamiento especializado que se requiere para llegar a dominar una aplicación del área de CAD CAM CAE adecuadamente.
- El costo del hardware necesario para ejecutar fluidamente aplicaciones de éste tipo es también un parámetro que juega un papel preponderante en la elección de software.

Por lo anterior es que normalmente lo que se busca al adquirir una plataforma, en particular en el mundo de la industria, es escoger una de ellas que sea capaz de realizar correctamente una amplia variedad de tareas, y es así que los desarrolladores, conscientes de ello, integran módulos especializados en temas puntuales como modelado 3D, análisis de elementos finitos, etc.

En la situación puntual de ésta tesina, el problema que se plantea es la resolución de las necesidades de un análisis CFD que se tienen al momento de realizar el desarrollo del vehículo de alto rendimiento del IDF. Para ello se cuenta con una plataforma que integra un módulo de análisis de elementos finitos con capacidades CFD, la plataforma es NX y el módulo es NX THERMAL / FLOW, que es el solver "*built in*" para todos los análisis de flujo y temperatura que se realicen en la plataforma probablemente basado en NASTRAN que es el solver estructural del programa. El pre procesado y post procesado se realiza en el ambiente de NX que comparte con los demás módulos que lo conforman.

**Se busca entonces lograr el desarrollo satisfactorio de los análisis requeridos, la obtención y manejo de los resultados, mediante la plataforma disponible, pese a que no se trata de un software especializado en análisis CFD.**

Para ello el plan trabajo desarrollado consiste en llevar a cabo los análisis y todo el proceso que ello conlleva, previo y posterior, y obtener resultados concretos y útiles para el desarrollo del vehículo, pero también abarca la supervisión del comportamiento en detalle de éste programa informático, en todos los tópicos involucrados, y la realización una breve revisión del estado del arte de otras plataformas, especializadas o no, intentando definir los aspectos fuertes y débiles de NX frente a éstas, para determinar el nivel que posee al momento de utilizarse con éstos fines.

#### 4.2. Justificación y viabilidad.

La realización del plan de trabajo determina la viabilidad de que el software NX continúe siendo utilizado para estos fines, en caso de que presente un comportamiento adecuado y cumpla con lo requerido, o bien permita informar con conocimientos adecuados de su hándicap frente a otras aplicaciones, algunas de las cuales pueden ser directamente propuestas como su reemplazo en futuros estudios y desarrollos.

Respecto a los análisis a realizar, se buscará utilizar una mayor amplitud de los recursos del software, dado que se busca precisamente, comprender si resulta adecuado para éstas tareas y comprendiendo que no se requiere un software de alta competencia, sino uno

capaz de brindar los datos necesarios para ser de utilidad en el proceso de diseño y desarrollo de vehículos de cualquier tipo.

Para ello se ahondará en los recursos de pre y post procesado, como las herramientas para optimizar la generación de mallas de elementos finitos, y la presentación de los resultados de forma gráfica e interactiva, y también en la definición de una metodología concreta para, a partir de un modelo CAD creado en otras plataformas, llegar a la realización del análisis CFD en NX. Esta metodología se ha esbozado en algunos tutoriales revisados para la realización de éste trabajo, y en trabajos previos, pero no se ha determinado con claridad. Se busca entonces el planteamiento de un proceso que pueda ser seguido por quienes deseen a futuro ahondar más en las capacidades de la plataforma.

#### 4.3. Hipótesis y preguntas de la investigación.

De modo previo al establecimiento de la hipótesis, se ha considerado adecuado plantear algunas preguntas y/o aseveraciones que han ido surgiendo durante la elaboración de ésta tesina y las tareas que ello incluye. Estas ideas encarrilarán la hipótesis posterior, y aquellas ideas que no se consideren en ella directamente, igualmente seguirán siendo ideas rectoras del trabajo y la búsqueda de conclusiones útiles.

- ¿Existen ventajas en algunos aspectos de la utilización de NX frente a la utilización de otras plataformas informáticas?
- Los datos obtenidos mediante los análisis CFD realizados en NX son comprensibles con un mínimo conocimiento del área y son los requeridos para el desarrollo de vehículos terrestres.
- ¿Es posible desarrollar un método concreto y detallado del proceso a seguir para obtener resultados CFD viables a partir de un modelo 3D y utilizando NX?
- ¿Resulta posible plantear propuestas válidas para la modificación de la forma del vehículo en desarrollo, a partir de los datos obtenidos en los análisis CFD realizados?
- Es posible para profesionales no expertos en el área de la aerodinámica, luego de un período breve de actualización y estudio, la realización de análisis CFD válidos mediante este tipo de herramientas de software.
- ¿Es innecesario para el desarrollo de un vehículo de competición de índole no profesional, la adquisición de software CFD especializado y es suficiente con lo que puedan ofrecer análisis realizados mediante plataformas de carácter más genérico?

A raíz de lo expuesto, y las temáticas sugeridas en las interrogantes que han surgido, resulta posible plantear como hipótesis central de trabajo y que se intenta demostrar en el desarrollo de ésta tesina que:

***“La utilización de la plataforma NX, y de su solver NX THERMAL / FLOW resulta adecuada y suficiente para el desarrollo de análisis CFD que aporten datos precisos y útiles al proceso de desarrollo y optimización aerodinámica de un vehículo terrestre, y es posible el planteamiento de un método específico a seguir para su ejecución.”***

Esto podrá extrapolarse quizás, luego del desarrollo de alguna investigación al respecto a otro tipo de vehículos que se desplacen en otro tipo de fluido, como embarcaciones, o que

no utilicen apoyo en el suelo para su avance, como vehículos aeronáuticos, sin embargo dado el campo de acción y los datos concretos que serán estudiados, éste trabajo se mantendrá en el campo de los vehículos terrestres.

#### 4.4. Objetivos.

##### General.

Realizar un proceso de análisis CFD de la carrocería en desarrollo para el coche Shell Eco-maratón del IDF, utilizando la plataforma NX y plantear, basándose en los resultados obtenidos, propuestas para la optimización de su forma y rendimiento aerodinámico.

##### Específicos.

- Llevar a cabo una documentación adecuada del procedimiento seguido.
- Establecer un método claro y consistente para la realización correcta de éste tipo de análisis en NX.
- Generar documentación que sirva de introducción al ámbito del análisis CFD a profesionales no expertos en el área pero con la necesidad de realizar éste tipo de simulaciones.
- Definir el alcance y las capacidades reales para la realización de análisis CFD de la plataforma NX respecto de su precisión y usabilidad, y frente a otras aplicaciones informáticas.

## 5. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN CFD

### 5.1. Establecimiento de la metodología a seguir.

El trabajo realizado para la puesta en marcha de la simulación CFD está sustentado en el trabajo previo llevado a cabo para el modelo de vehículo anterior a través de la tesina "Análisis aerodinámico del vehículo para la competencia Eco-Shell 2009" de Freddy Aguirre<sup>51</sup>, dicho trabajo se ha procurado revisar y mejorar cuando ha sido posible pues al ser pionero en el área comete algunas imprecisiones importantes de corregir, y también en los escasos tutoriales respecto al manejo del software NX para la realización de simulación CFD desarrollados para la versión 4 y 5<sup>52</sup>. Los pasos que se han realizado han sido entonces, sugeridos por los anteriores trabajos, sin embargo se han incorporado nuevas etapas que se han considerado importante para obtener resultados más precisos o bien más veloces.

---

51 [34]

52 [35]

A continuación se exponen dichas etapas de modo general, en orden, y se explican en detalle, para una comprensión adecuada del próximo apartado, con una idea del proceso total ya formada. Este proceso se ha podido establecer evidentemente, a posterioridad de la realización de muchas simulaciones, lo que ha permitido determinar la forma más conveniente de operar.

De ésta manera el siguiente apartado que documenta el proceso seguido en la práctica con las simulaciones realizadas con el vehículo del IDF, es posible de seguir directamente, sin detenciones en la comprensión de lo que se está realizando en cada etapa.

*Todas las ilustraciones de éste y el siguiente apartado corresponden a capturas de pantalla de los análisis realizados para el desarrollo de ésta tesina, por lo tanto no se declara su procedencia.*

### Generación del modelo 3D a estudiar.

Se parte de la base que el modelo 3D no necesariamente estará realizado directamente en NX, sino que puede ser exportado desde otras plataformas para importarse posteriormente a NX. En cualquier caso, sea un modelo nativo de NX o no, 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”.<sup>53</sup>*
- Es recomendable cerrar los espacios que por diseño de la forma puedan quedar abiertos, como guardabarros, ventanas, etc. para realizar un análisis correcto.
- Es recomendable que las ruedas y elementos complementarios a la forma principal se integren a esta, 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 si no se trata 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

---

<sup>53</sup> [36]

entre los diversos sistemas CAD, pero optimizado para sólidos, sean estos generados por modelado sólido o de superficies.

### Importación y preparación del modelo en NX.

Una vez que el modelo IGES o STEP ha sido abierto en NX se podrán seguir dos caminos dependiendo del formato utilizado.

- El formato STEP generará un sólido, un volumen “relleno”, que no admitirá reparación en sus superficies por lo que se deberá pasar al siguiente paso, pero se notará la existencia de un error solamente al lanzar el proceso de solución de las ecuaciones que definen el sistema.
- Si se utiliza el formato IGES, lo generado será una “cáscara” que limita el modelo. Al influir solamente las superficies, inclusive de forma independiente al material de las que estén construidas (no a su terminación superficial), el hecho que el modelo no tenga nada en su interior es irrelevante.

En el caso de importación de un modelo IGES, deberá ser revisado y asegurarse de que las superficies individuales que forman el modelo cerrado, para ello se deberán utilizar las herramientas de NX de comprobación y reparación de geometrías, independientemente si el modelo ha quedado “cerrado” en su plataforma nativa, pues es muy posible que las superficies pasen a NX como elementos individuales debido a las diferencias de tolerancia de los programas informáticos.

**La importancia que tiene el haberlo dejado perfectamente cerrado en el software previo es que sólo así las herramientas de NX podrán volver a construir un modelo unitario sin problemas, de otro modo deberá tenerse un dominio mayor de las herramientas de NX para reconstruir ciertas partes del modelo o modificar las tolerancias hasta llegar a cerrar completamente la forma, por lo que resulta imprescindible realizar el proceso con un modelo perfectamente definido desde su software de origen.**

En caso de que no existan problemas mayores, la utilización de la herramienta “coser” de NX bastará para realizar una adecuada unión de las 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 costados 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.



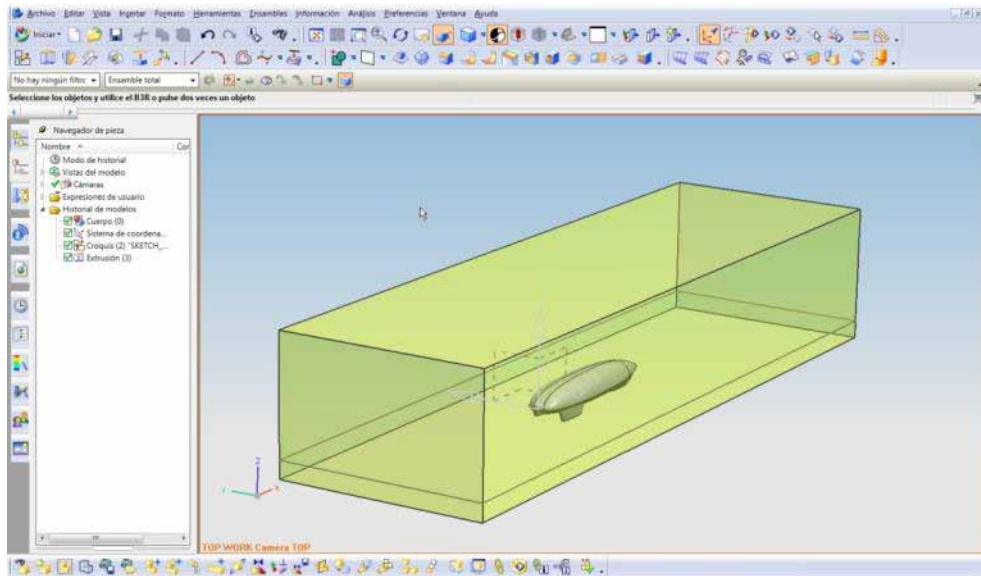


Ilustración 26 - Paralelepípedo que representará el túnel de viento alrededor del vehículo. Obsérvese la proporción y distancia de las paredes.<sup>54</sup>

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 como se ha explicado previamente, y una solución de tipo **estacionario**, ya que como se ha explicado también previamente, se desea evitar que deba ser calculado cada instante del movimiento del flujo y que puedan existir variaciones de las condiciones.)

Esto se podrá realizar en conjunto a la determinación de las condiciones anteriores y al seleccionar las propiedades de la solución.

- 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.

<sup>54</sup> Imagen obtenida en los análisis de los modelos preliminares del vehículo del IDF.

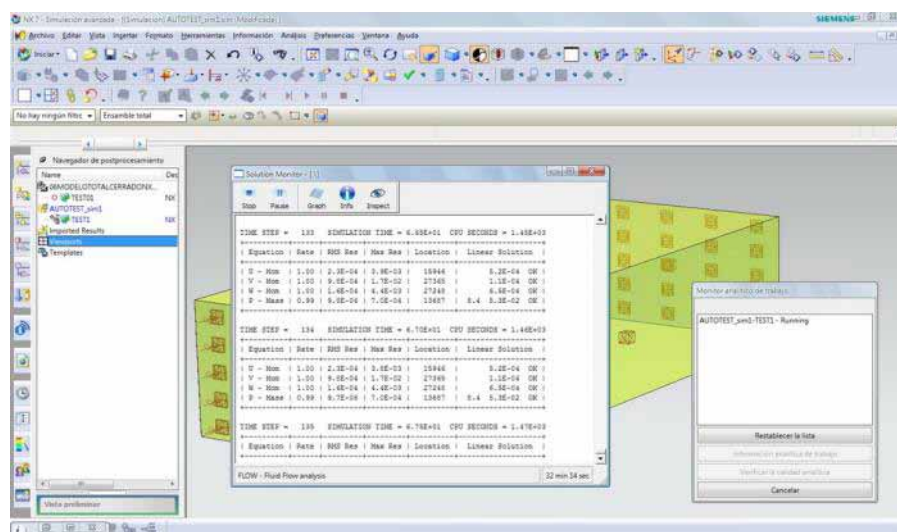
- Como parte del dominio fluido, deberá definirse la malla de la superficie del vehículo, que “restará” el vehículo al volumen total del fluido contenido en el paralelepípedo, informando al software que el fluido “choca” en esa zona con un volumen.
- También como parte del dominio del fluido, deberán 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 la vorticidad, 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 ésta 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. Esto se tratará en un apartado posterior de esta tesina en detalle. Otros aspectos relacionados con el tipo de mallado del flujo y el vehículo se expondrán cuando se detalle el proceso seguido en los análisis llevados a cabo para la realización de éste documento.

### Cálculo de la solución.

Este será un paso en el que el usuario del software se podrá incidir poco, sin embargo, en el siguiente apartado se verá que es posible trabajar con los resultados parciales que la aplicación va entregando.



**Ilustración 27 - Monitor de Solución en pantalla mientras se realiza el cálculo de la solución al problema configurado.**

Esta etapa puede llegar a ser bastante extensa y utilizar enormes cantidades de recursos del ordenador o los ordenadores que se utilicen. Primeramente se calcularán las mallas para las zonas de fluido, pues previamente solo 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.

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 propiamente tal, 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 mas 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	
<b>CP location (m):</b>	<b>1.160E+00</b>	<b>3.419E-03</b>	<b>4.777E-01</b>	
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
<b>Pressure Force (N):</b>	<b>3.868E+00</b>	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  $C_x$ , la fuerza de las presiones en el eje X, es decir el dato que en la fórmula para su obtención corresponde a  $F_x$ .

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 éste 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  $C_x$ , 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 cabal 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.

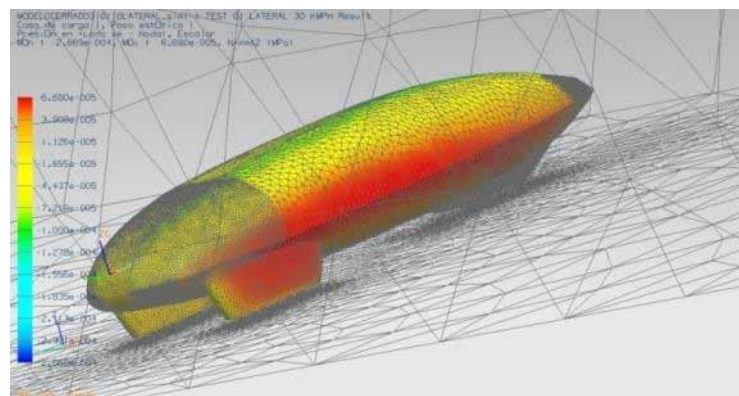


Ilustración 28- Presión en la superficie del vehículo - estudio de viento lateral.

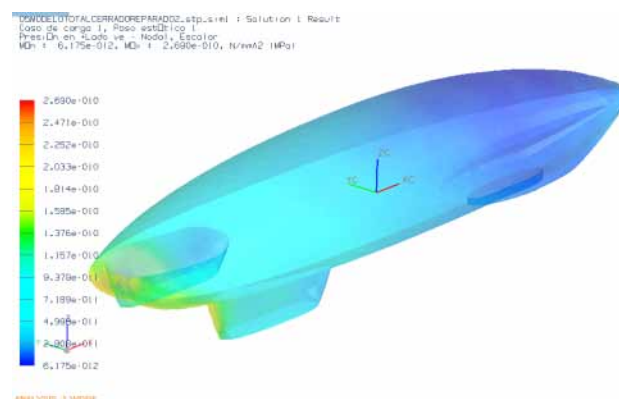


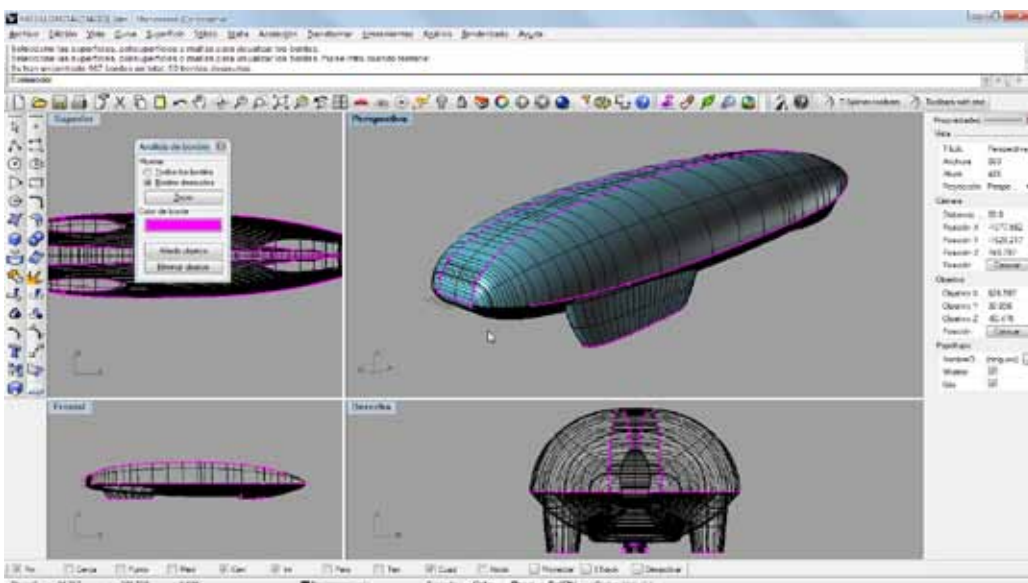
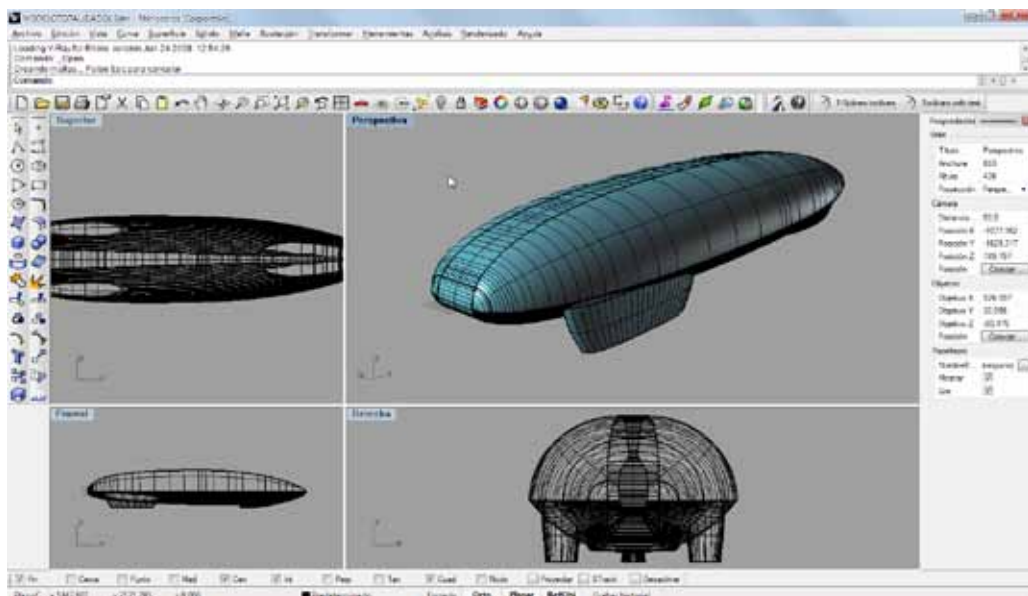
Ilustración 29 - Presión en la superficie del vehículo - estudio de avance frontal.

## 5.2. Procedimiento seguido para la realización de los análisis.

En este apartado se declaran 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 privilegia 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.

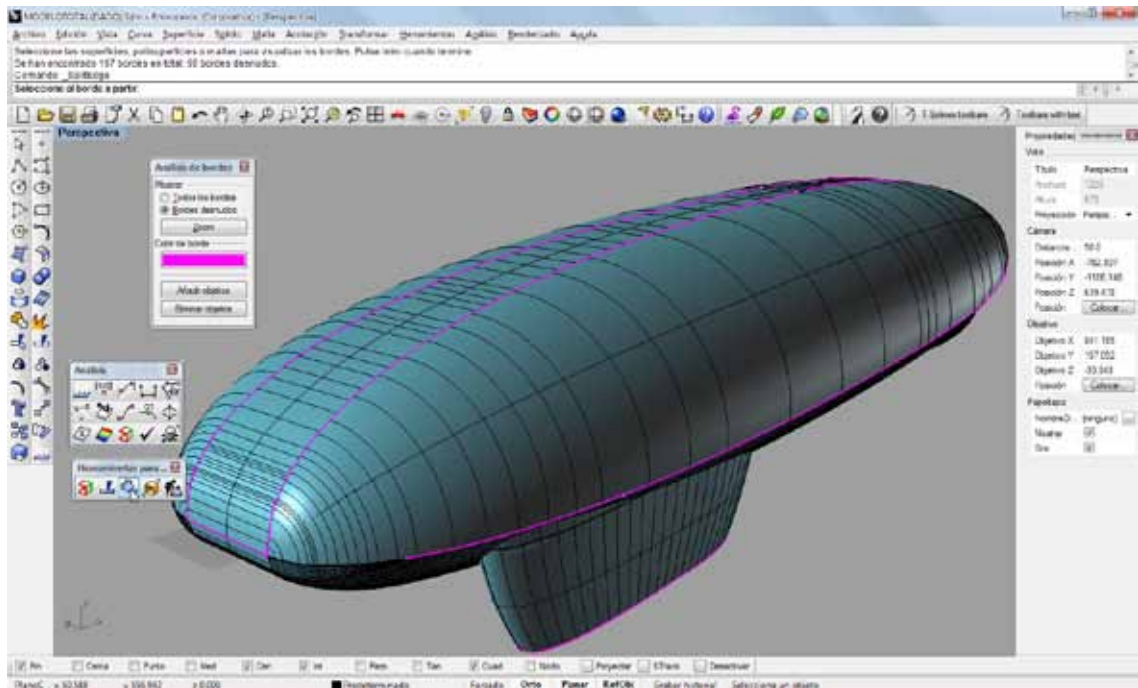
### Generación y optimización del modelo 3D.

A partir del modelo recibido, en este caso generado en Rhinoceros 3D v4.0, los primeros pasos efectuados consisten, para cada modificación que se realice, ya sea por parte del equipo a cargo del vehículo o de las propuestas que surgieron a raíz del análisis CFD, en revisar y reparar si se considerase necesario, la geometría del modelo haciéndolo apto para su exportación e importación a NX.

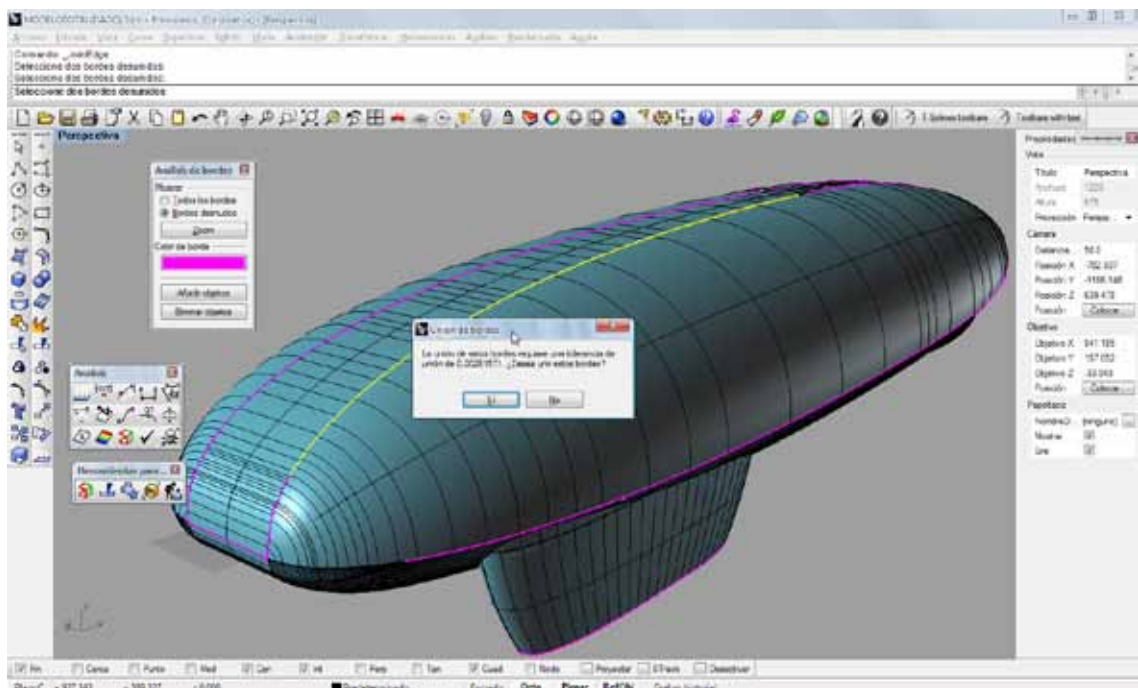


El modelo idealmente debe repararse en su programa nativo, pues será más fácil obtener un resultado correcto. Para ello se han utilizado las herramientas de análisis que Rhinoceros posee como “análisis de bordes”. Primeramente se revisan los bordes desnudos del modelo, y gráficamente es posible apreciar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

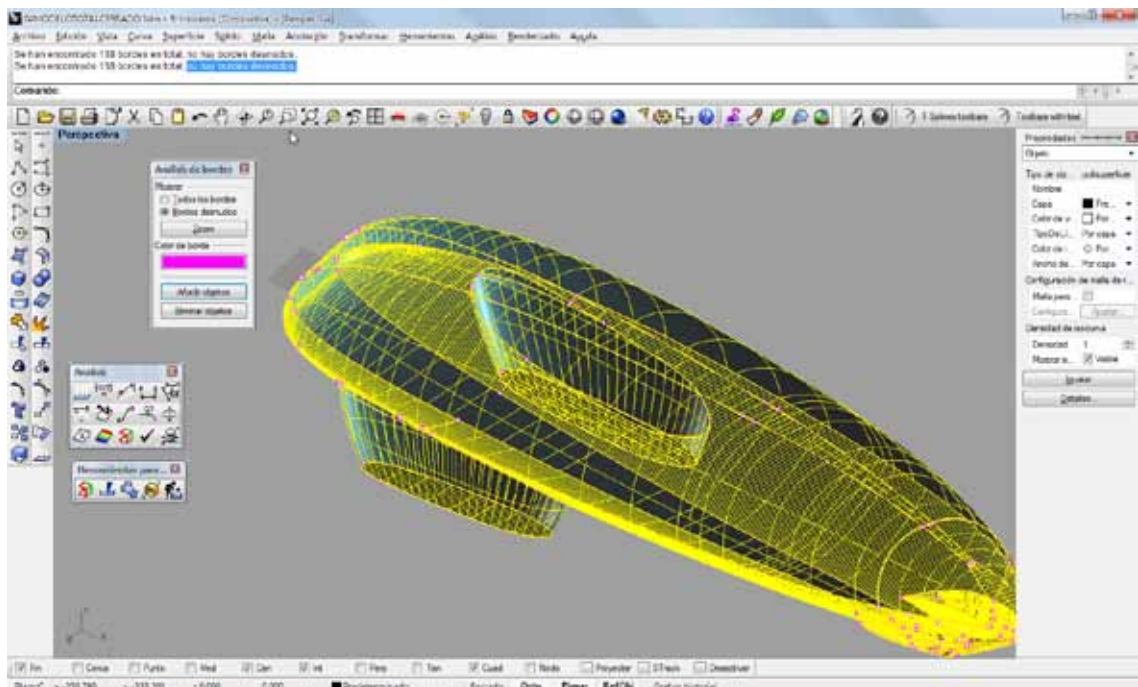
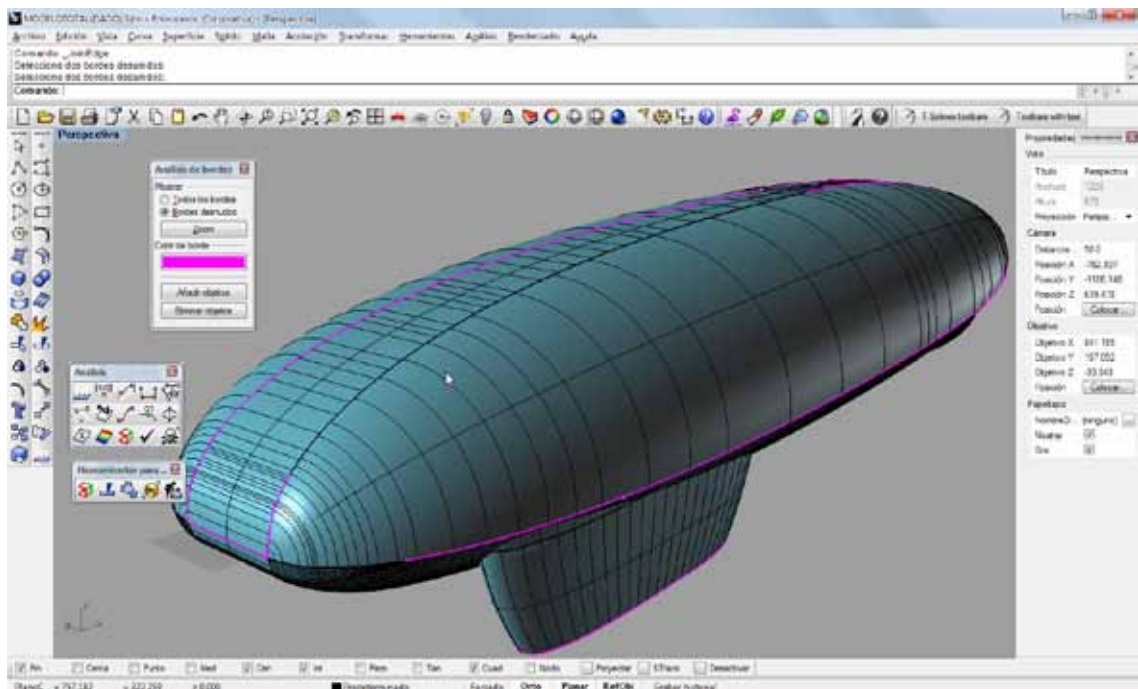
Utilizando las herramientas de reparación como “unir bordes desnudos” se procede a ir seleccionando pares de bordes adyacentes para unirlos por sobre la tolerancia del software, “obligándolo” a acercarse y “coser” dichos bordes.



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 acusa ninguno.

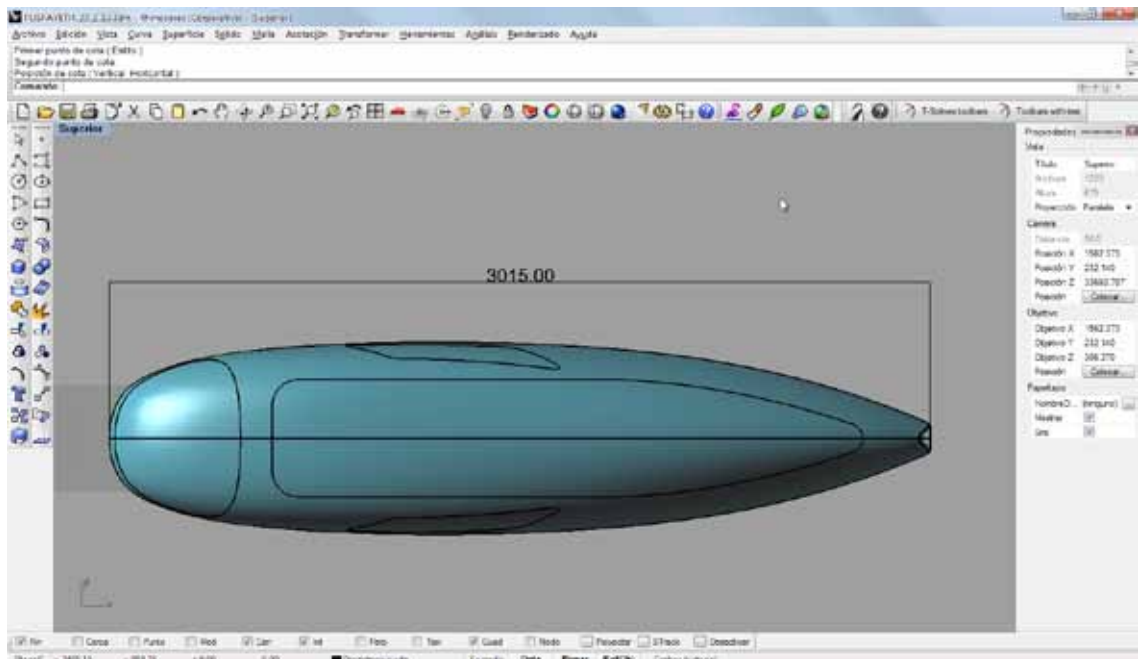


Una vez realizada la unión como muestran las figuras anterior y siguiente, el borde destacado en color magenta desaparece como borde desunido.



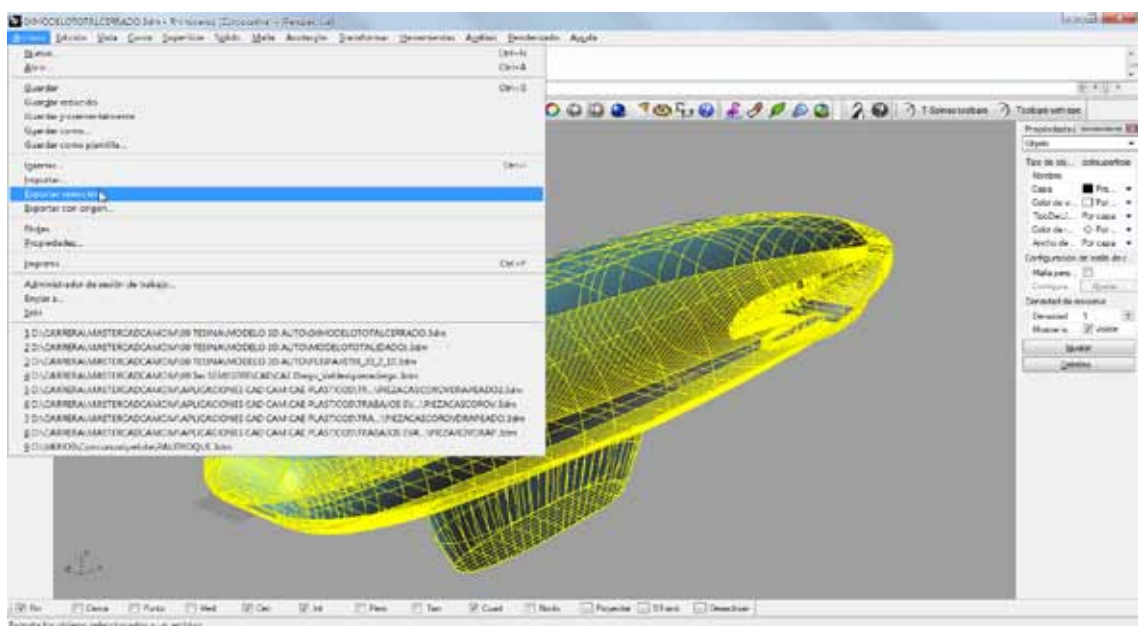
Finalmente se vuelve a realizar un análisis de toda la forma y el software anuncia que no existen bordes desnudos que es lo que se deseaba lograr.

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 proceso 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 esto realizado el modelo se encontrará listo para ser exportado a NX.



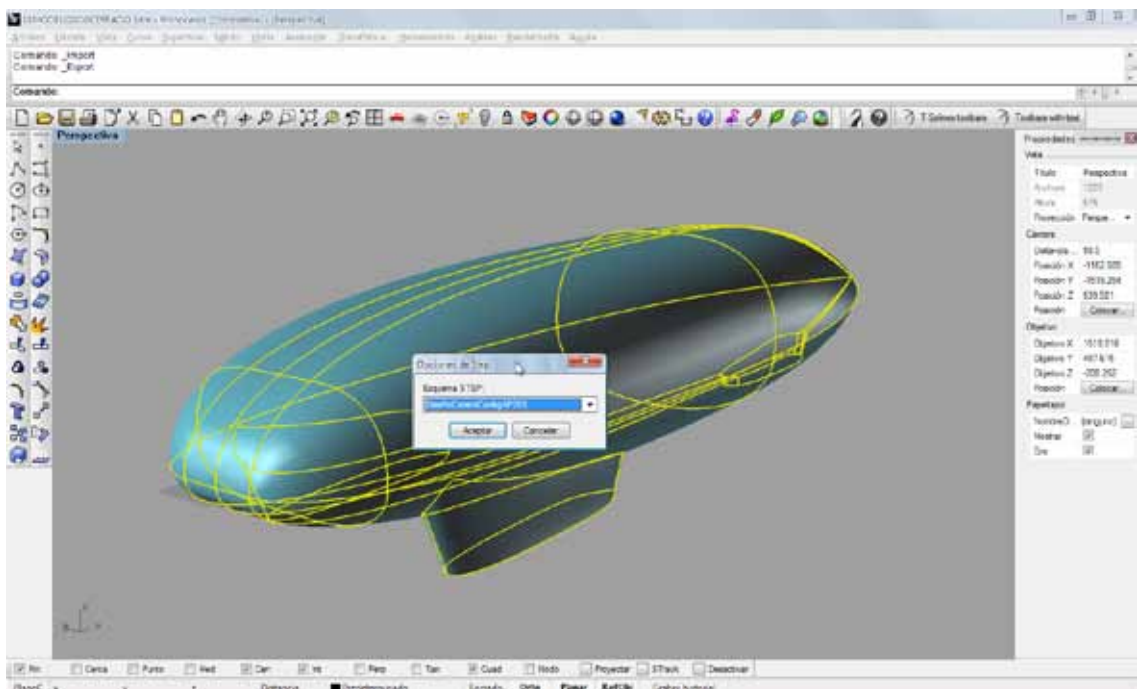
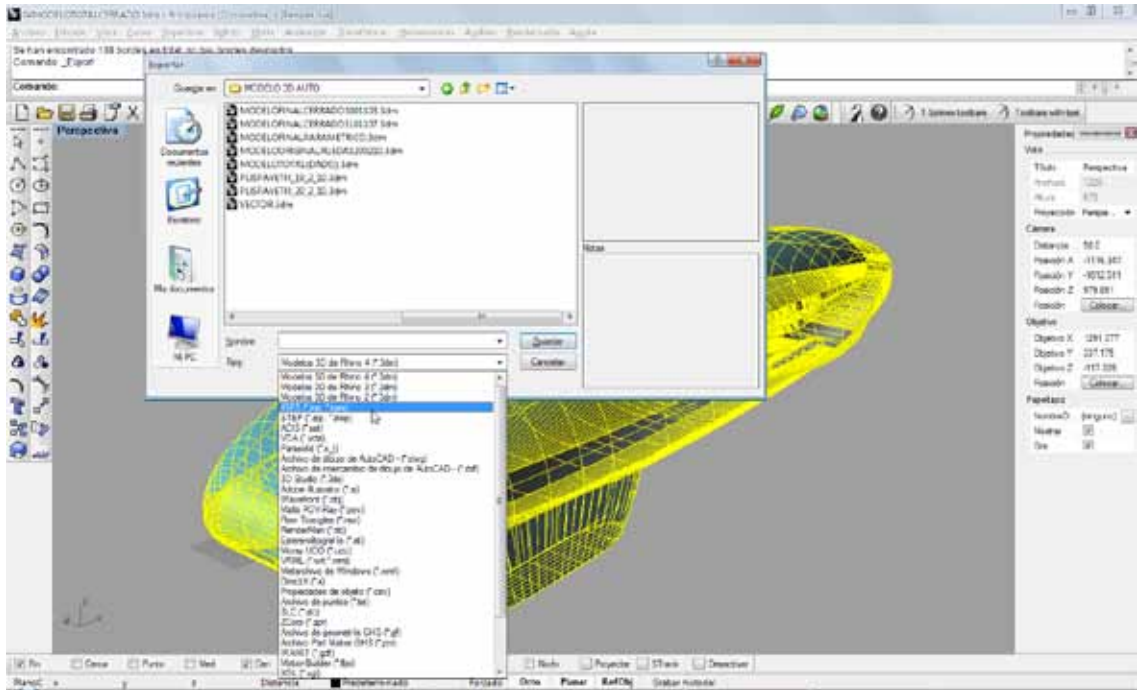
#### Exportación e importación del modelo.

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, como muestra la imagen siguiente, 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.



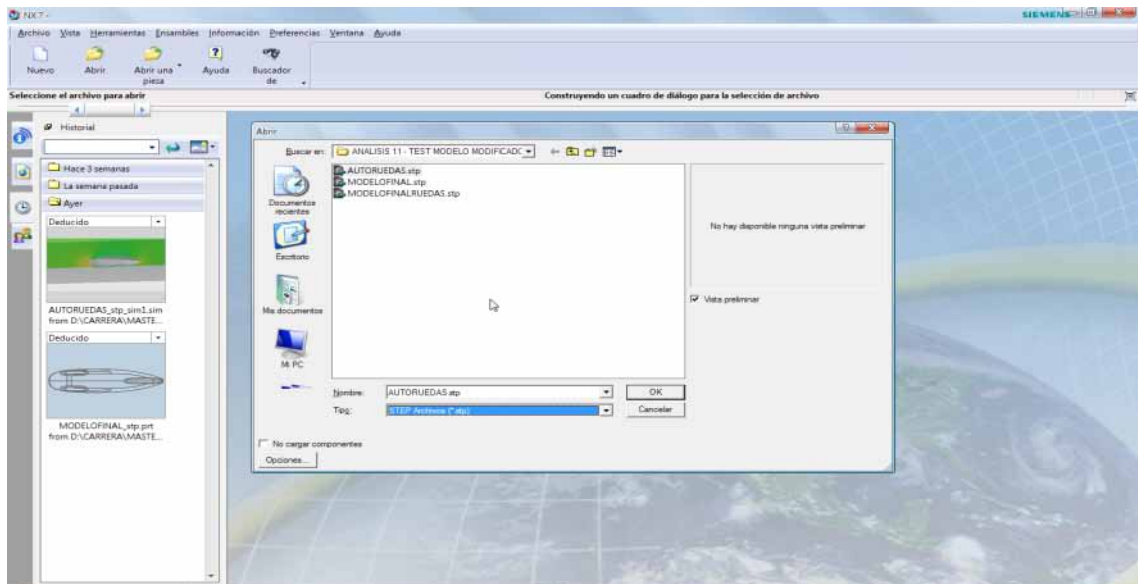
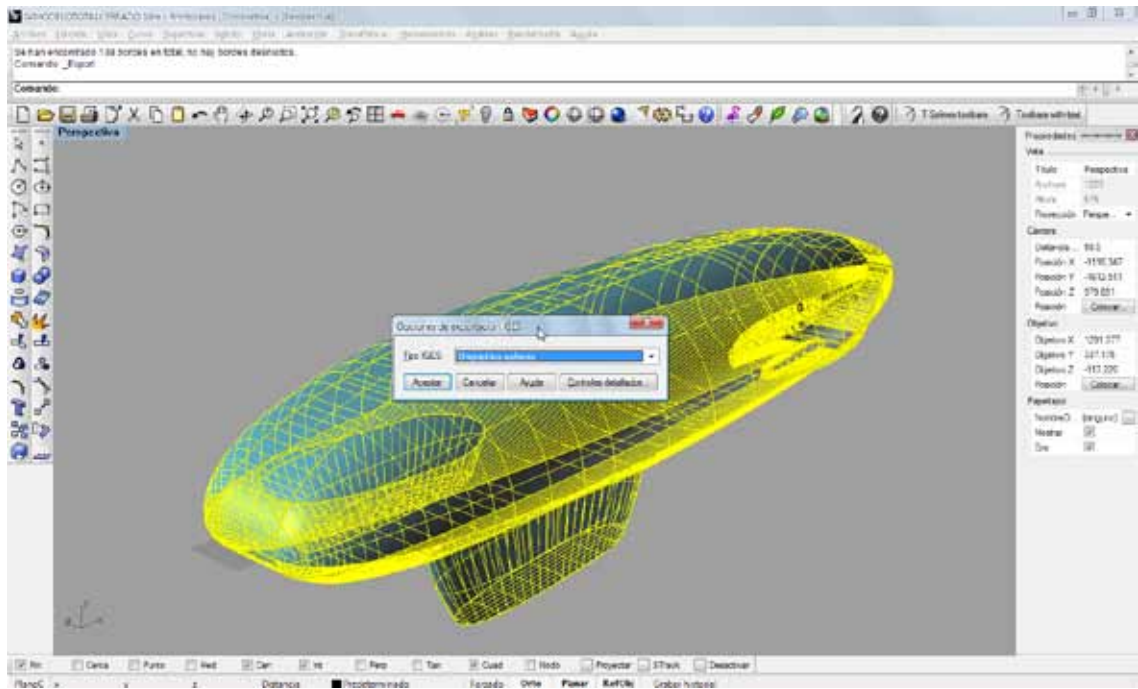


En la amplia lista de formatos que el software puede importar y exportar, debe buscarse el formato STEP y el formato IGES, que serán los escogidos para la exportación.

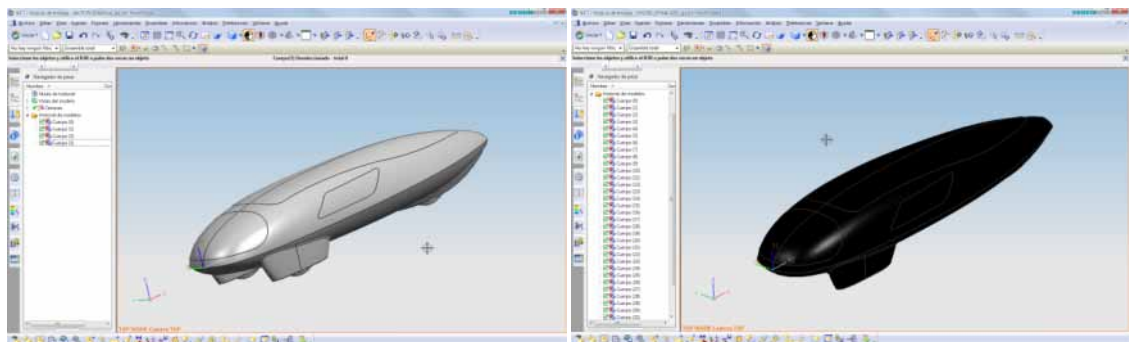


En caso de escoger el formato STEP, que como se ha mencionado debe ser elegido solamente si se posee la plena certeza de que no hay errores de ningún tipo en el modelo, se optará por la alternativa "DiseñocontrolconfigAP203", como muestra la imagen anterior.

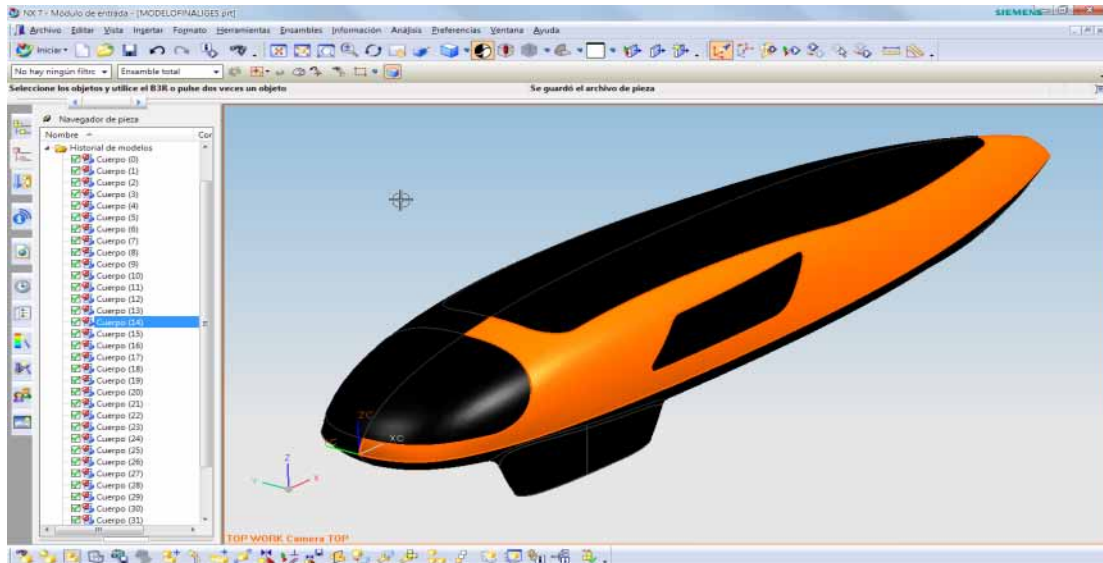
En caso de escoger el formato IGES, se optará por "Unigraphics Surfaces", estas elecciones tienen como principal razón mantener las tolerancias dentro de los límites de NX, y ofrecer al software receptor un lenguaje que pueda leer correctamente.



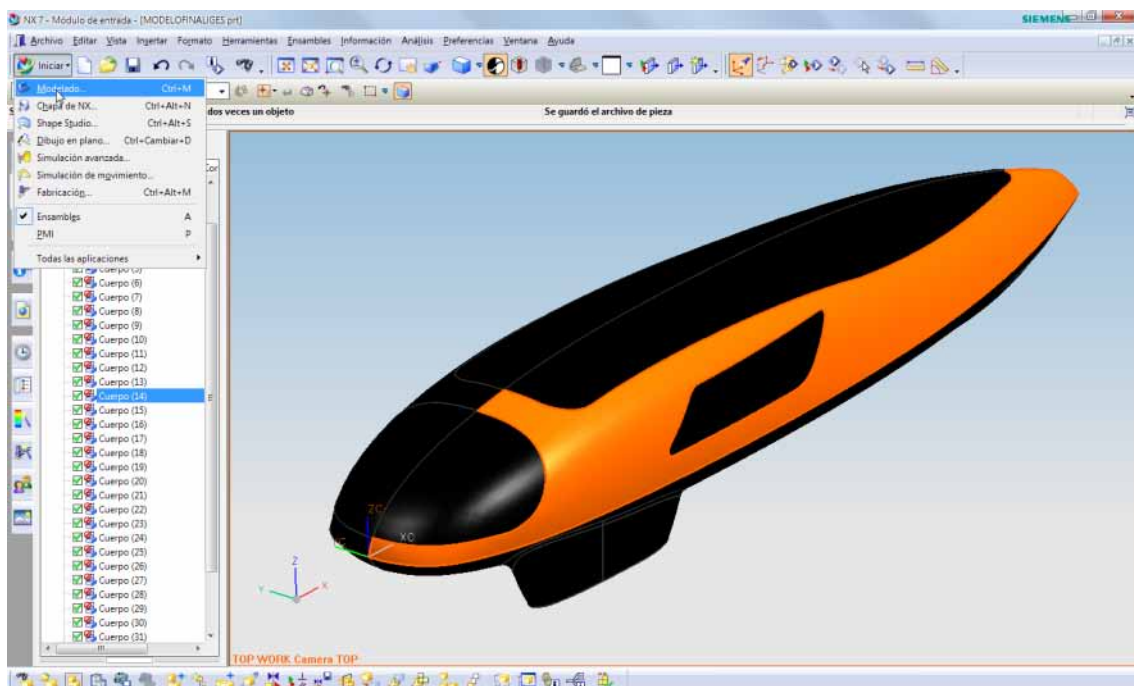
El siguiente paso será desde el software NX, utilizar el comando “Abrir” para acceder a los ficheros creados, ya sea el STEP, a la izquierda en las imágenes siguientes, o el IGES a la derecha.



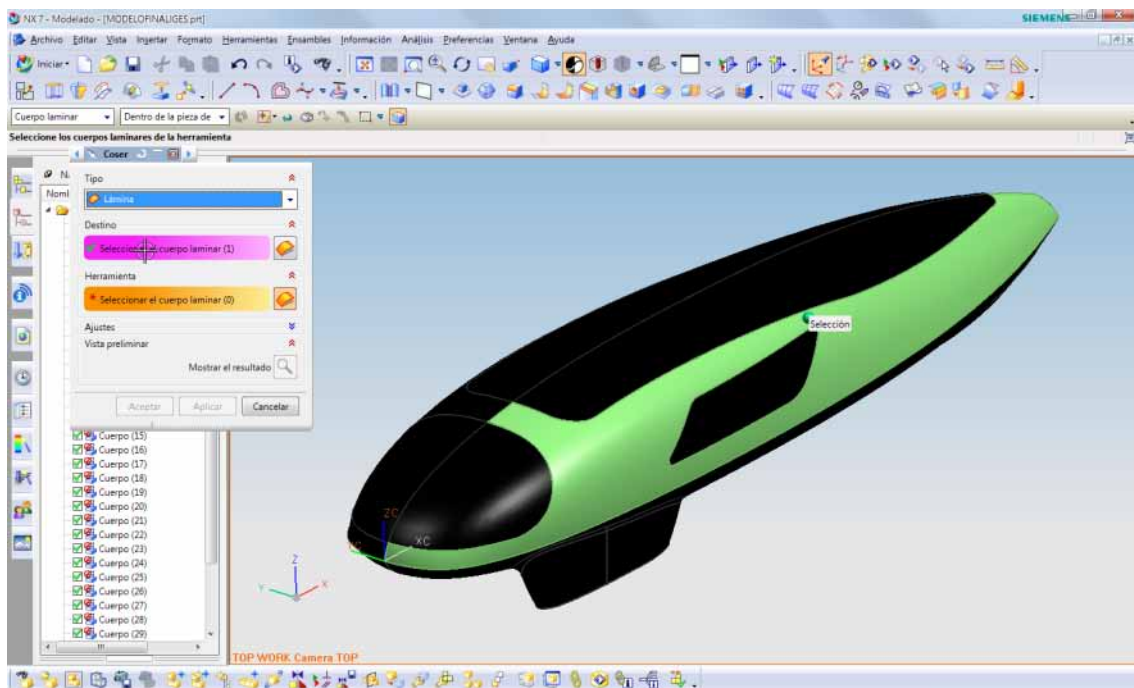
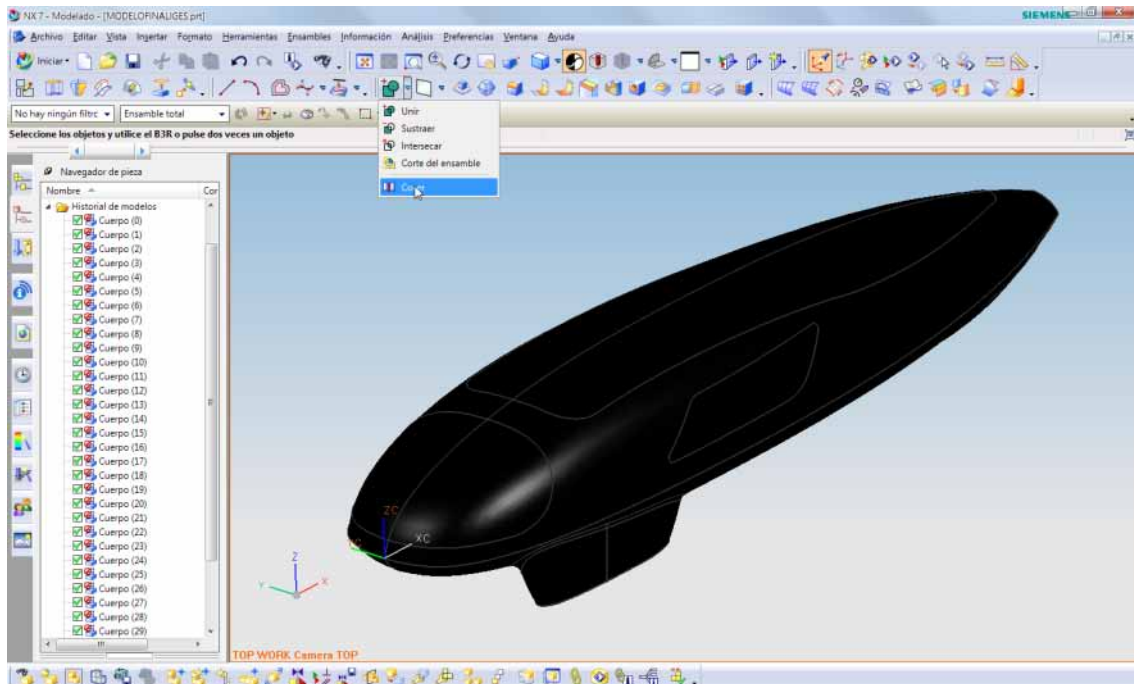
## Preparación final del modelo.



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 imagen siguiente 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.



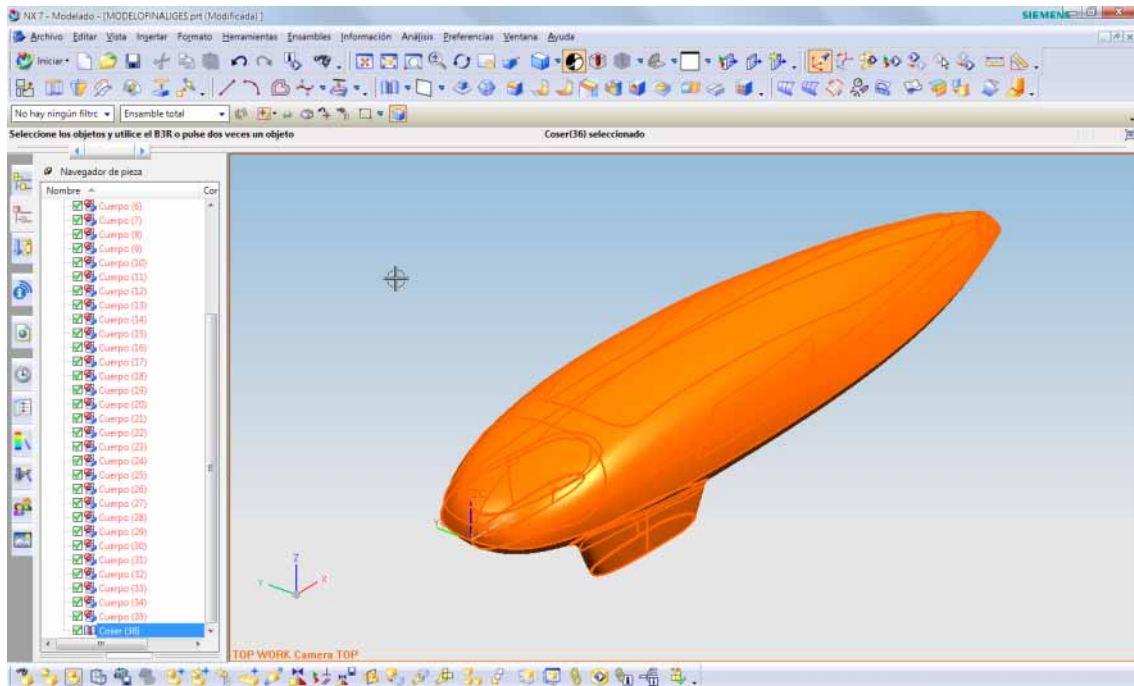
El proceso siguiente será utilizar la herramienta "coser" de NX.



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 superficies (puede realizarse por ventana de selección).

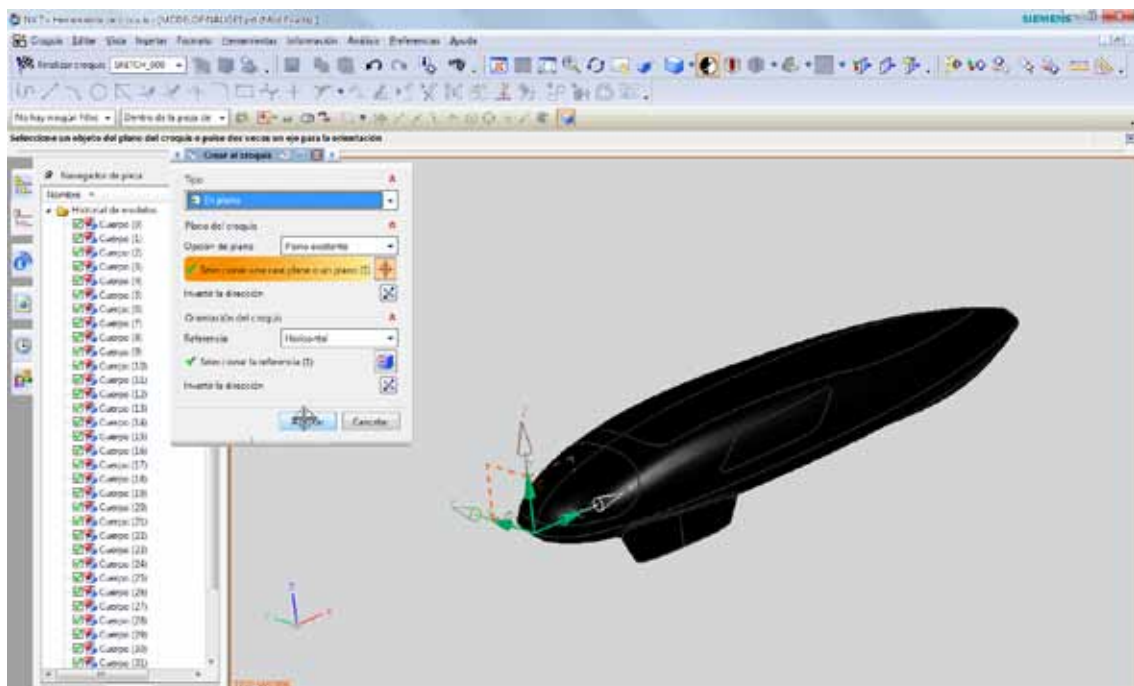
Esto al aplicar la herramienta generará una unión entre todas las superficies generando nuevamente un modelo totalmente cerrado.

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.

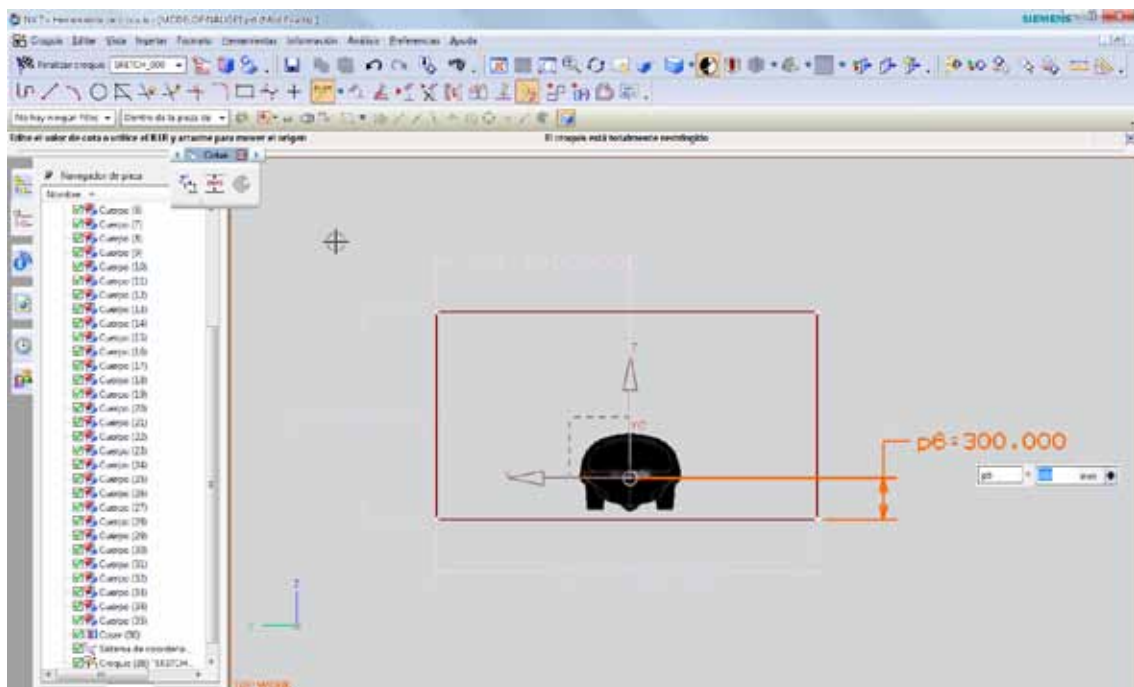
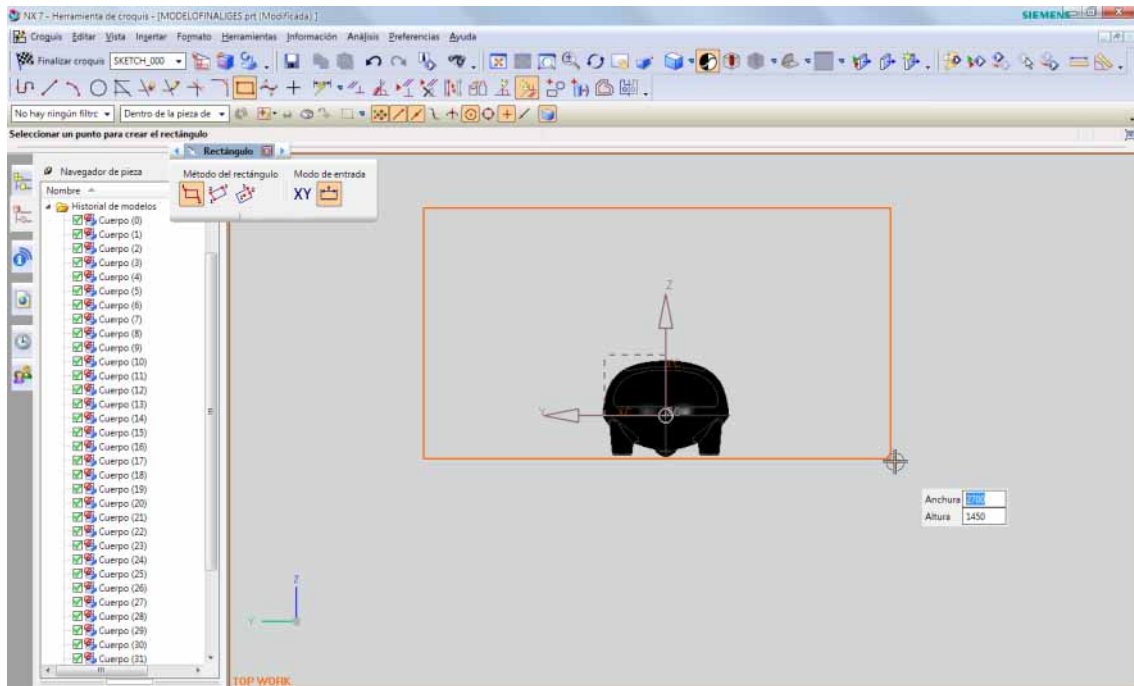


Generación de las geometrías complementarias.

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 propiamente tal.

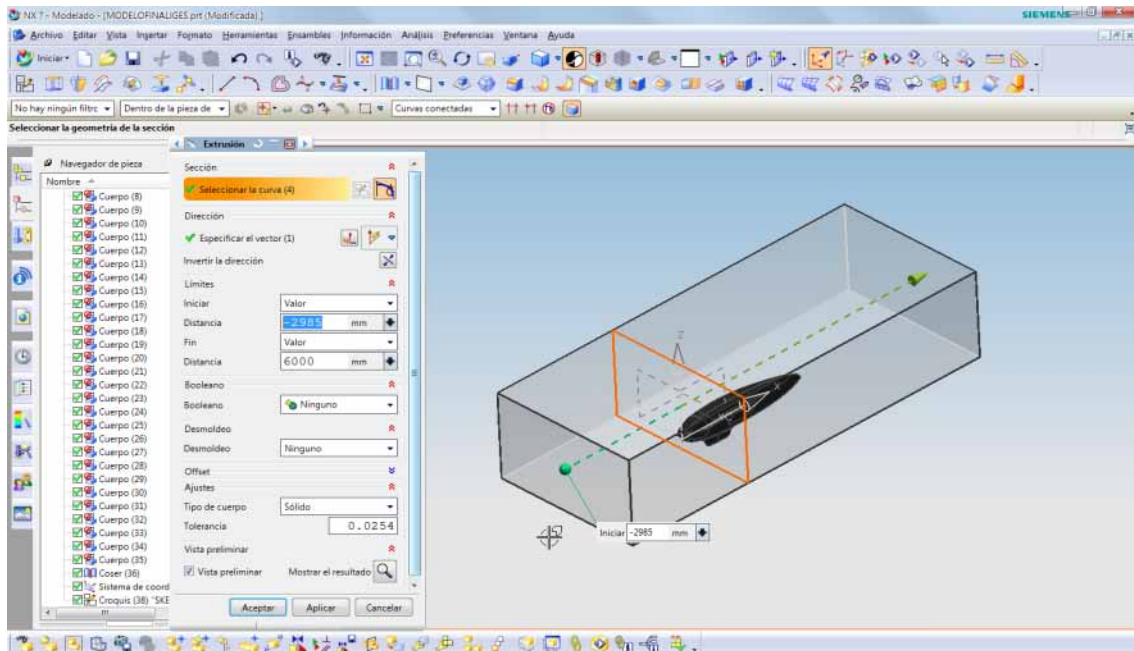


Para ello se creará un croquis en el plano ZY, que definirá la forma del rectángulo que será extruido. Se realizará el rectángulo sin medidas determinadas ya que se utilizarán cotas paramétricas para su adecuado control de dimensiones.



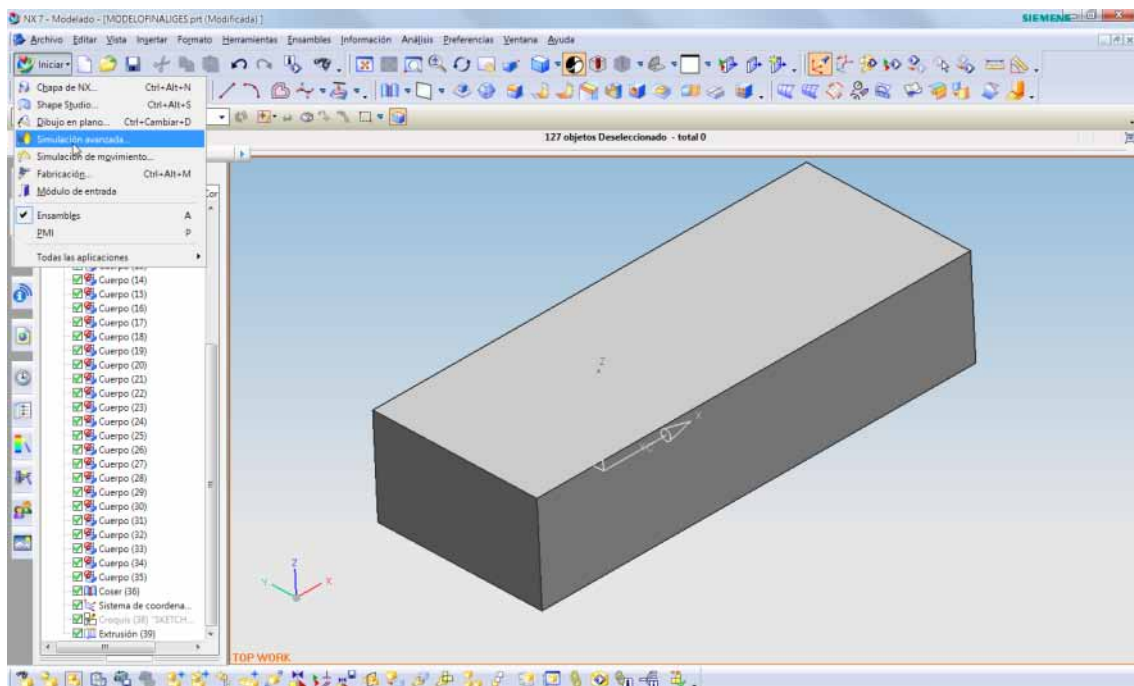
Las cotas deberán permitir ubicar al vehículo exactamente al centro del rectángulo en la horizontal, y en contacto con suelo respecto a la altura, además debe considerarse medidas que logren que el flujo no se vea perturbado por la cercanía de las paredes. En este caso se ha generado un rectángulo de 3500 mm de ancho por 2000 mm de alto.

La extrusión del rectángulo se hará considerando la medida del vehículo al largo, que se tomó previamente en Rhinoceros. En caso de no contar con ella deberá medirse en este punto. 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.

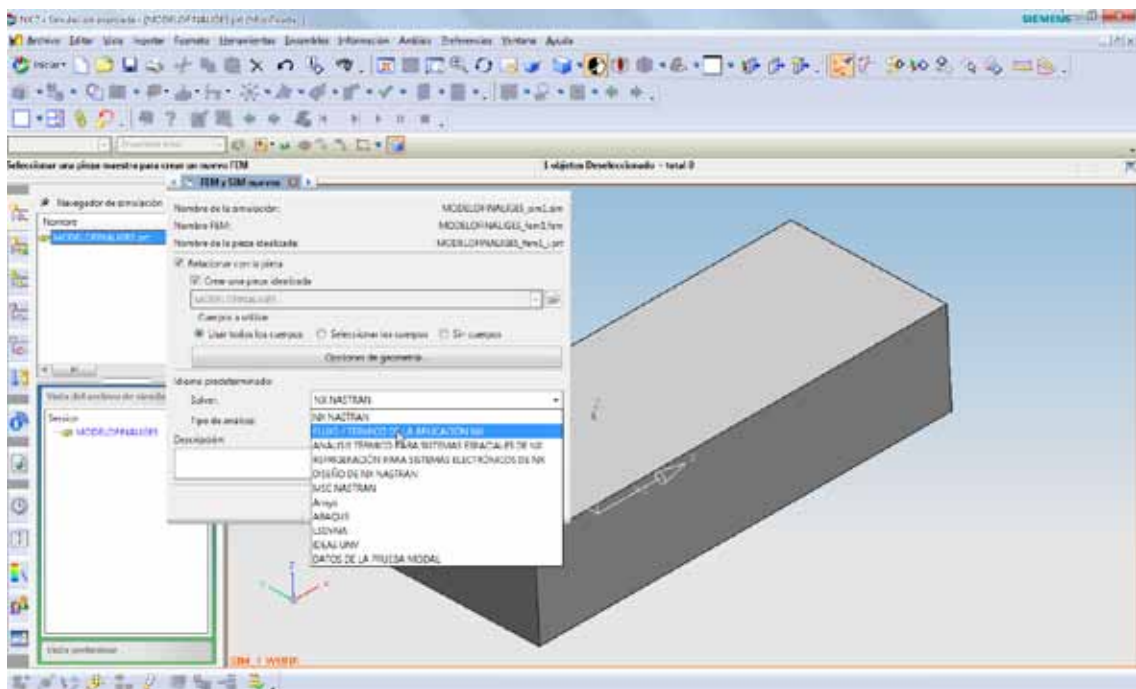
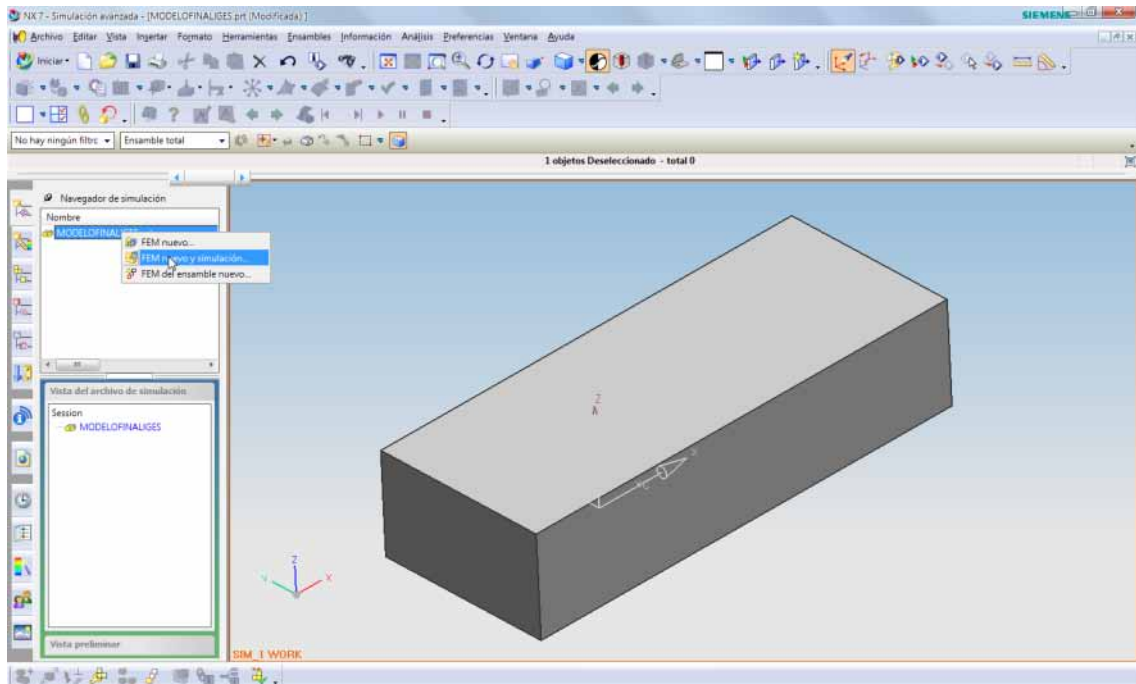


### Configuración de la simulación CFD.

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.



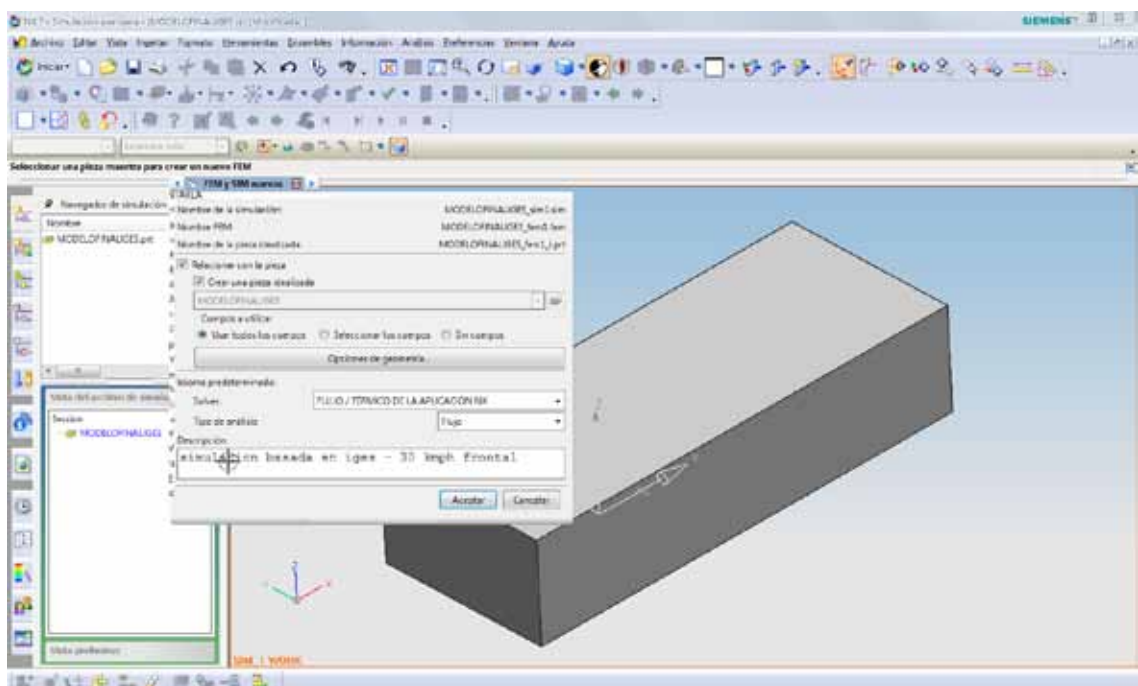
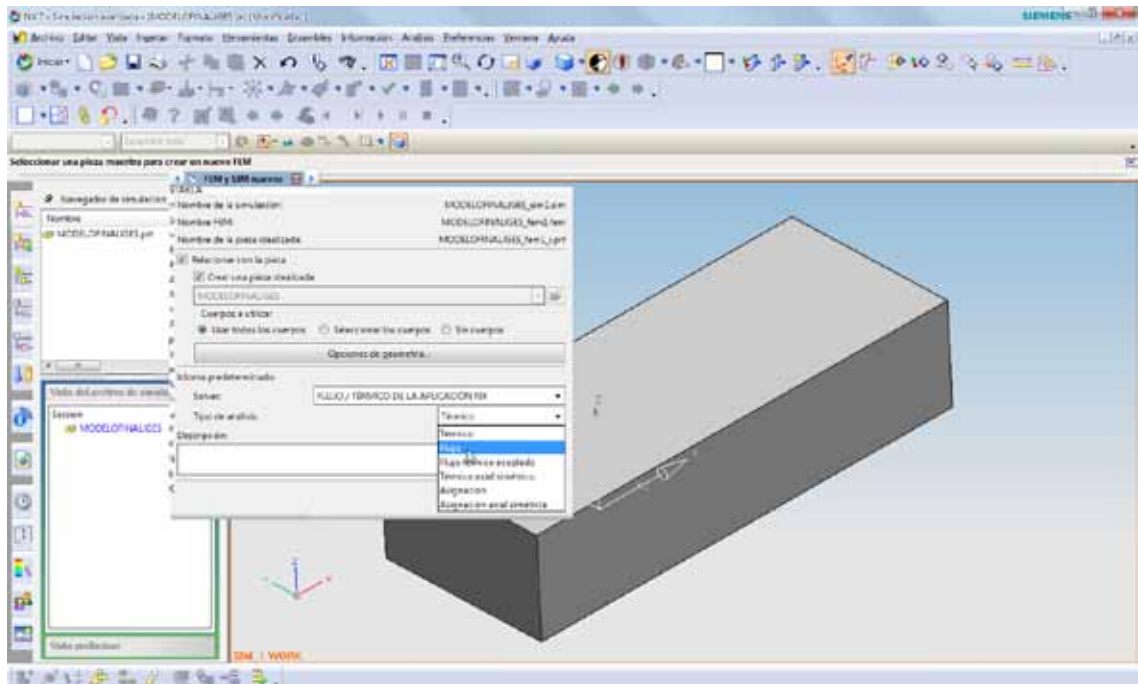
El primer paso a realizar para configurar la simulación es activar el módulo de simulación avanzada como se muestra en la imagen anterior. Una vez en el módulo, se hará clic derecho sobre el modelo y se escogerá la opción "FEM nuevo y Simulación" para iniciar una nueva simulación basada en el modelo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



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

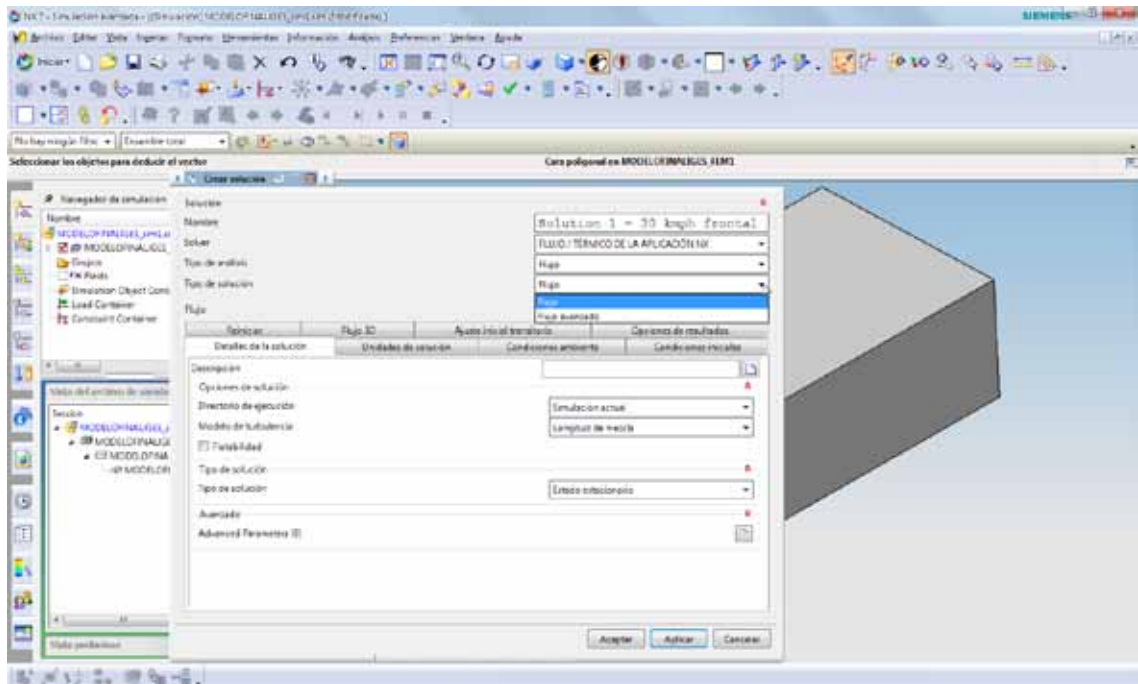
Se escogerá "flujo" entre las opciones que presenta NX, pues en este tipo de simulación CFD no tiene mayor relevancia la temperatura ni su transferencia.



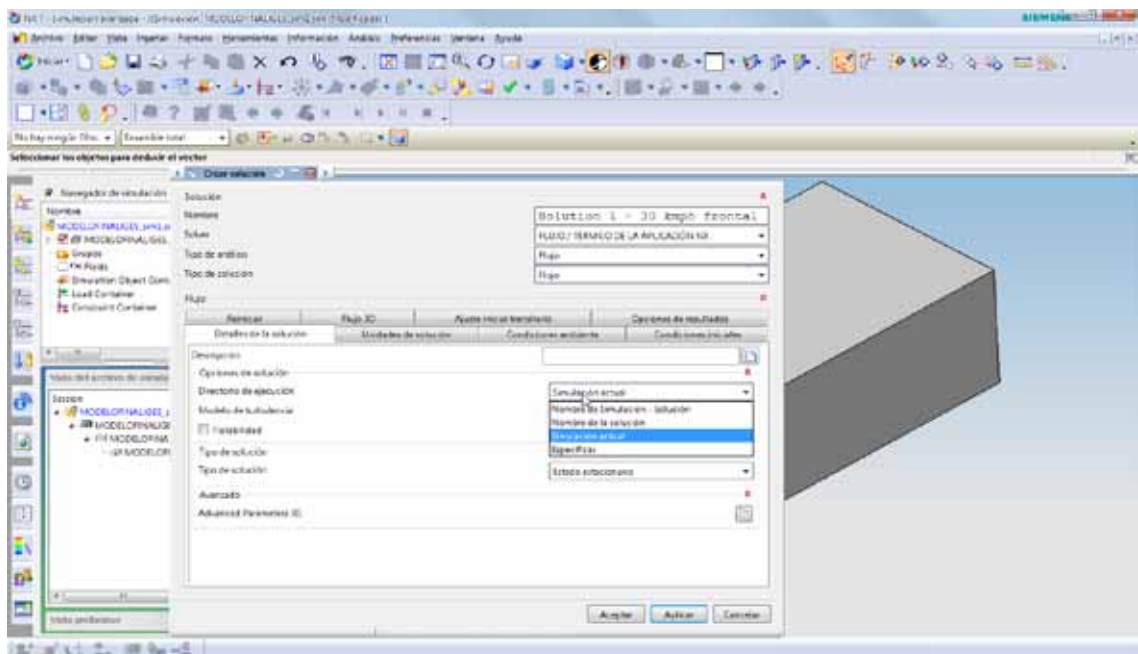


Finalmente se podrá añadir algún texto para describir la simulación y las características particulares de ésta. Es importante debido a que rara vez se realizará un solo análisis, y debe contarse con elementos que permitan diferenciar uno de otro con facilidad.

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 que se explicarán a continuación:

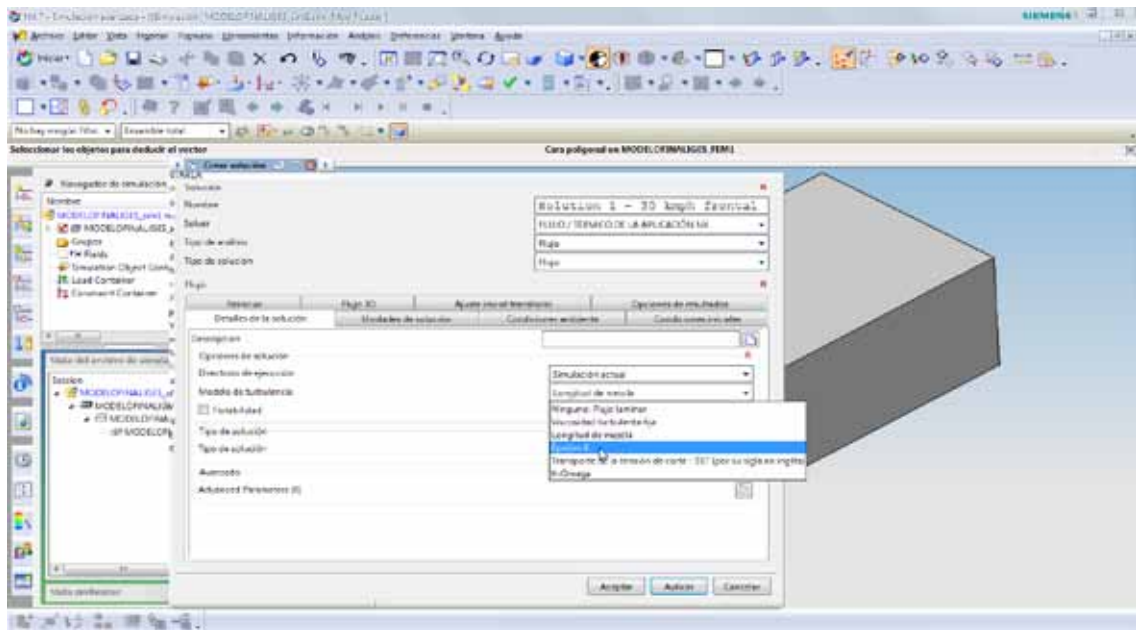


Las primeras persianas ya se encuentran definidas desde el cuadro de dialogo previo y la información se traspasa de forma automática al nuevo. La única diferencia es que se deberá determinar la opción flujo entre las dos existentes. Para un análisis aerodinámico la opción "flujo" es suficiente pues no 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"



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. **Es importante contar con suficiente espacio libre en el directorio escogido pues una sola simulación puede ocupar alrededor de 500 mb a 2.0 Gb con facilidad.**

También es posible crear automáticamente nuevos directorios dentro del directorio de las piezas, mediante las opciones “nombre de la simulación-solución” o “nombre de la solución”, o determinar uno cualquiera mediante “especificar”.



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<sup>55</sup> 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.

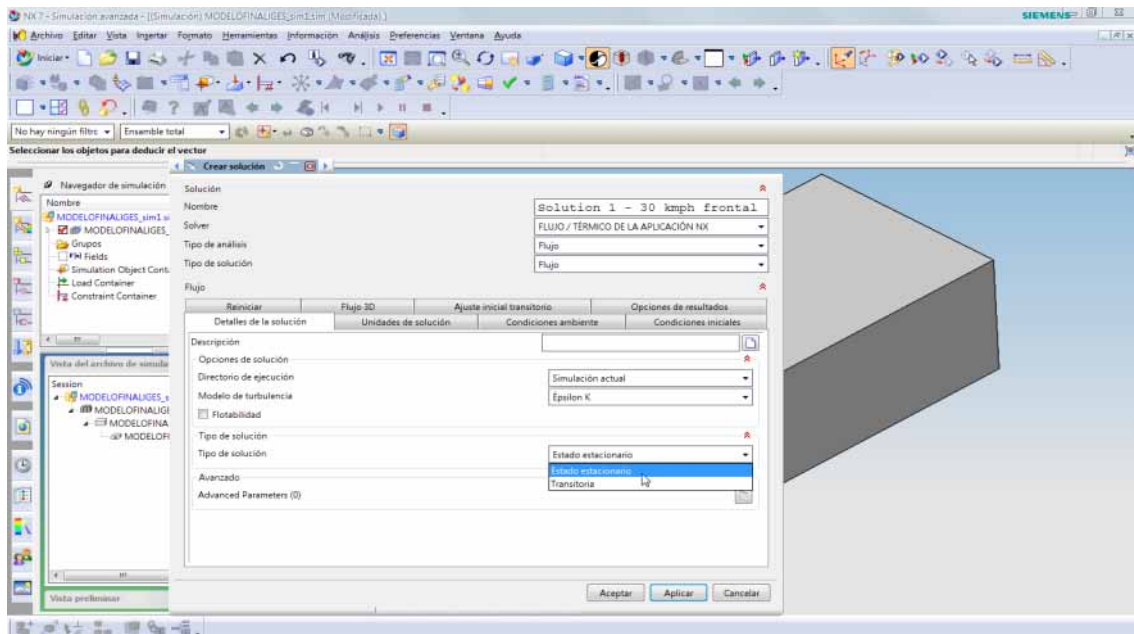
El modelo “**Longitud de mezcla**”, llamado a veces “modelo algebraico” da buenos resultados en muchos tipos de aplicaciones CFD, utiliza menos tiempo de cálculo que los modelos de dos ecuaciones como el k-ε, pero no es adecuado para velocidades bajas de flujo.

---

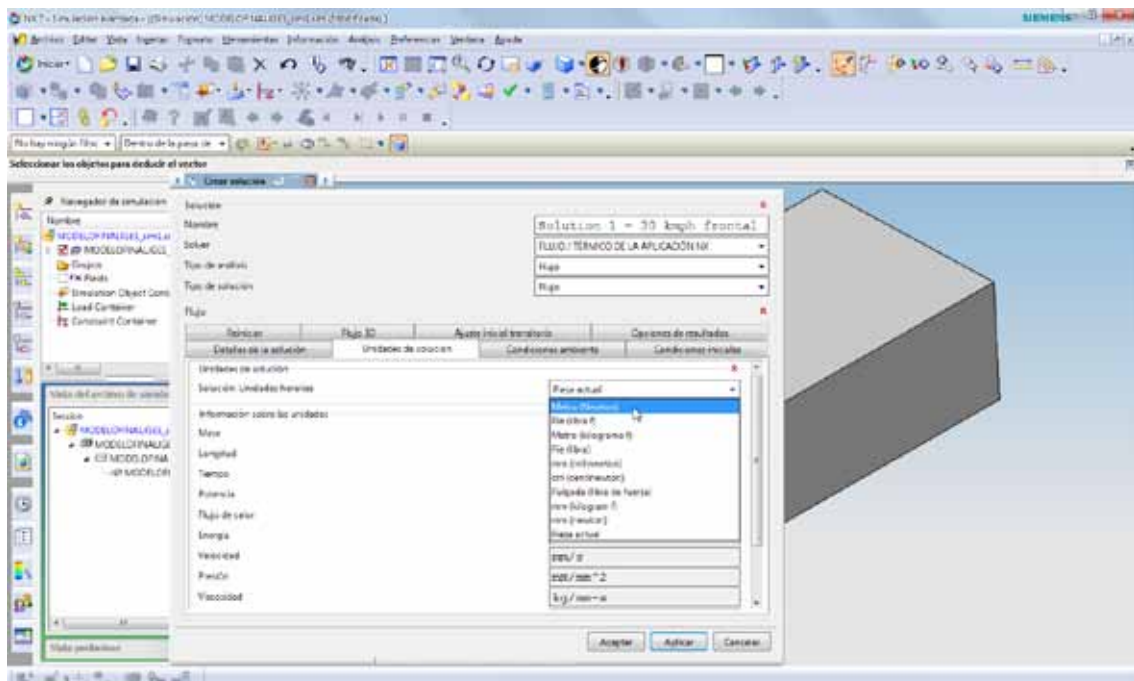
<sup>55</sup> Documentación de ayuda incluida en el software NX v7.0. Apartados “Understanding Turbulence Models” y “Creating geometry for FE Flow Modeling.”

El modelo “k- $\omega$ ” 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- $\epsilon$ ” y “k- $\omega$ ”, 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.

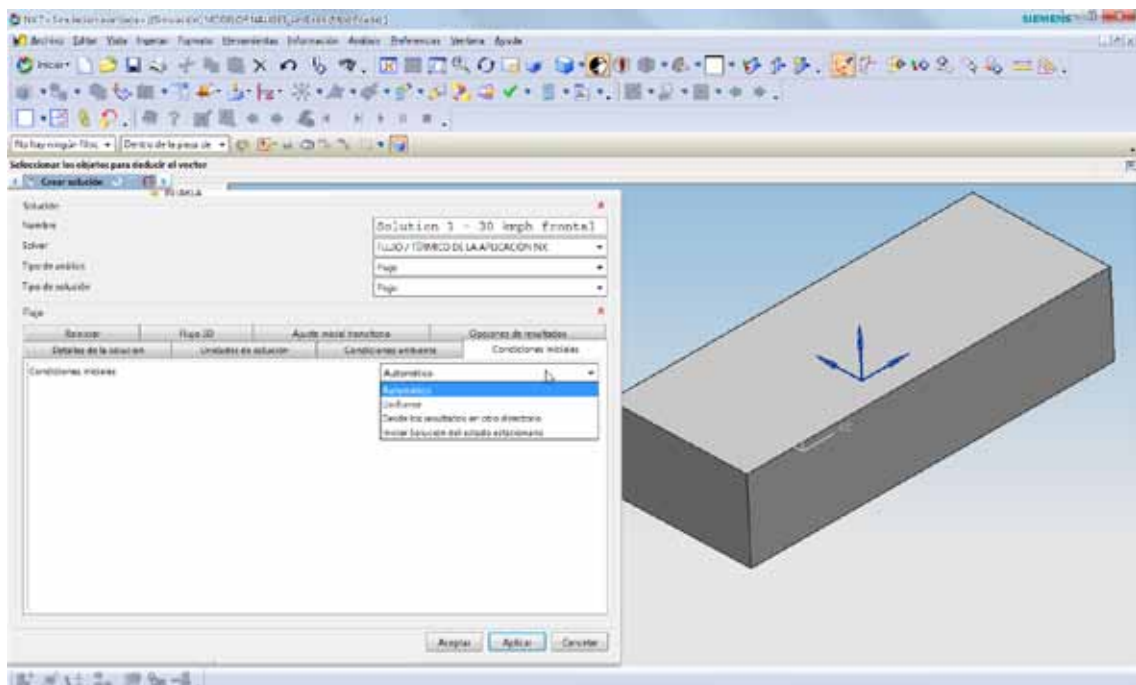
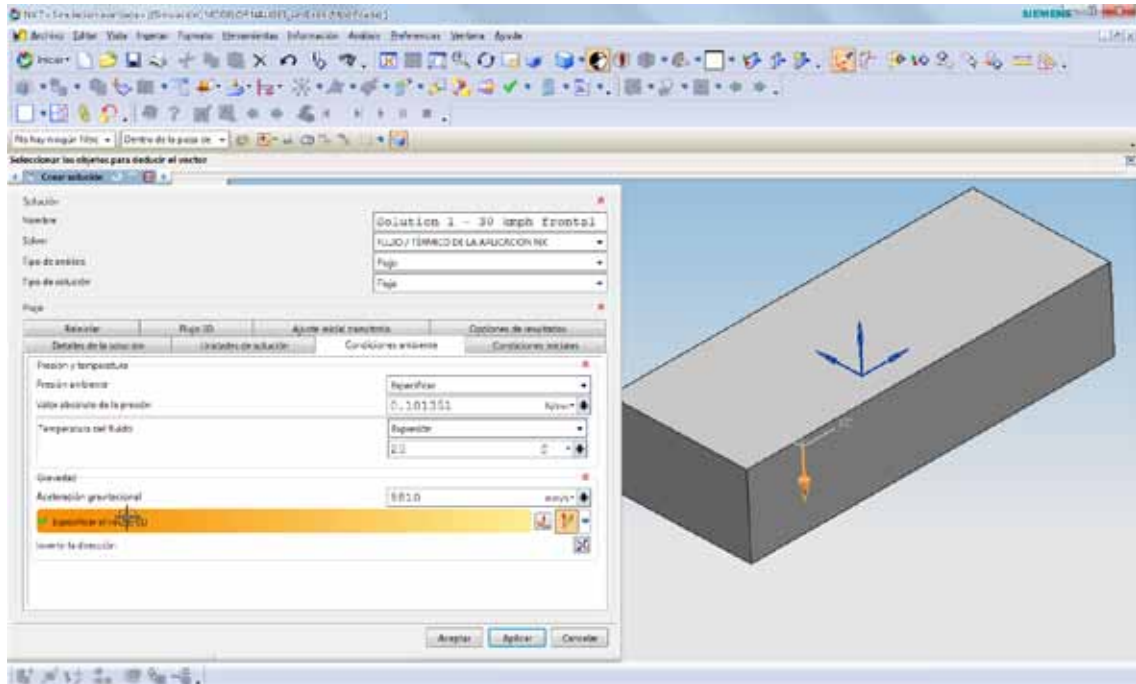


Como se ha definido también en el marco teórico, en “tipo de solución” se escogerá “estado estacionario” pues se supondrán condiciones uniformes durante toda la simulación, facilitando de éste modo el proceso de cálculo.



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

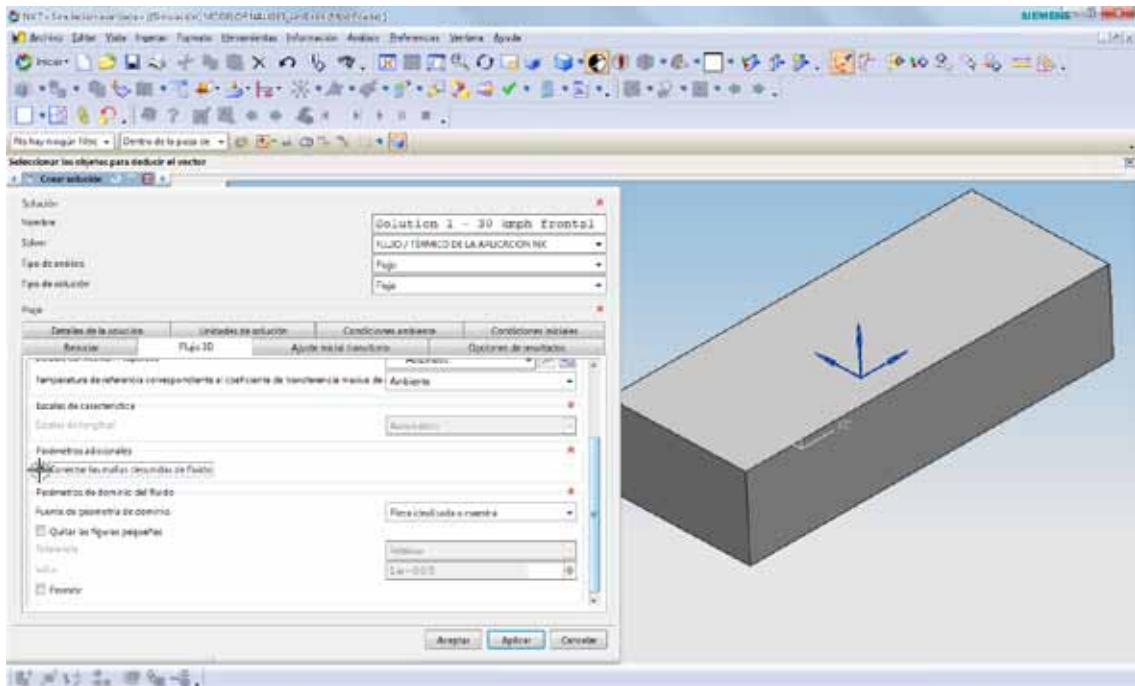
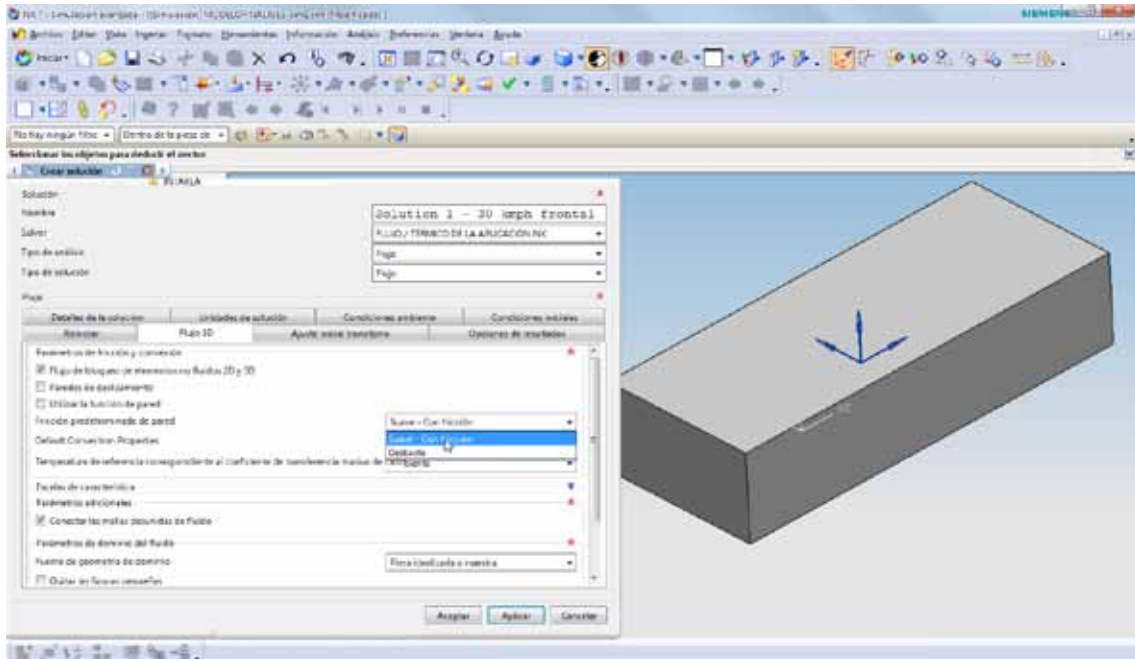
En la pestaña “condiciones ambiente” se mantendrá los datos por defecto en la mayoría de las situaciones de simulación aerodinámica, a menos que la presión o la temperatura ambiente experimenten un cambio amplio que valga la pena retratar en el experimento. Conviene confirmar que la dirección del vector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



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.

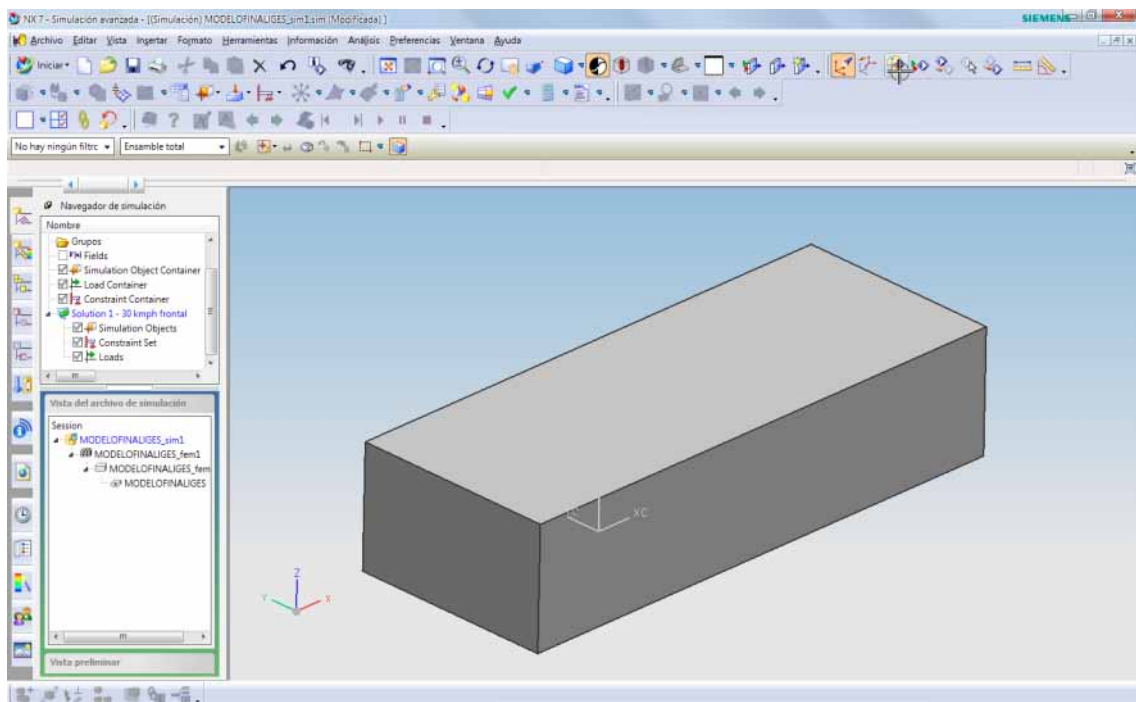
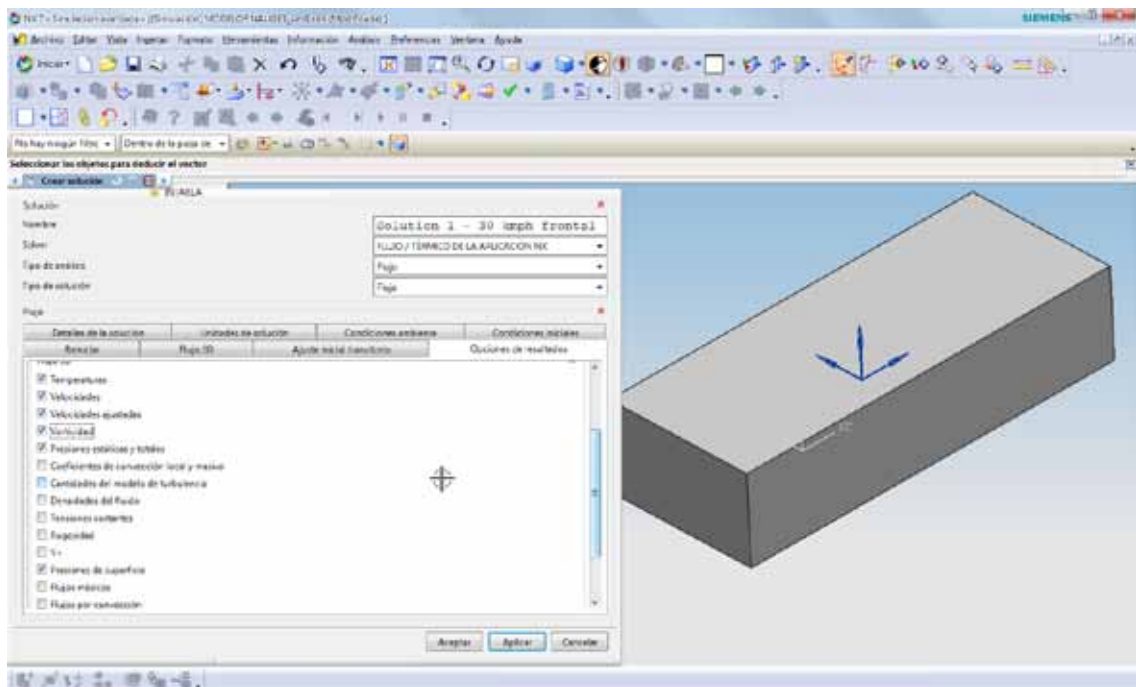
Deberá activarse la opción conectar “mallas desunidas de fluido”, para asegurar un flujo unitario y no flujos independientes en caso de que el vehículo limite el paso separando el flujo, y la opción “utilizar ley de pared” podrá activarse según el modelo de turbulencia utilizado. Esto es opcional pues 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.



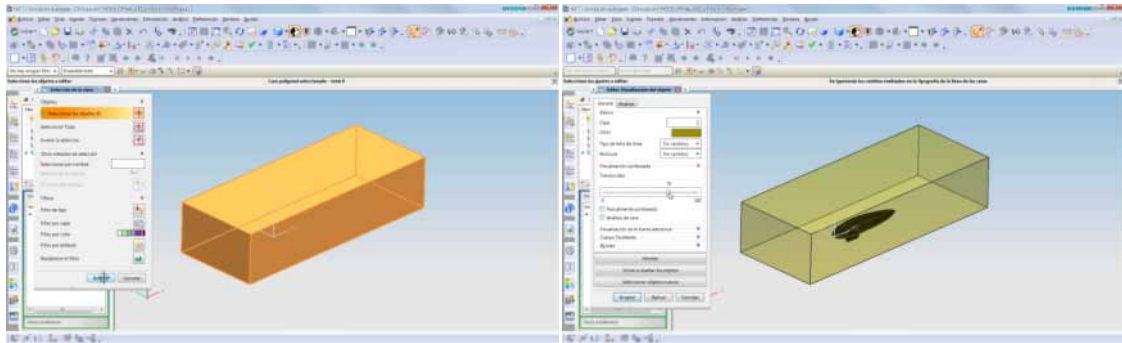
Siempre en la misma pestaña se escogerá para “fuente de geometría de dominio del fluido” la opción pieza idealizada o maestra, para que el software cree la malla del flujo según el modelo que se ha preparado previamente (túnel y vehículo).

Para la pestaña “opciones de resultados” se activarán solamente las presiones, velocidades y vorticidad, 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.

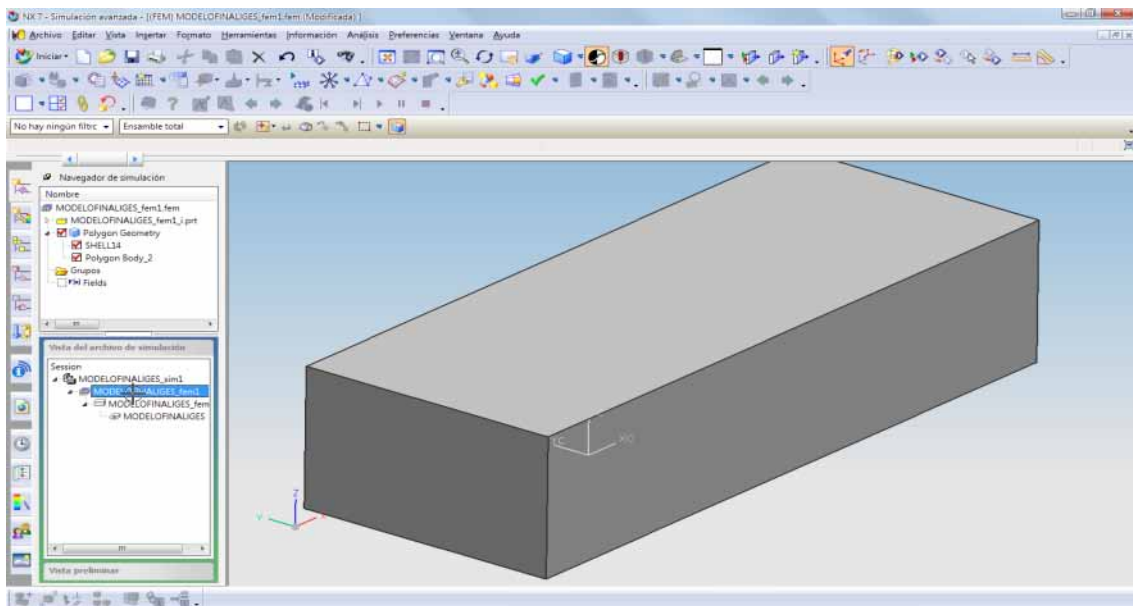
Finalmente se deberá aplicar y aceptar para terminar de configurar los parámetros de la solución.



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



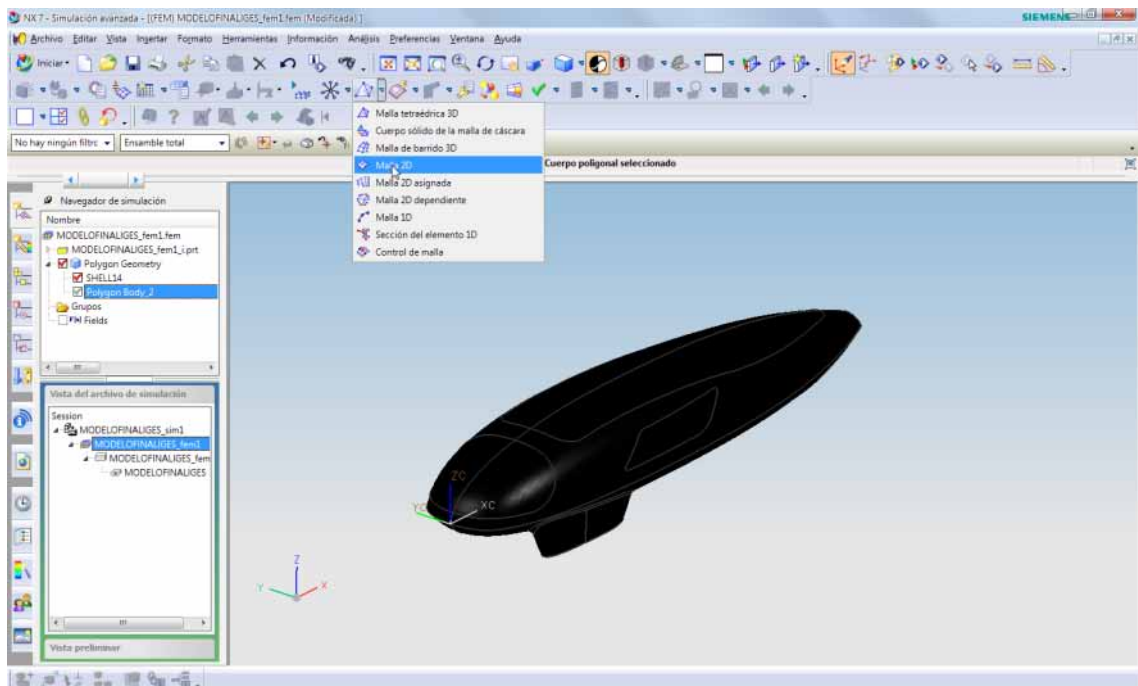
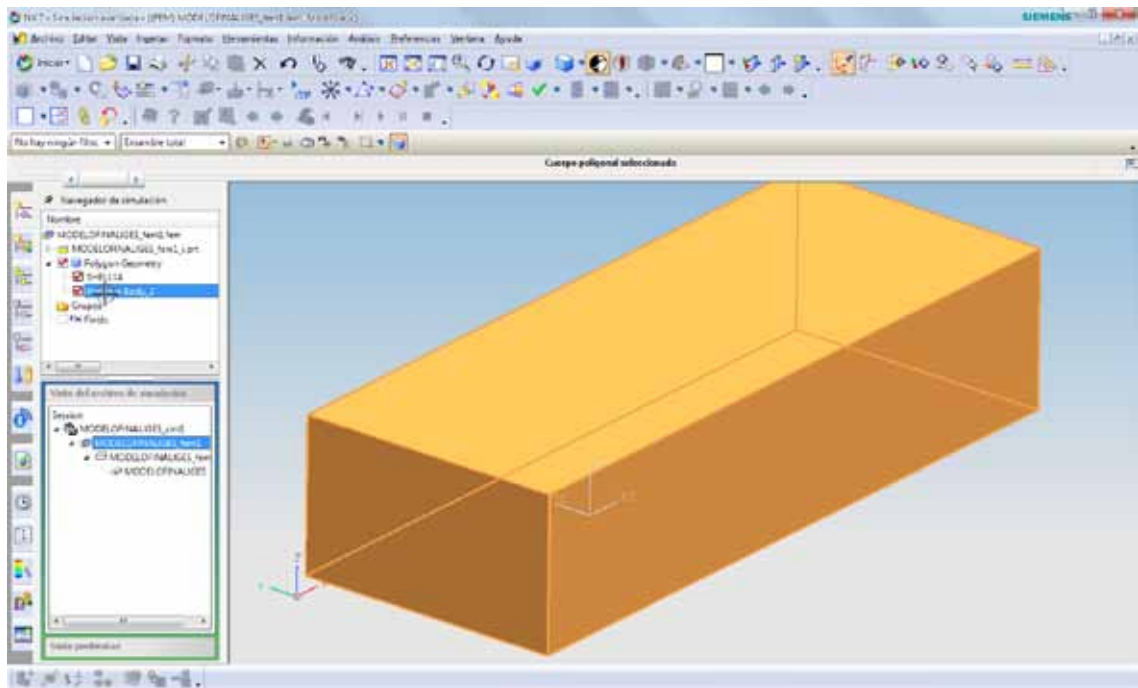
Otra alternativa es simplemente ocultar el túnel, esto se podrá hacer como muestran las siguientes imágenes, en la sección superior a la izquierda de la pantalla, desmarcando la marca de chequeo en la geometría que se quiera ocultar, ya sea estando en módulo de simulación o en el módulo de FEM.



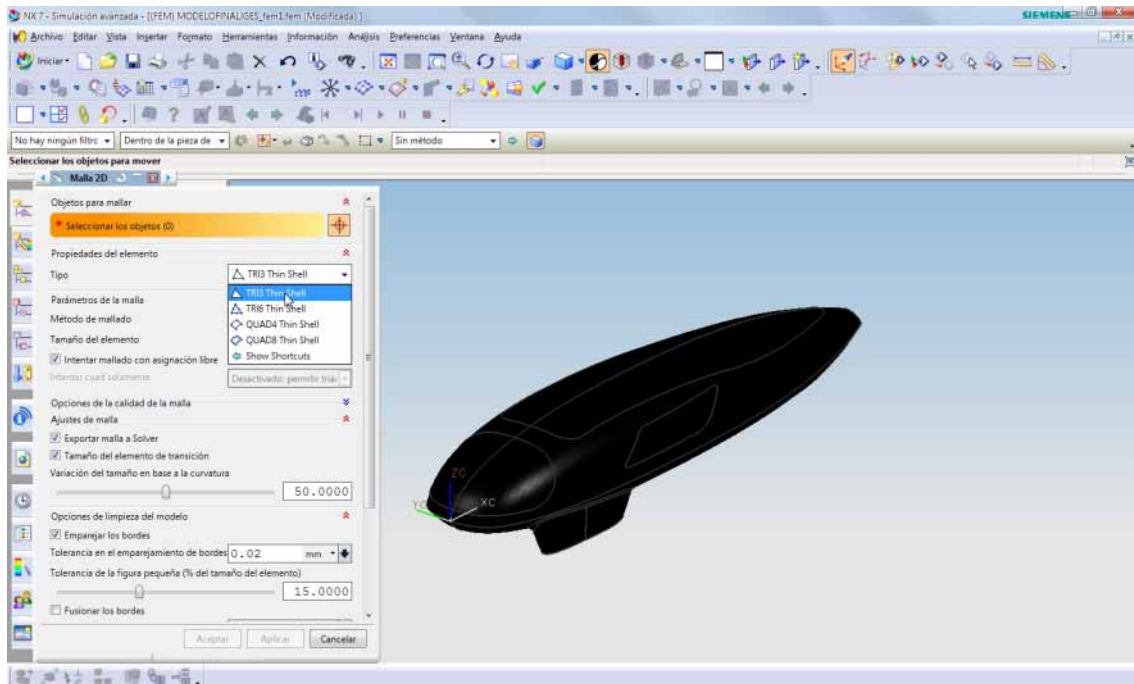
Resulta importante notar que el análisis está constituido por varios componentes, esto es posible de visualizar en la zona inferior izquierda de la pantalla de NX, en "vista del archivo de simulación", allí es posible notar que el vehículo y el túnel son los ficheros de "partes", y existe un modelo SIM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

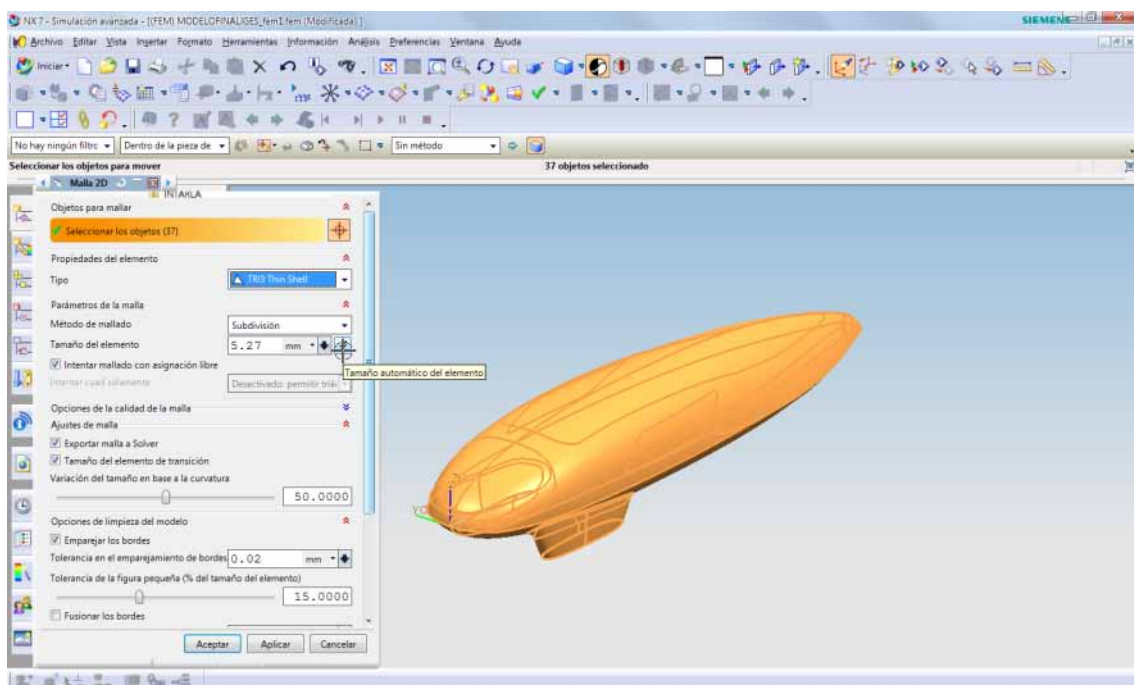




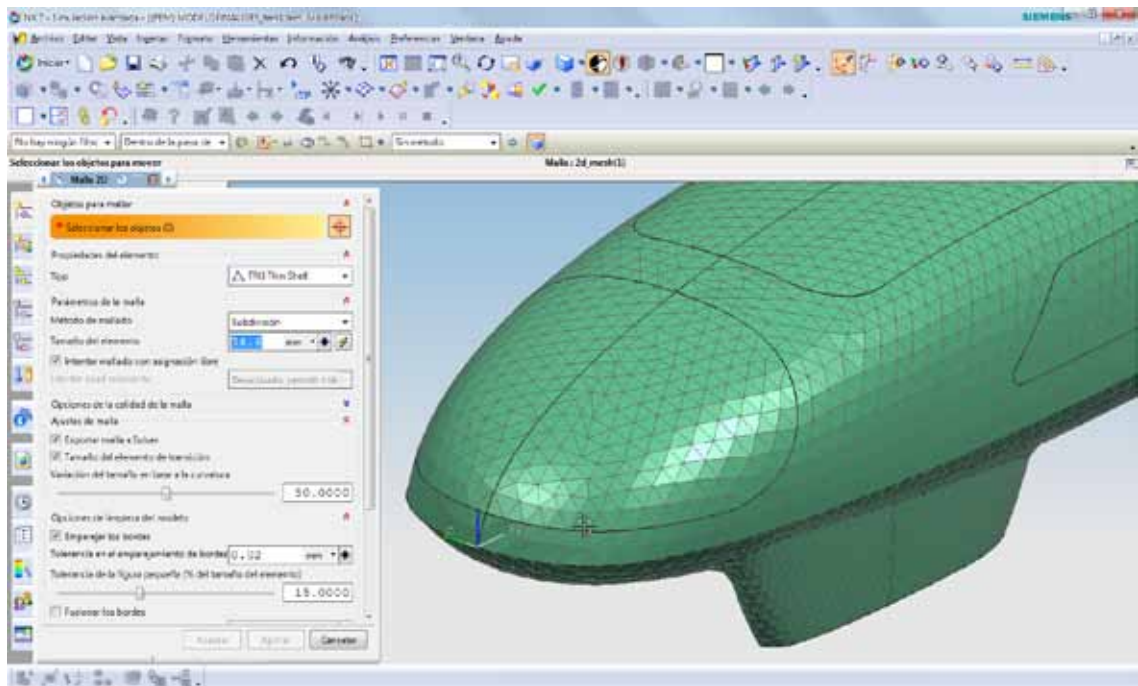
En éste caso se ha optado acceder al modelo FEM, y por ocultar el túnel. Accediendo al FEM se activarán una serie de opciones e iconos en las barras de botones y herramientas del software. Se escogerá "malla 2D" pues como ya se ha señalado, se creará una malla superficial, siendo irrelevante el interior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



Como se ha explicado convenientemente en el apartado previo, 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.

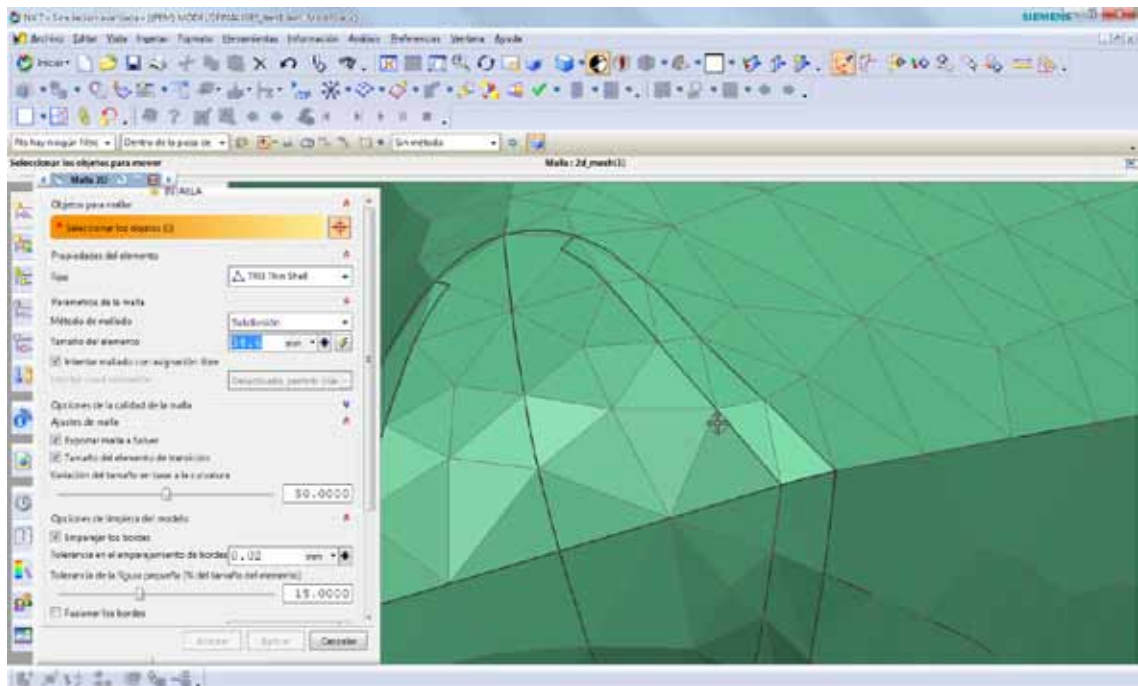


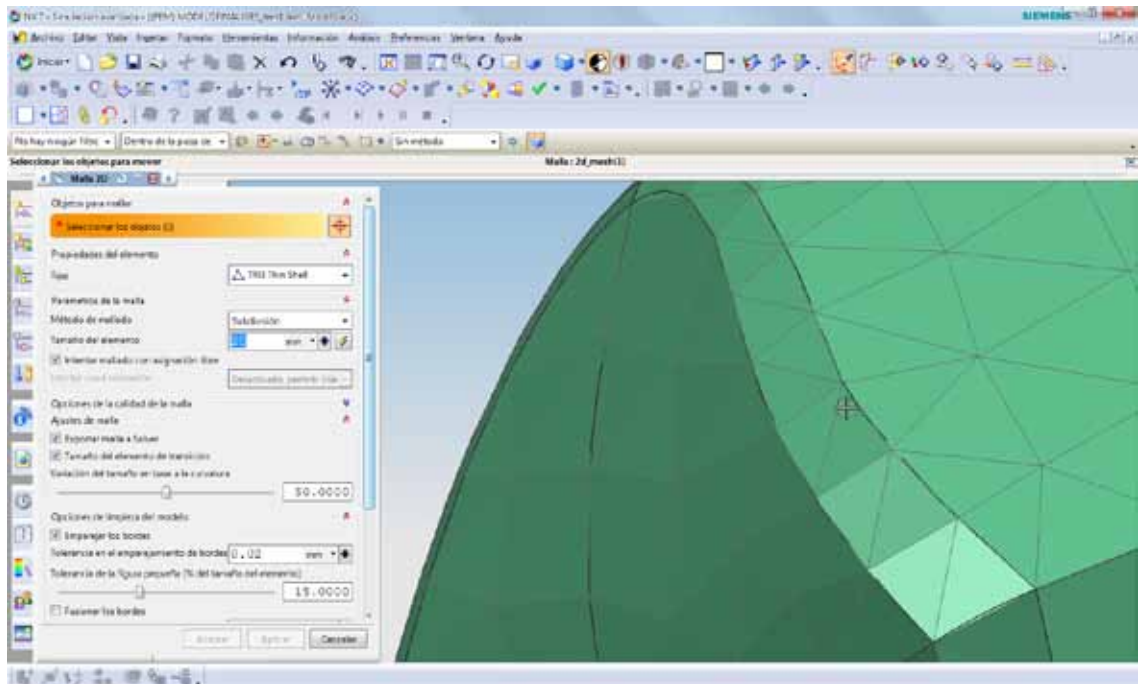
El aspecto clave será la elección adecuada del tamaño de elemento, para ello como se ha comentado se deja al software sugerir un tamaño el que se va disminuyendo gradualmente hasta lograr una adecuada calidad de malla sin un tamaño demasiado pequeño de elemento que hará que el cálculo se prolongue demasiado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



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

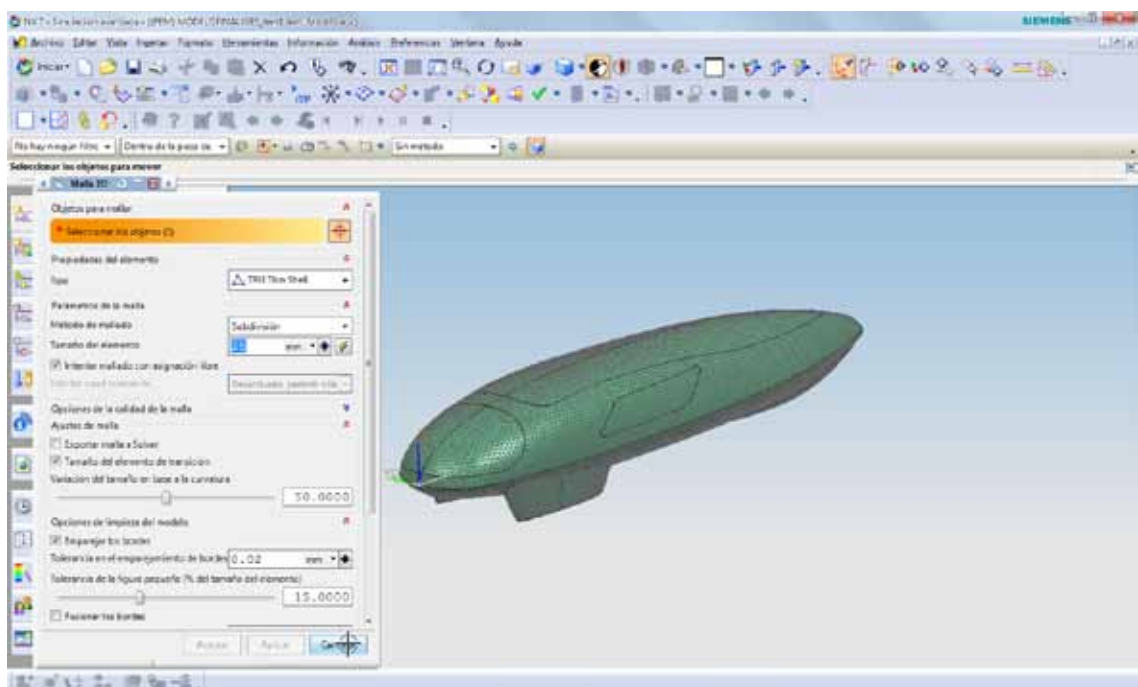
Y más grave aún, existen triángulos de aspecto poco uniformes y muy alargados que restarán precisión al cálculo de los resultados.



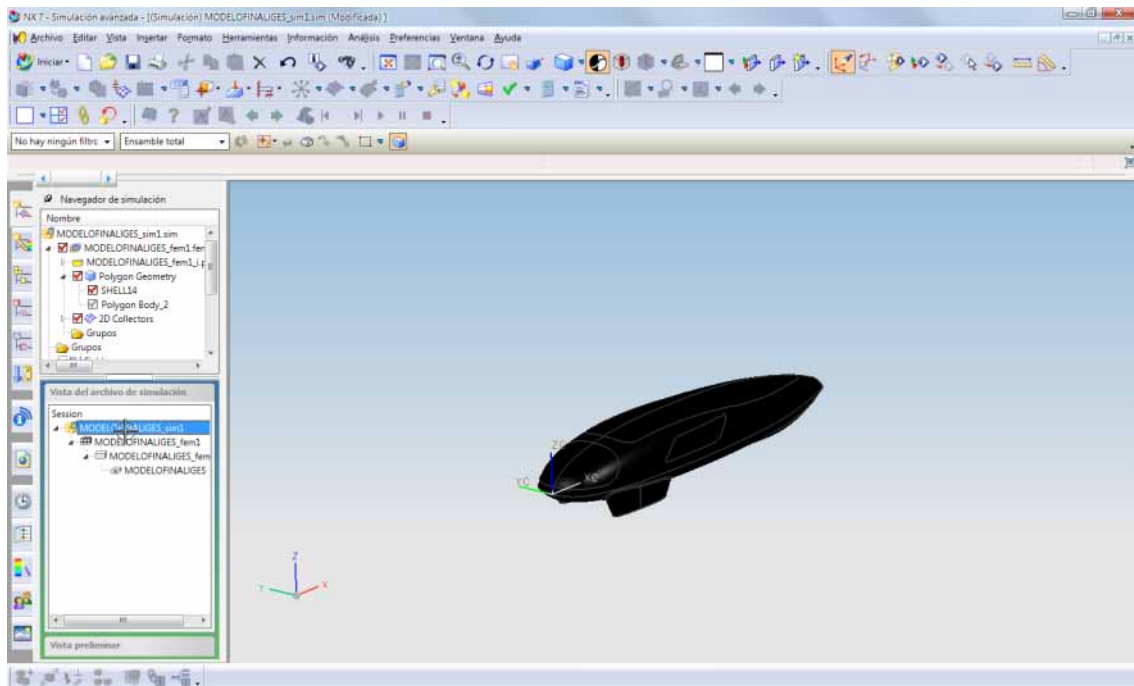


Al disminuir el tamaño de elemento se puede apreciar como ambos aspectos mejoran, los triángulos poseen un aspecto más uniforme y la correspondencia con la geometría real es también mejor.

Finalmente se opta por un tamaño de elemento de 25 mm para un coche que mide 3000 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.

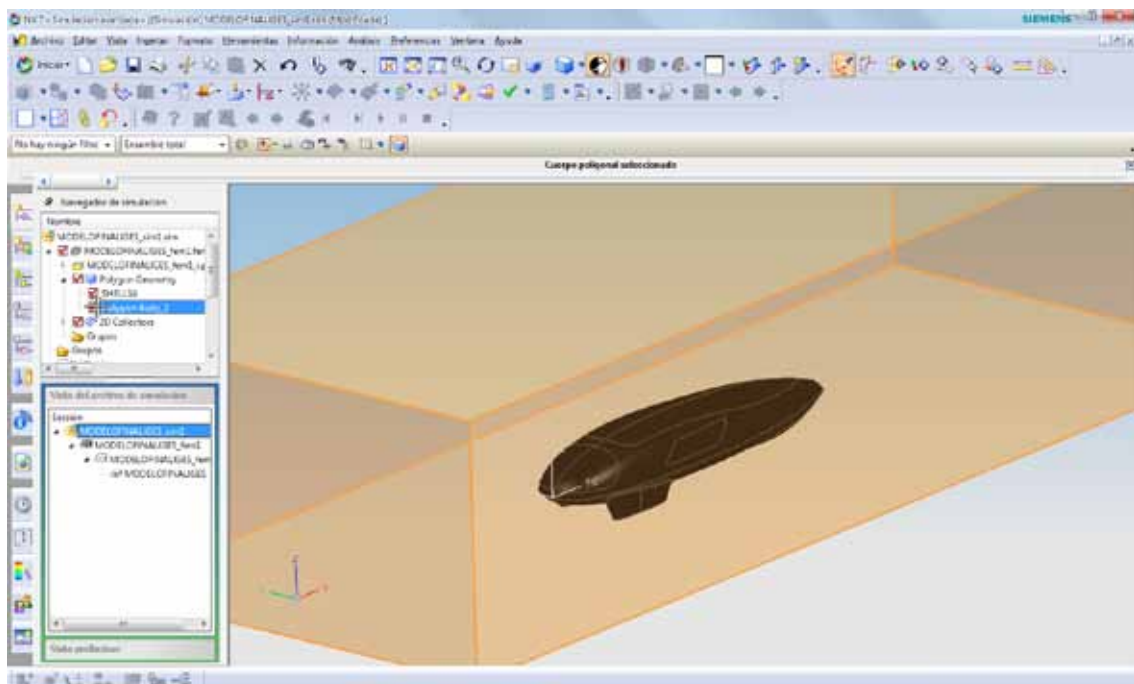


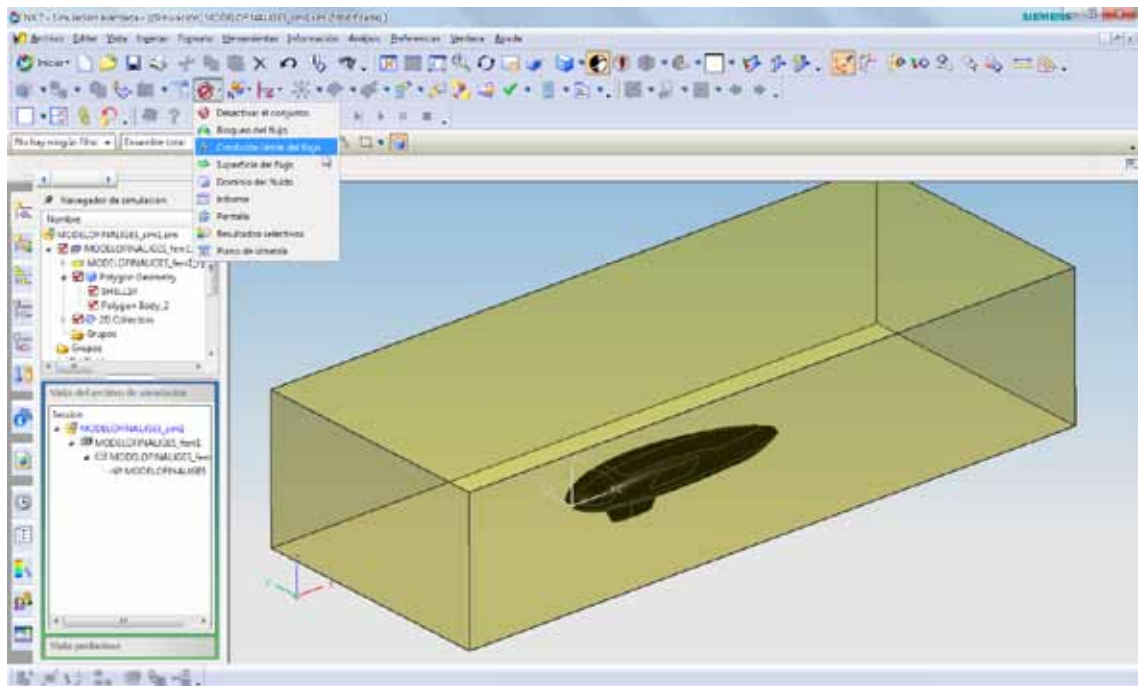
Es imprescindible para la simulación CFD que esté activada la opción “exportar malla a solver”, pues es la malla del vehículo la que permitirá obtener los resultados más importantes buscados. Aquí se ha desactivado solamente para que la pieza se visualice mejor en las capturas.



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.

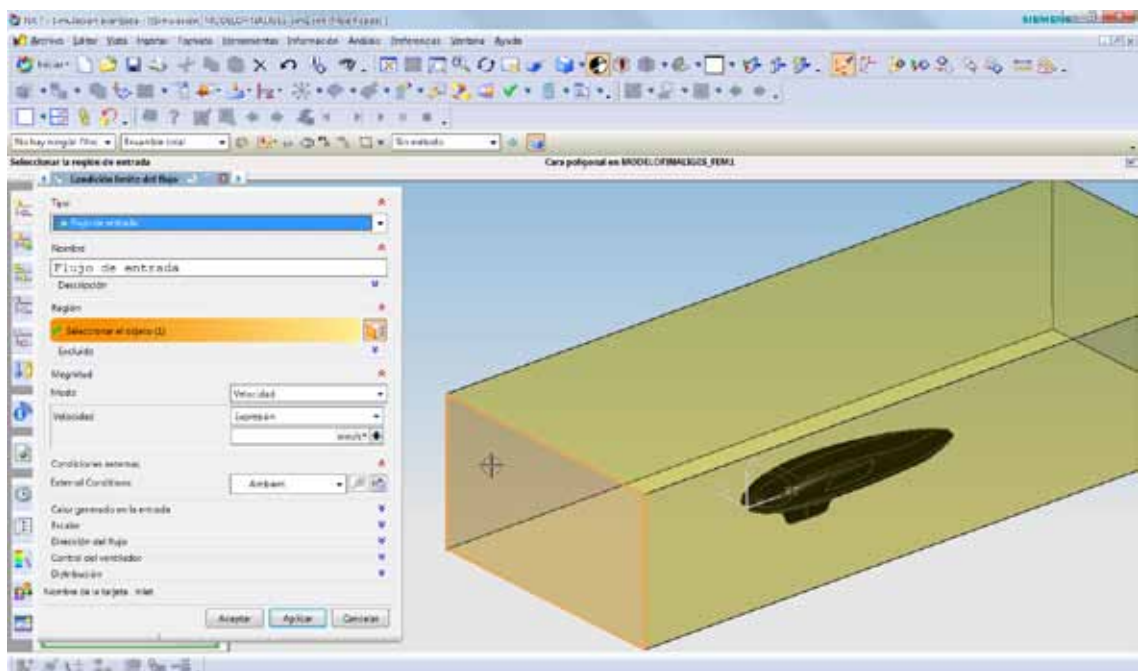


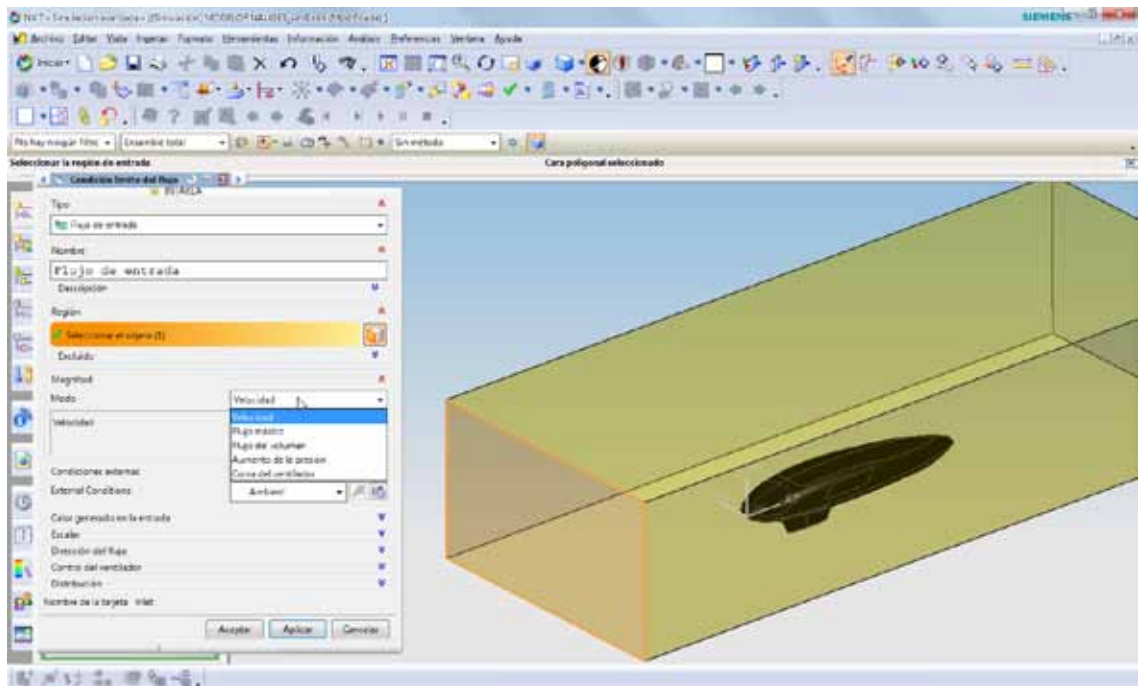


El primer paso para la determinación de las condiciones del SIM será acceder al menú “condición límite del flujo”, donde se podrán escoger las zonas de entrada (equivalente en un túnel de viento al ventilador) y salida del flujo (equivalente a las mallas de apertura).

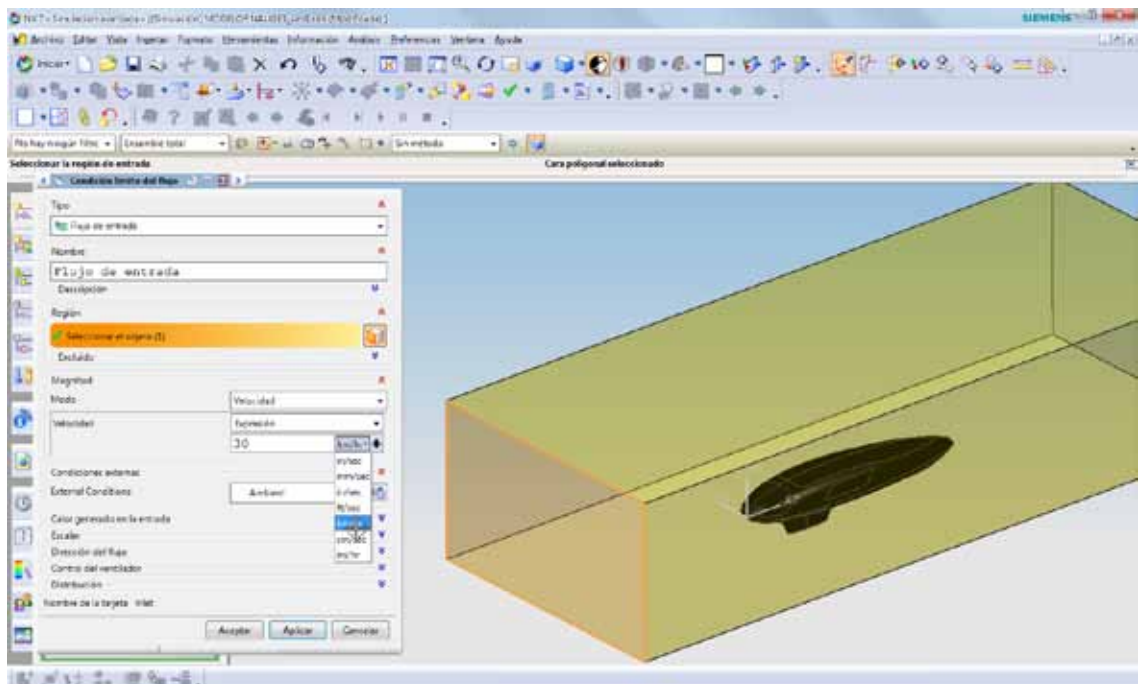
En primer término se escogerá el “Flujo de entrada” desde la pestaña “Tipo”, y en el espacio en blanco se podrá agregar un nombre que defina la condición límite de flujo en cuestión, en este caso simplemente se le da el mismo nombre “flujo de entrada”.

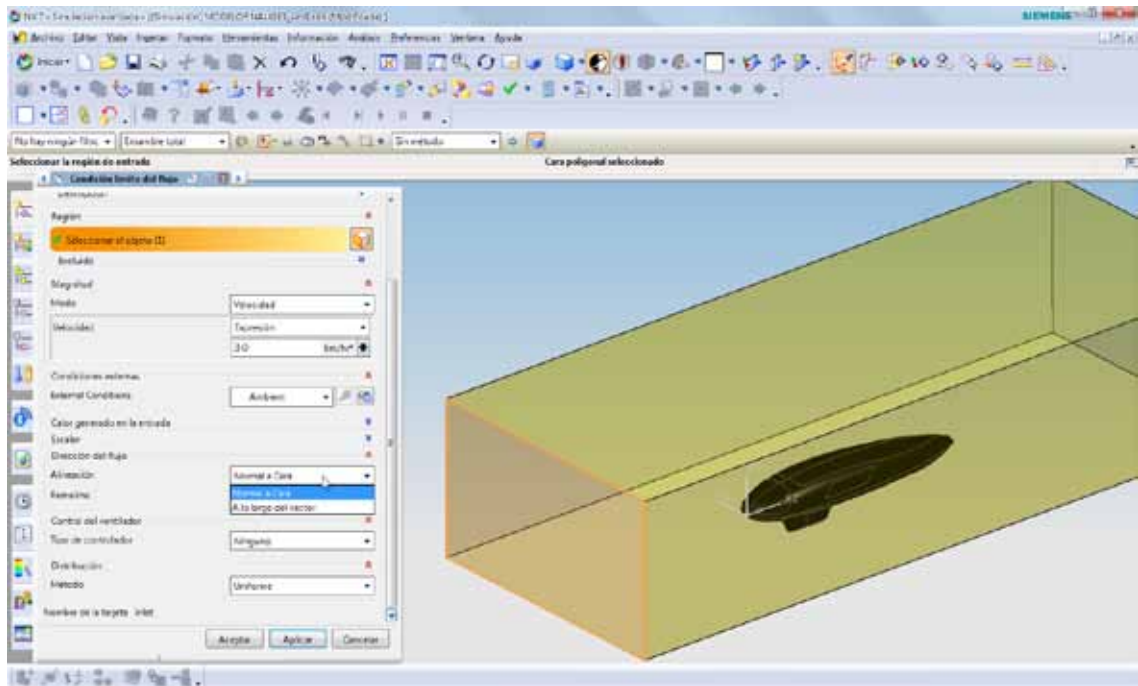
El paso siguiente será seleccionar el objeto que constituirá la zona de entrada del flujo, en este caso la pared que queda frente al vehículo.





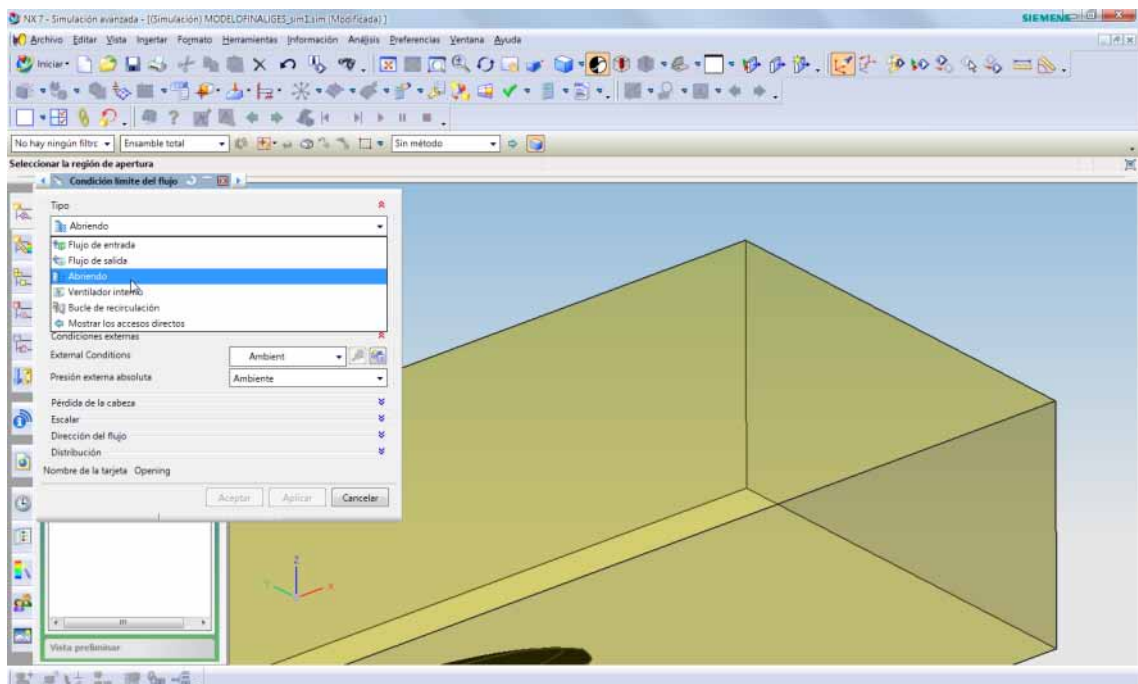
°A continuación se selecciona la velocidad del flujo, la que se determinará en base datos conocidos que constituyen los datos de entrada del problema a solucionar mediante la simulación, en esta ocasión se desea probar el vehículo a las velocidades normales a las que se desplaza, cercanas a los 30 km/h, 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.





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.

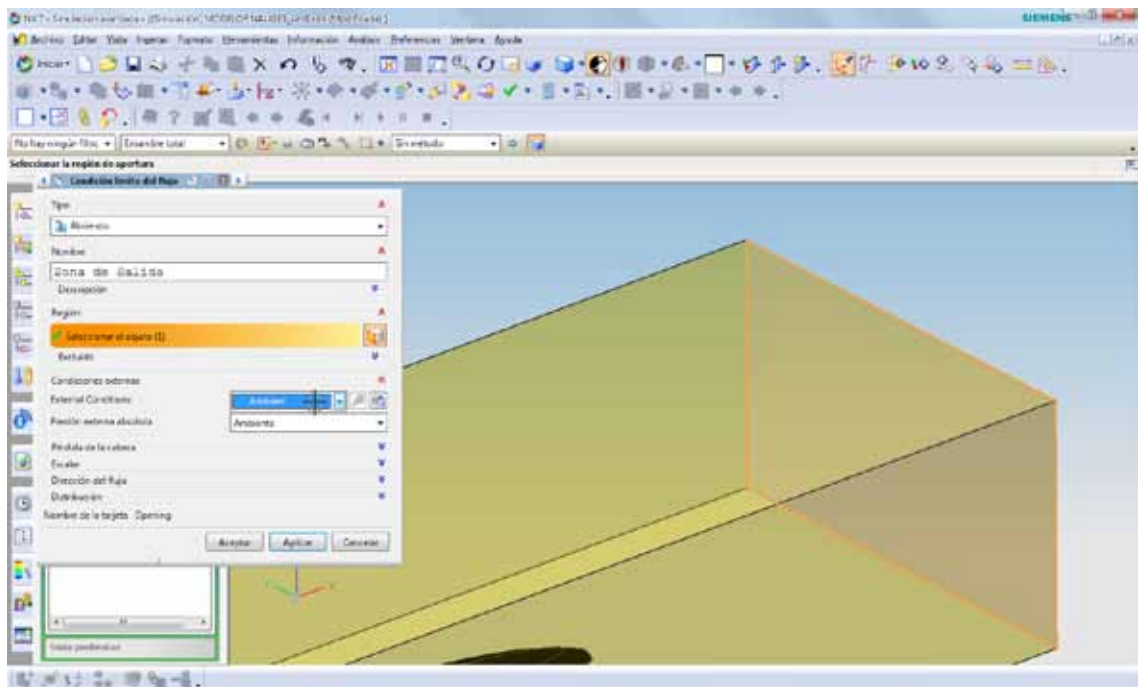
Como el flujo será continuo no será necesario añadir ningún control de ventilador o método de distribución diferentes a los por defecto, es decir "ninguno" y "uniforme".



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.

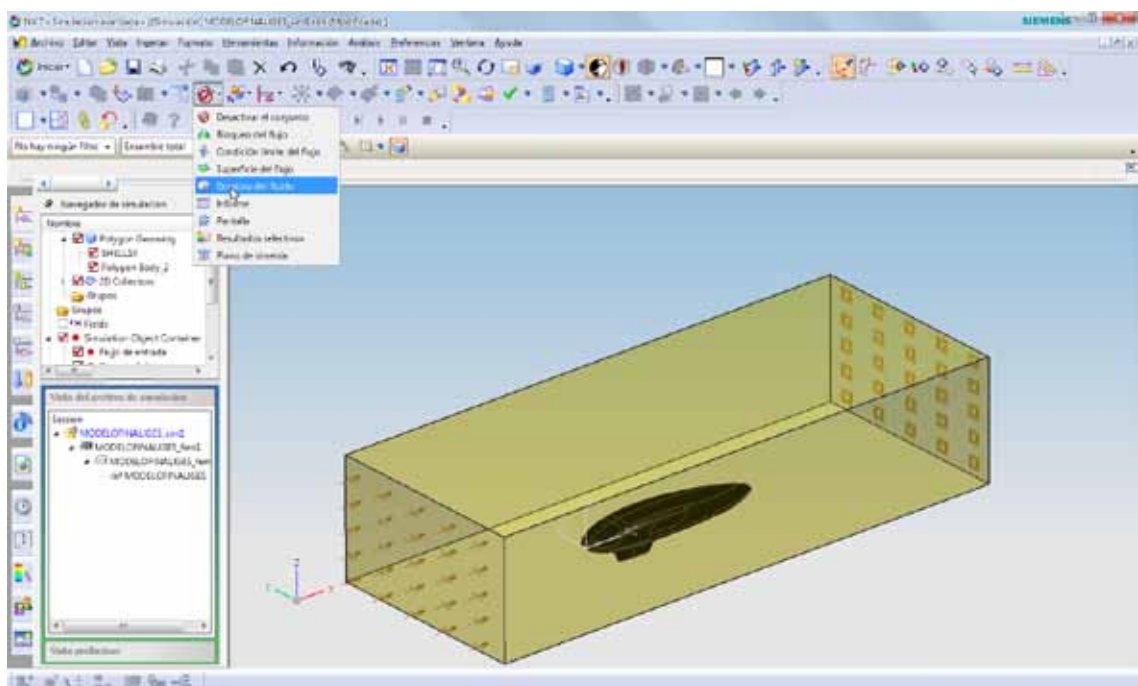


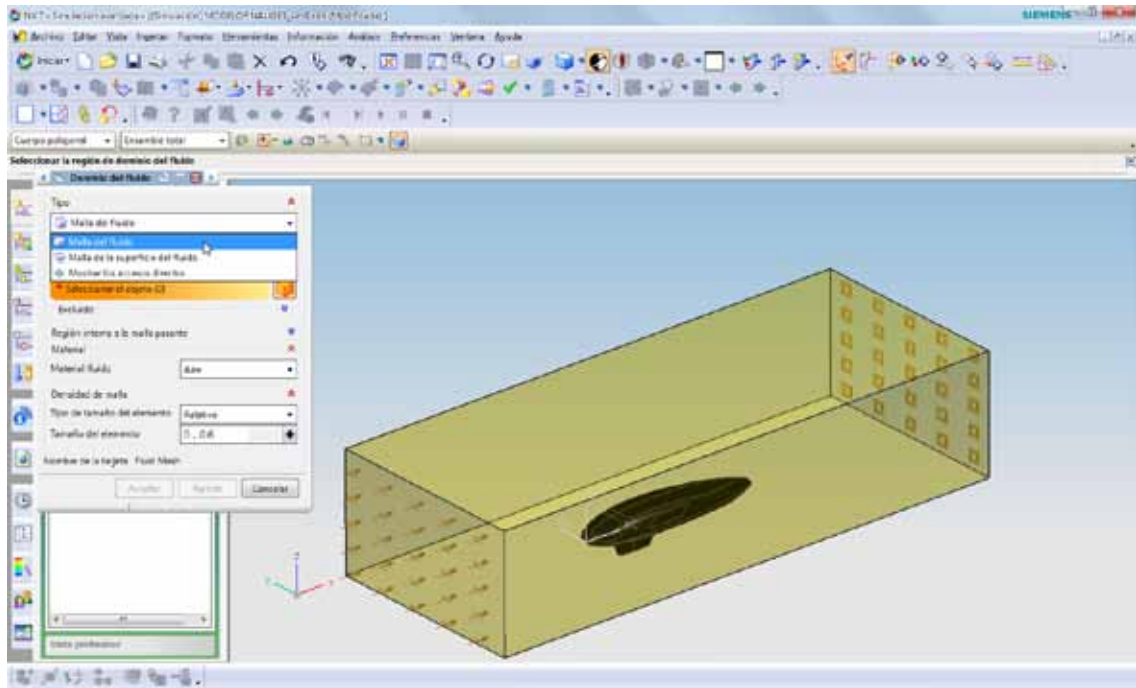
Por lo anterior, evidentemente las opciones a escoger, en “external conditions” y “presión externa absoluta” serán “ambiente”, el resto de las opciones se dejarán por defecto, y también podrá ser agregado un texto que defina y permita identificar rápidamente el tipo de condición de limite de flujo.



Con la entrada y salida del flujo definidas, se deberá escoger a continuación, el dominio del fluido, vale 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





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<sup>56</sup> y en la tesina previa<sup>57</sup> sobre el tema consultada al inicio de éste trabajo siempre se escoge como "tipo de tamaño de elemento" la opción "absoluto", durante la realización la presente tesina 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

<sup>56</sup> [35]

<sup>57</sup> [34]

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. En apartados posteriores se profundizará sobre los tipos de elemento en el mallado y sus resultados.

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.<sup>58</sup>

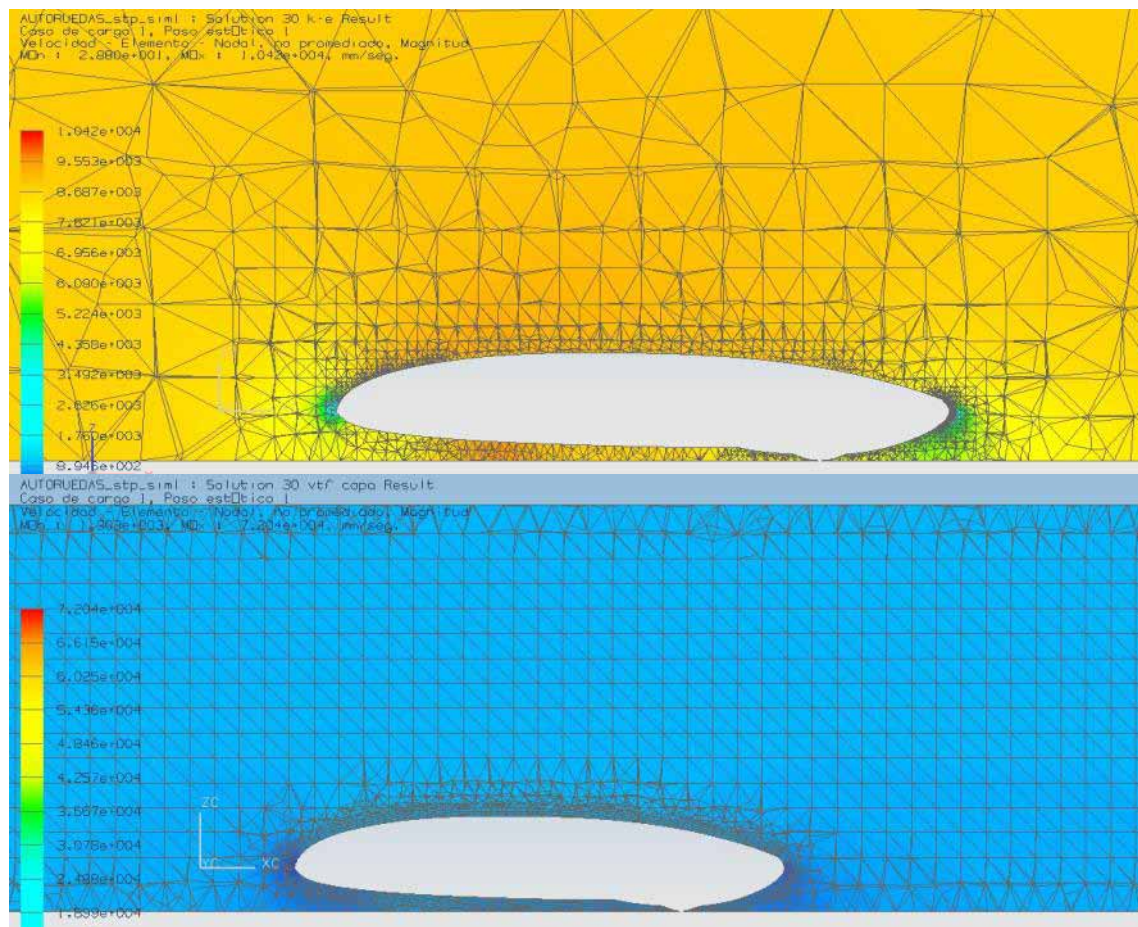
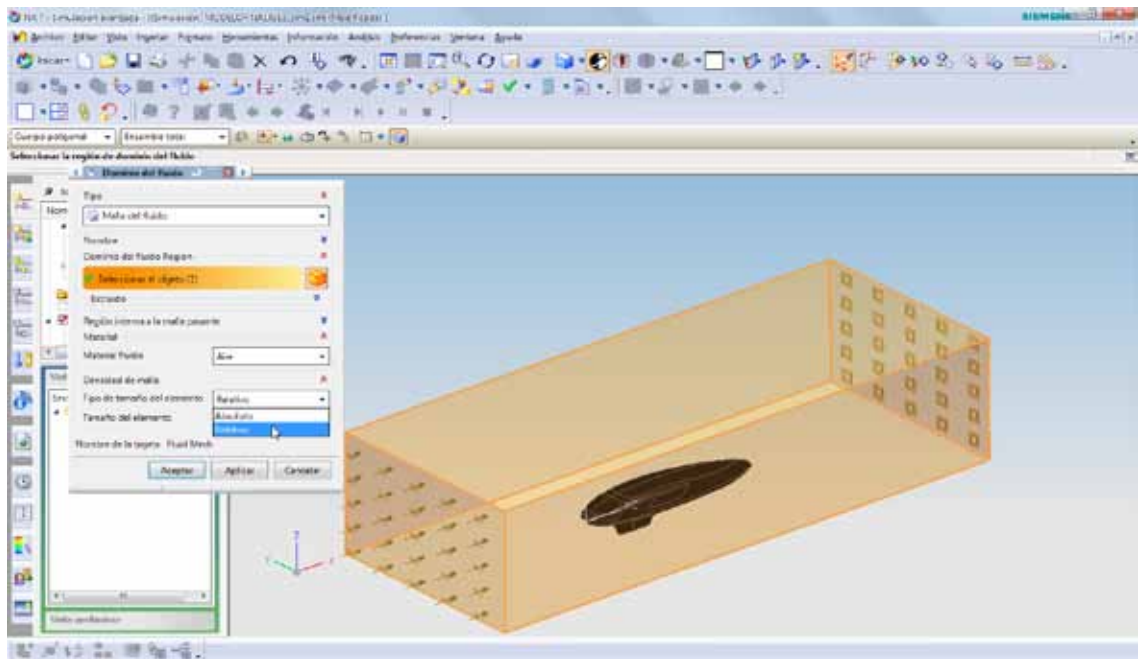


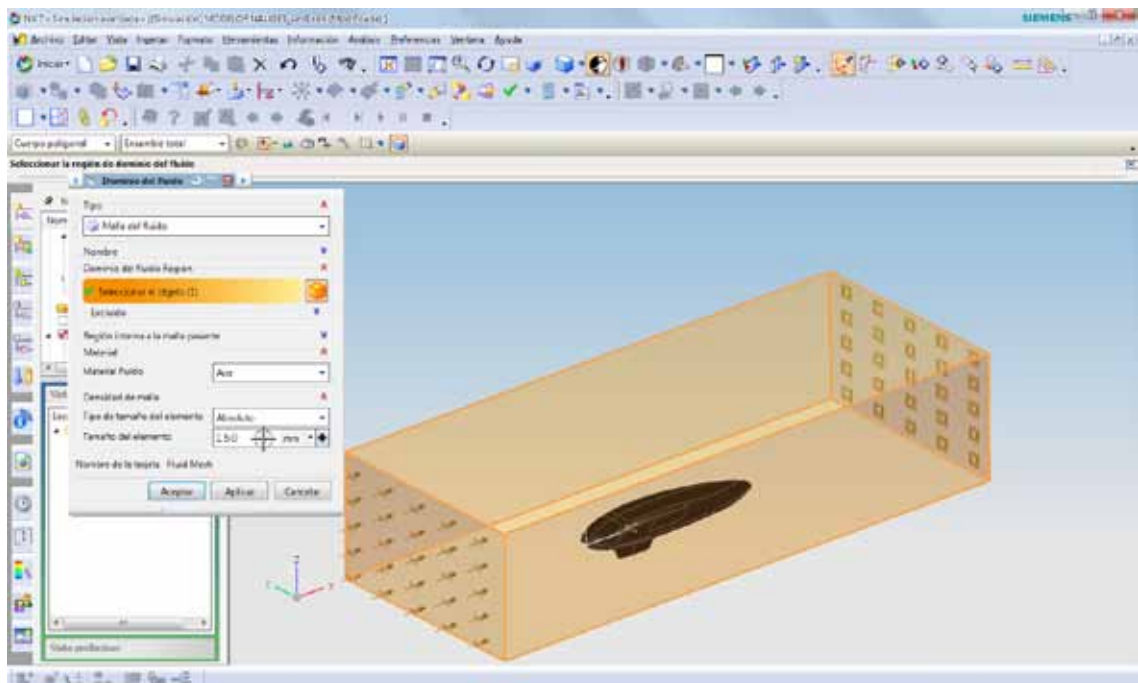
Ilustración 30 - Mallado relativo y mallado regular.<sup>59</sup>

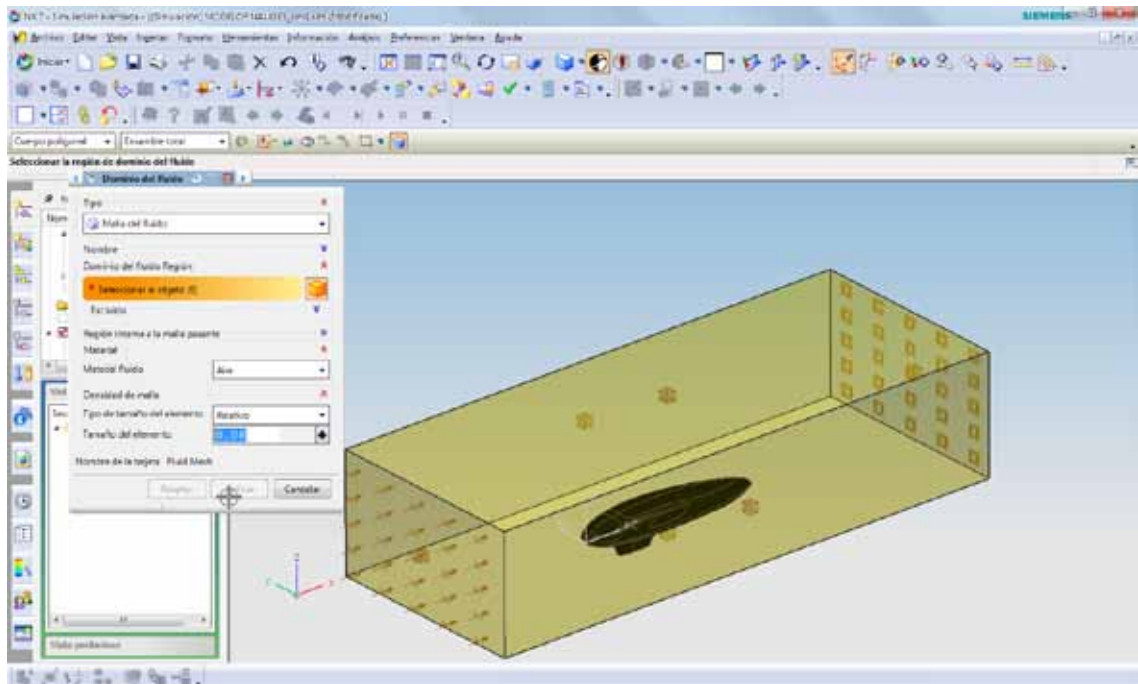
<sup>58</sup> Documentación de ayuda incluida en el software NX v7.0. Apartados “3D Flow Meshing Overview” y “Creating geometry for FE Flow Modeling.”

<sup>59</sup> Las imágenes muestran la diferencia apreciable entre los diferentes mallados, los elementos pequeños alrededor del coche en el mallado regular (en azul) corresponden a la capa límite definida al momento de configurar los parámetros y no a una adaptación realizada por el software. Valores utilizados 0.06 relativo y 150 mm. absoluto.



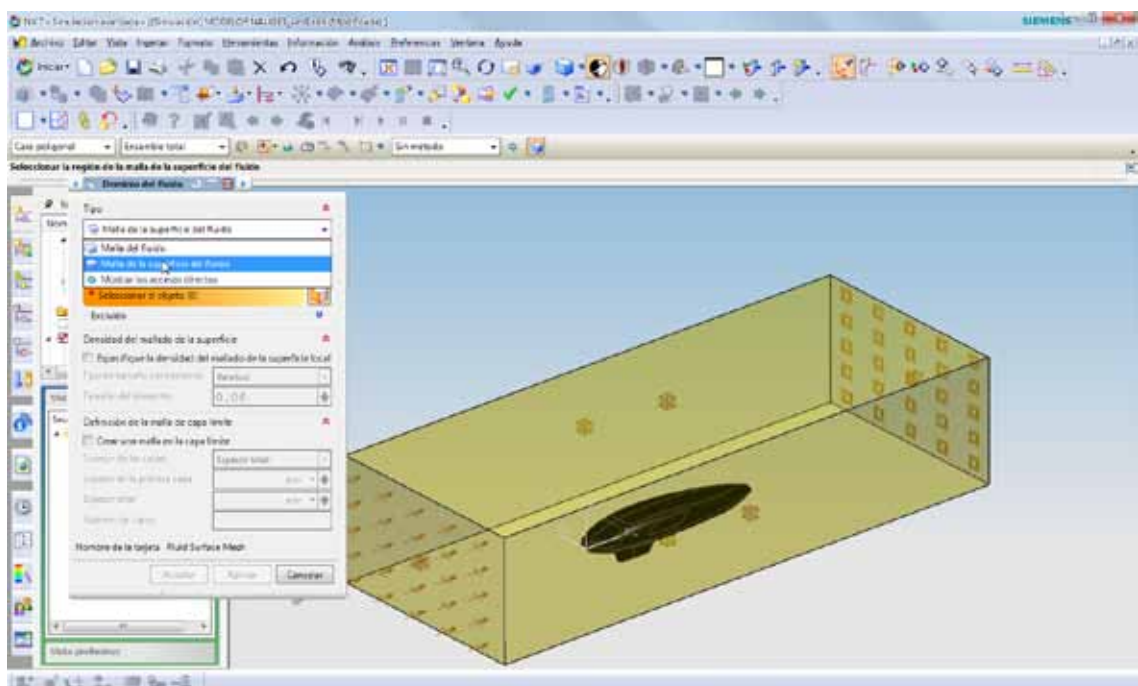
La imagen siguiente muestra la configuración que se le ha dado, cuando se ha escogido la opción "absoluto" y que corresponde a un valor de 150 mm a cada elemento constituyente del fluido dentro del túnel

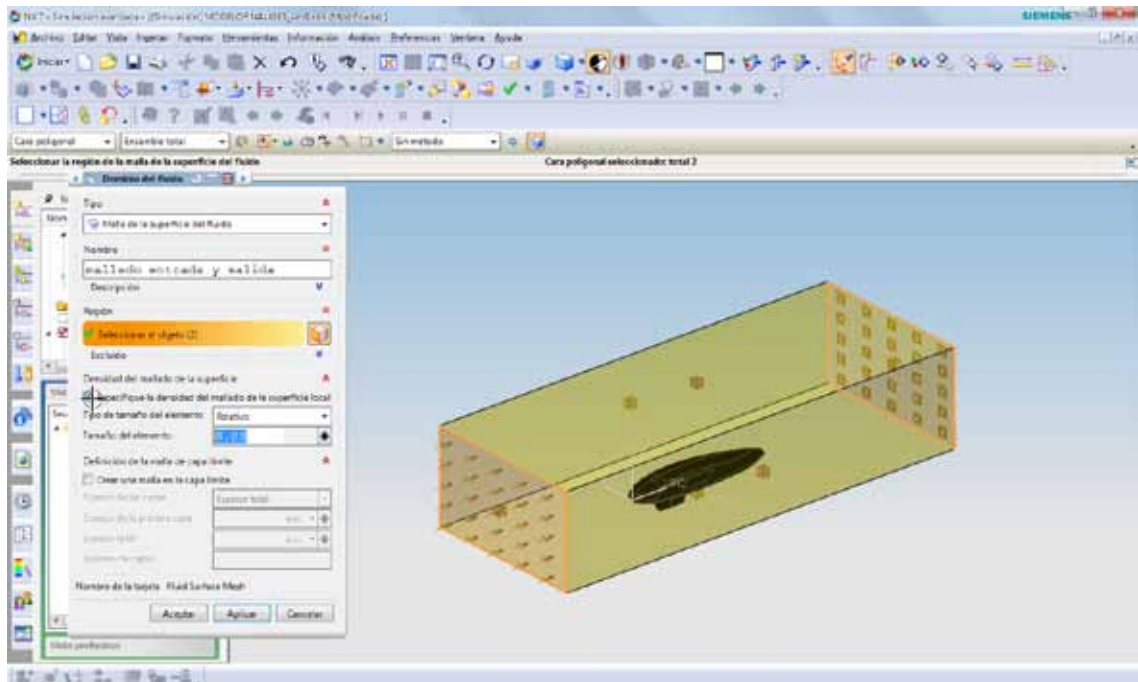




La imagen anterior muestra los valores para la opción “relativo”, que en esta ocasión es 0.06 (esto como se ha mencionado, se revisará con mayor detalle en un apartado posterior)

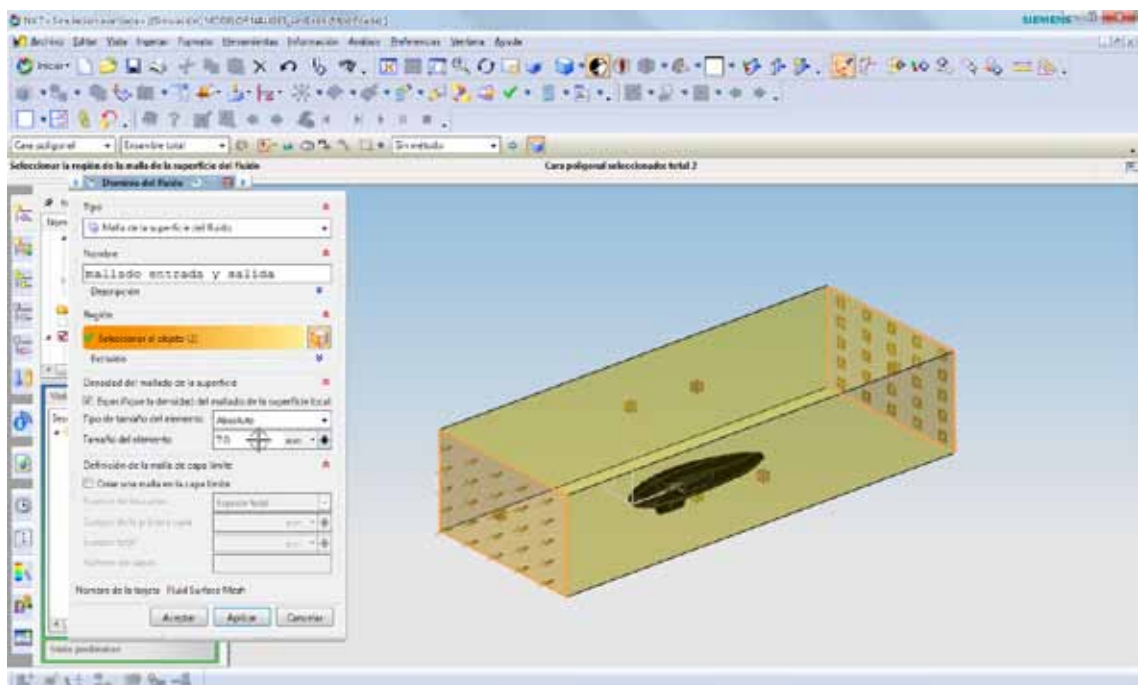
El paso siguiente será, en el mismo cuadro de diálogo (se recomienda usar la opción aplicar, de modo que el cuadro no se cierre y se pueda continuar trabajando directamente) escoger en “Tipo” la opción “Malla de la superficie del fluido”. Esto permitirá definir una malla especial, con otro tipo de elemento, 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.



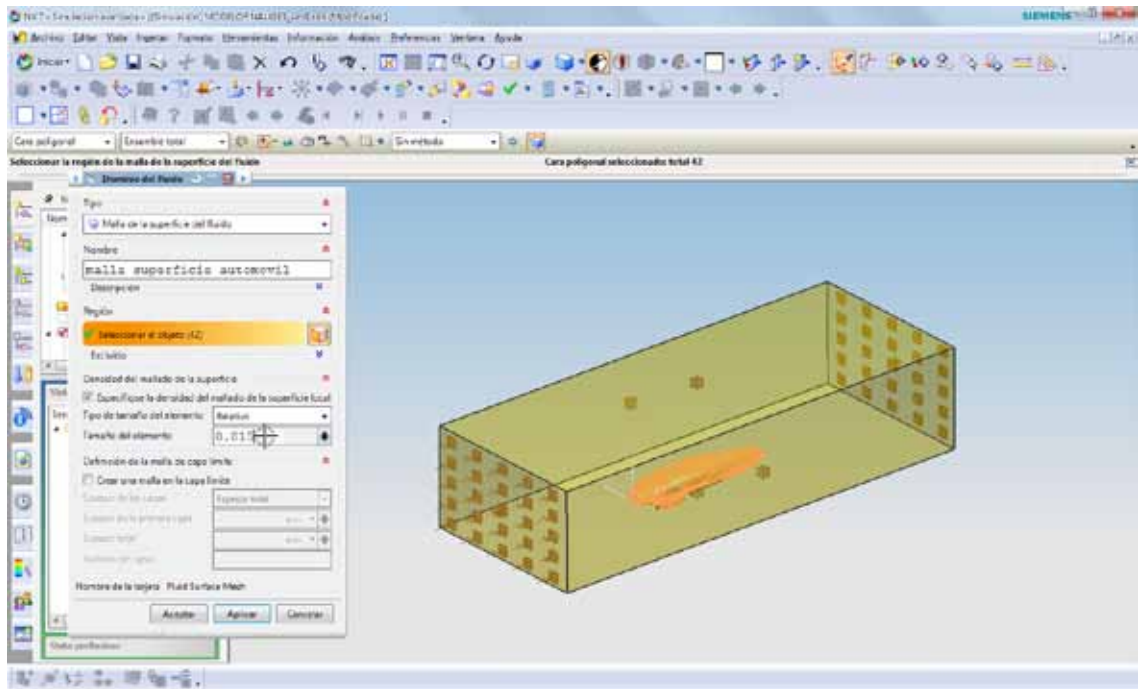


Para seleccionar los parámetros de éste paso, se deberá repetir los pasos anteriores, ya que el cuadro de diálogo es similar, sin embargo tanto si se trabaja con valores absolutos o relativos deberán disminuirse, para obtener mayor precisión en el cálculo de la entrada y salida del flujo clave para que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

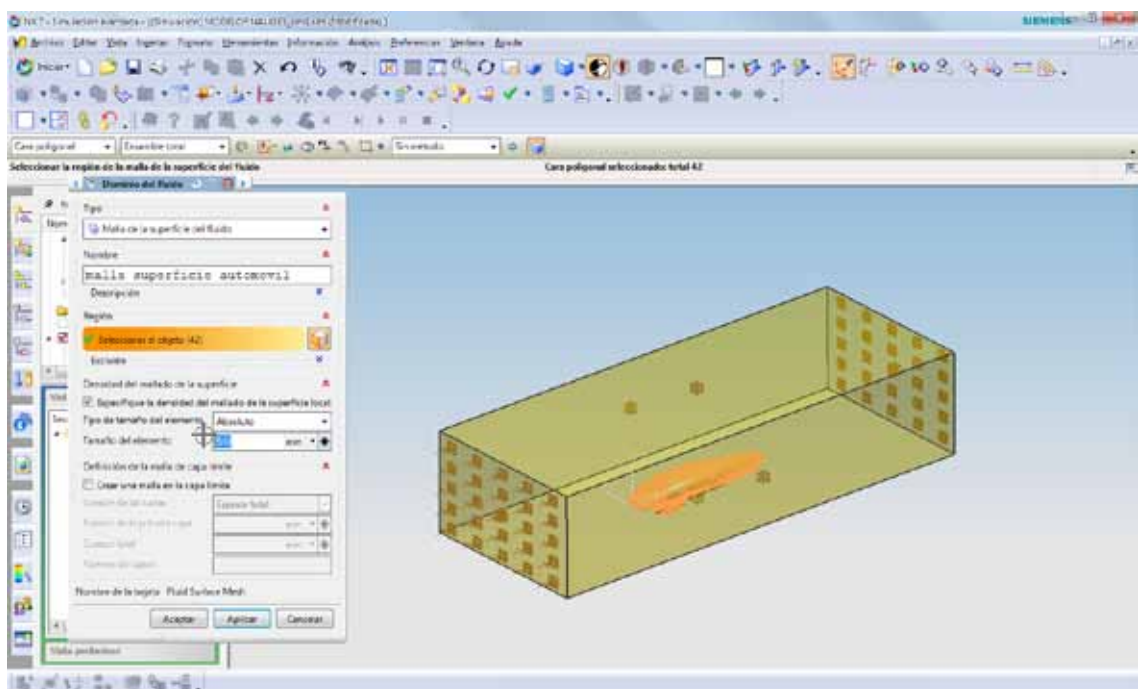
Los valores escogidos son 0.03 relativo y 70 mm absoluto. Estos valores tienen relación con el tamaño de los objetos en el sistema, por lo que pueden utilizarse como referencia para otros análisis con objetos diferentes, modificándolos de acuerdo al tamaño de éstos. La creación de la capa límite se dejara 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 aun menor.



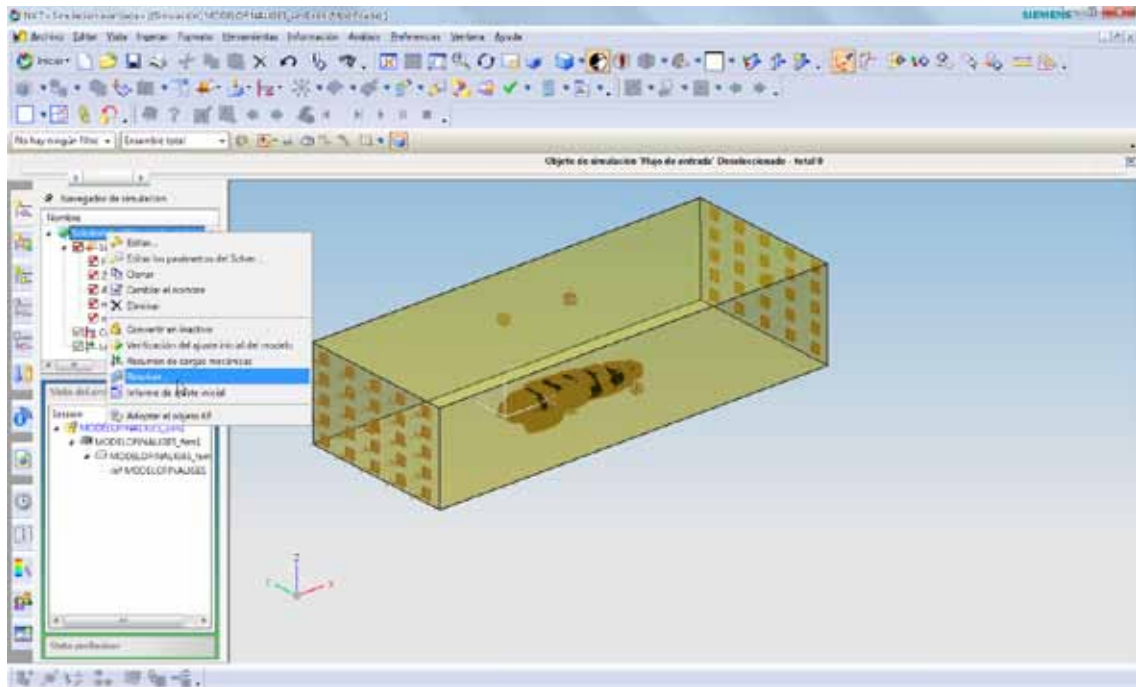
Los valores utilizados corresponden a 0.015 para relativo y 50 mm para absoluto.



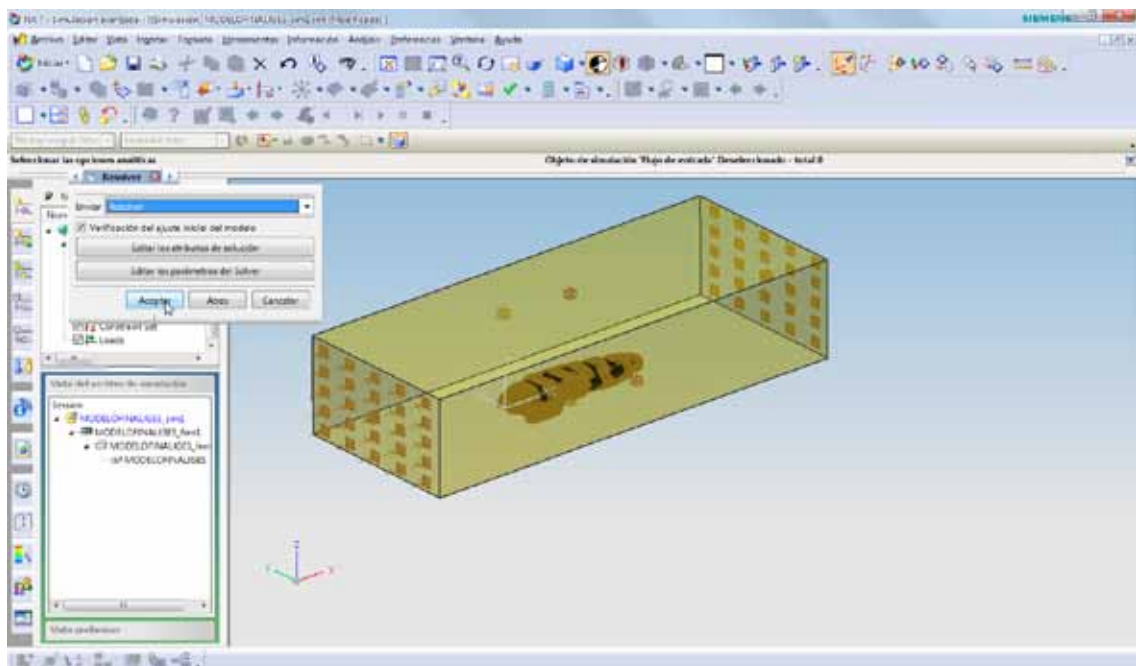
La siguiente opción en el cuadro de diálogo corresponde a la definición de la capa límite, que en éste caso si tendrá una incidencia, no enorme, pero si digna de considerar en el resultado final. Esta capa límite, definida y explicada convenientemente en el marco teórico previo, podrá ser aquí definida en cuando a espesor, cantidad de capas, espesor de la primera capa y de las demás, pero solamente será recomendable de 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.

Esto deja una **tarea pendiente** que sin duda puede ser el objeto de otra investigación, y es definir con precisión las condiciones para el uso de éste parámetro. Se hace necesaria una fórmula de cálculo en base a los datos disponibles, las formas adecuadas de realizar el mallado + la capa límite para mantener la rapidez y robustez del estudio, etc.

### Ejecución de la solución.



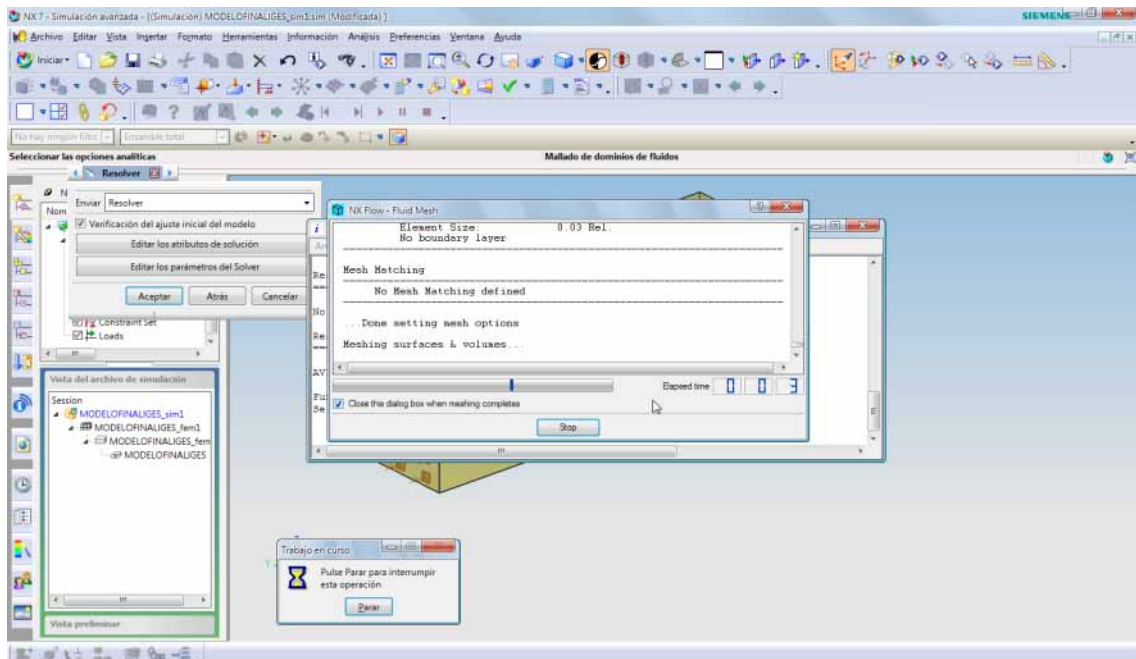
Con los parámetros del apartado anterior ya configurados es posible “lanzar” la solución. Para ello se dará clic con el botón derecho sobre el nombre de la solución, en la zona superior izquierda del panel lateral, y se escogerá “resolver”, posteriormente ya que todo se ha configurado correctamente solo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



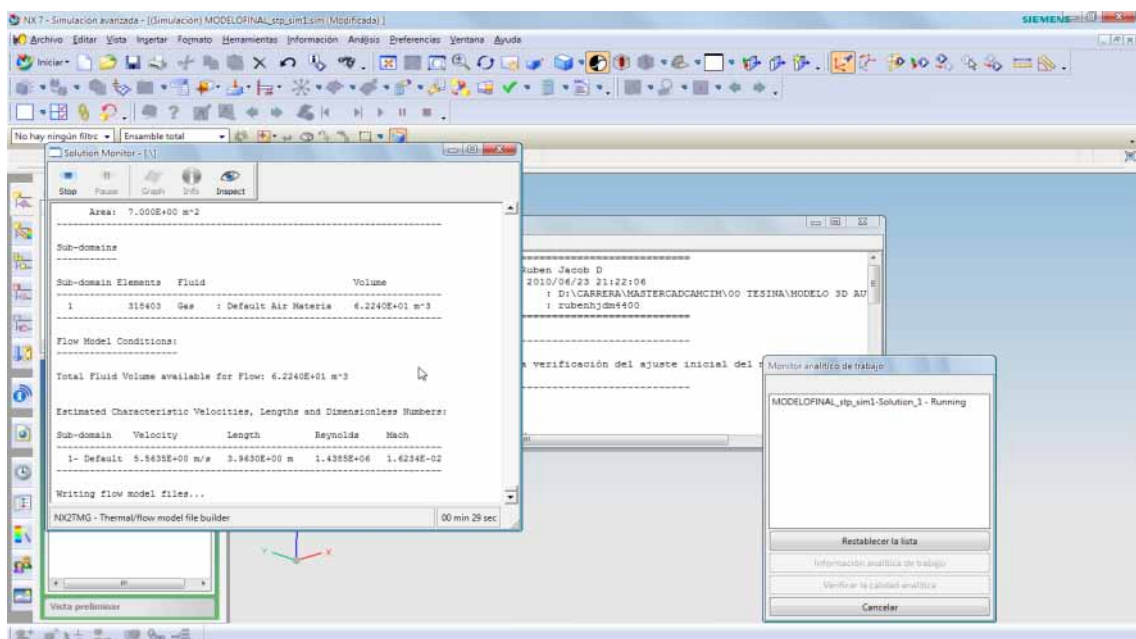


El primer paso de la solución será realizar el mallado del fluido y sus superficies, ya que durante el proceso sólo se ha realizado el mallado del vehículo propiamente tal. Esto mostrará el cuadro de diálogo que se ve en la imagen siguiente.

Este cuadro de diálogo muestra el tiempo que el proceso va utilizando pero adolece de algún tipo de orientación respecto al tiempo restante para concluir el proceso.

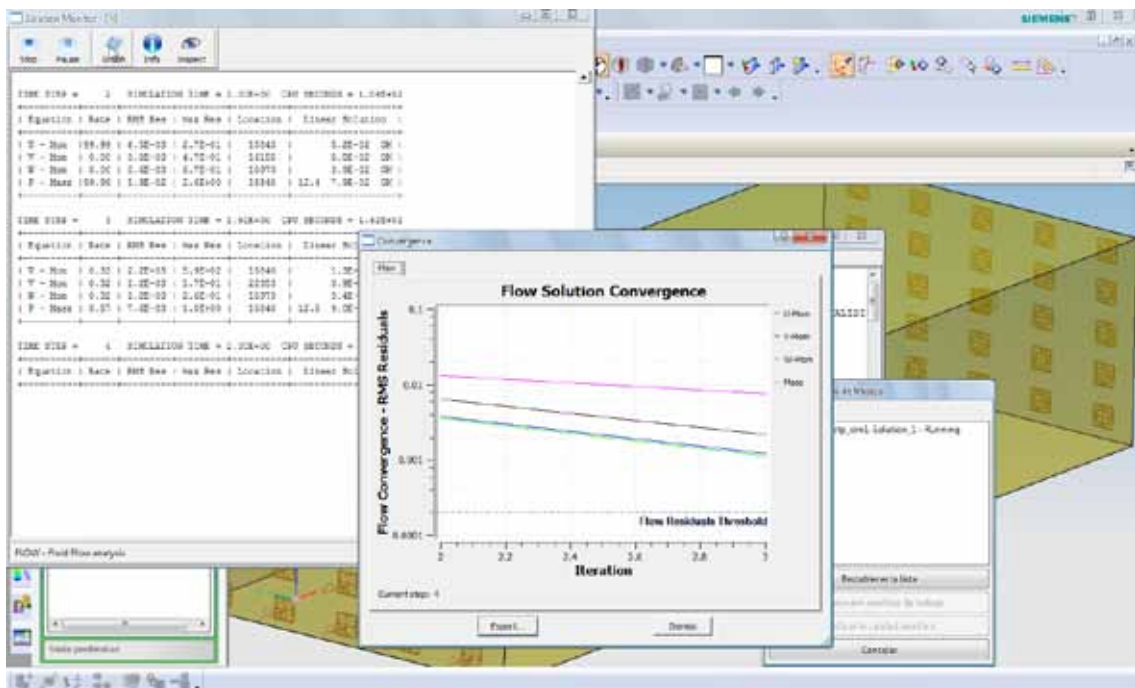
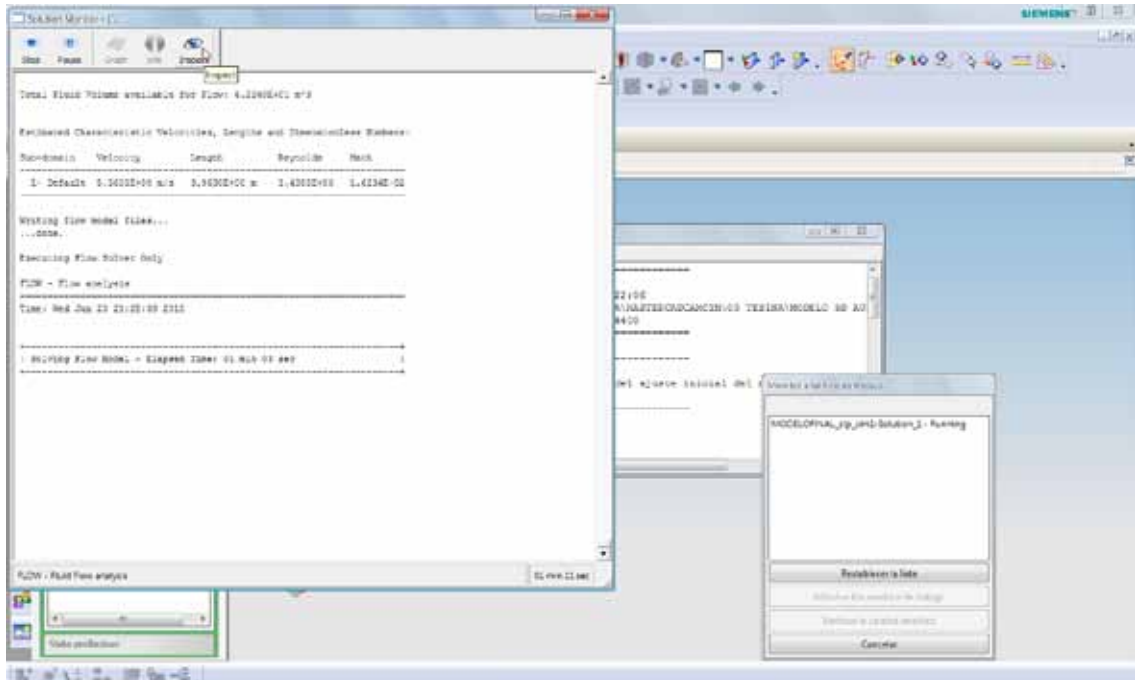


Los procesos de mallado podrán tardar un tiempo considerable y resulta difícil dar una referencia, pero dependen directamente de los tamaños de elemento usados y del tipo de tamaño de elemento. Serán en general más rápidos para procesos que usen tipo "relativo", y en el caso de los análisis realizados,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

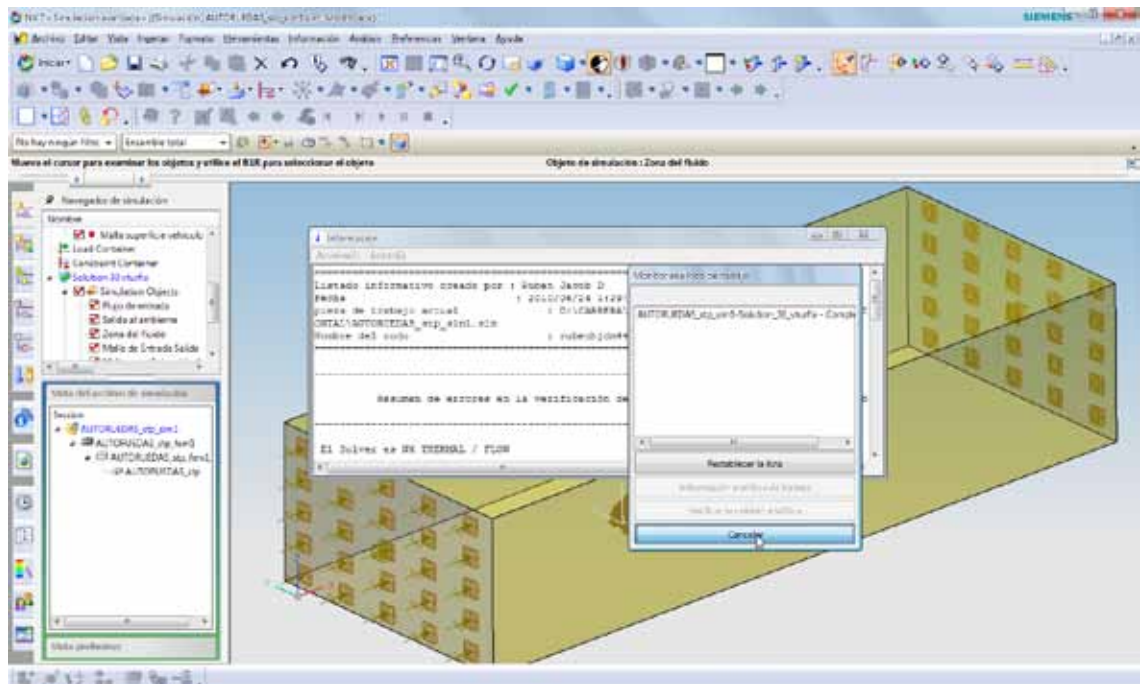


Con el proceso de mallado completo, se procederá a abrir automáticamente el "Solution monitor" que mostrará el progreso de la solución.

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.

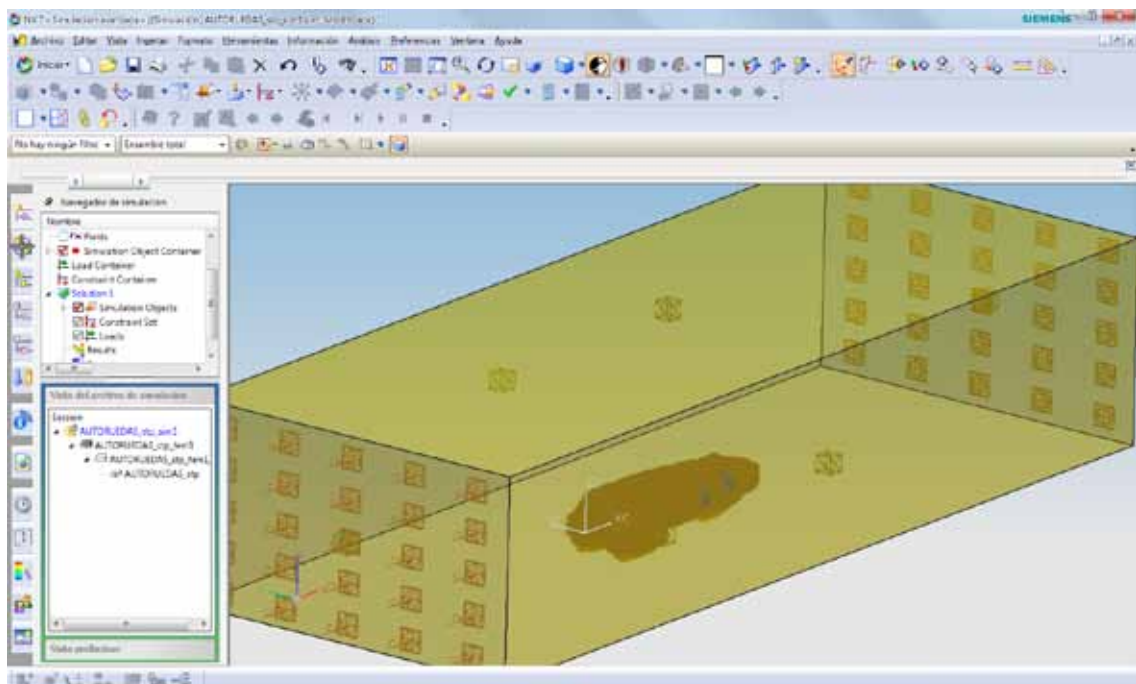


Con el botón “Graph” se podrá acceder a los gráficos que muestran el progreso de la solución, la cantidad de iteraciones que realiza el proceso vs la convergencia del flujo, lo que dará una idea de la cantidad de datos procesados en los distintos puntos del proceso del cálculo de la solución.



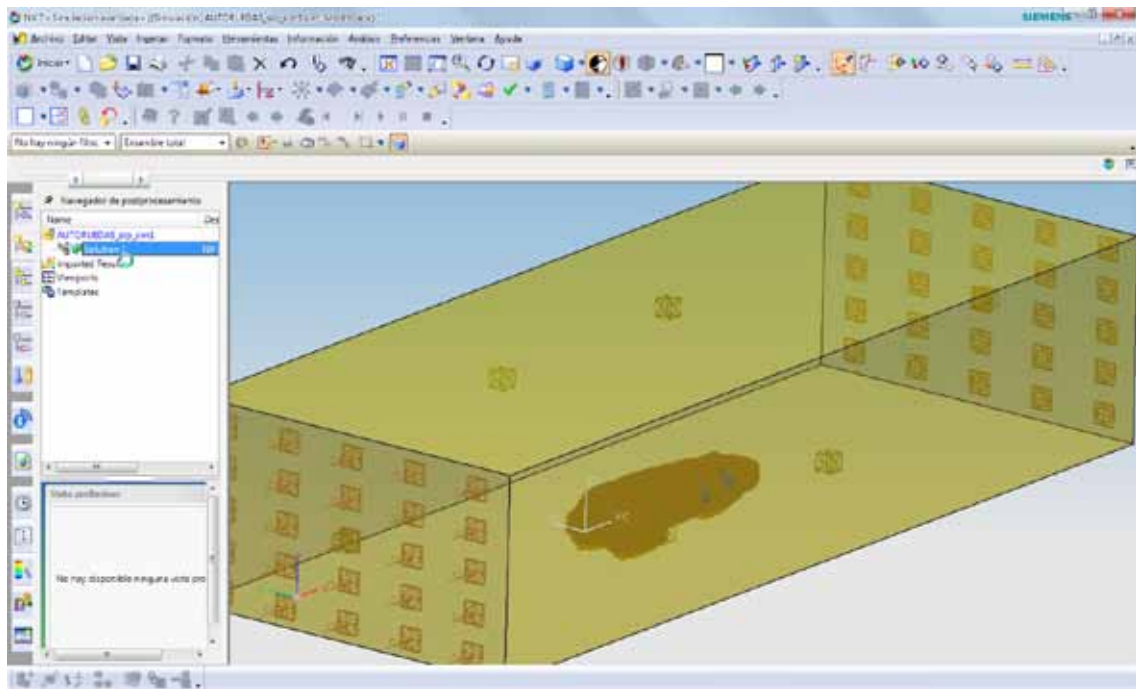
Quando la solución ha sido calculada con éxito, lo que puede demorar entre 15 y 50 minutos para un problema de éste tipo con un ordenador potente, pero muchísimo más en el caso de problemas de mayor complejidad que involucren por ejemplo mayores niveles de turbulencia, se deberán cerrar las ventanas 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.

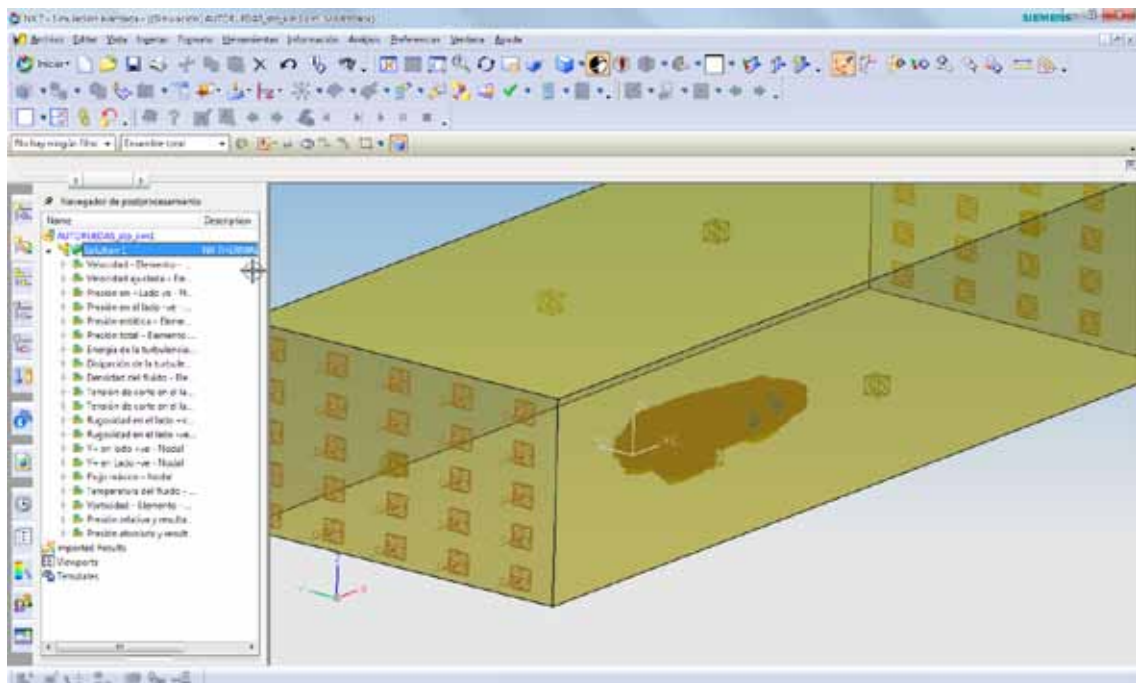


Una vez completado el proceso de cálculo, para acceder a la solución se deberá escoger la segunda pestaña de las diferentes que ocupan la zona a la izquierda de la pantalla.

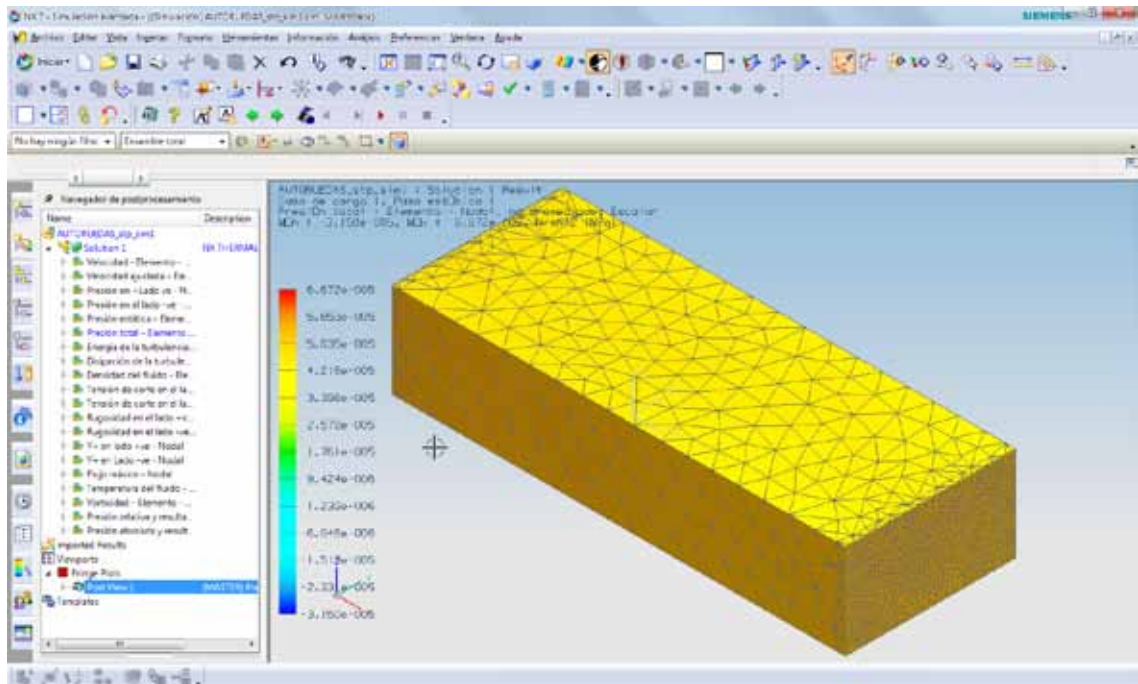
Esta pestaña, denominada “Navegador de post-procesamiento” permitirá acceder a la solución, la que se encontrará sin los resultados inicialmente. Para que se carguen se deberá hacer doble clic sobre el nombre de la solución, lo que luego de un tiempo de carga que puede alcanzar el minuto, hará aparecer un pequeño triángulo junto al nombre de la solución.



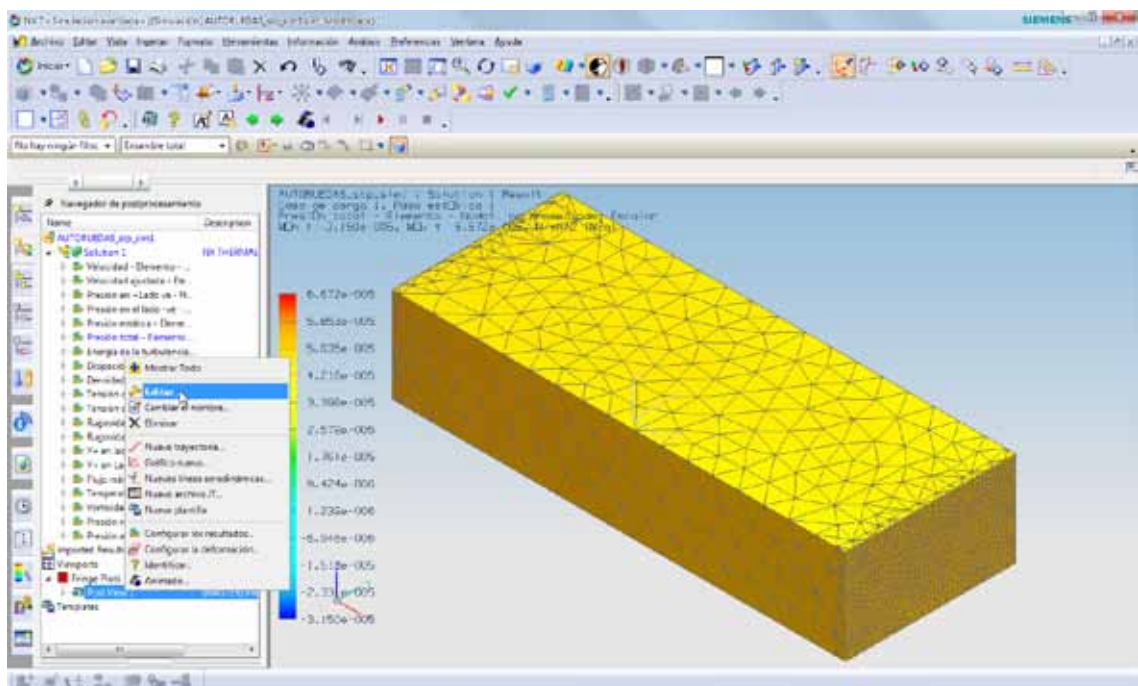
Ahora al clicar con el botón izquierdo en el nombre de la solución se desplegará el listado de resultados.



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 anterior.

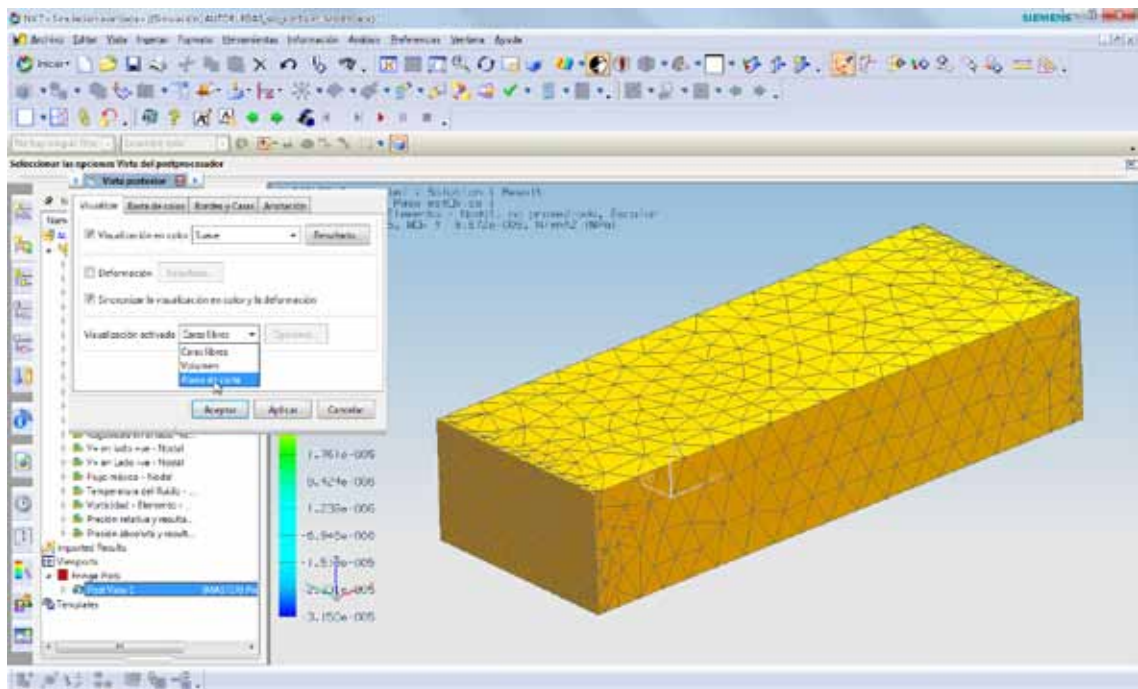


En éste caso se ejemplificarán algunas de las posibilidades de post-procesamiento utilizando uno de los análisis realizados. Nótese el mallado con tipo de tamaño de elemento "relativo", mucho menor en las zonas extremas del túnel.

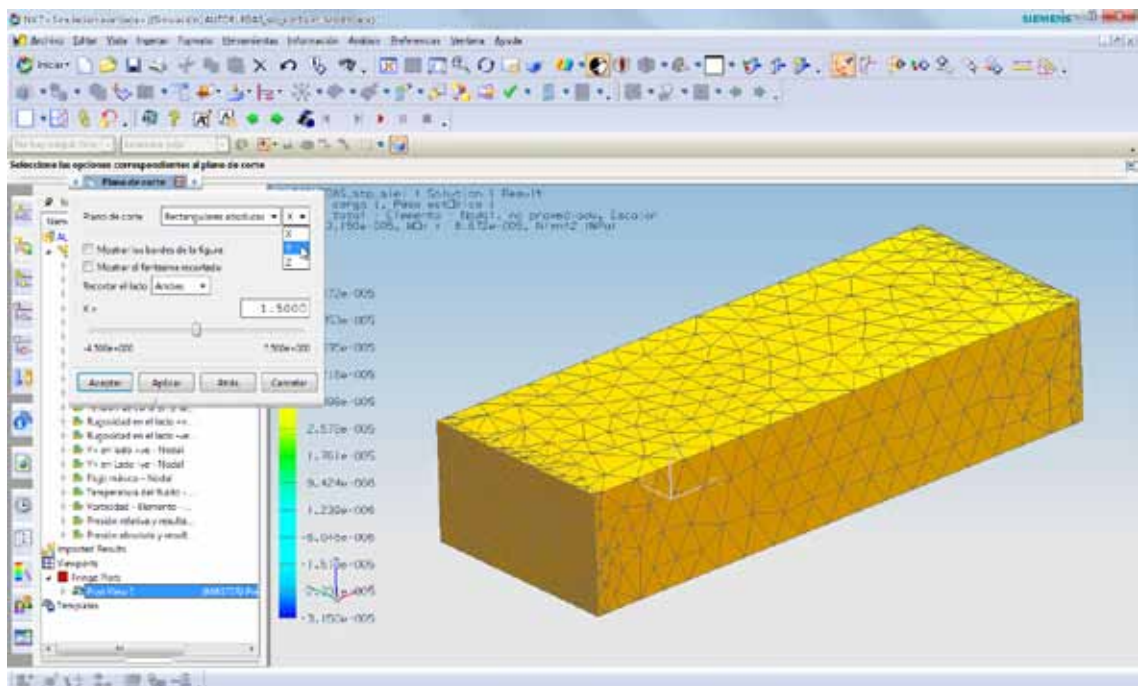


Para editar la visualización se accederá a la zona inferior del panel, y se dará clic derecho para que se extienda el menú en el cual se escogerá "Editar" y se accederá a los cuadros de diálogo que permitirán manejar la forma en que los resultados se muestran.

## Plano de corte – simetría.

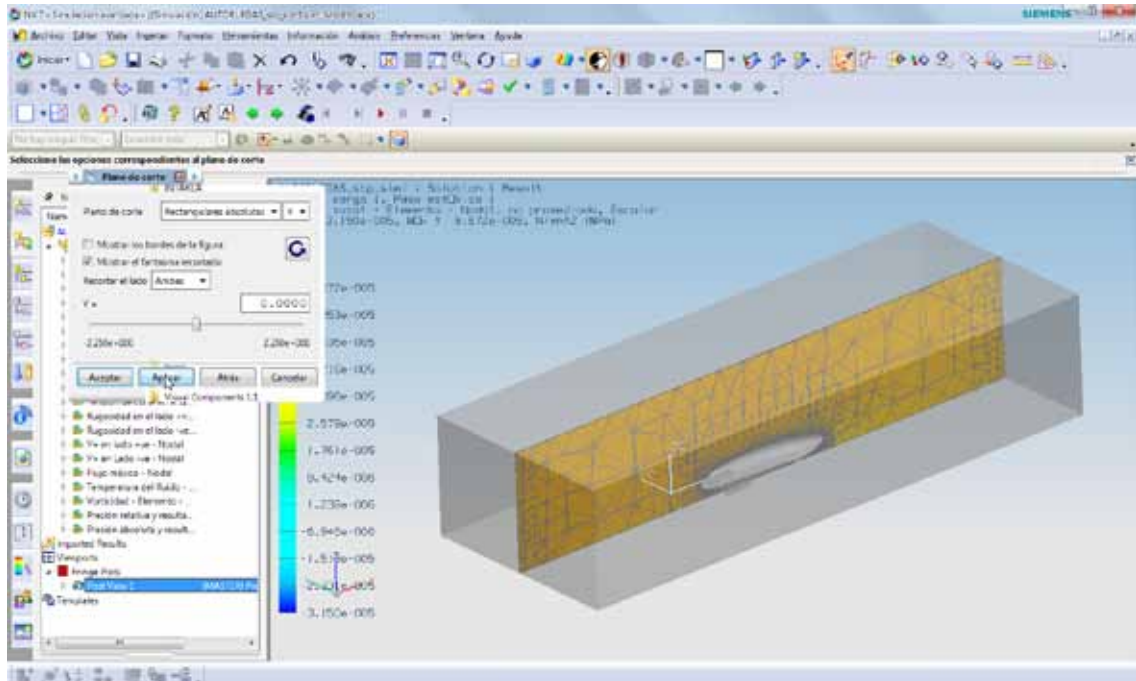


Una de las modalidades de visualización más utilizadas en CFD aerodinámico consiste en un plano que corte el vehículo en su eje de simetría, ya que de ese modo se podrá apreciar las características del flujo a todo su alrededor. Para ello en el cuadro de diálogo "Vista posterior", en la pestaña "Visualizar"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

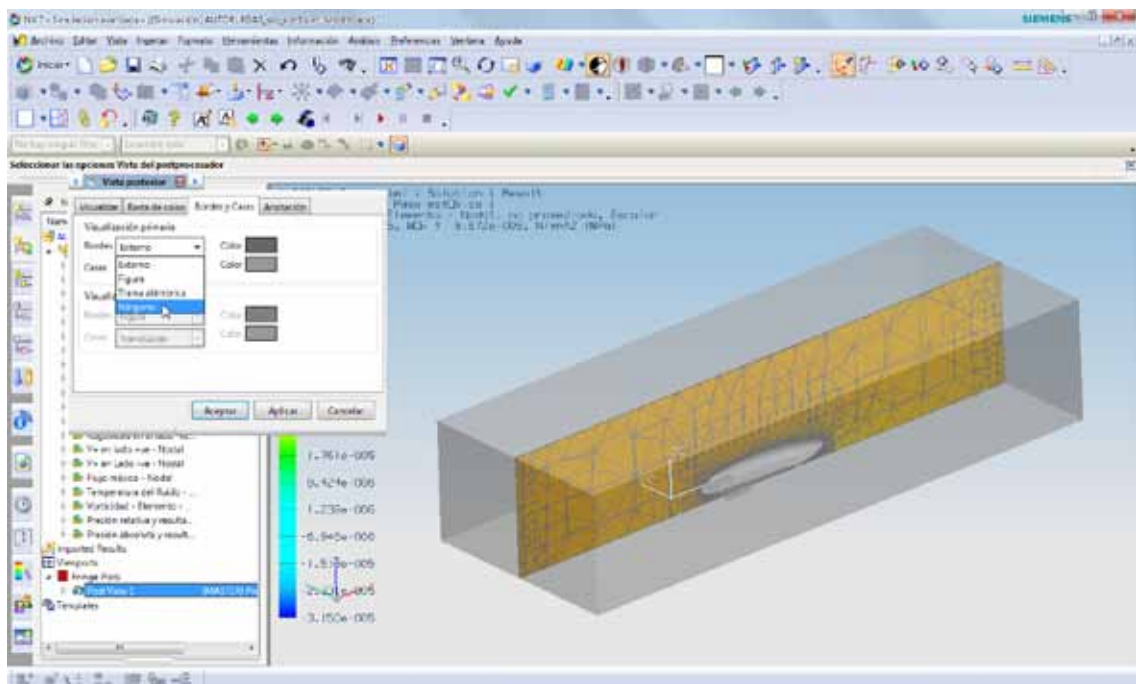


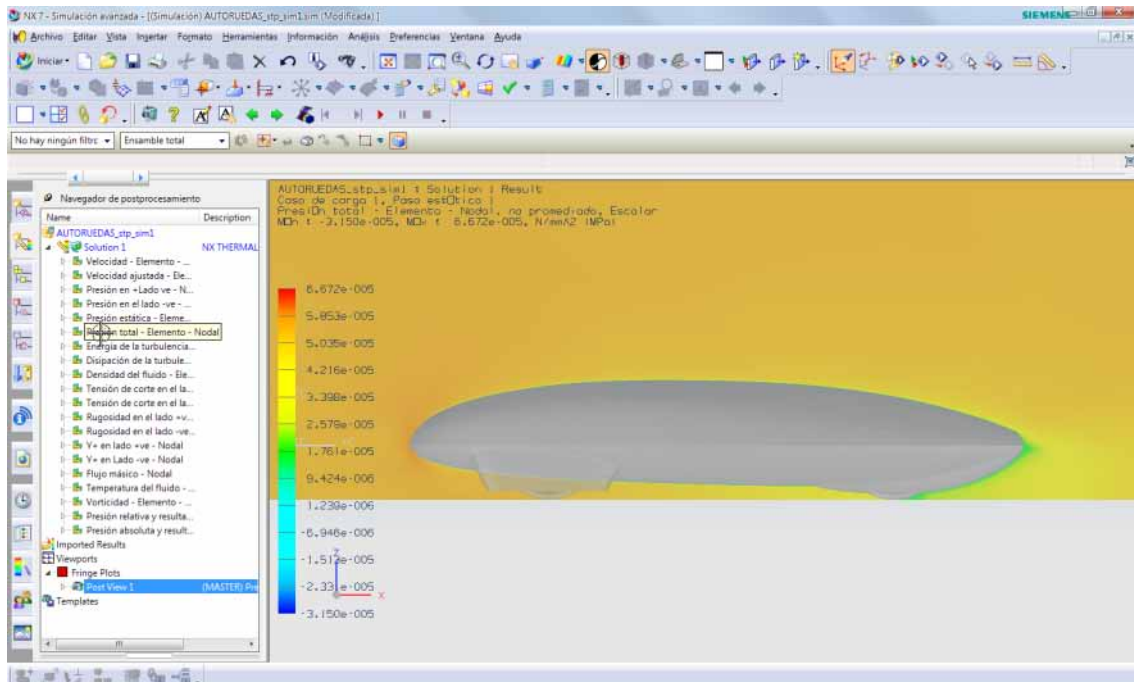
Con éste botón se podrá acceder a los ajustes del plano de corte. Para obtener el plano adecuado se escogerá "coordenadas rectangulares absolutas" y la opción "Y" en la zona superior del cuadro. En la opción "Recortar el lado" se escogerá ambas, y si se desea se podrán clicar las opciones "Mostrar los 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.

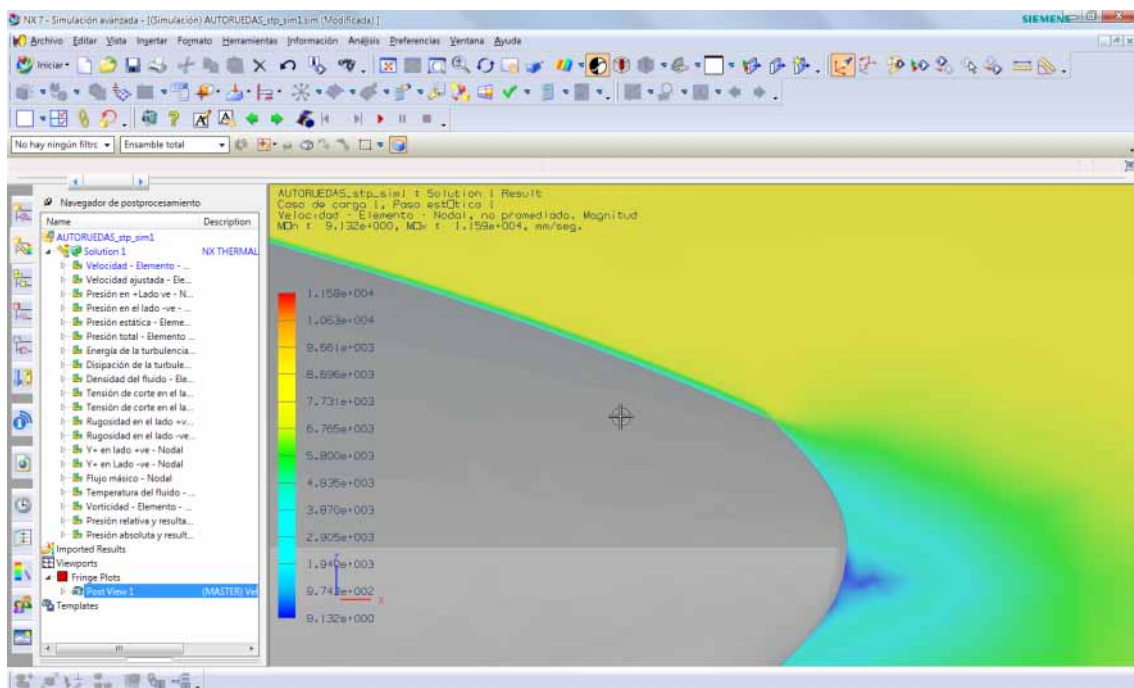


El resultado obtenido será como el que muestra la imagen anterior. Esto podrá mejorarse, accediendo, en el cuadro Vista posterior" a la pestaña denominada "bordes y caras", y escogiendo en "bordes" la opción ninguno, con lo que la trama alámbrica desaparecerá por completo.





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 consigna los datos se mostrará a un costado de la imagen para comprender que significa cada zona.

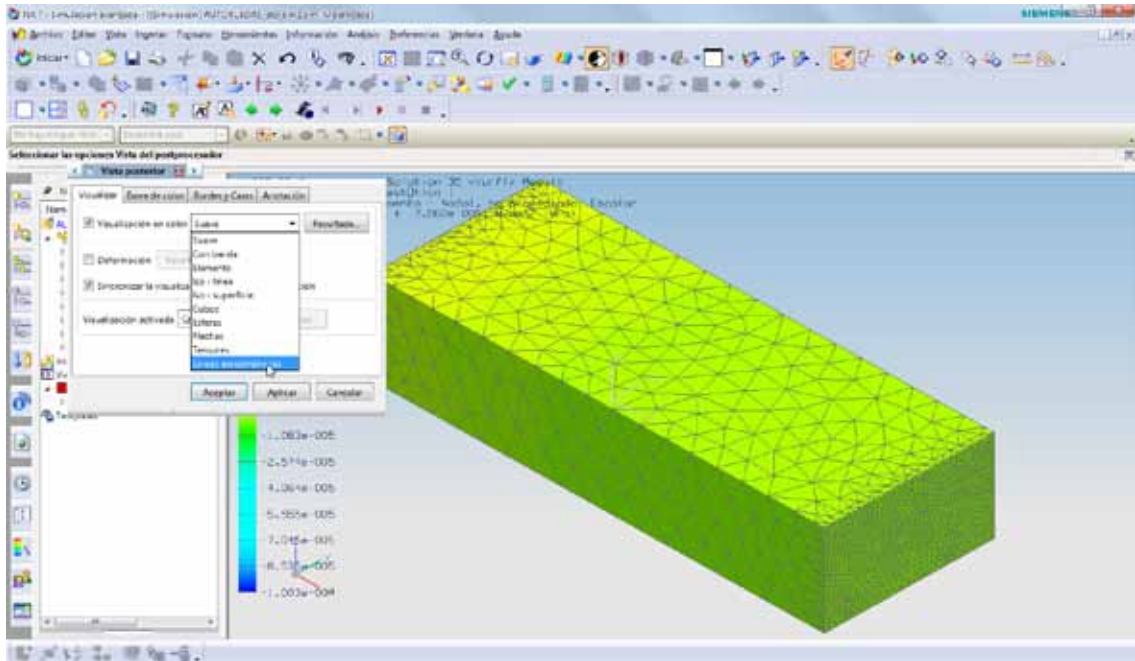


En la imagen anterior se puede ver en el plano de corte creado, la zona de la capa límite donde la velocidad de las partículas del fluido desciende hasta ser casi nula, y la zona posterior donde el flujo se separa provocando disminución de la velocidad y algunos mínimos vórtices dada la forma aerodinámica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

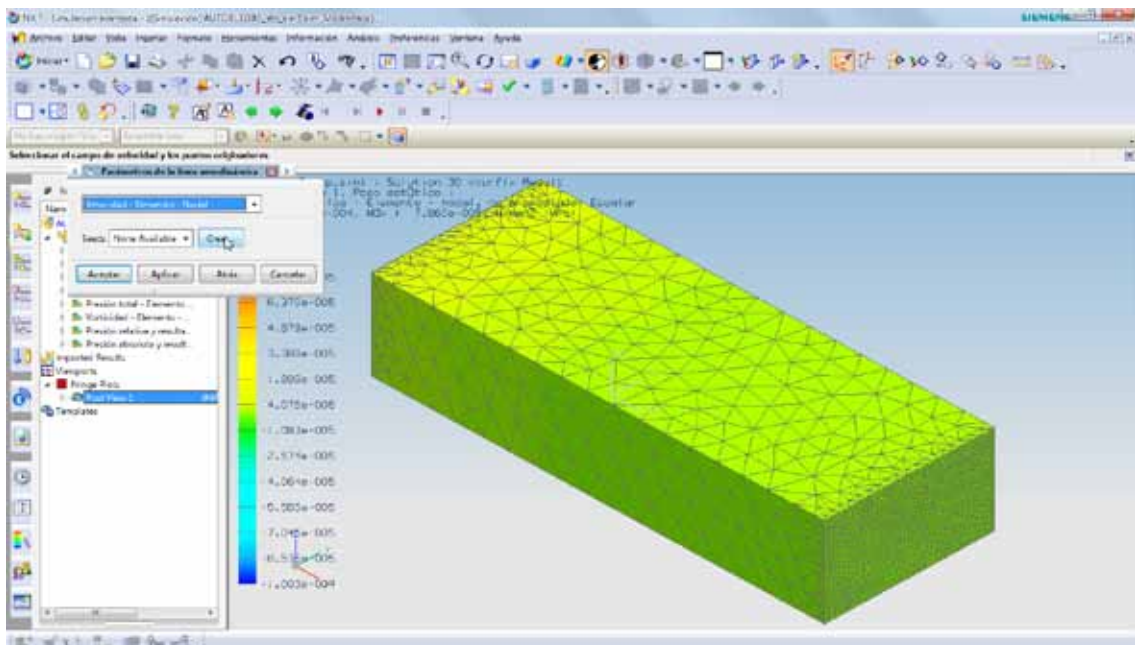


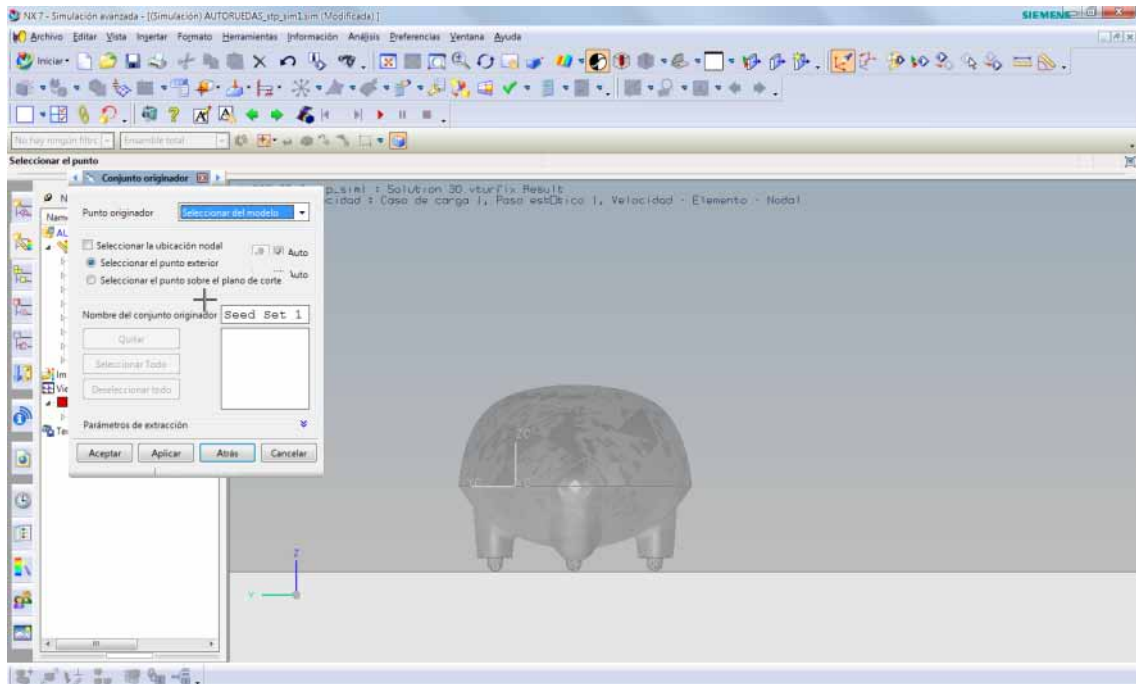
Líneas aerodinámicas.

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”



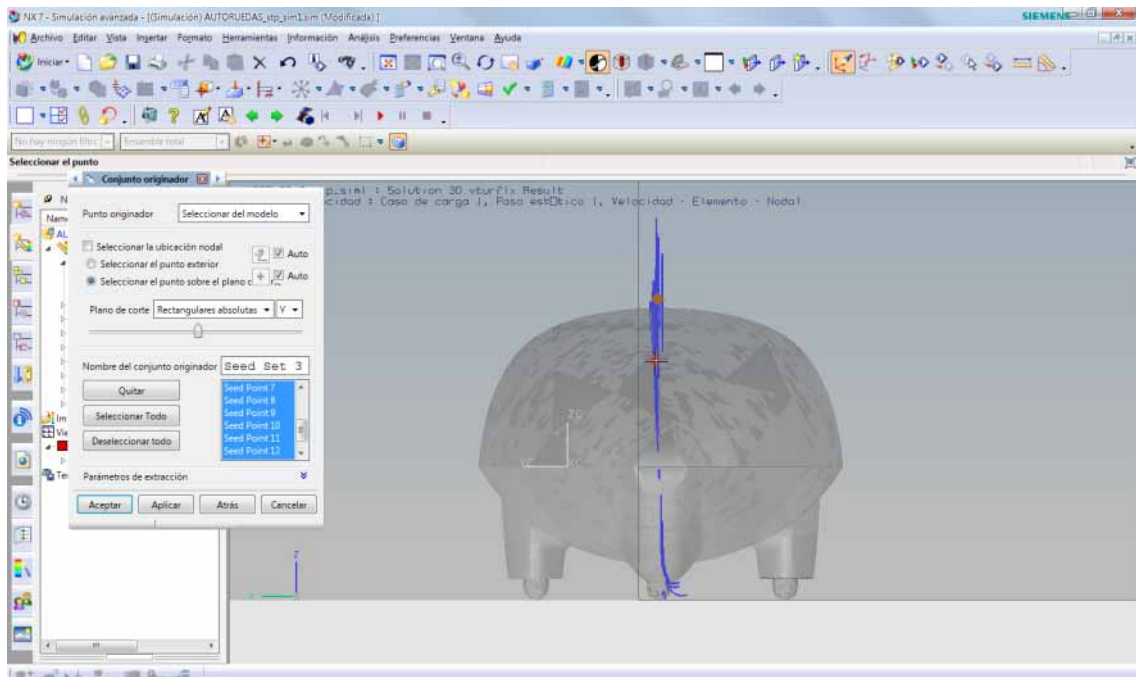
Para que las líneas sean mostradas deberá primero crearse uno o más “grupos de líneas” o “Seeds”, que son grupos de puntos que indican el nacimiento de líneas aerodinámicas. Para ello se dará clic al botón “crear” lo que permitirá acceder al modo de creación.

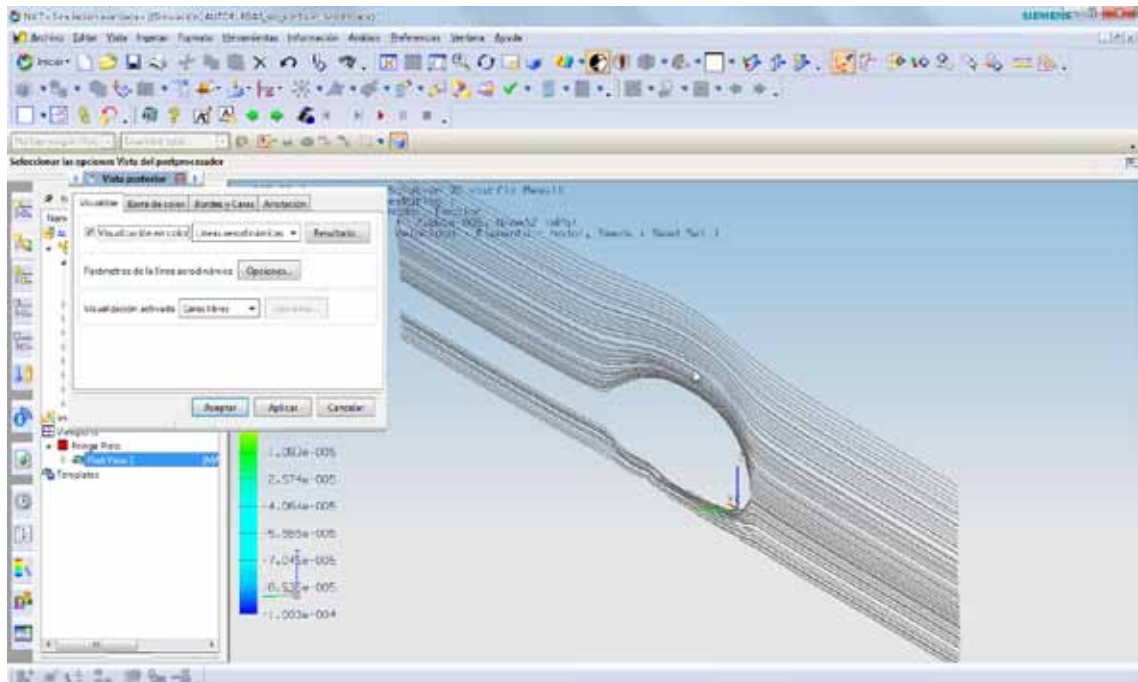




Este modo presentará todos los elementos translúcidos. Utilizando la tecla F8, se deberá ubicar el túnel en la vista ortogonal más adecuada para crear las líneas según la dirección del flujo.

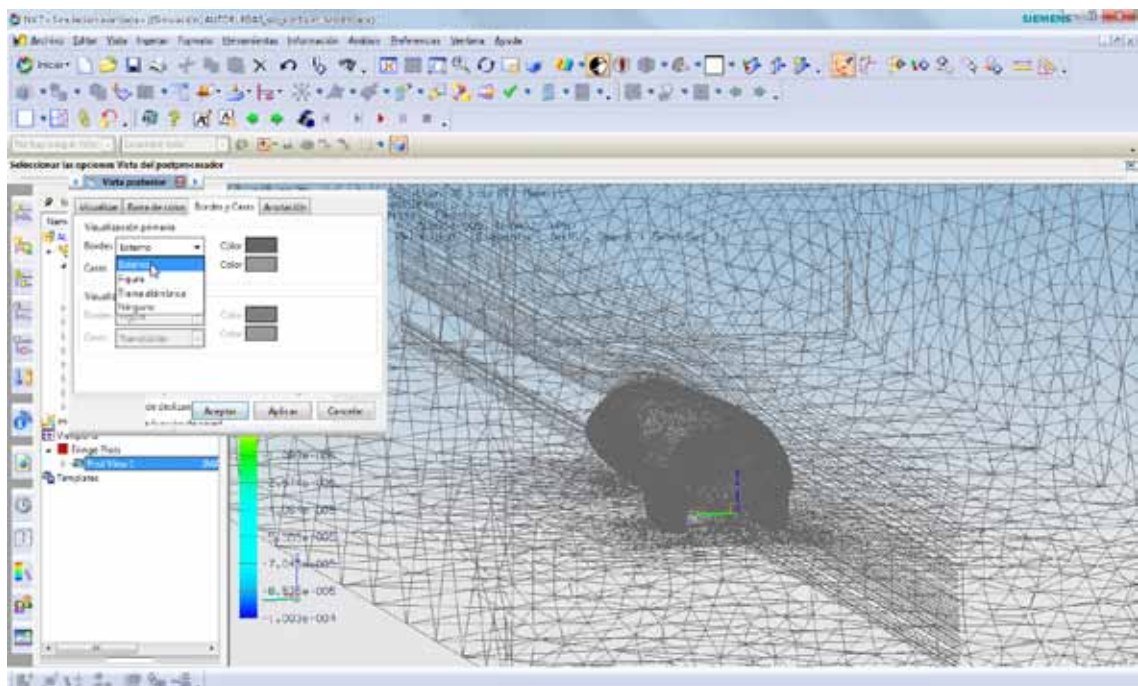
Existen varias maneras de crear las líneas, por ejemplo mediante coordenadas, lo que permitirá una fila ordenada de líneas de flujo. En éstas imágenes se ejemplifica la modalidad más "libre" pero también la más versátil al momento de mostrar lo deseado, esto es para la opción "punto originador" escoger "seleccionar desde el modelo", el resto de las opciones se deja por defecto, y simplemente haciendo clic con el mouse 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.

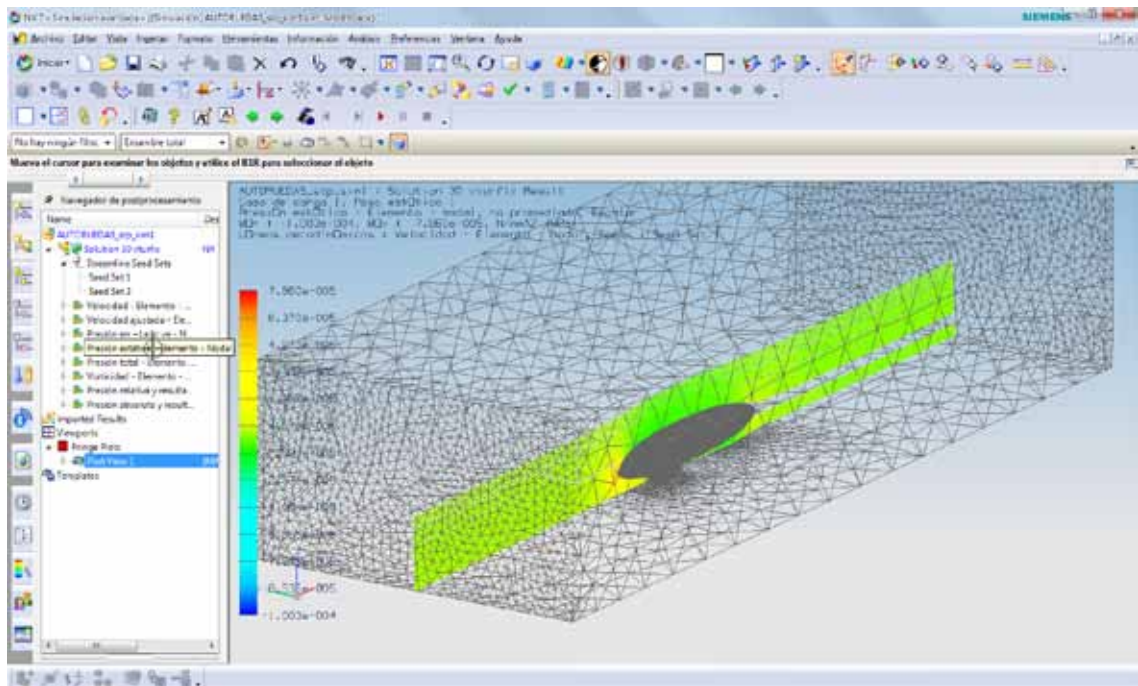




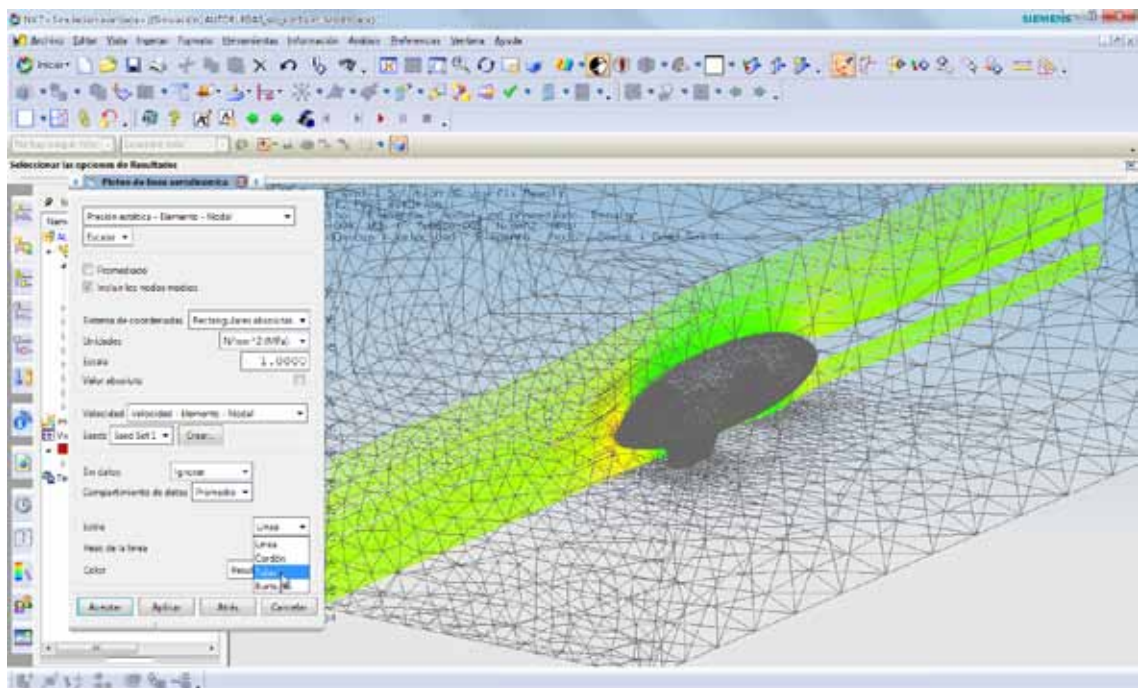
Una vez creada la cantidad de grupos de líneas que se desee, se acepta para cerrar el cuadro de diálogo "conjunto originador" y aplicando se podrán ver las líneas en pantalla. Aun así es probable que, según el resultado que se desee ver, aparezcan en gris, pues no todos los resultados mostrarán líneas coloreadas.

Una alternativa para presentar las líneas aerodinámicas es activar las mallas alámbricas externas como muestra la imagen siguiente, para dar una mejor idea de la totalidad del sistema, principalmente del volumen en estudio como es el vehículo.



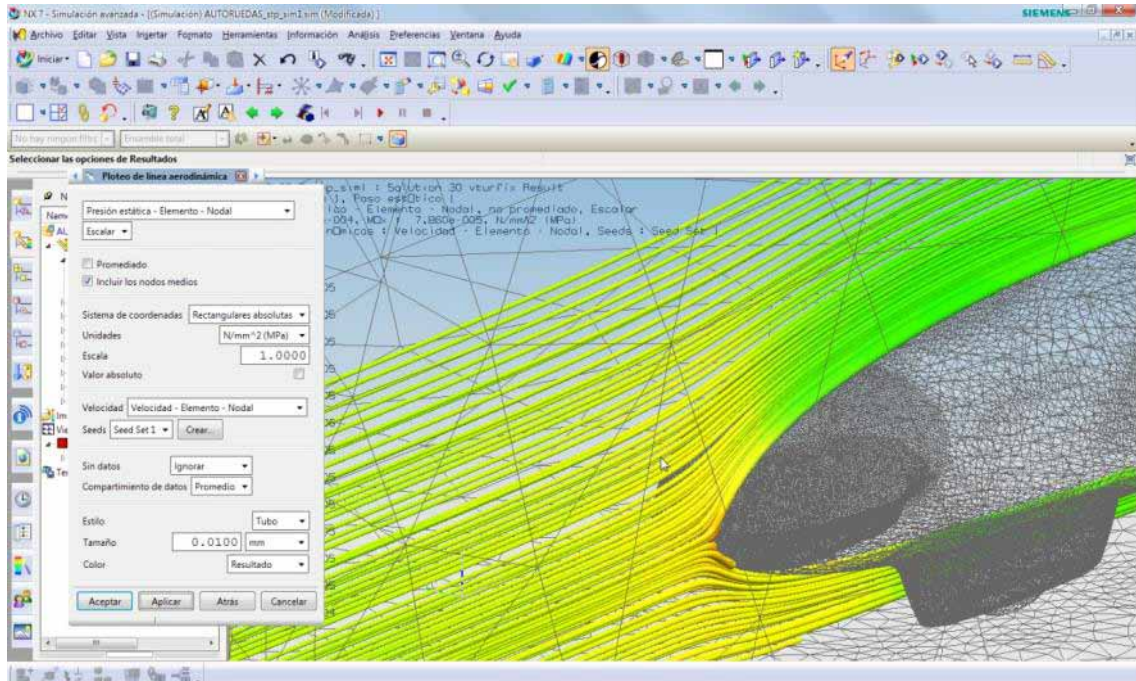


Cambiando el tipo de resultado se podrá acceder a líneas coloreadas que ilustrarán convenientemente el paso del flujo de aire por el vehículo en las direcciones que se hayan escogido previamente.

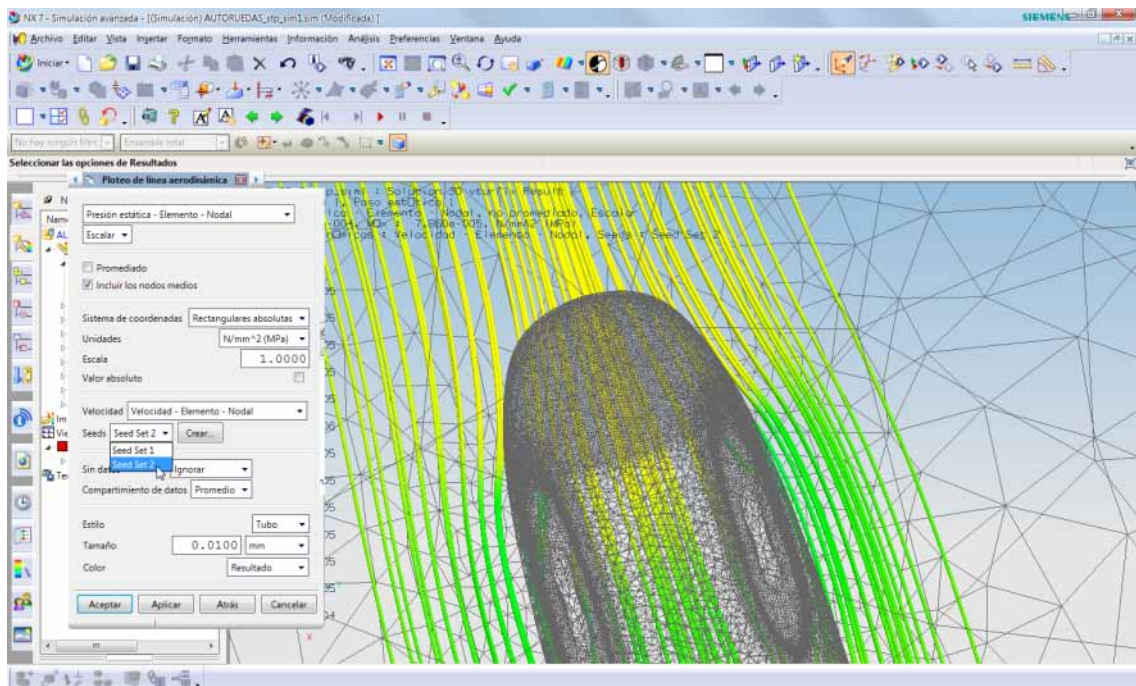


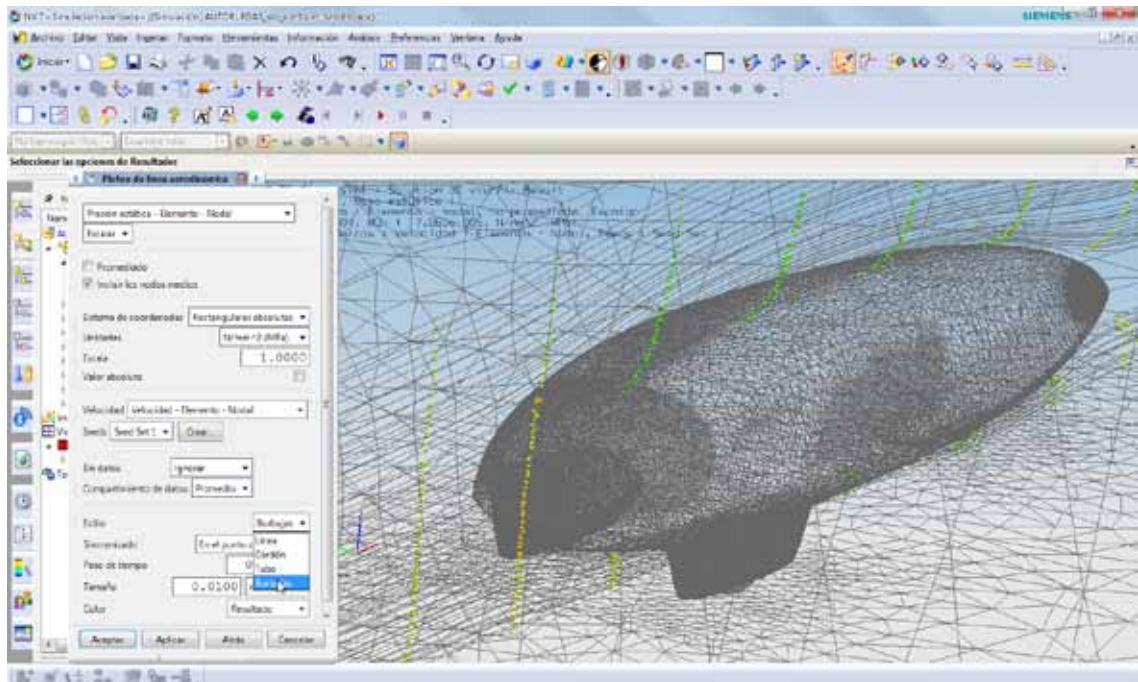
Las líneas podrán ser editadas desde el cuadro de diálogo "Vista posterior", pestaña "Visualizar", seleccionando el botón "resultados", con lo que se accederá al cuadro de diálogo "Ploteo de línea aerodinámica", desde allí y modificando la opción "Estilo" se podrá variar la forma de visualizar la línea,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

La imagen siguiente muestra la opción "tubos activada", la que permite una mayor visibilidad de las líneas.



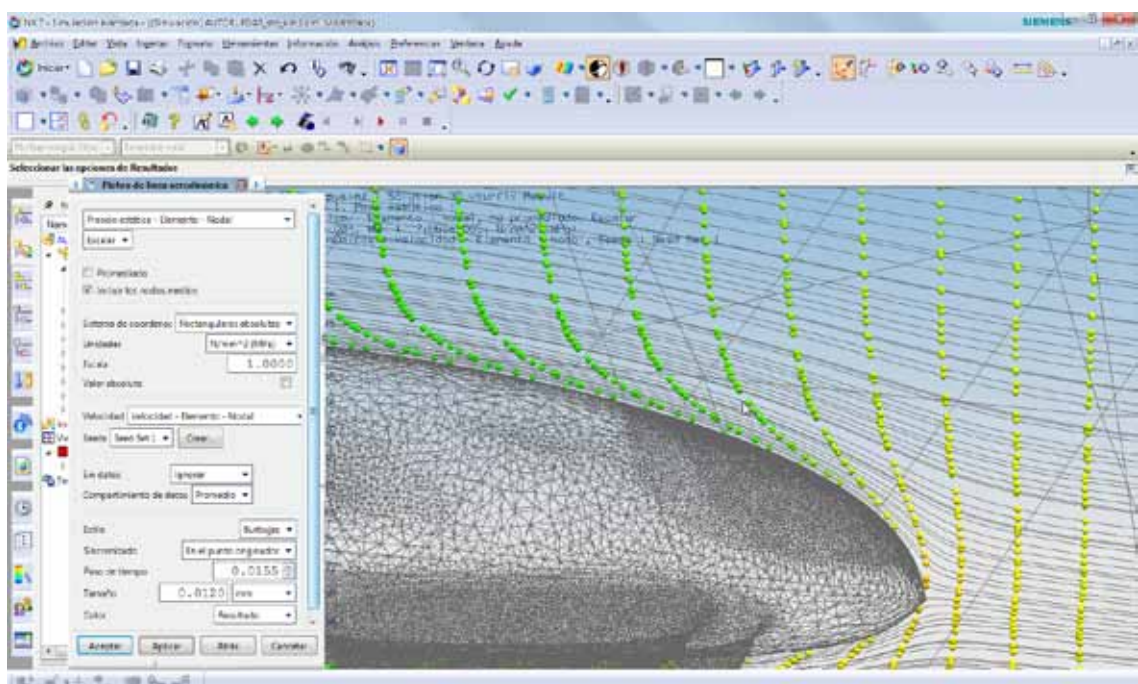
En todo momento se podrá variar entre los grupos de líneas creados previamente "Seed sets" para que se muestren en pantalla como se puede ver en las imágenes anterior y siguiente.



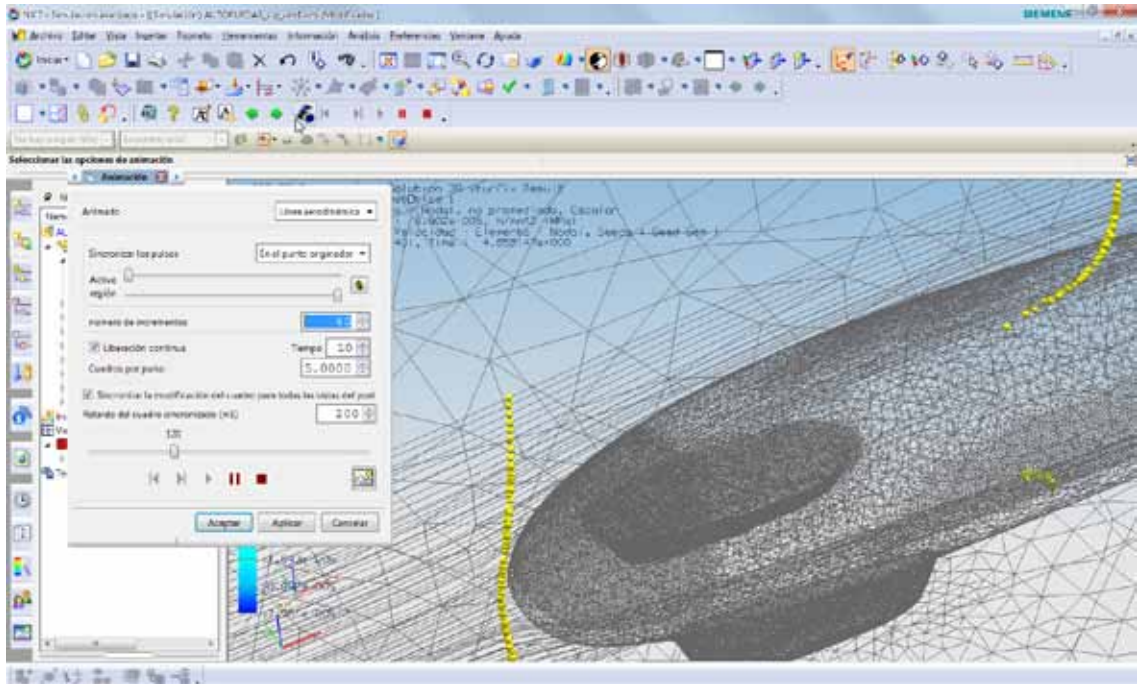


La opción de burbujas, configurando adecuadamente su tamaño será la más adecuada al momento de que se necesite presentar los resultados de forma animada.

En la imagen siguiente 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.

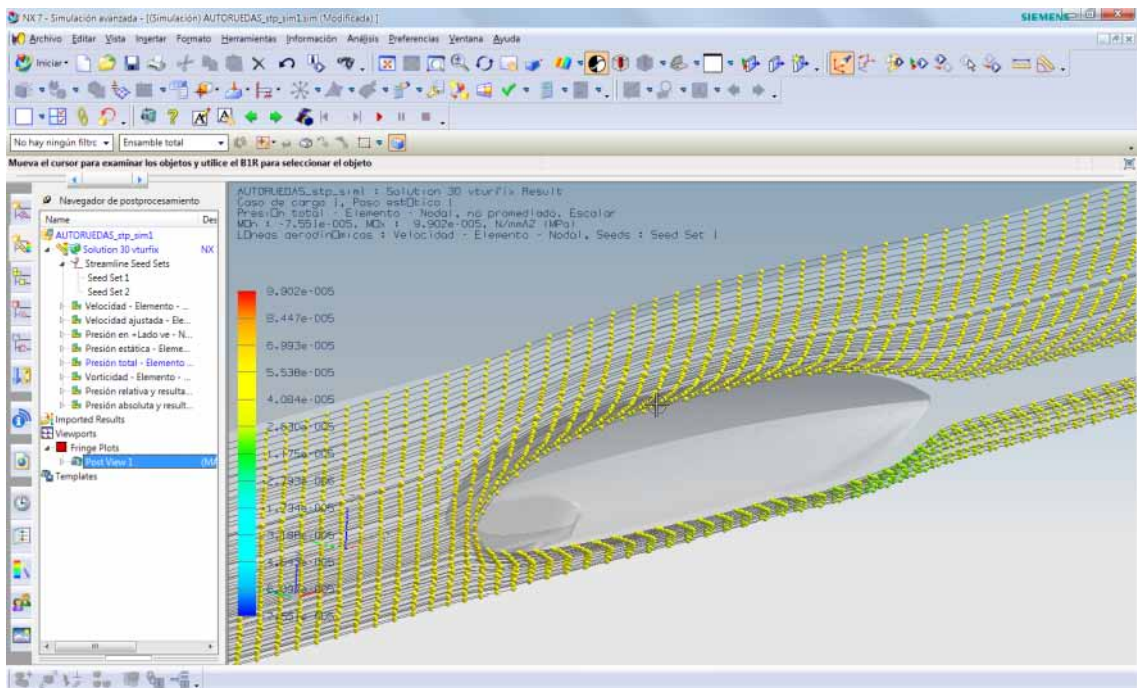


Para animar las burbujas simplemente se dará clic a los botones de animación en la barra de iconos en la zona superior de la pantalla.



Esto generará una animación que podrá exportarse como GIF o AVI, y que será un gran apoyo multimedia al momento de explicar los resultados obtenidos a terceros.

En la imagen siguiente 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.



### 5.3. Realización de un análisis CFD como comprobación de la precisión del software y el método empleado.

Previamente a la realización de todos los análisis sobre el vehículo se han realizado para la realización de ésta tesina, una serie de comprobaciones sobre el software mismo y sobre los pasos a seguir en el procedimiento que se ha determinado.

Para ello se ha escogido una forma cuyo coeficiente aerodinámico es conocido a través de trabajos y experimentación previa. Se ha escogido una esfera, la que suele ser utilizada en ensayos sobre el tema en muchos cursos en carreras de Ingeniería y Física en diversas universidades, la siguiente imagen muestra los valores esperados para su geometría.








Shape		Drag Coefficient
Sphere	→ 	0.47
Half-sphere	→ 	0.42
Cone	→ 	0.50
Cube	→ 	1.05
Angled Cube	→ 	0.80
Long Cylinder	→ 	0.82
Short Cylinder	→ 	1.15

Ilustración 31- Imagen obtenida en la web de la NASA, que muestra los coeficientes aerodinámicos de algunas formas geométricas comunes<sup>60</sup>.

Basándose en el  $C_x$  conocido de la esfera, que se establece en **0,47** para una esfera lisa de acero, se realizará entonces un test mediante NX para determinar experimentalmente el  $C_x$  de una esfera modelada en el software, junto a un túnel de viento y condiciones similares a las que será simulado el vehículo, es decir a **50 km/h**.

Cabe recordar que el tamaño y la velocidad del análisis no tienen incidencia sobre el valor  $C_x$  que se obtendrá, a diferencia del  $SC_x$  donde el área frontal resulta clave. Para éste caso se utilizará una esfera lisa de **1 metro de diámetro**.

---

<sup>60</sup> <http://exploration.grc.nasa.gov/education/rocket/shaped.html>, *estos valores pueden variar según la calidad de la superficie de las geometrías.*



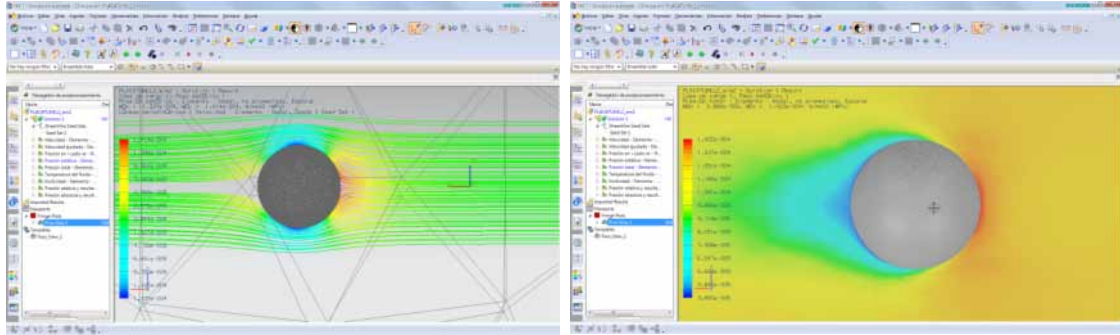


Ilustración 32 - Imágenes de los test realizados sobre la esfera en NX.

Como se ha mencionado previamente, a partir del fichero LOG creado por el análisis se obtendrá el valor necesario para el cálculo del  $C_x$  de la forma.

	x-comp	y-comp	z-comp	R
-----				
GLOBAL FLOW SURFACE				
CG location (m):	1.240E-07	1.051E-07	1.886E-06	
CP location (m):	-4.613E-06	2.091E-04	-1.505E-04	
Total Force (N):	4.454E+01	6.331E-01	-5.157E-01	4.454E+01
Total Torque (N-m):	5.096E-05	-6.790E-03	-9.314E-03	1.153E-02
Shear Force (N):	2.011E+00	-2.149E-04	-1.768E-03	2.011E+00
Shear Torque (N-m):	4.602E-05	-6.783E-03	-9.303E-03	1.151E-02
<b>Pressure Force (N):</b>	<b>4.253E+01</b>	6.333E-01	-5.140E-01	4.253E+01
Pressure Torque (N-m):	4.943E-06	-7.202E-06	-1.072E-05	1.383E-05
-----				

Con el valor obtenido de 42,53 Newtons, se procederá a realizar el cálculo del coeficiente buscado mediante la fórmula establecida para ese propósito:

$F_x$  = Fuerza de Arrastre en X, en Newtons = 42,53

$\rho$  = Densidad del Aire en condiciones estándar, corresponde a 1,204 Kg/m<sup>3</sup>, por  $\frac{1}{2} = 0,6$

$V$  = Velocidad del Vehículo/Aire en m/s, es decir 50 km/h = 14 m/s, al cuadrado = 196

$S$  = Superficie frontal de referencia en m<sup>2</sup> (área de la proyección de la esfera) = 0,785

Se tendrá que:

$$C_x = \frac{42,53 \text{ N}}{\left(\frac{1}{2} \times 1,204 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \times 0,785 \text{ m}^2} = \mathbf{0,46}$$

El coeficiente obtenido es totalmente correcto para la geometría de prueba escogida, la diferencia de 0,01 que no es trascendente puede deberse a que la esfera virtual creada en NX posee una superficie lisa perfecta y una geometría perfecta, a diferencia de las utilizadas para los experimentos en túnel de viento que poseen cierto nivel mínimo, pero existente, de error.

Lo anterior valida entonces el método seguido para la realización de los siguientes test al vehículo, y la precisión del software.

#### 5.4. 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.

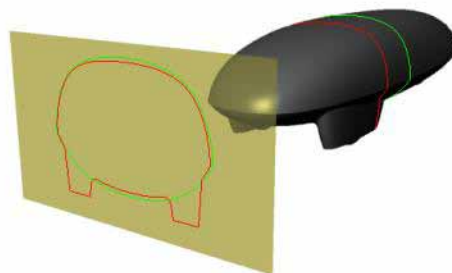
Al igual que en el ensayo previo con la esfera, el  $C_x$  se calculará mediante la fórmula correspondiente utilizando un dato clave obtenido en el análisis, más otros factores conocidos. El primer dato a considerar será la fuerza ejercida por el fluido en el eje X del vehículo, es decir el que recorre 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	
<b>CP location (m):</b>	<b>1.160E+00</b>	<b>3.358E-03</b>	<b>4.762E-01</b>	
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):	<b>3.319E+00</b>	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
-----				

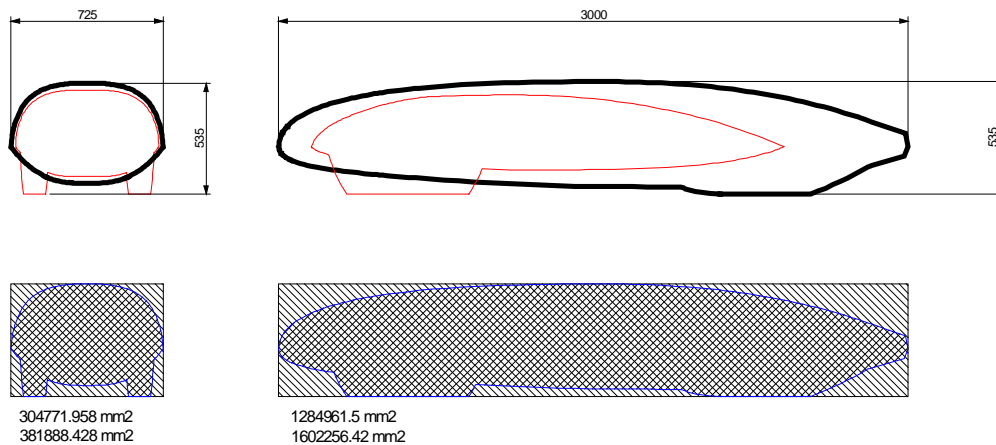
De acuerdo a los datos obtenidos, donde el campo de presiones es lo más importante a revisar, el arrastre en X es **3,319 Newtons**.

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



**Ilustración 33 - Método utilizado para la obtención del área frontal.<sup>61</sup>**

<sup>61</sup> Imagen obtenida mediante renderizado básico en Rhinoceros. El mismo software calcula el valor exacto del área contenida en las proyecciones realizadas.



**Ilustración 34 - Proyecciones frontales y laterales del vehículo. Modelo previo al final.<sup>62</sup>**

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  $C_x$

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

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

$\rho$ =Densidad del Aire en condiciones estándar, es un valor conocido de  $1,204 \text{ Kg/m}^3$ , por  $\frac{1}{2} = 0,6$

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

$S$ =Superficie frontal de referencia en  $\text{m}^2 = 0,304$

Se tendrá que:

$$C_x = \frac{3,319 \text{ N}}{\left(\frac{1}{2} \times 1,204 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times \left(8,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \times 0,304 \text{m}^2} = \mathbf{0,25}$$

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  $C_x$  no tiene relación con la velocidad a la que es medido.

No obstante lo anterior, el valor del  $C_x$  como tal, y como se apuntó en el apartado teórico al comienzo de esta tesina, no suele utilizarse como el valor a considerar como

<sup>62</sup> El modelo previo al final no presenta cambios respecto al final en su perfil frontal, pero si en su perfil lateral. En cuyo caso resulta en un mínimo aumento del área en la práctica despreciable.

referencia, sino que al multiplicarse nuevamente por el área frontal del vehículo permite obtener el valor denominado  $SC_x$ , 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):	<b>9.039E+00</b>	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:

$$C_x = \frac{9,039 \text{ N}}{\left(\frac{1}{2} \times 1,204 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}\right) \times \left(14 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 \times 0,304 \text{m}^2} = \mathbf{0,25}$$

El valor  $SC_x$  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"*.<sup>63</sup>

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 m<sup>2</sup> v/s 0,254 m<sup>2</sup>**), 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,

63 [37]

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:

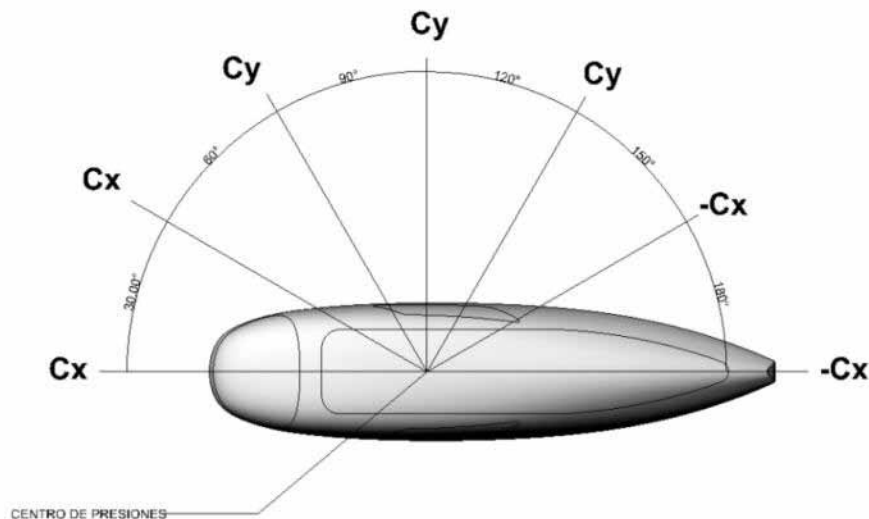


Ilustración 35 - Relación que se utilizará entre los coeficientes alrededor del vehículo<sup>64</sup>

Como valores de referencia para las áreas frontal y lateral se considerarán **0,304 m<sup>2</sup>** y **1,284 m<sup>2</sup>** 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.

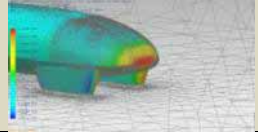
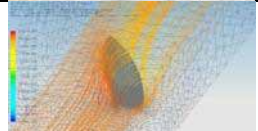

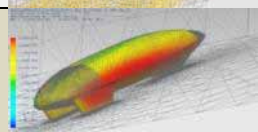


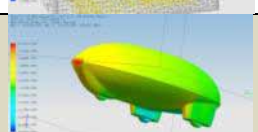
El resto de los valores se mantendrá constante. El punto que se usará como eje de coordenadas para el giro angular del vehículo será en éste caso su centro de presiones, determinado también en los análisis.

---

<sup>64</sup> Los coeficientes se medirán definidos de acuerdo a los ángulos y proyecciones de la imagen. El centro de presiones es el obtenido en los análisis realizados.

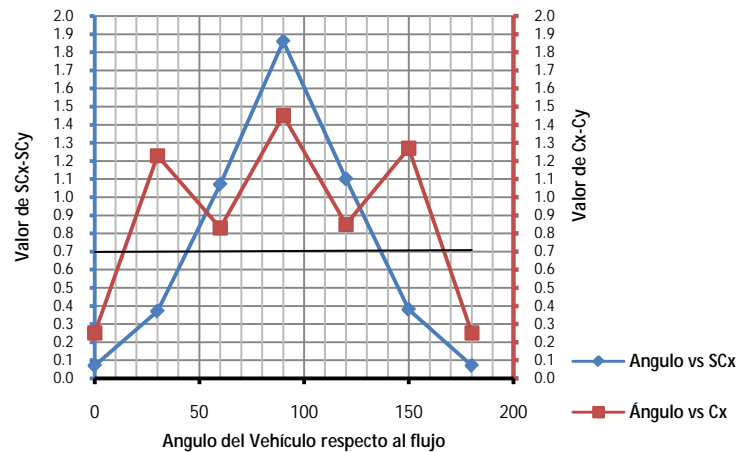
*Las condiciones de los análisis serán a 30 km/h, con modelo de turbulencia k-ε, y con tipo de tamaño de elemento de malla relativo con valor 0,06 para el túnel, 0,03 para las zonas de entrada y salida, y 0,015 para la superficie del fluido en contacto con el vehículo. El vehículo mismo será mallado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

Tabla 2 - Coeficientes de penetración del vehículo en diferentes ángulos frente al flujo.

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

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.**

### Ángulo - Cx/Cy - SCx/SCy



El anterior gráfico muestra cómo pese a que tienen una directa relación, los valores de  $C_x$  y  $SC_x$  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  $SC_x$  y no el del  $C_x$  solamente.

La curva descrita por la variación del  $C_x - C_y$  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  $F_x$  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 3 - Incidencia del efecto suelo en el arrastre ejercido sobre el vehículo a 30 kmph

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	<b>0,204 N</b>	<b>0,211 N</b>
<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 4 . Incidencia del efecto suelo en el arrastre ejercido sobre el vehículo a 50 kmph.

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	<b>0.485 N</b>	<b>0.692 N</b>
<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.

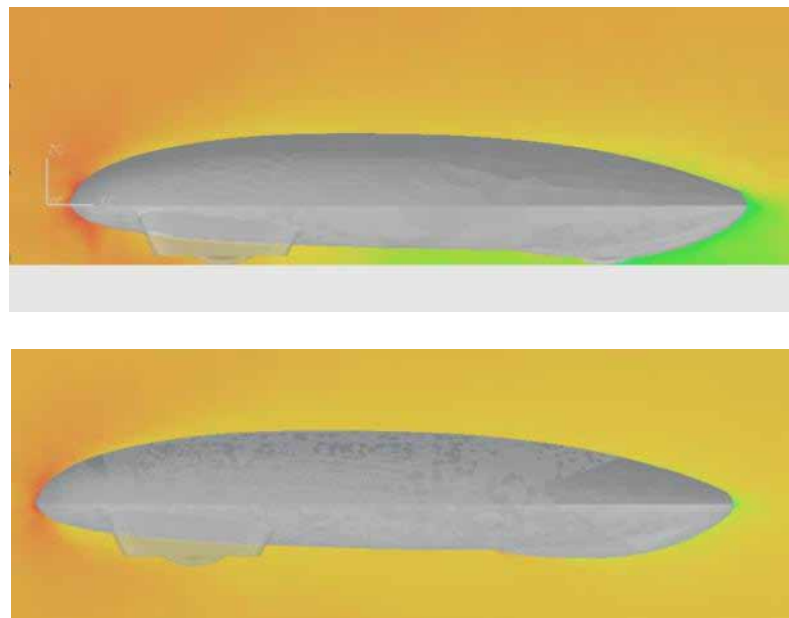


Ilustración 36 - Imágenes que grafican el efecto suelo sobre el vehículo.



## 6. RELACIÓN ENTRE EL TAMAÑO DE ELEMENTO, TIEMPO DE CÁLCULO Y RESULTADOS OBTENIDOS.

Un factor en extremo importante, que ha sido objeto de investigación en variados campos de aplicación de los elementos finitos, es el que relaciona el nivel de la discretización realizada, que se traduce mayormente en el tamaño de elemento utilizado para el mallado de las geometrías, con los tiempos de cálculo y la precisión de los resultados obtenidos. Al respecto cada algoritmo de mallado utilizado por los diferentes softwares, cada tipo de análisis, cada geometría puede ofrecer algunas particularidades, sin embargo la tendencia es una relación inversamente proporcional entre el tamaño de elemento y la precisión de cálculo y a su vez, del tiempo empleado para el cálculo.<sup>65</sup>

No obstante el factor de mayor trascendencia en la precisión del cálculo suele ser la relación de aspecto de los elementos que forman la malla. Esto último también tiende a mejorar al disminuir el tamaño de elemento.

Al no contarse en este caso con una referencia de resultados reales y comprobados, por ejemplo un estudio en túnel de viento, que permita validar adecuadamente los resultados, se considerará que a menor tamaño de elemento, el resultado será de mayor precisión, pues también existirá una mayor coincidencia de la malla FEM con las geometrías originales, y una mayor cantidad de datos para interpolar hacia el resultado final.

Este apartado pretende arrojar alguna luz sobre el comportamiento de NX al respecto, **pues no se han hallado estudios disponibles al respecto**, sin embargo evidentemente no constituye un estudio acabado sino uno inicial, el que queda planteado como un aspecto necesario a desarrollar para el logro de exactitud plena en éste tipo de análisis con NX y la creación de un método de mallado para CFD.

El ordenador utilizado, que determinará los tiempos de cálculo en buena medida para todos los análisis tiene la siguiente configuración: *Dell Precision Workstation M4400, Procesador Intel Core 2 Duo T9400 de 2533 MHz, 4 Gb RAM DDR2, Procesador Gráfico Nvidia Quadro Fx700 512 Mb RAM de Video.*

Deberá considerarse el ordenador utilizado y extrapolar los tiempos obtenidos (los valores deberán mantenerse evidentemente) de acuerdo a la potencia de cálculo de la que se disponga. La totalidad de los análisis realizados sólo para éste apartado utiliza alrededor de 15 Gb de espacio en disco duro, por lo que se recomienda contar con espacio suficiente al realizar éste tipo de análisis y monitorear el espacio libre con frecuencia, pues su carencia provocará errores en los procesos.

### 6.1. Influencia de la malla sólida del vehículo.

La siguiente tabla muestra los valores obtenidos en los sucesivos análisis realizados, donde se aprecia que no varía el tiempo de mallado del fluido, lo que indica que **no existe relación directa entre la malla FEM del vehículo y las mallas que se crean en éste punto para el fluido.**

---

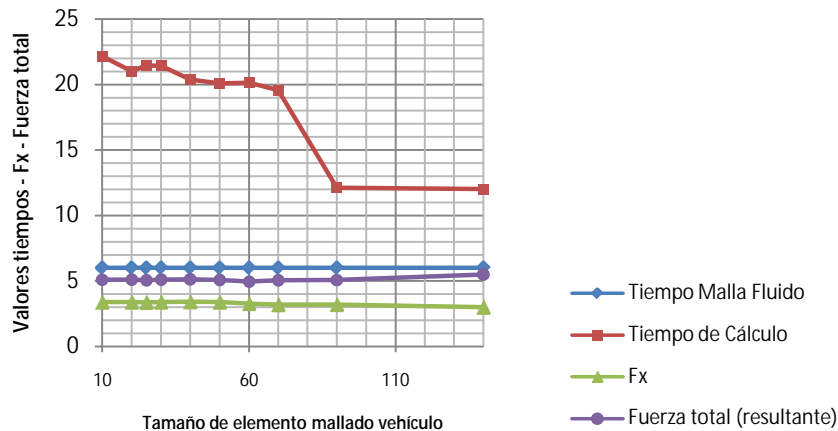
<sup>65</sup> [7]

El gráfico posterior muestra de forma más clara la tendencia a mantenerse estables de los demás factores estudiados, notándose lo pequeñas que resultan las variaciones que se producen, desde 140 mm, el doble del tamaño de elemento sugerido por el software, es decir 70, hasta uno intencionalmente muy pequeño de valor 10 mm. Sin embargo pese a lo pequeñas que resultan las variaciones, **pueden generar una variación de más de un punto en el cálculo del  $C_x$**  de un vehículo.

Tabla 5 - Variación del tamaño de elemento en la Malla FEM del Vehículo.

Tamaño elementos Mallado FEM (en mm)	Tiempo para el mallado del fluido (en min y seg)	Tiempo de cálculo de la solución (en min y seg)	Resultado para Fx (en Newtons)	Resultado fuerza total resultante XYZ (en Newtons)
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

*Condiciones fijas: 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*



El factor tiempo de cálculo, a diferencia de los demás, se ve afectado por el tamaño de los elementos de forma más sensible, aumentando en la medida que el tamaño de elemento disminuye. El mayor salto en éste factor se produce entre los 90 y 70 mm de tamaño de elemento.

De acuerdo también al factor de fidelidad de la representación de la malla respecto a la forma original (correspondencia o "*mesh matching*"), que se ha mencionado previamente, se han considerado los valores desde 40 a 20 mm como el **rango aceptable para el tamaño de elemento** ya sea para tipo de mallado subdivisión o adoquín.

## 6.2. Influencia de la malla fluida con tipo de tamaño de elemento relativo.

La siguiente tabla que se presenta mantiene el mallado FEM como un dato fijo, y varía gradualmente el tamaño de elemento de la malla del fluido, que se presume de forma previa, deberá incidir de forma más drástica en los resultados.

El tipo de tamaño de elemento de la malla de fluido se ha mantenido "relativo". Los tutoriales y guías que se han podido revisar en los inicios del desarrollo de ésta tesina, sugieren que se utilice el tipo de tamaño de elemento absoluto para el mallado del fluido.

Lo anterior garantiza una mayor robustez del proceso de solución, y bajo ciertas condiciones, una disminución del tiempo de cálculo, pero esto último es relativo como se verá en éste apartado.

No obstante lo anterior, y considerando para ello los múltiples ensayos y pruebas que se realizaron antes de comenzar a realizar análisis sobre el modelo final del vehículo, también la utilización del tipo de tamaño de elemento relativo, como se ha mencionado previamente, entrega buenos resultados y correctos tiempos de cálculo.

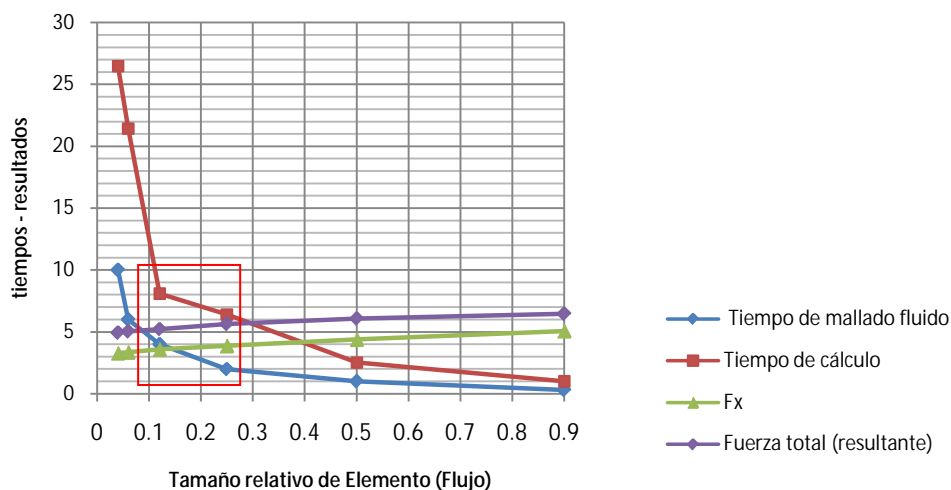
La elección de un tipo u otro deberá entonces basarse en ciertos criterios que se expondrán en éste apartado y en las conclusiones generales de ésta tesina. En este caso se realizará una serie de test basados en malla con tipo de tamaño de elemento relativo.

La cantidad de análisis realizados se ha disminuido debido al menor rango posible de lograr entre las variables contempladas. Los valores menores a los utilizados generarán un error de mallado. El primer valor corresponde al tamaño de elemento del flujo mismo, el segundo valor a sus límites de entrada y salida, y el tercero a la superficie fluida en contacto con el vehículo.

Tabla 6 – Variación del tamaño de elemento relativo en el mallado del fluido.

Tamaño <i>relativo</i> elementos de mallado del fluido (fluido – límites – zona contacto con el vehículo)	Tiempo para el mallado del fluido (en min y seg)	Tiempo de cálculo de la solución (en min y seg)	Resultado para Fx (en Newtons)	Resultado fuerza total resultante XYZ (en 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
<b>0,12 – 0,04 – 0,020</b>	<b>4.00</b>	<b>8.09</b>	<b>3,584</b>	<b>5,234</b>
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

**Condiciones fijas:** Tipo de elemento de Mallado Fluido relativo, Tamaño de elemento del mallado FEM del vehículo 25 mm. Análisis a 30 Km/h – Mod. Turbulencia k-ε



En éste caso la influencia de la malla fluida es mucho mayor que la malla sólida del vehículo sobre los procesos y los resultados obtenidos. La diferencia entre una malla con un tamaño de elemento amplio y una malla fina además de traducirse en tiempos mucho más amplios entrega imprecisiones enormes en los resultados. De no conocerse los límites y rangos en que el resultado puede considerarse aceptable, es posible dar por buenos valores que no reflejen la realidad del análisis.

La gráfica deja claro que en el caso de las fuerzas totales y  $F_x$  existe una curva de progresión similar lo que permite comprender de forma sencilla su comportamiento estimado en diversas situaciones de análisis.

Se observa en todos los casos un aumento del valor de los resultados mientras la malla es más gruesa. Se presume de acuerdo a los antecedentes al respecto que los resultados más ajustados a la realidad serán los obtenidos con un menor tamaño relativo de elemento, es decir los resultados menores.

Otro dato importante que es posible obtener observando la gráfica es el punto donde el valor obtenido se mantiene dentro de un rango aceptable, sin sacrificar un exceso de tiempo de cálculo o de mallado del fluido.

Este punto se puede definir cercano al valor **0,12** para el tamaño relativo de elemento del fluido (0,04 para sus límites y 0,02 para la zona en contacto con el vehículo). Luego de ese punto la divergencia entre el tiempo de cálculo y la precisión del resultado obtenido comienza a ser mucho mayor.

### 6.3. Influencia de la malla fluida con tipo de tamaño de elemento absoluto.

Del mismo modo que en el punto anterior, se han realizado una serie de ensayos utilizando el tipo de tamaño de elemento absoluto y variando sus valores para los tres factores clave, es decir el flujo mismo del fluido, sus límites de entrada y salida y la zona en contacto con el vehículo.

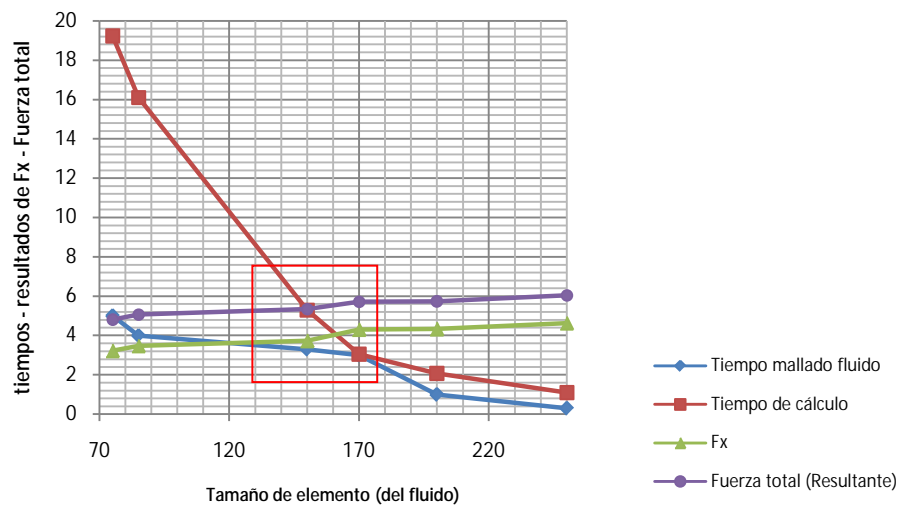
En la tabla y el gráfico siguientes es posible ver una similitud importante en los valores y resultados obtenidos, y principalmente en su tendencia, respecto de la utilización de tipo de tamaño de elemento relativo previamente utilizado. Los valores se mantienen dentro de los mismos rangos, y el tiempo de cálculo también se eleva en la medida que el tamaño disminuye, alcanzando un punto en que progresa excesivamente en relación a la mejora en la precisión de

los resultados obtenidos. Se escogerá entonces los valores 150-50-40 como los ideales para una óptima relación entre precisión y tiempo de cálculo, y 85-65-35 como valores óptimos cuando se desee obtener una mayor precisión a costa de un mayor tiempo de cálculo.

Tabla 7 - Variación del tamaño de elemento absoluto en el mallado del fluido.

Tamaño <i>absoluto</i> elementos de mallado del fluido (fluido – límites – zona contacto con el vehículo)	Tiempo para el mallado del fluido (en min y seg)	Tiempo de cálculo de la solución (en min y seg)	Resultado para Fx (en Newtons)	Resultado fuerza total resultante XYZ (en Newtons)
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

*Condiciones fijas:* Tipo de elemento de Mallado Fluido absoluto, Tamaño de elemento del mallado FEM del vehículo 25 mm. Análisis a 30 Km/h – Mod. Turbulencia k-ε



Es importante en este punto hacer notar que los valores sugeridos en los tutoriales correspondían al rango 170 – 75 – 50. Valores que de acuerdo a la tabla de resultados entregan un tiempo de cálculo algo menor, pero una **precisión mucho menor** si se consideran los rangos obtenidos en todos los test realizados y la tendencia de valores en ellos, que se asemeja mucho más a los ensayos con los valores ya mencionados como óptimos.

Bajo ésta configuración es destacable también el menor tiempo de cálculo que ofrece el mallado con tipo de tamaños de elemento relativo v/s el absoluto con 12 minutos aproximadamente, contra los 20 minutos del tipo de tamaño de elemento absoluto para resultados de similar precisión. Sin embargo para rangos donde los elementos se hacen más pequeños es el mallado absoluto el que ofrece menores tiempos de cálculo.

Para la etapa de la realización de la malla del fluido el tipo de tamaño de elemento absoluto entrega valores siempre menores a al tipo de tamaño de elemento relativo, sin embargo **debe considerarse la suma de los tiempos de cálculo para el mallado del fluido y el tiempo de cálculo de la solución** para obtener el valor real del tiempo de cálculo de la simulación.

## 7. PROPUESTAS PARA MODIFICACIONES.

En las imágenes siguientes 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 para el cual la investigación y trabajo práctico realizado en el desarrollo de ésta tesina han sido un aporte.

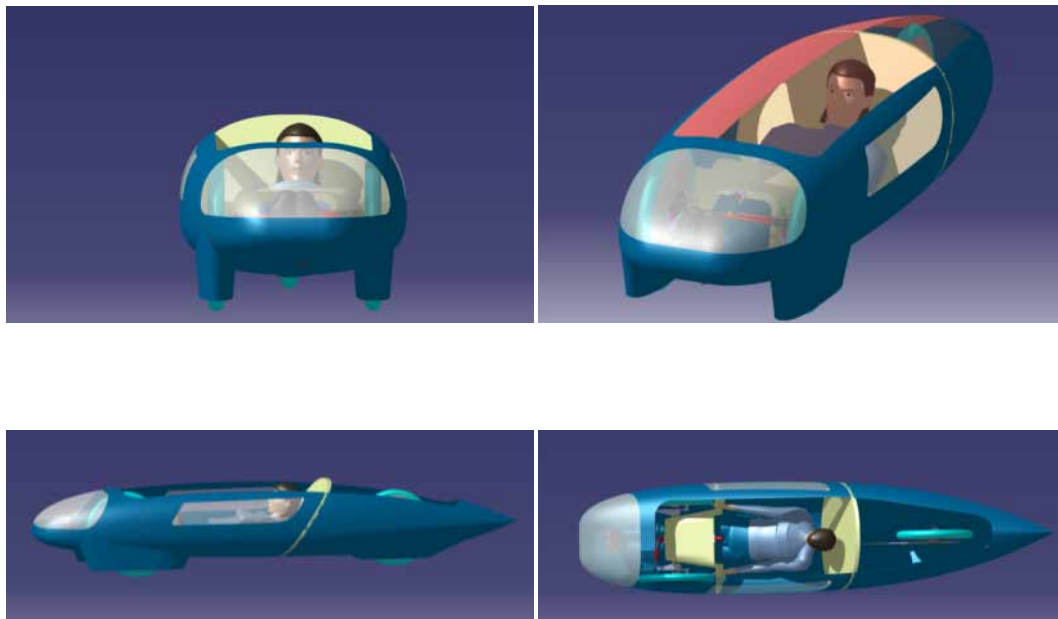


Ilustración 37 - Renders del primer modelo del coche mostrando piloto y zonas de visibilidad.<sup>66</sup>

---

<sup>66</sup> Renders gentileza del equipo oficial del vehículo.







### 7.1. Evolución de la forma del vehículo.

La siguiente tabla muestra gráfica y numéricamente la evolución de la forma del coche, con modificaciones introducidas por parte del autor de ésta tesina o directamente por el equipo del vehículo

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 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. Posteriormente se adjunta una serie de capturas desde el software con el que se modeló el vehículo, Rhinoceros 3D v4.0, con los diferentes modelos, mostrados desde diferentes ángulos y vistas, con algunos comentarios respecto a las variaciones en cada uno de ellos.

**Tabla 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 <sup>2</sup>	3.991 N	0.291	<b>0.091</b>
2 	0.305 m <sup>2</sup>	4.151 N	0.313	<b>0.095</b>
3 	0.303 m <sup>2</sup>	3.968 N	0.302	<b>0.091</b>
4 	0.307 m <sup>2</sup>	3.497 N	0.262	<b>0.080</b>
5 	0.306 m <sup>2</sup>	3.463 N	0.261	<b>0.079</b>
6 	0.304 m <sup>2</sup>	3.319 N	0.251	<b>0.076</b>

## Modelo 01.

El primer modelo fue directamente suministrado por el equipo que trabajaba en el vehículo, y 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 anterior, 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 imagen siguiente, 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 má 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 vorticidad y presiones que tendían a restar penetración.

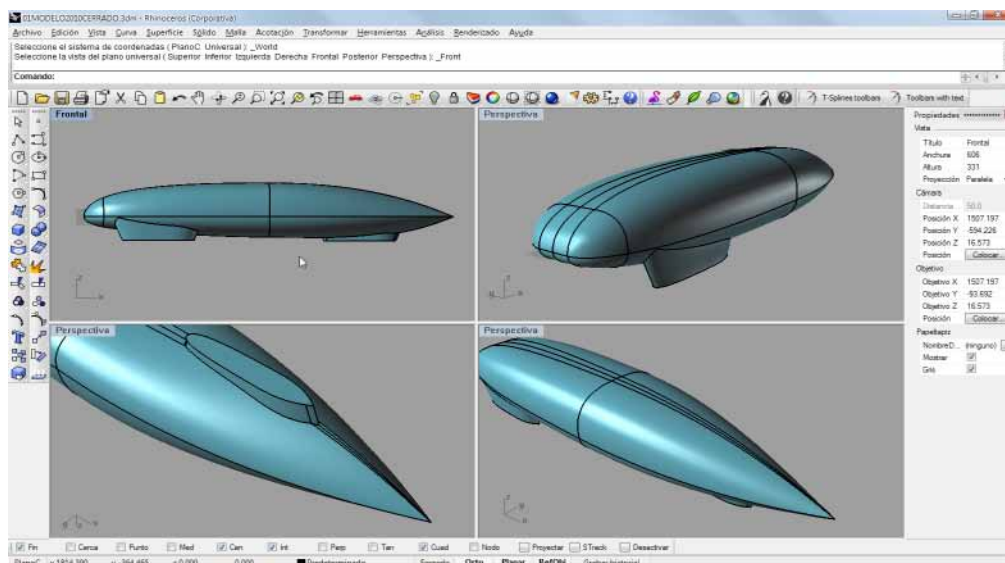


Ilustración 38 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 01

- 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

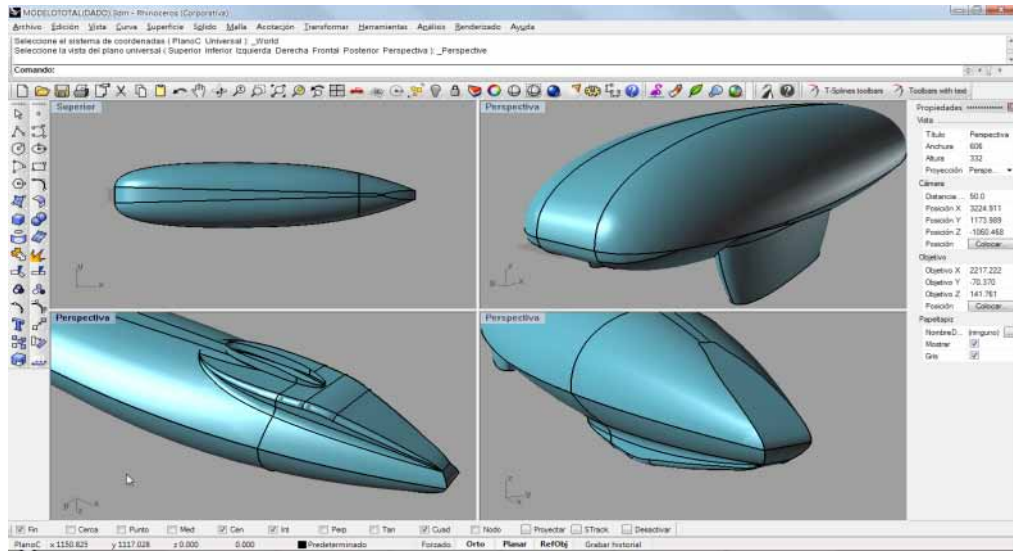


Ilustración 39 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 02

## Modelo 03.

El modelo 03 fue el primero planteado por el autor de ésta tesina y constituía un remodelado del anterior.

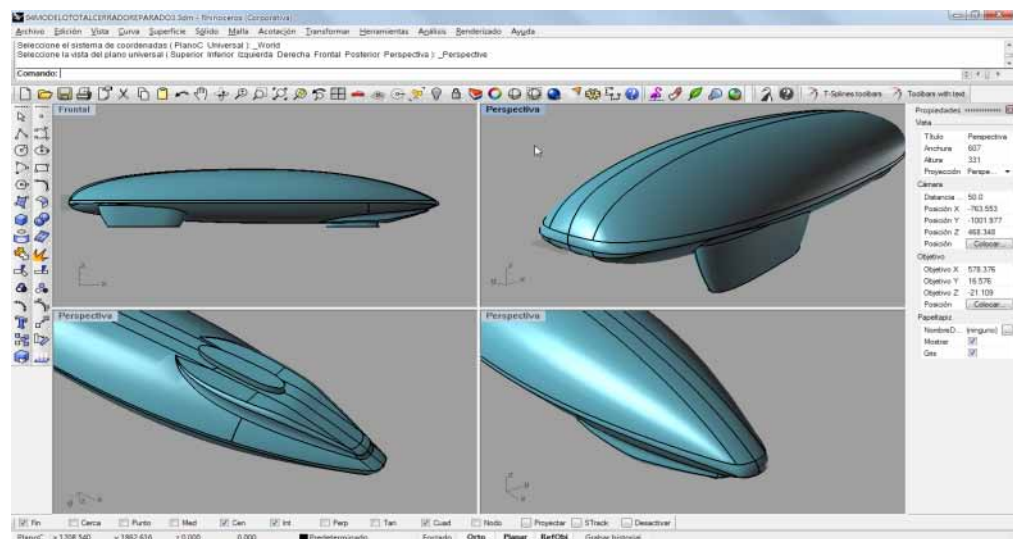


Ilustración 40- Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 03.

#### 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 ese entonces. A la postre 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 también suministrado por el equipo, previamente a la integración de las propuestas del autor de ésta tesina con las propuestas del equipo, mantenía la geometría principal del Modelo 02, pero modificaba la zona posterior.

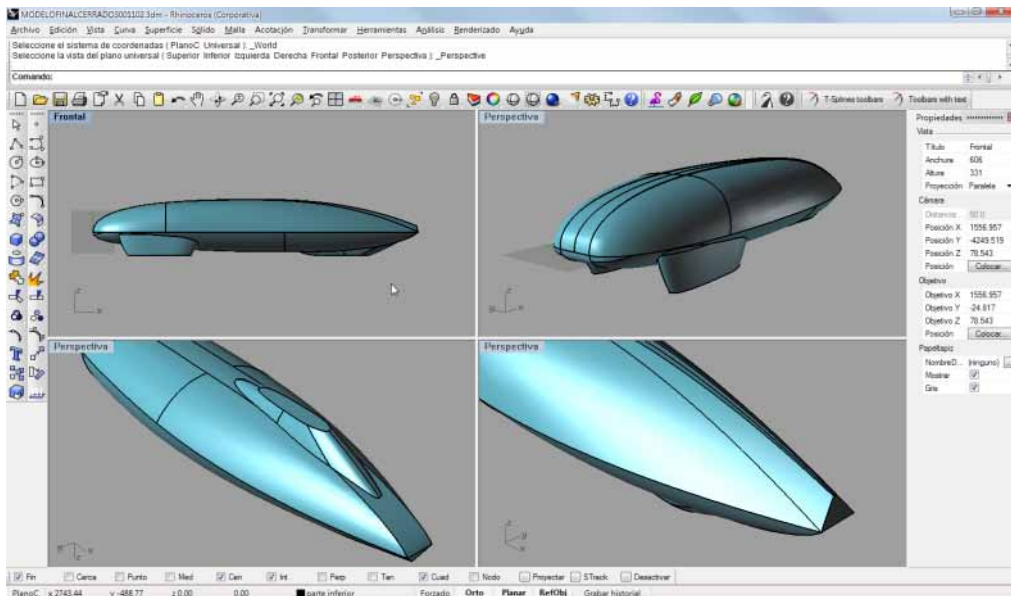


Ilustración 41 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 04.

#### Características de forma.

- La zona del protector de la rueda trasera pasaba a integrarse más suavemente a la geometría principal, aunque aun 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 rigidizaba 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 del equipo del vehículo que integraba algunas correcciones de modelado realizadas por el autor de ésta tesina.

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 ilustración 37.
- 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.

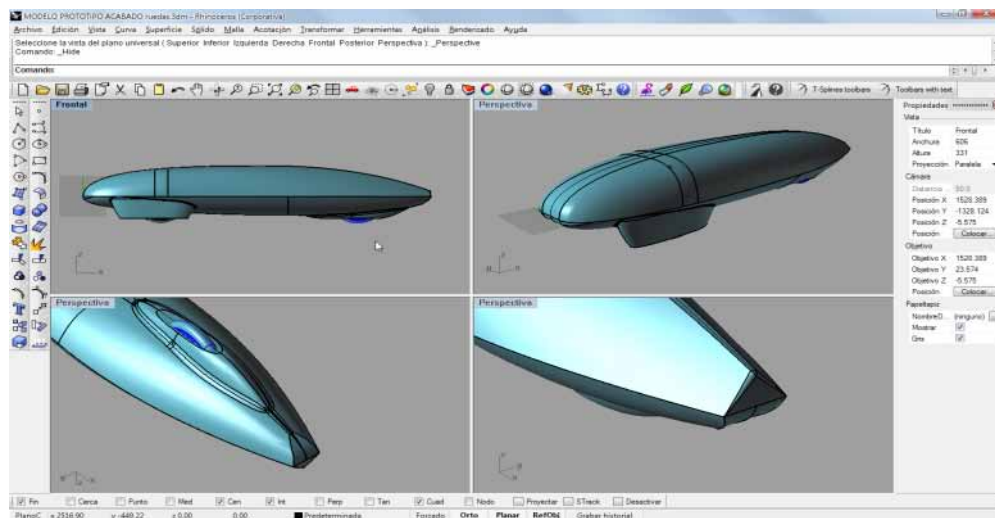


Ilustración 42 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 05.

### Modelo 06.

El modelo 06 fue propuesto por el autor de ésta tesina, integrando todo lo aprendido 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.

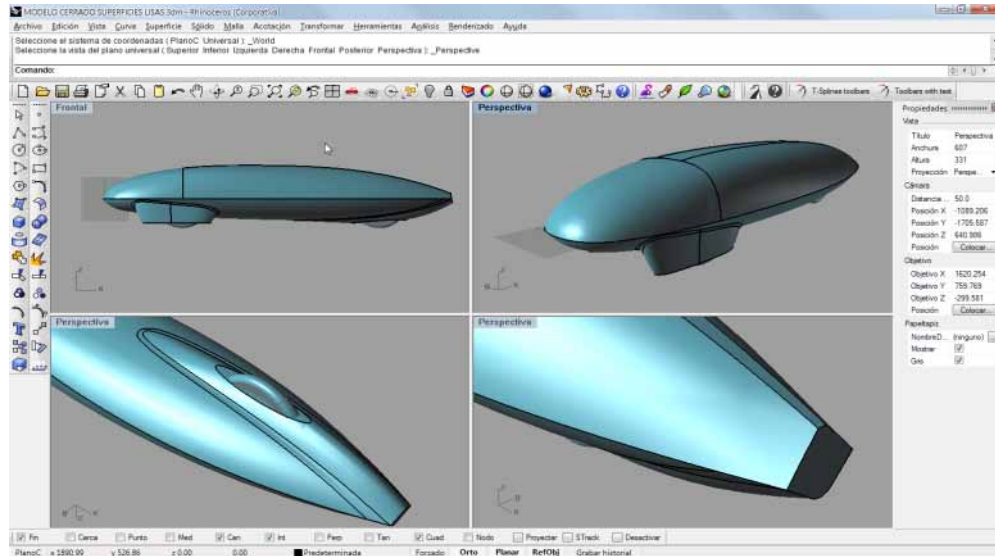


Ilustración 43 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 06.

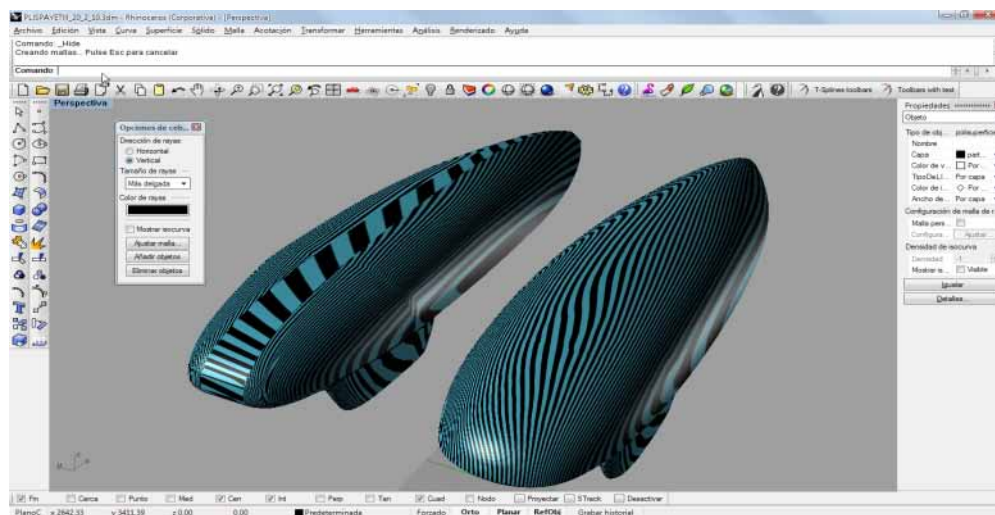
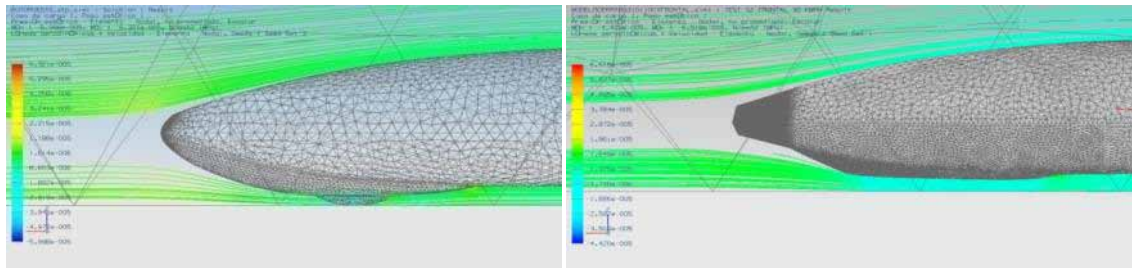


Ilustración 44 - Comparativa de la continuidad entre los modelos 04 y final.

#### Características de forma.

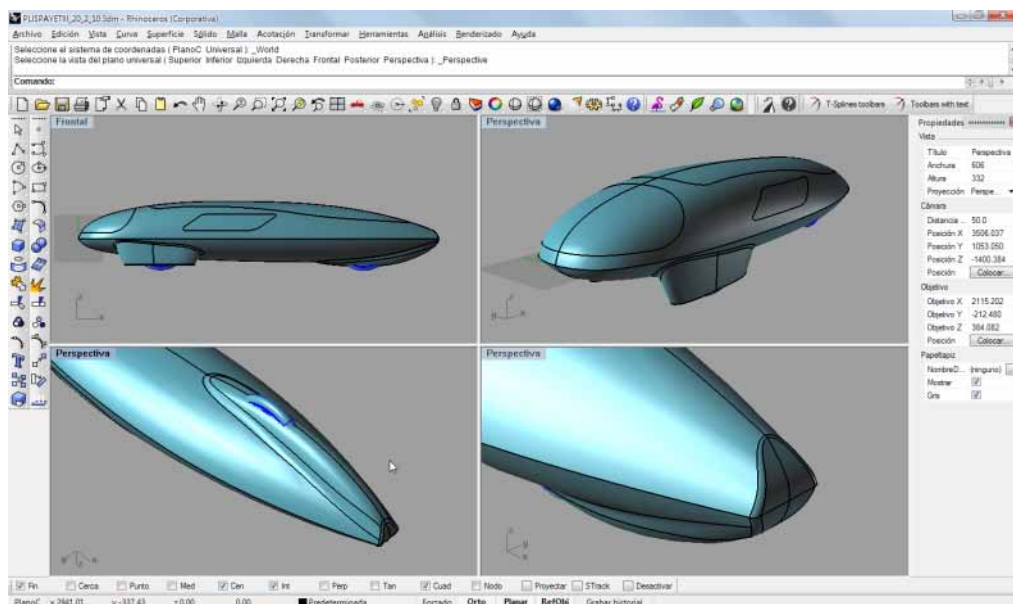
- El modelo modificó la geometría frontal, manteniendo el perfil más agudo propuesto previamente, pero además se agudizó también su forma vista en planta, eliminando la zona recta que presentaban los modelos previos, lo que distribuiría el flujo de mejor manera, presentando una menor superficie de choque.
- 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 rediseño 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 aun presentaba un corte recto como remate.



**Ilustración 45 - 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, planteado en conjunto con el equipo del coche y modelado finalmente por el autor de ésta tesina en Rhinoceros 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.



**Ilustración 46 – Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 – Modelo Definitivo**

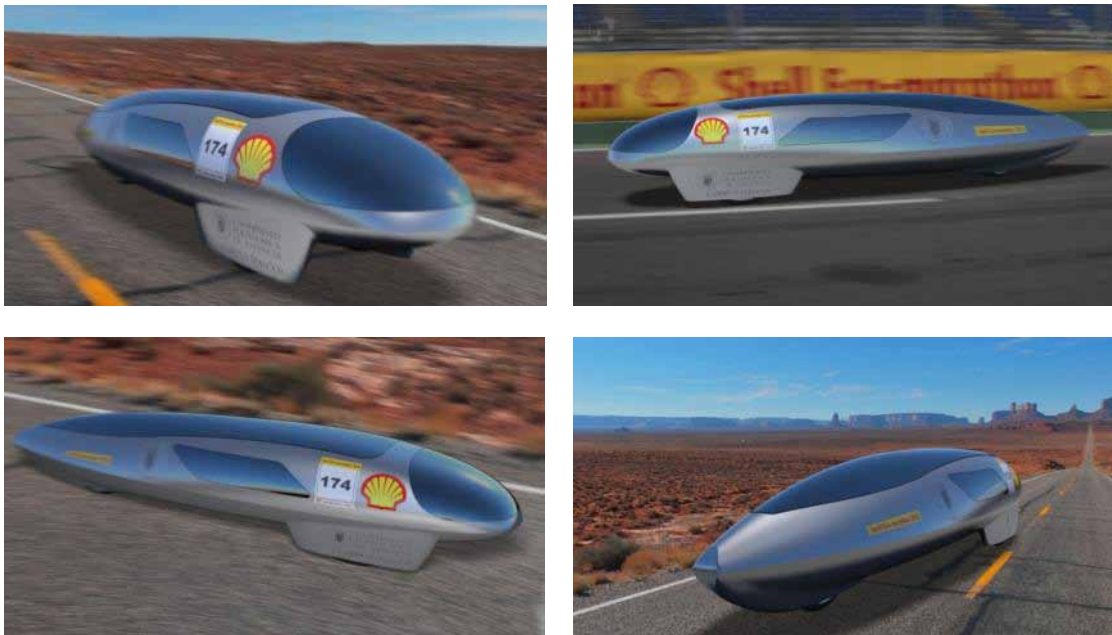
### Características de forma.

- 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 ilustración nº44.
- 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 ilustración nº45.
- 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.

#### Representación foto-realista del modelo final.

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 éste apartado y un breve video, los que se generaron teniendo como objetivo una adecuada presentación gráfica para ésta tesina, pero también fueron entregados al equipo del vehículo en caso de que fuese necesario dar a conocer el modelo previo a la fabricación.



**Ilustración 47 - Imágenes foto-realistas del Vehículo, realizadas por el autor de esta tesina.<sup>67</sup>**

---

<sup>67</sup> Las imágenes han sido realizadas mediante la importación del modelo de Rhinoceros a 3D Studio Max 2009, y renderizadas con el motor V-Ray v1.5



Ilustración 48 - Vehículo IDF 2010, en la pista de la Shell Eco-Maratón 2010.<sup>68</sup>

## 8. CONCLUSIONES OBTENIDAS.

Para la realización de ésta tesina se han realizado 14 series de análisis con más de 150 simulaciones CFD en total, utilizando, como se ha establecido, el software de Siemens NX v7 y su módulo de simulación avanzada. La serie final de análisis se entrega completa en la documentación electrónica que se adjunta con ésta tesina.

La realización de ésta considerable cantidad de simulaciones ha otorgado una cierta soltura en el dominio del software en los módulos específicos que participan en la obtención de las soluciones y para el tipo de estudios aerodinámicos llevados a cabo, lo que ha permitido pese a no contar con una base teórico-matemática totalmente sólida, comprender de forma correcta el comportamiento aerodinámico del vehículo.

Lo anterior ha permitido a su vez ir un poco más allá de lo que se había planteado originalmente como tesina, es decir, la realización de análisis a los modelos del vehículo del IDF y el planteamiento de propuestas de mejoras basadas en dichos análisis. A raíz de la mejor comprensión que se ha ido obteniendo, también se ha podido también analizar el comportamiento del software, modificar sus opciones de manera tal que los análisis realizados logren ser más precisos y más veloces.

Esto ha dado lugar a la generación de aportes no considerados en los inicios de éste trabajo, como por ejemplo el establecimiento de perfiles de valores que, frente a ciertas condiciones, permiten obtener resultados precisos con menores costos de tiempo o definir los puntos donde la relación de resultados sacrifica un tiempo excesivo sin ganar en precisión.

También se ha podido realizar con mayor propiedad, al entender las ventajas y desventajas que el software presenta en el proceso de la obtención de los coeficientes y perfiles aerodinámicos de un vehículo, una evaluación de las características de NX como herramienta a usar para estos fines.

---

<sup>68</sup> Fotografía gentileza de Vicente Colomer, jefe del equipo del vehículo del IDF y tutor de ésta tesina.

A continuación se exponen algunas temáticas donde se han podido obtener conclusiones y resultados que merecen ser registrados como corolario al trabajo desarrollado a lo largo de la realización de éste documento.

### Revisión de la hipótesis.

El planteamiento inicial de una hipótesis de trabajo ha sido también una de las razones por las que, una vez que se han realizado las tareas mínimamente requeridas por el planteamiento inicial de la tesina, se ha continuado su desarrollo, con la idea de demostrar o desmentir éste razonamiento inicial, aun cuando los resultados obtenidos ya tendían hacia una respuesta positiva.

*“La utilización de la plataforma NX, y de su solver NX THERMAL / FLOW resulta adecuada y suficiente para el desarrollo de análisis CFD que aporten datos precisos y útiles al proceso de desarrollo y optimización aerodinámica de un vehículo terrestre, y es posible el planteamiento de un método específico a seguir para su ejecución.”*

Disgregando las ideas expuestas en la hipótesis inicial, es posible decir que **sin duda el software NX y su módulo para simulación avanzada resultan adecuados y suficientes para el desarrollo de estos análisis**. El software en general entrega resultados robustos y fiables, coherentes entre sí al momento de modificar las condiciones externas. No obstante lo anterior es posible realizar **una crítica a su modalidad de entrega de datos**. Si se compara la entrega de datos de NX con softwares especializados en CFD aerodinámico como por ejemplo STAR CCM+ utilizado por la mayoría de los desarrolladores de automóviles esta podría mejorar. Para encontrar los datos numéricos que son claves en éstos análisis se debe acudir a un fichero que queda recogido en el directorio de trabajo, y que resulta bastante “árido” de comprender.

Para la realización de ésta tesina se tuvo la fortuna de contar con el apoyo vía e-mail del consejo experto de **Timoteo Briet Blanes** quien tuvo la disponibilidad para atender una serie de consultas en los inicios del desarrollo de ésta tesina, claves para lograr comprender estos datos y definir cuáles resultaban útiles para los objetivos que se tenían y cuáles no. Los softwares especializados por el contrario entregan los datos con claridad inclusive calculando automáticamente el  $C_x$ .

Tampoco resulta particularmente sencillo averiguar la utilización de todas las herramientas gráficas de post-procesado, y afortunadamente en éste aspecto la experiencia previa en la utilización de una amplia gama de softwares por parte del autor de ésta tesina, tanto en el contexto de la experiencia profesional y académica como durante el mismo máster CAD CAM CIM fue bastante útil para comprender y acceder a los diversos menús y opciones de los niveles más ocultos del software. Este aspecto sin embargo no es particularmente más “amigable” con el usuario en los softwares especializados, que en general arrastran interfaces que provienen de sistemas operativos robustos y creados para uso profesional como UNIX o SOLARIS, las que están lejos de la usabilidad de lo que el usuario promedio puede conocer a través del uso de Windows, MacOSX o Linux. Esto los hace muy difíciles de seguir sin asesoramiento o tutoriales adecuados. En éste aspecto NX tiene la virtud de mantener una interface similar al resto de la aplicación, la que se presenta bastante más accesible al usuario no experto que pueda provenir del CAD o el modelado 3D.

Respecto a la posibilidad de establecer para NX un método específico a seguir para la ejecución de éste tipo de análisis, ello ha sido posible, y ha sido además, como se ha dicho, el inicio de una investigación que ha ido un poco más allá de lo buscado originalmente. Se ha planteado una serie de pasos a recrear en orden para llegar a un desarrollo exitoso de los análisis sin pasar por un proceso de “descubrimiento” del uso del software. También y a raíz de las tablas comparativas entre resultados y detalles sobre el paso a paso, se ha pretendido



evitar un seguimiento a ciegas del método planteado, como si de un tutorial se tratara, sino facilitar la comprensión de cada etapa y una racionalización tanto del proceso como de sus resultados.

De acuerdo a la retroalimentación obtenida desde el equipo del vehículo, no resulta fuera de lugar decir que se ha realizado un aporte importante para la definición de la forma de la carrocería del coche, aporte que se ha podido realizar en gran parte debido a la utilidad que ha prestado la información obtenida a partir de los análisis. Ello permite aseverar con confianza que, como se planteaba en la hipótesis, las simulaciones CFD han resultado útiles al proceso de desarrollo y optimización aerodinámica del vehículo.

Cabe destacar que afortunadamente también se ha podido aportar al desarrollo del vehículo debido al conocimiento previo con que se contaba respecto al software que se ha escogido para realizar el modelado, Rhinoceros 3D, de cuyo uso avanzado en modelado para Diseño Industrial el autor de ésta tesina lleva 5 años impartiendo clases en la Universidad de Santiago de Chile a nivel de pregrado y postgrado.

### Logro de objetivos.

Como fundamentos de la investigación y trabajo a realizar se han planteado inicialmente una serie de objetivos muy concretos a lograr de modo genérico y específico.

Efectivamente el objetivo planteado a nivel general, que consiste en la realización del proceso de simulación CFD con NX y el planteamiento de mejoras a la forma ha sido realizado, y ha sido realizado con un éxito que resulta mensurable a través de los mismos análisis y simulaciones, las que confirman una mejora progresiva del comportamiento aerodinámico de la carrocería del vehículo en la medida que se han integrado las propuestas tanto del equipo como de quien escribe.

- La presente tesina documenta el proceso llevado a cabo, paso a paso como se ha comentado, lo que se plantea originalmente como uno de los objetivos específicos a lograr. Esta documentación del proceso está también apoyada por una propuesta de "paper" que resume la labor realizada y, con la idea de dotar de claridad y sencillez a la documentación la tesina está dividida en capítulos, resultando claves los apartados 4 y 5 para la comprensión del trabajo realizado
- Se ha planteado un método concreto para la realización de éste tipo de análisis como se ha detallado previamente en estas conclusiones, el que además integra perfiles numéricos de resultados determinando ciertas tendencias de comportamiento.
- Uno de los aspectos más importantes a desarrollar con éxito para quien escribe consiste en lograr que ésta tesina pueda considerarse un documento introductorio al CFD y la aerodinámica de vehículos para profesionales que, como el autor de ésta tesina, no sean expertos en el tema, e inclusive no provengan de áreas afines a la física o la mecánica de fluidos. Para quienes no cuentan con una formación sólida en ciencias la comprensión de éstos factores se sustentará en los aspectos numéricos más básicos del ámbito, pero principalmente en una comprensión visual e intuitiva que deberá surgir de una explicación clara y detallada de los múltiples temas que entran en juego para la realización de éste tipo de análisis.

Si bien en este sentido no existe aún una retroalimentación adecuada para considerar que el objetivo se ha cumplido con éxito se ha puesto especial énfasis en su logro, esmerando detalles y explicaciones en cada apartado de la tesina con miras a

permitir a quienes no cuentan con una formación al respecto, pero si pueden llegar a necesitar la realización de éste tipo de análisis de forma sencilla y enfocados en la práctica y los resultados concretos más que en una aplicación teórica para lo cual sin duda se deberán adquirir conocimientos fundamentales del área y no bastará una comprensión intuitiva del tema.

- La definición del alcance y las capacidades reales para la realización de análisis CFD de NX frente a otras aplicaciones se ha tratado de establecer mediante el breve levantamiento del estado del arte realizado, donde se comparan diversos softwares comerciales y gratuitos que se utilizan para la realización de CFD aerodinámico. Si bien éste estudio es preliminar y puede ser inicio de uno más profundo es posible ya definir que NX resulta útil para éste tipo de simulaciones hasta un punto limitado. Lo anterior porque no incorpora por ejemplo las capacidades de mallado de formas complejas de otras plataformas, y no tiene como ya se ha dicho, una entrega de resultados plenamente adecuada.

Sin embargo también resulta posible aventurar que el desconocimiento de las capacidades de NX para éstos objetivos conspira contra su mayor utilización, pues además de las desarrolladoras de vehículos a nivel profesional, existe una amplia gama de estudios y desarrollos que podrían verse beneficiados de la utilización del software, que además puede ser usado como plataforma de modelado de gama alta, sin necesidad de acudir a aplicaciones especializadas sólo para las necesidades de análisis FEM.

El contar con una sola aplicación capaz de realizar el desarrollo completo de un vehículo es sin duda una de las mayores ventajas de NX frente a software especializado solamente en elementos finitos entendiendo que las prestaciones que pueda no entregar no resultan imprescindibles, pues es capaz de entregar con precisión todos los resultados necesarios para un estudio adecuado.

Por otro lado, debe decirse que el aspecto de **la ayuda de NX resulta deficiente** y muy poco claro. Es tal la magnitud de la información a incluir y las capacidades del software que los temas se hacen difíciles de encontrar y su hipervinculación no resulta tampoco óptima.

No toda la ayuda se encuentra traducida, pese a que se utiliza la versión en español del software, y muchos de los tópicos solo cuentan con un par de líneas de texto explicándolos, lo que resulta insuficiente. Existe una carencia importante de diagramación y elementos gráficos que transformen la ayuda del software en algo realmente utilizable por usuarios no expertos.

### Tareas futuras.

Como en todo desarrollo de investigación o trabajo, en la medida que van se progresa en la labor van surgiendo nuevas interrogantes o ideas, sustentadas por el conocimiento que se va adquiriendo a través del mismo trabajo en progreso. Es por ello que pese a que objetivos y tareas concretas planteados al comienzo de ésta tesina se consideran logrados de forma plena o en el peor de los casos satisfactoria, han surgido nuevas ideas que corresponde plantear aquí a modo de registro, y con la intención que puedan servir como inicio de nuevas investigaciones o desarrollos futuros.

- El estudio del concepto de **"suelo rodante"** mediante CFD. De acuerdo a las diferentes fuentes consultadas, en especial el artículo de *Perrier, Bonvín y Ibarrola, aparecido en Mecánica Computacional n°23, Bariloche, Argentina 2004* <sup>69</sup> y a la opinión experta del mencionado *Briet Blanes*<sup>70</sup>, la implementación correcta de ésta condición de contorno es la única manera de considerar que la precisión del análisis CFD será la máxima posible. Sin embargo resulta de bastante dificultad hallar material que pueda orientar sobre el tema, y más aun si se trata de realizarlo en NX.

La implementación de ésta característica en los túneles de viento reales da cuenta de su importancia. Si bien se suele usar más en túneles destinados a pruebas de vehículos de competencia que en vehículos urbanos, normalmente el uso del CFD con fines académicos se enfocará en vehículos que participarán en competencias diversas, de rendimiento, capacidad, innovación, etc. por lo que debe considerarse un parámetro trascendente.

Pese a que se consideró un tema de interés para ésta tesina desde que la investigación lo hizo salir a la luz, la importancia de otros factores hizo imposible su adecuado desarrollo, y dado que las condiciones exactas a las que se mediría el rendimiento del vehículo estaban establecidas, resultaba menos necesario que en el caso de desarrollo de estudios más experimentales. La predicción del comportamiento del vehículo y el fluido a su alrededor en diversas condiciones de pista y a diferentes velocidades sólo se podrá establecer precisamente si se cuenta con éste factor.

- El desarrollo de la continuación del apartado número 5 de ésta tesina, donde se estudia la **relación entre el tamaño y tipo de elemento utilizado en el mallado de elementos finitos para CFD, la precisión de los resultados obtenidos y la velocidad de cálculo** debiese ser un tema a investigar con mayor profundidad y conocimientos previos de las bases científicas que explican las tendencias descubiertas.

La importancia de la realización de nuevas series de análisis en diferentes condiciones, con diferentes vehículos, con una resolución más fina entre cada análisis, permitirá confirmar las tendencias descubiertas y generar documentación específica sobre NX en éste tipo de análisis, la que hoy es inexistente en la práctica.

- El tipo de elemento utilizado, TRI3 Thin Shell, no ha sido variado en los análisis realizados para ésta tesina, pudiendo ser también un factor importante a tener en cuenta considerando que la mayoría de los softwares específicos de CFD utilizan hoy mallas extremadamente finas y compuestas por polígonos de muchos lados y han abandonado los triángulos para éstos fines. Si bien NX tiene la capacidad de crear mallas de diferente modo, no hay una referencia respecto de la influencia de dichos tipos de mallado y sus resultados concretos.

El cálculo mediante elementos finitos en formas de mayor complejidad podría verse beneficiado en velocidad y precisión si el elemento de malla es el más adecuado. Al respecto queda como trabajo pendiente un análisis más acabado del tema en NX, realizando pruebas controladas y documentando el proceso para obtener la modalidad que permita resultados óptimos.

---

<sup>69</sup> [4]

<sup>70</sup> [5]

## 9. BIBLIOGRAFÍA<sup>71</sup>.

- [1] M. Luis Pérez Rojas, Dr. Ing. Naval and P.S. Juan Miguel Sánchez Sánchez, Dr. Ing. Naval Ricardo Zamora Rodríguez, Dr. Ing. Naval Rodolfo Bermejo, Dr. Ing Naval, "La calidad en el software . Validación de " CFD " ( Computational Fluid Dynamics ).," *Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (UPM)*, 2008, pp. 1-19.
- [2] ANSYS Fluent INC., "A Brief History of Computational Fluid Dynamics," 2008.
- [3] J.A. Francisco Peña, "En el túnel de viento. Importancia de la aerodinámica en el diseño de carrocerías.," *CESVIMAP*, vol. 59, 2007, pp. 12-15.
- [4] 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, 2004, pp. 1-21.
- [5] T. Briet Blanes, "Simulación CFD y Túnel de viento," *The F1.com*, 2009.
- [6] E. Frías Valero, "APORTACIONES AL ESTUDIO DE LAS MAQUINAS ELECTRICAS DE FLUJO AXIAL MEDIANTE LA APLICACION DEL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.," 2004, pp. 140-352.
- [7] J.H. Batchelder, "A CFD Investigation of Potential Aerodynamic Enhancements to a Microcar Class Vehicle.," *Baseline*, 2009.
- [8] N. Nigro, J. Delia, M. Storti, and G. Franck, *Análisis aerodinámico de un automóvil mediante CFD*, Santa Fe, Argentina: 2007.
- [9] T. Briet Blanes, "Apoyo Técnico CFD," *congreso I Internacional de ingeniería Mecánica, Diseño industrial e ingeniería industrial*, vol. 24, 2006.
- [10] F.R. García, "ANALISIS DE FLUIDOS (CFD) DE UNA VALVULA DE SEGURIDAD.," *Trabajos de Investigación Operativa*, vol. 7, 2001, pp. 17-29.
- [11] A.M. Yebra, "Aerodinámica VOLVO S40," *ETSII U.Politécnica de Madrid*, 2004, pp. 1-28.
- [12] W. Hucho, L. Janssen, and H.J. Emmelmans, "The Optimization of Body Details, A method for reducing the aerodynamic drag of road vehicles.," *Optimization*, 1976.
- [13] R. Buchheim and B. Leie, "The development of the new AUDI 100—a new approach in aerodynamic passenger car design'.,," *Internat. Symposium Vehicle Aerodynamics*, Wolfsburg: 1982.

---

<sup>71</sup> Esta bibliografía ha sido generada automáticamente mediante el software **Mendeley Desktop v0.9.7** a partir de la ficha digital creada por el autor de esta tesina para cada artículo, texto o publicación citada o consultada para la realización de este documento.

- [14] J. Santin, C. Onder, J. Bernard, D. Isler, P. Kobler, F. Kolb, N. Weidemann, and L. Guzzella, *The world's most fuel efficient vehicle, Design and development of PAC car II. Parte 2.pdf*, VDF, 2007.
- [15] J. Santin, C. Onder, J. Bernard, D. Isler, P. Kobler, F. Kolb, N. Weidemann, and L. Guzzella, *The world's most fuel efficient vehicle, Design and development of PAC car II. Parte 1.pdf*, 2007.
- [16] M. Argento, S. Barone, F. Bianconi, P. Conti, and E. Rosati, "Reverse engineering and CFD analysis: A case study," *Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling*, M. Hamza, B6, STE 101, 2509 DIEPPE AVE SW, CALGARY, ALBERTA T3E 7J9, CANADA: ACTA PRESS, 2004, pp. 323-328.
- [17] X. Chen, D. Wang, Y. Wu, and Z. Ma, "Simulation of the Autobody Aerodynamics for Car Interior Noise Control," *2009 IEEE 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER-AIDED INDUSTRIAL DESIGN & CONCEPTUAL DESIGN, VOLS 1-3 - E-BUSINESS, CREATIVE DESIGN, MANUFACTURING - CAID&CD'2009*, Pan, YH and Sun, SQ and Zhou, MQ and Lin, ZK and Hu, ZY and Hyungjae, M, 345 E 47TH ST, NEW YORK, NY 10017 USA: IEEE, 2009, pp. 634-637.
- [18] Y. Zhang, Z. Zhang, S. Luo, and J. Tian, "Aerodynamic Numerical Simulation in the Process of Car Styling," *E-ENGINEERING & DIGITAL ENTERPRISE TECHNOLOGY VII, PTS 1 AND 2*, Cheng, K and Liu, YX and Xu, XP and Xie, HL, LAUBLRUTISTR 24, CH-8717 STAFA-ZURICH, SWITZERLAND: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD, 2009, pp. 862-865.
- [19] M. Koike, T. Nagayoshi, and N. Hamamoto, "Research on Aerodynamic Drag Reduction," *Package Engineering*, pp. 11-16.
- [20] T. Defraeye, B. Blocken, E. Koninckx, P. Hespel, and J. Carmeliet, "Computational fluid dynamics analysis of cyclist aerodynamics: Performance of different turbulence-modelling and boundary-layer modelling approaches.," *Journal of biomechanics*, 2010, pp. 1-46.
- [21] "CFD Online," 2010.
- [22] "Nastran History," 2002.
- [23] "STAR-CCM + Product Information," *Engineering*, 2010.
- [24] D. Nagy, "CFD is changing From " Hero Mountain " to " Payback Meadow ", " *Dynamics*, vol. 25, 2005, pp. 1-32.
- [25] "FloEFD," *Mentor Graphics*, 2010.
- [26] "PAM-FLOW CFD Physics Solver," *ESI Group*.
- [27] C.P. Shen-Yeh, "The Unofficial History of ANSYS," 2006.
- [28] "CFX History," 2010.
- [29] "ANSYS FLUENT Flow Modeling Software," 2010.
- [30] "FLOW-3D," *Flow Science*, 2010.

- [31] "About OpenFOAM," 2010.
- [32] "OpenFOAM Community : CFD in C ++," 2010.
- [33] E. Sozer, "Free CFD," 2010.
- [34] F. Aguirre, "ANÁLISIS AERODINAMICO DEL VEHÍCULO PARA LA COMPETENCIA ECO-SHELL," 2009, pp. 19-36.
- [35] R. Duquette and K. Duffy, "NX4 – External Flow Application: Flow over selected ATV parts," 2006, p. 23.
- [36] R. Jacob D, *Modelado avanzado de superficies mediante Rhinoceros, Material de apoyo a la cátedra "Taller Experimental de Modelos", Carrera de Tecnología en Diseño Industrial, Universidad de Santiago de Chile., 2007.*
- [37] 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.
- [38] J.D. Anderson, *Aerodinamica- Computational Fluid Dynamics The Basics With Applications.pdf*, 1995.

## 10. ANEXOS.

### PROPUESTA DE PAPER.

#### 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"<sup>72</sup>.

*Rubén Jacob D., Diseñador Industrial Universidad de Valparaíso, Chile, Máster en Diseño Gestión y Desarrollo de Nuevos Productos, Universidad Politécnica de Valencia, España.*

*Escuela Técnica superior de Ingeniería del Diseño. Instituto de Diseño y Fabricación, Máster en Diseño y fabricación integrada asistidos por ordenador (CAD CAM CIM). Universidad Politécnica de Valencia.*

**Palabras clave:** CFD, NX, análisis computacional de fluidos, aerodinámica, vehículo de alto rendimiento.

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

#### Resumen.

---

El presente trabajo se enfoca en el establecimiento de un procedimiento para la realización de **análisis de rendimiento aerodinámico computacional** mediante el software NX y, en base a los resultados obtenidos en dichos análisis, en el planteamiento de propuestas de optimización de la carrocería del vehículo para la competición "**Shell eco maratón 2010**" que desarrolla el Instituto de Diseño y Fabricación de la Universidad Politécnica de Valencia.

Para el logro de los objetivos de éste trabajo se ha procedido, a partir del modelo CAD del vehículo, a la realización de una serie de simulaciones de acuerdo a las condiciones en las que el vehículo competirá, las que a continuación han sido registradas y comparadas para establecer tendencias en el comportamiento aerodinámico del vehículo existente. Con posterioridad se han propuesto modificaciones a la geometría original las que persiguen mejoras en el comportamiento observado a través de los análisis CFD (Computational Fluid Dynamics) realizados, siendo incorporadas nuevos modelos CAD.

Este procedimiento se ha llevado a cabo hasta llegar a una optimización con el nivel esperado para el vehículo, validando durante su ejecución las herramientas para la realización de análisis aerodinámicos que posee la aplicación NX, y permitiendo a la vez la definición de un método a seguir en el desarrollo de éste tipo de análisis.

#### 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 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

---

<sup>72</sup> *El presente paper constituye un resumen de la tesina presentada para la obtención del título de "Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos por Computador" en la Universidad Politécnica de Valencia en el curso 2009-2010.*

competition " Shell eco maratón 2010 " that develops the Institute of Design and Manufacture of Universidad Politécnica de 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. 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.

## Introducción.

---

La realización de **simulaciones computacionales de dinámica de fluidos** (CFD) para la optimización del comportamiento aerodinámico de vehículos ha progresado de forma veloz en los recientes años, y ha pasado desde considerarse una disciplina de alta complejidad y reservada a grandes empresas o centros de investigación a estar disponible en aplicaciones comerciales de mediana complejidad, comprensibles por ingenieros no necesariamente expertos en el área y, gracias a su costo decreciente, a ser un recurso cada vez más útil en el proceso de desarrollo de diversos productos. La variedad de softwares con capacidades CFD, especializados o de propósitos generales es cada vez más amplia, lo que genera la necesidad de evaluarlos y tomar decisiones respecto a cuáles son los adecuados de acuerdo a los requerimientos de cada situación. Este trabajo entre otros aspectos evalúa las capacidades de la plataforma **PLM de Siemens, NX v7**, en particular de su módulo de simulación avanzada y su solver de resolución CFD (Flujo/Térmico de la aplicación NX).

El caso que se analiza es el proceso de desarrollo de la carrocería del vehículo que el Instituto de Diseño y Fabricación de la Universidad Politécnica de Valencia ha presentado para la competición internacional "**Shell Eco-Maratón 2010**", evento que estimula y premia desarrollo de vehículos de alto rendimiento, para lo cual el aspecto aerodinámico resulta fundamental.

En el presente trabajo la geometría inicial que se ha propuesto para este vehículo ha sido evaluada aerodinámicamente a través de un análisis CFD que simula condiciones similares a las que enfrentará en la competencia, definiendo a la vez un método a seguir para la realización de simulaciones CFD mediante NX. Con posterioridad, a la luz de los resultados obtenidos en los análisis realizados, se proponen modificaciones que sean capaces de optimizar su comportamiento aerodinámico. Este proceso es repetido hasta obtener una forma definitiva que tenga el desempeño esperado para el vehículo

Las modificaciones más trascendentes, el método seguido para la realización de los análisis, y las conclusiones obtenidas sobre los diversos aspectos de las simulaciones CFD llevadas a cabo son descritos en las siguientes páginas.

## Marco teórico.

---

La investigación de enmarca en el área de la aerodinámica y la dinámica de fluidos, disciplinas hacia las que se busca un acercamiento sencillo y claro a través de las herramientas computacionales del software NX.

### Aerodinámica.

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, (para efectos de los estudios aerodinámicos el fluido será aire) 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 éste sistema deben considerarse en todos los puntos de la superficie del vehículo, en la práctica casi infinitos, determinados por el tamaño extremadamente pequeño de las moléculas del fluido. 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 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 siempre será conocida la dirección del movimiento del fluido, o más bien la del automóvil, es posible descomponer esa fuerza total en dos componentes, 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**.

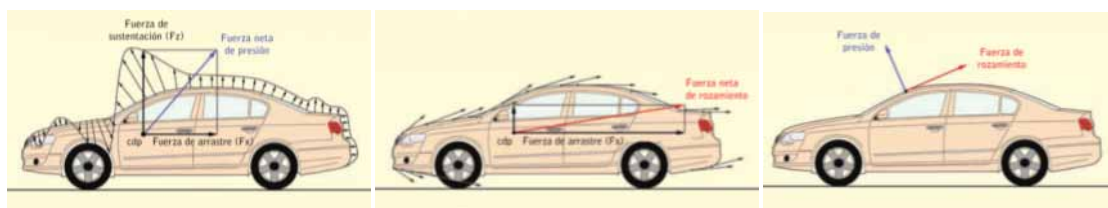


Ilustración 49 - Fuerzas Aerodinámicas, centro de presiones, y componentes en cada dirección.<sup>73</sup>

Coefficiente Aerodinámico.

Debido a complejidad de los efectos del aire sobre el vehículo y para hacer posible su estudio 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 conoce la velocidad, la densidad del aire, la proyección frontal del mismo, y se determinan el arrastre y la sustentación producida sobre el vehículo.

El coeficiente más importante en esta área es el “**coeficiente de arrastre**”, también llamado “**coeficiente aerodinámico**” o “**coeficiente de penetración**” y conocido por su notación  $C_x$ , que se determina mediante la siguiente fórmula:

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

$C_x$ =Coeficiente de Arrastre, será un número adimensional, es decir sin unidades.

$F_x$ =Fuerza de Arrastre, se obtendrá en túnel de viento o mediante CFD, en Newtons, N

$\rho$ =Densidad del Aire, es un valor conocido de 1,2 Kg/m<sup>3</sup>

$V$ =Velocidad del Vehículo/Aire, se supone conocido, y se expresa en metros por segundo, m/s

$S$ =Superficie frontal de referencia, corresponde al área de la proyección frontal del vehículo

<sup>73</sup> [3]

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 entre distintos automóviles lo más apropiado es comparar el valor conocido como  $SC_x$ , que resulta de multiplicar el  $C_x$  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  $C_x$  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.<sup>74</sup>

CAE, FEA, FEM Y CFD.

El Método de los elementos finitos o FEM (y por ende el CFD que se realiza mediante éste método), consiste en tomar un cuerpo y dividirlo en pequeños elementos, adyacentes entre sí, y que juntos se corresponden geoméricamente con el cuerpo original, de modo cada vez más perfecto mientras menor es el tamaño de cada uno de ellos y mayor cantidad de elementos. Esta idea básica permite que situaciones cuyo cálculo real resulta imposible de realizar dada justamente las infinitas operaciones que requieren, se vuelven posibles de calcular dado que si bien éstos elementos son pequeños y muchos, son finitos, y están también delimitados finitamente por sus bordes sean éstos bi o tridimensionales y obteniéndose, con la resolución individual de cada uno de ellos, la resolución del problema inicial. Este modelo aproximado solamente se acerca al modelo real, esta transformación se denomina "discretización del modelo". Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.<sup>75</sup>

El método FEM propiamente tal se considera originalmente desarrollado en 1943 por *Richard Courant*<sup>76</sup>, quien usó variantes para obtener soluciones aproximadas a sistemas oscilatorios. Posteriormente se mantuvo como un método casi exclusivo del ámbito de la investigación, principalmente en la industria aeroespacial y pudo presentar una aplicación práctica y eficiente sólo desde la aparición de los ordenadores potentes de los últimos años, comenzando su auge a partir de las investigaciones realizadas por la NASA en la década de los '60s, y convirtiéndose en un método para realizar análisis de situaciones complejas. Dichos análisis son denominados FEA (Finite Elements Analysis) y forman parte de la Ingeniería Asistida por Computador (CAE).

Actualmente el FEA es usado en una enorme gama de aplicaciones, como por ejemplo para la resolución de problemas de resistencia y comportamiento mecánico-estructural, de llenado de moldes de inyección de polímeros, y por supuesto, para la simulación del comportamiento de los fluidos, lo que se denomina CFD, y que se fundamenta en las ecuaciones de *Navier-Stokes*, un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido que se plantearon en 1825, los postulados de *Daniel Bernoulli* conocidos desde 1738, y otros planteamientos con una larga historia dentro de la física tradicional y de la mecánica de fluidos<sup>77</sup>.

El método de forma genérica se compone de tres etapas:

- La primera etapa se denomina **pre-procesado**, consiste en tomar un modelo geométrico con la calidad de modelado necesaria y, en el entorno informático adecuado, proceder a su discretización. Este proceso es conocido como "**mallado**" ya que se genera una grilla, una malla en la superficie del modelo producto de su subdivisión en elementos pequeños.

---

<sup>74</sup> [4]

<sup>75</sup> [6]

<sup>76</sup> [38]

<sup>77</sup> [38]

Posteriormente se determinan las “condiciones de contorno”, que consiste en aportar al software los datos necesarios para asimilarlo a las condiciones reales del problema, por ejemplo en el caso de problemas CFD es necesario determinar la velocidad del fluido, su temperatura, las superficies de contacto con las paredes de los túneles de ensayo, etc.

- Cuando las condiciones de contorno se han determinado se progresa a la siguiente etapa que es el **procesado**, realizado mediante un software comúnmente conocido como “**solver**” (de los cuales hay muchos existentes según tipo de problema a resolver) que resuelve las ecuaciones matemáticas que determinan la situación planteada.
- Finalmente en la etapa llamada **post-procesado** y mediante herramientas gráficas propias de cada aplicación informática, se revisan los resultados calculados mediante escalas de colores, líneas y tablas numéricas que permiten comprender de forma más clara y visual el comportamiento de los elementos del problema sea este estructural, de dinámica de fluidos u otros.

### Planteamiento de la Investigación.

---

Como hipótesis de trabajo se han planteado interrogantes que se desea responder a través de la realización de ésta investigación práctica. Basándose en dichas preguntas se ha estructurado la siguiente aseveración que se confirmará o desmentirá mediante el desarrollo de los objetivos del trabajo:

*“La utilización de la plataforma NX, y de su solver NX THERMAL / FLOW resulta adecuada y suficiente para el desarrollo de análisis CFD que aporten datos precisos y útiles al proceso de desarrollo y optimización aerodinámica de un vehículo terrestre, y es posible el planteamiento de un método específico a seguir para su ejecución.”*

Junto a dicha hipótesis, se busca el logro de objetivos particulares, que vienen a completar el alcance que se pretende dar al estudio realizado:

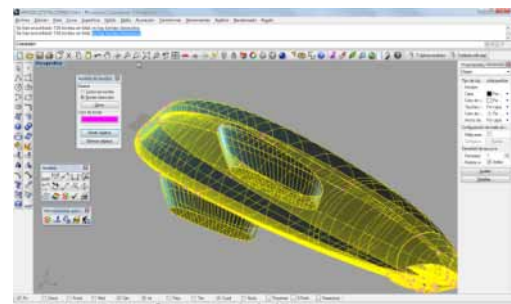
- Llevar a cabo una documentación adecuada del procedimiento seguido.
- Establecer un método claro y consistente para la realización correcta de éste tipo de análisis en NX.
- Generar documentación que sirva de introducción al ámbito del análisis CFD a profesionales no expertos en el área pero con la necesidad de realizar éste tipo de simulaciones.
- Definir el alcance y las capacidades reales para la realización de análisis CFD de la plataforma NX respecto de su precisión y usabilidad, y frente a otras aplicaciones informáticas.

### Procedimiento seguido para la realización de los análisis.

---

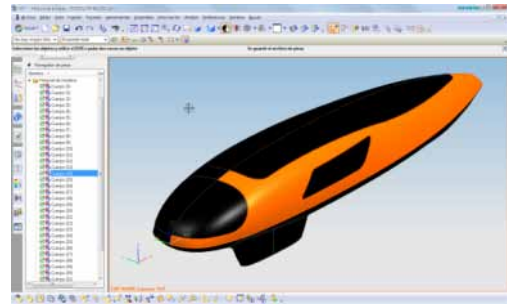
Pre-proceso - Preparación del modelo y exportación.

El primer del método determinado para la realización de los análisis mediante NX corresponde a la preparación del modelo 3D en el software nativo donde se haya realizado el proceso de modelado, revisando detalles como bordes desconectados y zonas conflictivas. Posteriormente debe exportarse el modelo en formatos compatibles con NX como IGES o idealmente STEP.



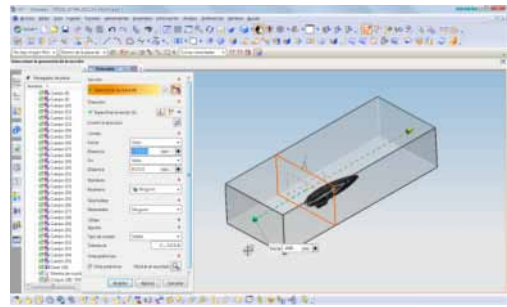
### Importación y preparación en NX.

Una vez que el modelo es importado o abierto en NX, deben revisarse los mismos factores mencionados en el punto anterior y realizar la unión de las superficies de ser necesario. Si el modelo es abierto como STEP este paso puede no ser necesario dependiendo de la calidad del modelo.



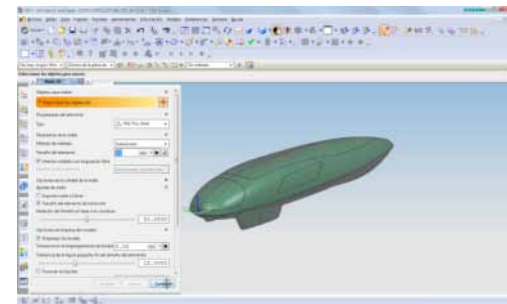
### Generación del sistema "Túnel de viento" en NX.

Basándose en el tamaño y la geometría del vehículo o forma a analizar, se crea el paralelepípedo que representa el túnel de viento en el sistema. Debe ser lo suficientemente amplio para que el flujo alrededor del vehículo no se vea perturbado por las paredes y permita un análisis válido.



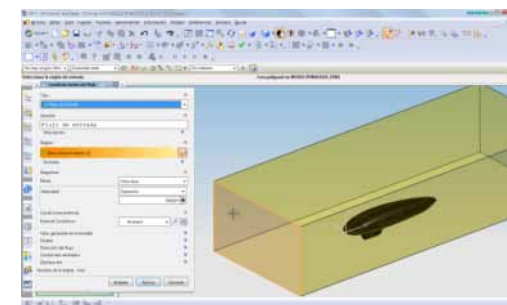
### Generación de la simulación - mallado de la forma

Cuando el modelado del sistema se completa, se genera la simulación activando el módulo de NX "simulación avanzada" que permite acceder a los iconos para iniciar el proceso, determinar las propiedades de la solución a obtener el solver flujo-térmico de NX, y posteriormente mallar la geometría del vehículo a estudiar.



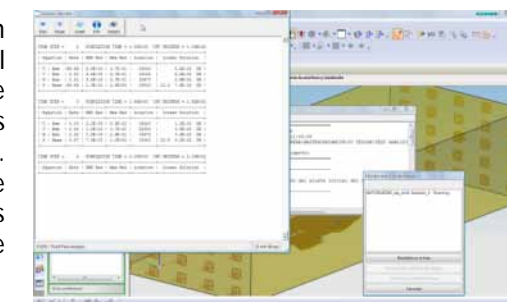
### Determinación de las condiciones de contorno.

En ésta etapa del proceso se determinará la velocidad del fluido equivalente a la del vehículo en la realidad, la zona de entrada y salida del flujo, el dominio fluido, las zonas límite del flujo y la superficie de contacto con el vehículo. NX presenta herramientas para realizar cada paso de forma inequívoca.



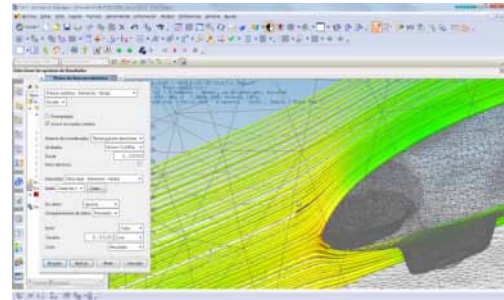
### Procesado - Cálculo de la Solución.

Este paso deja al usuario sin mayor participación y consiste en realizar las iteraciones necesarias y el cálculo de las ecuaciones para obtener la solución de acuerdo a las condiciones planteadas. Posee dos pasos claves, el mallado del fluido, y la solución propiamente tal. Posteriormente se obtiene un fichero LOG que se ubicará en el directorio de trabajo con los valores calculados y es posible cargar la presentación gráfica de los resultados.



Post-Procesado - Presentación de los resultados.

Finalmente, una vez que el cálculo de la solución ha terminado, se obtiene la presentación gráfica de los resultados, pudiendo observar el flujo mediante líneas aerodinámicas, las presiones mediante campos coloreados, y los valores en la escala de colores incorporada a la ventana gráfica.



Relación entre el proceso de discretización y la precisión de los resultados.

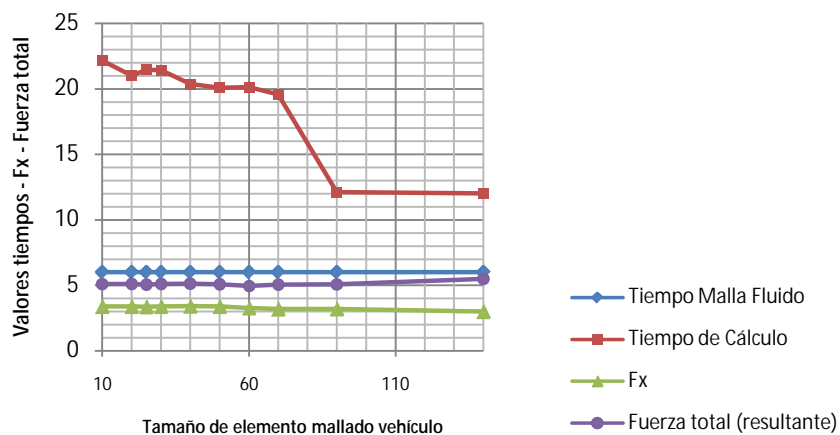
Un apartado importante del cual se obtienen resultados y conclusiones importantes durante el desarrollo de ésta investigación es aquel en que se determina la relación entre el proceso de discretización y la precisión de los resultados obtenidos. Existen dos tipos de mallado en relación a la manera en que se determina el tamaño del elemento, con tipo de tamaño de elemento **relativo o absoluto**, esto sumado al tamaño de elemento que se escoja determina una variación en la solución. La robustez y la menor probabilidad de fallo de la solución durante su proceso de desarrollo son mayores en el mallado absoluto, pero en general el mallado relativo ofrece menor tiempo de cálculo.

Las siguientes tablas y gráficos recogen los resultados obtenidos al respecto y determinan que pese a las aparentemente pequeñas diferencias entre los resultados obtenidos estos **pueden generar una variación de más de un punto en el cálculo del  $C_x$**  de un vehículo.

Variación del tamaño de elemento en la Malla FEM del Vehículo.

Tamaño elementos Mallado FEM (en mm)	Tiempo para el mallado del fluido (en min y seg)	Tiempo de cálculo de la solución (en min y seg)	Resultado para Fx (en Newtons)	Resultado fuerza total resultante XYZ (en Newtons)
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

*Condiciones fijas:* 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**



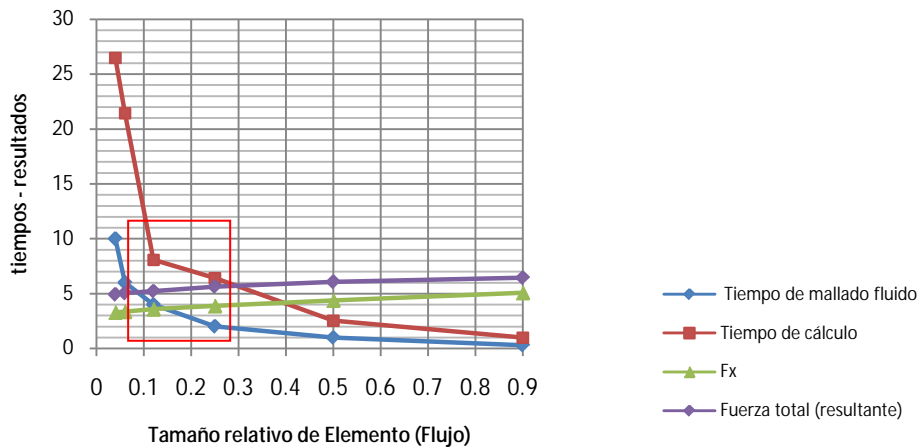
De acuerdo también al factor de fidelidad de la representación de la malla respecto a la forma original (correspondencia o "mesh matching"), que se ha mencionado previamente, se han considerado

los valores desde 40 a 20 mm como el rango aceptable para el tamaño de elemento ya sea para tipo de mallado subdivisión o adoquín.

#### Variación del tamaño de elemento relativo en el mallado del fluido.

Tamaño <i>relativo</i> elementos de mallado del fluido (fluido – límites – zona contacto con el vehículo)	Tiempo para el mallado del fluido (en min y seg)	Tiempo de cálculo de la solución (en min y seg)	Resultado para Fx (en Newtons)	Resultado fuerza total resultante XYZ (en 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
<b>0,12 – 0,04 – 0,020</b>	<b>4.00</b>	<b>8.09</b>	<b>3,584</b>	<b>5,234</b>
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

*Condiciones fijas:* Tipo de elemento de Mallado Fluido relativo, Tamaño de elemento del mallado FEM del vehículo 25 mm. Análisis a 30 Km/h – Mod. Turbulencia k-ε



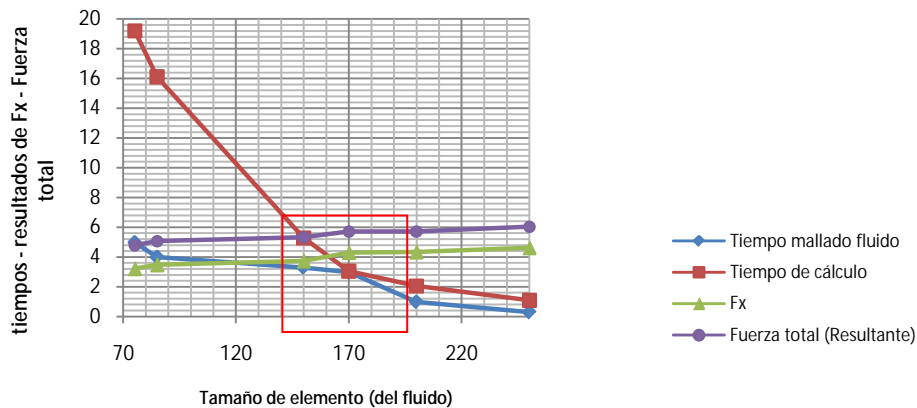
Un dato importante que es posible obtener observando las gráficas previas es el punto donde el valor obtenido se mantiene dentro de un rango aceptable, sin sacrificar un exceso de tiempo de cálculo o de mallado del fluido. Este punto para la malla con tipo de tamaño de elemento **relativo** se puede definir cercano al valor **0,12** para el tamaño relativo de elemento del fluido (0,04 para sus límites y 0,02 para la zona en contacto con el vehículo).

Luego de ese punto la divergencia entre el tiempo de cálculo y la precisión del resultado obtenido comienza a ser mucho mayor. De acuerdo a la siguiente tabla y gráfico para la malla con tipo de tamaño de elemento **absoluto** se escogerán los valores 150-50-40 como los ideales para una óptima relación entre precisión y tiempo de cálculo, y 85-65-35 como valores óptimos cuando se desee obtener una mayor precisión a costa de un mayor tiempo de cálculo.

#### Variación del tamaño de elemento absoluto en el mallado del fluido.

Tamaño <i>absoluto</i> elementos de mallado del fluido (fluido – límites – zona contacto con el vehículo)	Tiempo para el mallado del fluido (en min y seg)	Tiempo de cálculo de la solución (en min y seg)	Resultado para Fx (en Newtons)	Resultado fuerza total resultante XYZ (en Newtons)
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
<b>150 – 50 - 40</b>	<b>2.30</b>	<b>8.48</b>	<b>3.794</b>	<b>5.294</b>
<b>85 - 65 - 35</b>	<b>4.00</b>	<b>16.11</b>	<b>3.480</b>	<b>5.074</b>
75 - 55 - 30	5.00	19.22	3,224	4,801

*Condiciones fijas:* Tipo de elemento de Mallado Fluido absoluto, Tamaño de elemento del mallado FEM del vehículo 25 mm. Análisis a 30 Km/h – Mod. Turbulencia k-ε



Es destacable también el menor tiempo de cálculo que ofrece el mallado con tipo de tamaños de elemento relativo v/s el absoluto con 12 minutos aproximadamente, contra los 20 minutos del tipo de tamaño de elemento absoluto para resultados de similar precisión. **Sin embargo para rangos donde los elementos se hacen más pequeños es el mallado absoluto el que ofrece menores tiempos de cálculo.**

### Resultados y definición de la geometría final del vehículo.

Realizadas las simulaciones la geometría inicial del vehículo ha variado progresivamente, basadas dichas variaciones en los resultados tanto numéricos como visuales que entrega el software, y que permiten una comprensión cabal del comportamiento del fluido alrededor del vehículo.

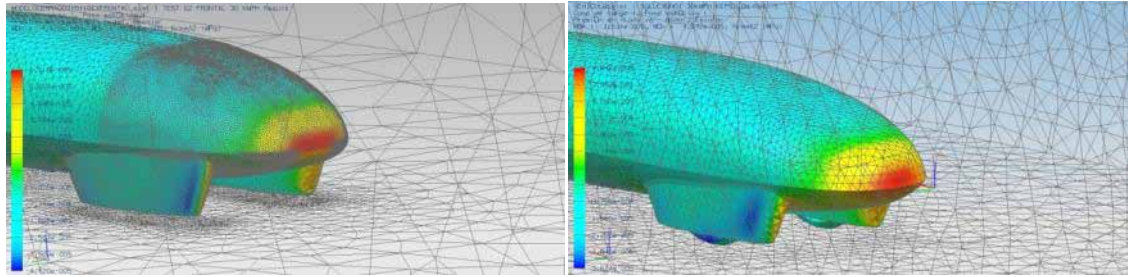
Las condiciones en que se han realizado los análisis son las siguientes:

**Velocidad del Fluido/vehículo: 30 km/h, Modelo de turbulencia: k-ε (Épsilon K), Mallado del vehículo: tipo subdivisión, tamaño de elemento de 25 mm sobre modelo STEP, malla 2D con tipo de elemento TRI3 Thin Shell. Solver: Flujo/Térmico de la Aplicación NX. Tipo de solución: flujo - estado estacionario. Unidades de la solución: Metro/Newton. Mallado del fluido: unión de mallas fluidas desconectadas activado, con tipo de tamaño de elemento relativo, de 0,06 para el fluido total, 0,03 para los límites de entrada y salida, y 0,01 para la zona de contacto fluido/vehículo. El túnel utilizado tiene una dimensión de 6000 mm de largo, 2000 de alto y 3000 de ancho.**

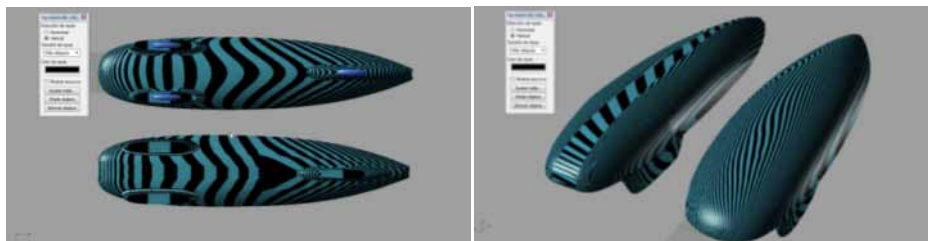
Se han definido **dos zonas clave** respecto de su incidencia sobre el flujo de aire, la **punta del vehículo**, donde se halla el "punto de estancamiento", y la **zona que conforma el cobertor de la rueda posterior**. Las imágenes siguientes muestran la diferencia entre una de las primeras geometrías del vehículo y la definitiva. Además de una diferencia cuantitativa entre la presión ejercida por el aire sobre el vehículo, puede verse como la zona de presión máxima en rojo es algo menor en el segundo modelo, y se concentra en un punto redondeado, mientras que en la primera forma es más alargado y abarca mayor superficie. La zona de transición entre las presiones es también más extendida en el segundo modelo, presentando una mayor superficie en verde, una presión mediana, mientras que el modelo inicial posee una mayor zona en amarillo, una presión más alta.

*A nivel numérico la fuerza del arrastre en el eje X en simulaciones a 30 km/h es de 3,991 N para el inicial y de 3,319 N, y las mayores presiones obtenidas son de  $6,516 \times 10^{-5}$  y de  $4,642 \times 10^{-5}$  N/mm<sup>2</sup> para el modelo inicial y final respectivamente.*

*Además la modificación formal permite que el segundo modelo presente una proyección de su área frontal reducida respecto al inicial, de 0,304 m<sup>2</sup> contra 0,316 m<sup>2</sup> lo que permite que su C<sub>x</sub> sea también menor. Los valores C<sub>x</sub> obtenidos presentan una evolución desde 0,31 a 0,25, y los valores SC<sub>x</sub> desde 0,095 a 0,076.*

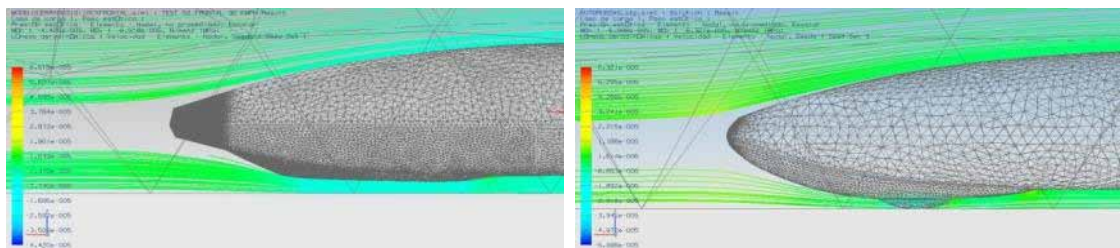


El modelado sin duda es un factor que ha demostrado ser determinante al momento de obtener un análisis adecuado y posteriormente un proceso de fabricación sin contratiempos. Las imágenes posteriores muestran la diferencia entre los modelados iniciales y final a través de un análisis cebrá que mide la calidad de la continuidad de las superficies, es decir detecta irregularidades y zonas donde se producen aristas o cambios bruscos de la forma, inexistente en el modelo final y presentes en los más tempranos. Estas irregularidades en la forma son fuente de turbulencias y perturbaciones en la "laminaridad" buscada para el flujo de aire que recorre el vehículo.



La segunda zona de extrema importancia para el rendimiento aerodinámico del vehículo corresponde a aquella que determina cómo el fluido abandona la forma. Esta zona es la que está conformada por el "remate" del vehículo en su zona posterior, la unión de la zona superior del monocasco, la zona que cubre la rueda trasera, y la zona inferior del monocasco. La unión de éstas tres grandes superficies debe ser lo más suave e integrada posible para permitir que el fluido se desplace suavemente y se mantenga unido al vehículo, demorando el punto donde se "despega" de él.

Las imágenes obtenidas a partir de los análisis realizados registran el comportamiento del fluido en dicha zona mediante líneas aerodinámicas, y muestran como la modificación realizada en el modelo final que se definió de forma gradual mediante los diversos modelos que significaron la evolución de la forma, incide de modo directo en **retardar y suavizar** la separación del fluido respecto de la pared del vehículo. Esto se traduce en una menor generación de turbulencias en la zona posterior del vehículo, y por lo tanto en una menor creación de bajas presiones que actúen "succionando" al vehículo y restándole fuerza a su avance.



El modelo definitivo se registra en la figura siguiente, en una imagen obtenida durante la competencia Shell Eco-Maratón 2010.





### Conclusiones obtenidas.

---

Para la realización de éste trabajo se han realizado 14 series de análisis con más de 150 simulaciones CFD en total, utilizando, como se ha establecido, el software de Siemens NX v7 y su modulo de simulación avanzada. Esto ha dado lugar a la generación de aportes no considerados en los inicios de esta investigación, como por ejemplo el establecimiento de perfiles de valores que, frente a ciertas condiciones, permiten obtener resultados precisos con menores costos de tiempo o definir los puntos donde la relación de resultados sacrifica un tiempo excesivo sin ganar en precisión. Estos datos han sido planteados en apartados previos.

Disgregando las ideas expuestas en la hipótesis inicial, es posible decir que **sin duda el software NX y su módulo para simulación avanzada resultan adecuados y suficientes para el desarrollo de estos análisis**. El software en general entrega resultados robustos y fiables, coherentes entre sí al momento de modificar las condiciones externas.

Respecto a la posibilidad de establecer para NX un método específico a seguir para la ejecución de éste tipo de análisis, ello ha sido posible, y ha sido además, como se ha dicho, el inicio de una investigación que ha ido un poco más allá de lo buscado originalmente. Se ha planteado una serie de pasos a recrear en orden para llegar a un desarrollo exitoso de los análisis sin pasar por un proceso de "descubrimiento" del uso del software.

Resulta pertinente también realizar **una crítica a la modalidad de entrega de datos**. Si se compara la entrega de datos de NX con softwares especializados en CFD aerodinámico esta es menos clara y directa. Para encontrar los datos numéricos que son claves en éstos análisis se debe acudir a un fichero que queda recogido en el directorio de trabajo, y que resulta bastante "árido" de comprender. Por otro lado, debe decirse que el aspecto de **la ayuda de NX resulta** deficiente y muy poco claro. Es tal la magnitud de la información a incluir y las capacidades del software que los temas se hacen difíciles de encontrar y su hipervinculación no resulta tampoco óptima.

No toda la ayuda se encuentra traducida, pese a que se utiliza la versión en español del software, y muchos de los tópicos solo cuentan con un par de líneas de texto explicándolos, lo que resulta insuficiente. Existe una carencia importante de diagramación y elementos gráficos que transformen la ayuda del software en algo realmente utilizable por usuarios no expertos.

Los objetivos particulares planteados a la investigación se han desarrollado y completado con éxito:

- Se documenta el proceso llevado a cabo.
- Se ha planteado un método concreto para la realización de éste tipo de análisis.
- Se plantea un documento introductorio al CFD y la aerodinámica de vehiculos para profesionales que no sean expertos en el tema, e inclusive no provengan de áreas afines a la física o la mecánica de fluidos.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS.<sup>78</sup>

### Capa límite.

En mecánica de fluidos, la **capa límite** o **capa fronteriza** de un fluido es la zona donde el movimiento de éste es perturbado por la presencia de un sólido con el que está en contacto. La capa límite se entiende como aquella en la que la velocidad del fluido respecto al sólido en movimiento varía desde cero hasta el 99% de la velocidad de la corriente no perturbada.

La capa límite puede ser laminar o turbulenta; aunque también pueden coexistir en ella zonas de flujo laminar y de flujo turbulento. En ocasiones es de utilidad que la capa límite sea turbulenta. En aeronáutica aplicada a la aviación comercial, se suele optar por perfiles alares que generan una capa límite turbulenta, ya que ésta permanece adherida al perfil a mayores ángulos de ataque que la capa límite laminar, evitando así que el perfil entre en pérdida, es decir, deje de generar sustentación aerodinámica de manera brusca por el desprendimiento de la capa límite.

El espesor de la capa límite en la zona del borde de ataque o de llegada es pequeño, pero aumenta a lo largo de la superficie. Todas estas características varían en función de la forma del objeto (menor espesor de capa límite cuanto menor resistencia aerodinámica presente la superficie: ej. forma fusiforme de un perfil alar).

### Coefficiente aerodinámico.

Son números adimensionales que se utilizan para el estudio aeronáutico o aerodinámico de las fuerzas y momentos que sufre un cuerpo cualquiera en movimiento en el seno del aire. Algunos de los coeficientes más importantes son el coeficiente de sustentación  $C_L$ , y el coeficiente de resistencia  $C_D$  mejor conocido como el coeficiente de penetración  $C_X$ .

En la automoción también se utilizan estos coeficientes para el estudio aerodinámico; sin embargo, suele utilizarse una notación diferente a la utilizada en aeronáutica, utilizando como subíndices los ejes de referencia del vehículo (X en sentido longitudinal, Y en sentido transversal y Z en sentido vertical).<sup>1</sup>

- El coeficiente de resistencia aerodinámica suele simbolizarse como  $C_X$ , en vez de  $C_D$ . Habitualmente se utiliza como superficie de referencia el área frontal del vehículo.
- El coeficiente de empuje lateral aerodinámico suele simbolizarse como  $C_Y$ , igual que en aeronáutica. Habitualmente se utiliza como superficie de referencia el área frontal del vehículo.
- El coeficiente de sustentación suele simbolizarse como  $C_Z$ , en vez de  $C_L$ . No obstante, también se utiliza su opuesto, el coeficiente de antisustentación, que relaciona la fuerza de antisustentación (componente en sentido descendente de la fuerza aerodinámica) y el producto de la presión dinámica del aire por el área característica. Habitualmente se utiliza como superficie de referencia el área frontal del vehículo, aunque a veces también se utiliza el área de la proyección en planta.

### Ecuaciones Navier-Stokes.

Reciben su nombre de Claude-Louis Navier y George Gabriel Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Estas ecuaciones gobiernan la atmósfera terrestre, las corrientes oceánicas y el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos.

---

<sup>78</sup> Las definiciones de éste glosario deben considerarse orientativas solamente, pues no constituyen material científico editado, y han sido extraídas de Wikipedia y otras publicaciones digitales diversas. ([www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org)).

No se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones, y salvo ciertos tipos de flujo y situaciones muy concretas no es posible hallar una solución analítica; por lo que en muchas ocasiones hemos de recurrir al análisis numérico para determinar una solución aproximada.

### Efecto suelo

Es 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 unas alteraciones en el flujo de aire que pueden aprovecharse en diversos campos. En el automovilismo se busca, 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 "aplata" al vehículo contra el suelo, mejorando el agarre, lo que se traduce en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad.

### Numero de Reynolds.

Es un número adimensional utilizado en mecánica de fluidos, diseño de reactores y fenómenos de transporte para caracterizar el movimiento de un fluido. Este número recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883.

**Como todo número adimensional es un cociente, una comparación. En este caso es la relación entre los términos convectivos y los términos viscosos de las ecuaciones de Navier-Stokes que gobiernan el movimiento de los fluidos.**

Por ejemplo un flujo con un número de Reynolds alrededor de 100.000 (típico en el movimiento de una aeronave pequeña, salvo en zonas próximas a la capa límite expresa que las fuerzas viscosas son 100.000 veces menores que las fuerzas convectivas, y por lo tanto aquellas pueden ser ignoradas. Un ejemplo del caso contrario sería un cojinete axial lubricado con un fluido y sometido a una cierta carga. En este caso el número de Reynolds es mucho menor que 1 indicando que ahora las fuerzas dominantes son las viscosas y por lo tanto las convectivas pueden despreciarse. Otro ejemplo: En el análisis del movimiento de fluidos en el interior de conductos proporciona una indicación de la pérdida de carga causada por efectos viscosos.

### Teorema de Bernoulli

El principio de Bernoulli, también denominado ecuación de Bernoulli o Trinomio de Bernoulli, describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente. Fue expuesto por Daniel Bernoulli en su obra *Hidrodinámica* (1738) y expresa que en un fluido ideal (sin viscosidad ni rozamiento) en régimen de circulación por un conducto cerrado, la energía que posee el fluido permanece constante a lo largo de su recorrido. La energía de un fluido en cualquier momento consta de tres componentes:

Cinética: es la energía debida a la velocidad que posea el fluido.

Potencial gravitacional: es la energía debido a la altitud que un fluido posea.

Energía de flujo: es la energía que un fluido contiene debido a la presión que posee.

Así el principio de Bernoulli puede ser visto como otra forma de la ley de la conservación de la energía, es decir, en una línea de corriente cada tipo de energía puede subir o disminuir en virtud de la disminución o el aumento de las otras dos.

## TABLA DE ILUSTRACIONES.

Ilustración 1- Efecto Coanda .....	11
Ilustración 2 - Fuerzas Aerodinámicas, centro de presiones, y componentes en cada dirección. .....	12
Ilustración 3 - Esquema de Capa Límite Laminar y Turbulenta.....	14
Ilustración 4 - Vista exterior del Túnel de Viento de Ferrari.....	15
Ilustración 5 - Túnel de Viento .....	16
Ilustración 6 - Túnel de Viento de Audi, y preparación de una banda de suelo rodante. ....	17
Ilustración 7 - Etapas del FEM. Geometría CAD, Malla de Elementos Finitos, Resultados Gráficos.....	18
Ilustración 8 - Tabla Drag Coeficient (Cx) vs N° de Elementos de malla. ....	19
Ilustración 9 - Geometría CAD - Pre-procesado en NX.....	20
Ilustración 10 - Establecimiento de condiciones de Contorno - Pre-procesado en NX.....	20
Ilustración 11 - Mallado de la geometría - Pre-Procesado en NX .....	21
Ilustración 12 - Cálculo de la solución – Procesado en NX.....	21
Ilustración 13 - Visualización de los resultados - Post-Procesado en NX.....	22
Ilustración 14 - CFD de un distribuidor y de un automóvil en Solidworks (Cosmos) y Ansys respectivamente.....	23
Ilustración 15 - Influencia de la altura del punto de estancamiento.....	26
Ilustración 16 - Alturas que influyen en el punto de estancamiento.....	27
Ilustración 17 - Punto de estancamiento en el vehículo del IDF. ....	27
Ilustración 18 - Análisis preliminar vehículo IDF. ....	28
Ilustración 19 - Comparativa en el proceso de la forma de un vehículo con y sin la utilización de simulación CFD, fuente "Applied Mechanics and Materials Vols. 16-19 pág. 863. <sup>23</sup> .....	30
Ilustración 20 - Interface de Star CCM+ v.4.0 4 con el vehículo del IDF preparado para el análisis. ....	48
Ilustración 21 - Refinamiento progresivo de una malla tridimensional basada en poliedros. ....	49
Ilustración 22 - FloEFD integrado a Pro Engineer Wildfire.....	50

Ilustración 23 – Mallado del vehículo del IDF realizado en Ansys v.11 CFX.....	53
Ilustración 24 – Flow-3D utilizado para cálculo de caudales de agua.....	55
Ilustración 25 - OpenFOAM, etapa de configuración de la solución y corrector de mallado....	58
Ilustración 26 - Paralelepípedo que representará el túnel de viento alrededor del vehículo. Obsérvese la proporción y distancia de las paredes.....	65
Ilustración 27 - Monitor de Solución en pantalla mientras se realiza el cálculo de la solución al problema configurado. ....	66
Ilustración 28- Presión en la superficie del vehículo - estudio de viento lateral.....	68
Ilustración 29 - Presión en la superficie del vehículo - estudio de avance frontal.....	68
Ilustración 30 - Mallado relativo y mallado regular.....	99
Ilustración 31- Imagen obtenida en la web de la NASA, que muestra los coeficientes aerodinámicos de algunas formas geométricas comunes. ....	120
Ilustración 32 - Imágenes de los test realizados sobre la esfera en NX. ....	121
Ilustración 33 - Método utilizado para la obtención del área frontal. ....	122
Ilustración 34 - Proyecciones frontales y laterales del vehículo. Modelo previo al final.....	123
Ilustración 35 - Relación que se utilizará entre los coeficientes alrededor del vehículo .....	125
Ilustración 36 - Imágenes que grafican el efecto suelo sobre el vehículo.....	128
Ilustración 37 - Renders del primer modelo del coche mostrando piloto y zonas de visibilidad. ....	134
Ilustración 38 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 01.....	136
Ilustración 39 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 02.....	137
Ilustración 40- Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 03.....	137
Ilustración 41 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 04.....	138
Ilustración 42 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 05.....	139
Ilustración 43 - Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 - Modelo 06.....	140
Ilustración 44 - Comparativa de la continuidad entre los modelos 04 y final. ....	140
Ilustración 45 - 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. ....	141
Ilustración 46 – Vehículo IDF para la Shell Eco-maratón 2010 – Modelo Definitivo.....	141
Ilustración 47 - Imágenes foto-realistas del Vehículo, realizadas por el autor de esta tesina..	142

Ilustración 48 - Vehículo IDF 2010, en la pista de la Shell Eco-Maratón 2010.....	143
Ilustración 2 - Fuerzas Aerodinámicas, centro de presiones, y componentes en cada dirección. .....	153



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA



INSTITUTO  
DE DISEÑO Y  
FABRICACIÓN