



ANÁLISIS AERODINÁMICO DEL VEHÍCULO PARA LA COMPETENCIA ECO-SHELL

MASTER CAD CAM CIM

Ing. Fredy Alexander Aguirre Gómez

2009

TABLA DE CONTENIDO

1.	OBJETIVOS.....	8
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	8
2.	MARCO TEÓRICO	9
2.1	CFD	9
2.2	TÚNEL DE VIENTO.....	10
2.3	RESISTENCIA AERODINÁMICA.....	12
2.4	EL EFECTO SUELO EN AUTOMOVILISMO	14
2.5	EFFECTOS INVOLUCRADOS EN EL ANÁLISIS AERODINÁMICO.....	17
2.5.1	COEFICIENTES AERODINÁMICOS	19
2.5.1.1	CX COEFICIENTE DE PENETRACIÓN	19
3.	PROCEDIMIENTO PARA LA SIMULACIÓN.....	22
3.1	COSER SUPERFICIES	23
3.2	DISEÑAR EL TÚNEL DE VIENTO	25
3.3	CONDICIONES GENERALES DE LA SIMULACIÓN.....	26
3.4	MALLADO DE LA CARROCERÍA	28
3.5	CONDICIONES Y MALLADO DEL FLUJO.....	29

4.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES	35
4.1	SIMULACIÓN CON INCIDENCIA EN LA CARA FRONTAL	36
4.2	SIMULACIÓN CON INCIDENCIA EN LA CARA POSTERIOR	37
4.3	SIMULACIÓN CON INCIDENCIA EN LA CARA LATERAL	38
4.4	SIMULACIÓN CON INCIDENCIA EN LA CARA FRONTAL ELEVADO DEL SUELO	39
5.	RECOMENDACIONES DE REDISEÑO	46
6.	SIMULACIÓN CON LA CARROCERÍA REDISEÑADA	48
7.	CONCLUSIONES	49
8.	BIBLIOGRAFÍA	50

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1 CFD	9
FIGURA 2 TÚNEL DE VIENTO.....	10
FIGURA 3 ANÁLISIS AERODINÁMICO.....	11
FIGURA 4 EFECTO VENTURI.....	14
FIGURA 5 EFECTO SUELO	15
FIGURA 21 FUERZAS RESULTANTES	17
FIGURA 22 DISTRIBUCIÓN FUERZA DE ROZAMIENTO	18
FIGURA 23 DISTRIBUCIÓN FUERZA DE PRESIÓN.....	18
FIGURA 6 FICHERO DEL VEHÍCULO EN FORMATO IGES	23
FIGURA 7 PROCESO PARA COSER LAS SUPERFICIES	24
FIGURA 8 RESULTADO DE LA COSIDA DE SUPERFICIES	24
FIGURA 9 TÚNEL.....	25
FIGURA 10 CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	26
FIGURA 11 PARÁMETROS DE LOS RESULTADOS	27
FIGURA 12 CARACTERÍSTICAS DE LA MALLA	28
FIGURA 13 MALLADO DE LA CARROCERÍA.....	28
FIGURA 14 ENTRADA DEL FLUJO	29
FIGURA 15 SALIDA DEL FLUJO.....	30
FIGURA 16 CONDICIONES DEL FLUJO	31
FIGURA 17 MALLADO ENTRADA SALIDA.....	32
FIGURA 18 CAPA LÍMITE.....	33
FIGURA 19 RESOLVER	34
FIGURA 20 ANIMACIÓN DE LA SIMULACIÓN	34
FIGURA 24 ISOMÉTRICO INCIDENCIA FRONTAL.....	36
FIGURA 25 VISTA LATERAL INCIDENCIA FRONTAL	36
FIGURA 26 VISTA DE PLANTA INCIDENCIA FRONTAL	36
FIGURA 27 ISOMÉTRICO INCIDENCIA POSTERIOR	37
FIGURA 28 VISTA LATERAL INCIDENCIA POSTERIOR.....	37
FIGURA 29 VISTA DE PLANTA INCIDENCIA POSTERIOR.....	37
FIGURA 30 VISTA DE PLANTA INCIDENCIA LATERAL	38
FIGURA 31 VISTA FRONTAL INCIDENCIA LATERAL	38

FIGURA 32 ISOMÉTRICO INCIDENCIA FRONTAL ELEVADO DEL SUELO .	39
FIGURA 33 VISTA LATERAL INCIDENCIA FRONTAL ELEVADO DEL SUELO	39
FIGURA 34 VISTA DE PLANTA INCIDENCIA FRONTAL ELEVADO DEL SUELO	39
FIGURA 35 INCIDENCIA DEL AIRE	40
FIGURA 36 PROPUESTA DE REDISEÑO	46
FIGURA 37 ISOMÉTRICO INCIDENCIA FRONTAL.....	48
FIGURA 38 VISTA LATERAL INCIDENCIA FRONTAL	48
FIGURA 39 VISTA DE PLANTA INCIDENCIA FRONTAL	48

INTRODUCCIÓN

Dado el deterioro medio ambiental y en busca de un aporte significativo para detener éste progresivo detrimento, se han enfocado esfuerzos en desarrollar nuevas tecnologías que hagan más eficiente el funcionamiento del automóvil. La competencia Eco-Shell es una carrera en donde los participantes son estudiantes que tiene como reto diseñar, construir y probar vehículos prototipo de consumo eficiente de combustible que recorran la mayor distancia con la menor cantidad de combustible, estos prototipos son vehículos de formas extravagantes y se diseñan bajo un reglamento muy abierto que deja volar la imaginación de los jóvenes talentos.

Actualmente las herramientas de software hacen posible el estudio de problemas cada vez más complejos, que hasta hace pocos años eran de improbable tratamiento, la incursión de estos software han aumentado el tipo de tareas que se pueden enfrentar desde el punto de vista teórico, brindando una herramienta efectiva para la resolución de tales problemas. La necesidad de proveer resultados inmediatos está íntimamente relacionada con su aplicación en el diseño, provocando mayor atención en áreas que influyen de manera significativa el funcionamiento eficiente del proyecto.

Dada la complejidad de los efectos del aire sobre un cuerpo, para este caso un vehículo y con la finalidad de facilitar su estudio, se hace depender dichas relaciones de una única variable (coeficiente) que permita de una forma sencilla conocer los efectos que resulten presentes. Normalmente, el valor de estos coeficientes se determina de forma experimental en un entorno controlado (túnel de viento), en el que se puede conocer la velocidad, la densidad del aire, el área de referencia (factor de forma).

Los túneles aerodinámicos, también llamados túneles de viento son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de las acciones del viento sobre modelos en los que el aire en movimiento juega un papel

dominante, la finalidad de los ensayos en túneles aerodinámicos es suministrar información sobre las particularidades del flujo en las proximidades del cuerpo en consideración.

La combinación de estas herramientas nos permite y facilita realizar análisis como el que a continuación se observará, donde los resultados obtenidos aporta ideas, líneas de trabajo, intervalos de solución y comparación entre diversas alternativas.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Hacer el análisis aerodinámico de la carrocería del vehículo usado para la competencia ECO-SHELL, utilizando el modulo de simulación de fluidos ofrecido por el software **UNIGRAPHICS NX**.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Exportar el fichero existente al formato “**IGES**” para hacer compatible con los ficheros trabajados por el **UNIGRAPHICS NX**.
- Hacer los ajustes necesarios para poder usar el fichero exportado de la carrocería modelada.
- Determinar las condiciones del flujo que se aplicara al coche para hacer la simulación.
- Determinar las condiciones del túnel en el que se realizaran las simulaciones.
- Ejecutar las simulaciones de fluidos ofrecido por el software **UNIGRAPHICS NX**.
- Hacer el análisis los resultados obtenidos.

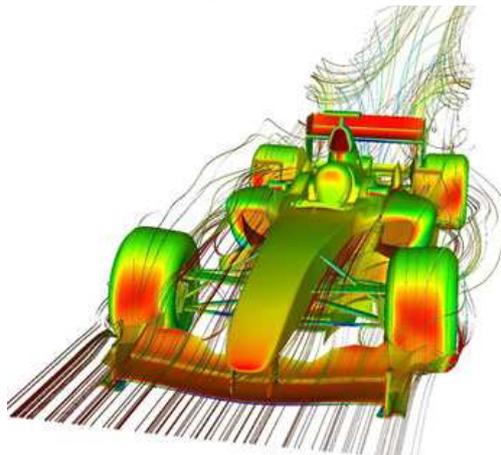
2. MARCO TEÓRICO

A continuación se hará una breve exposición de los temas más relevante en el momento de hacer un análisis de fluido-dinámica.

2.1 CFD

La mecánica de fluidos computacional CFD es 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.

Figura 1 CFD



Fuente: Wikipedia

Los ordenadores son utilizados para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas. Aun con ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados en muchos casos. La continua investigación, sin embargo, permite la incorporación de software que reduce la velocidad de cálculo como así también el margen de error al tiempo que permite analizar situaciones cada vez más complejas como los fluidos transónicos y los flujos turbulentos. La verificación de los datos

obtenidos por CFD suele ser realizada en túneles de viento u otros modelos físicos a escala¹.

2.2 Túnel de Viento

El túnel de viento ó también llamado túnel de aire es un aparato que simula las condiciones a las que se somete un objeto que se mueve a través del aire y fue creado para estudiar de forma más práctica los efectos del aire frente al movimiento de objetos. La utilización de túneles de viento no va dirigida exclusivamente al diseño de aeronaves, también son utilizados en los diseños de automóviles, bicicletas, edificios, entre muchas otras aplicaciones.

Figura 2 Túnel de Viento



Fuente: www.audi.com

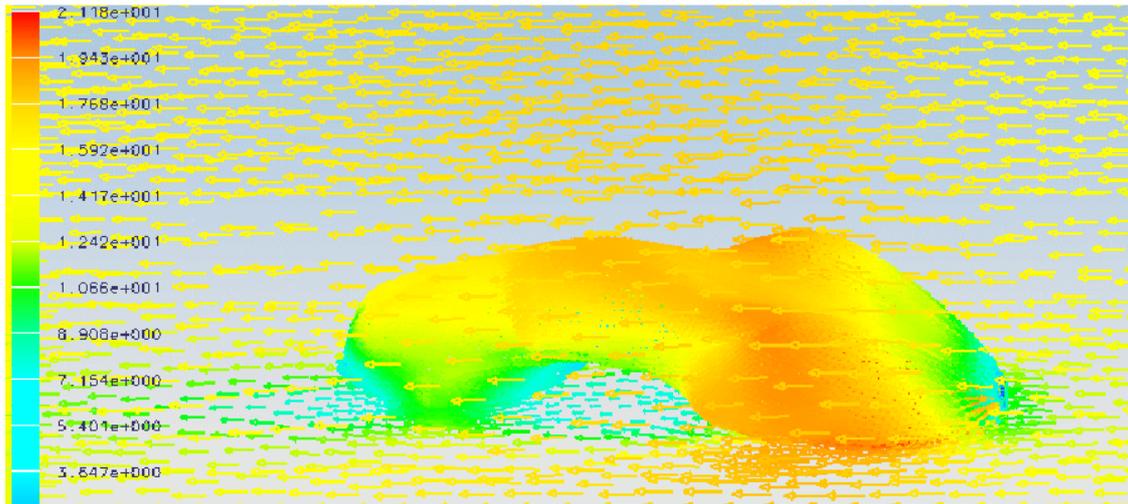
Para la obtención de los resultados de las pruebas no sólo se usan sensores, también se usan sustancias que sirven para visualizar el comportamiento que presenta el flujo, un claro ejemplo es el caso de los túneles de humo o túneles en los que se utiliza agua con jabón para marcar líneas y trayectorias en el fluido.

Lo más importante en los túneles de aire, es todo el conjunto de análisis, teorías y conclusiones que los aerodinamistas tienen que encontrar después de haber hecho las pruebas en el túnel de aire. Se tienen que pasar muchas horas viendo los videos grabados durante las pruebas y analizando los datos recogidos por todos los sensores que se distribuyen por el vehículo o por su

¹ http://es.wikipedia.org/wiki/Mec%C3%A1nica_de_fluidos_computacional

representación en escala y en el propio túnel con tal de llegar a estas conclusiones. También ha tomado un papel protagónico el uso de simulaciones en modelos tridimensionales creados por ordenador gracias a su reducido costo y fiabilidad en los resultados.

Figura 3 Análisis aerodinámico



Fuente: autor del proyecto

Aunque las velocidades con que se experimenta en los túneles de viento varían dentro de un amplio rango, solo se considerarán las menores a 360 mph, denominadas subsónicas, dónde la compresibilidad del aire es despreciable.

En un túnel de pruebas debe existir una similitud geométrica para poder considerar los efectos en un ambiente real, para esto se requiere que ambos tengan la misma escala de longitudes, tiempo y fuerzas. El tamaño del modelo define en muchos casos el tamaño de la sección del túnel; en teoría sería ideal que la sección tuviera el mayor ancho posible, sin embargo, por razones económicas, es aceptable que la envergadura del modelo sea como máximo cuatro quintas partes del ancho de la sección, para evitar que el efecto de las paredes se vea reflejado en las mediciones.

2.3 Resistencia Aerodinámica

Aplicada a un vehículo, se expresa como la fuerza que necesita para desplazarse dentro de la atmósfera, sin tener en cuenta el rozamiento con el suelo², es posible hacer la comparación entre un barco que se mueve por el agua y un vehículo que se mueve por el aire, pues ambos se encuentran penetrando y moviéndose a través de un fluido. En un coche normal, la mayor cantidad de resistencia aerodinámica se debe a la necesidad de desplazar el aire y a las diferencias de presión que se forman debido a ello. La depresión que se forma en la parte posterior del coche es la principal causa de resistencia aerodinámica³.

La fuerza necesaria para desplazarse en la atmósfera es proporcional a la superficie frontal (S), al coeficiente de penetración (Cx), a un medio de la densidad del aire (ρ) y al cuadrado de la velocidad del viento (v).

$$F = S \cdot C_x \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot V^2$$

Es posible medir la efectividad aerodinámica de los vehículos y en general de cualquier cuerpo. Se llama Resistencia Aerodinámica y mide la resistencia que opone el aire al avance de un determinado cuerpo.

El coeficiente aerodinámico ó coeficiente de penetración "**Cx**", donde la x indica una dirección en un eje de tres coordenadas, al coeficiente vertical o de elevación se le denomina Cz por la misma causa. Otra forma de referirse al coeficiente de penetración es el Cd, donde la d es la inicial de la palabra inglesa "drag".

El Cx es un factor adimensional que cuantifica la resistencia que presenta la forma de algún cuerpo al penetrar y moverse a través del aire, es posible afirmar que hasta cierto punto es independiente del tamaño del cuerpo y de la

² <http://www.km77.com/glosario/r/resiaero.asp>

³ <http://www.km77.com/glosario/r/resiaero.asp>

velocidad del fluido (aire). Pasado ese punto podría haber variaciones en el Cx por cualquiera de las estas causas anteriormente mencionadas, es por esta razón que cuando no se utilizan modelos a escala real y por el contrario se usan modelos de menor escala para analizar la aerodinámica de un cuerpo nunca se usan modelos con escalas muy pequeñas más específicamente menores a 1:5.

“La mayoría de los vehículos modernos tienen un Cx de entre 0.28 y 0.35, los vehículos todo terreno tienen un Cx que varía entre 0.35 y 0.45, vehículos prototipo pueden bajar aún más su Cx hasta llegar a tener menos de 0.25. En cambio un auto de Formula 1 tiene un Cx de 0.7 a 1.1, dependiendo de la pista en la que va a correr”⁴.

Existen dos importantes efectos aerodinámicos que dependiendo la configuración aerodinámica que se tenga dejan de ser desventajas suelen ser aprovechados, estos efectos son el efecto suelo y el Downforce. Ambos manipulan el flujo de aire que circula por el contorno del vehículo para aumentar el agarre en la pista y por ende la velocidad en las curvas.

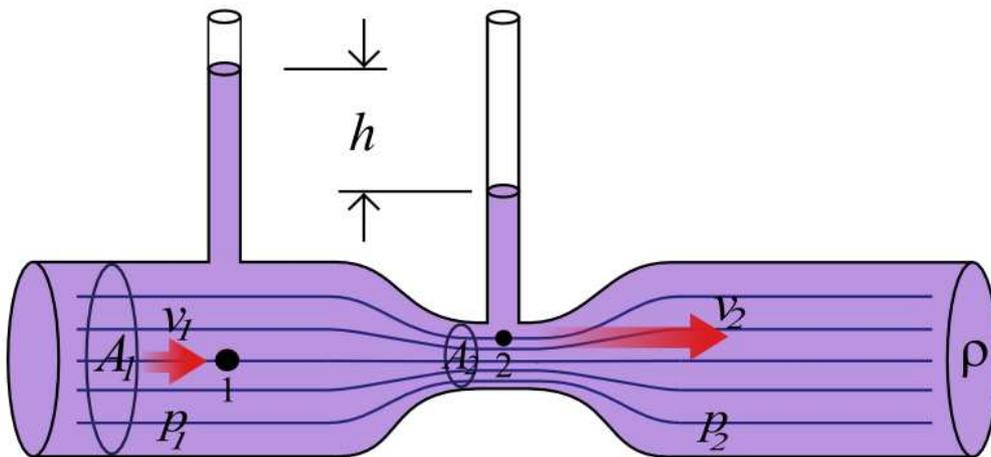
⁴ http://en.wikipedia.org/wiki/Automobile_drag_coefficients

2.4 El Efecto Suelo en Automovilismo

En la aeronáutica se diseña con disposiciones geométricas tales que se logra conseguir una zona de baja presión en la parte superior de las alas y así generar la fuerza de sustentación suficiente para elevar un avión. Por otra parte en el automovilismo se busca el efecto contrario, el objetivo en este caso es lograr la mayor adherencia posible del vehículo para evitar pérdidas de agarre cuando se alcanza alta velocidad.

El efecto suelo se produce por un diferencial de presiones en los lados de un cuerpo cuando se acerca al suelo. El efecto suelo está basado en los principios del efecto Venturi que consiste en canalizar un fluido haciéndolo pasar por un estrechamiento donde el fluido alcanza mayor velocidad y al mismo tiempo disminuye la presión produciéndose así una especie de succión. En la siguiente imagen se logra apreciar con claridad el efecto Venturi.

Figura 4 Efecto Venturi



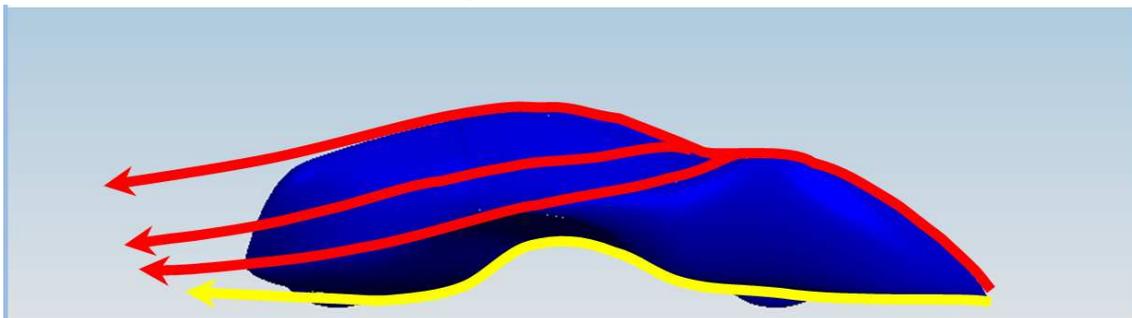
Fuente: Wikipedia

La imagen anterior permite hacer el análisis de dos factores, la presión y la velocidad del fluido en los puntos 1 y 2; en el punto 2 como se muestra en la

figura hay un estrechamiento debido a la disminución del área transversal, tal como lo muestra las dos columnas de fluido, la presión en el punto 2 es menor pero al mismo tiempo la velocidad del fluido en éste punto es más alta que la velocidad del punto 1.

El efecto suelo se logra manipulando el diseño para que la zona de alta presión se produzca en la parte superior del automóvil y al mismo tiempo la zona de baja presión estará ubicada en la parte inferior del automóvil. Este diferencial de presiones provoca una succión que adhiere al vehículo contra el suelo, obteniendo así mayor agarre, traduciéndose esto en la posibilidad de trazar curvas a mayor velocidad.

Figura 5 Efecto Suelo



Fuente: autor del proyecto

En la figura anterior, se muestra los dos grandes conjuntos de flujos que tiene un vehículo en movimiento, en rojo podemos ver representadas las líneas de flujo de aire superior donde se busca una presión más alta y una velocidad menor en comparación a los valores que se obtienen con el flujo inferior representado por la línea amarilla donde se debe tratar de obtener la mayor velocidad y menor presión posible.

El efecto suelo se introdujo en la Fórmula 1 a finales de los años 1970 con un diseño especial de la parte inferior de la carrocería para lograr un efecto Venturi que disminuyera la presión del aire debajo del monoplaza; sin embargo, esta técnica tiene el problema de que en cuanto no hubiese una presión lo suficientemente pequeña por debajo del vehículo, cosa que por ejemplo podía

pasar si se pasaba a gran velocidad por encima de un bache y el vehículo daba un saltito, éste podía volverse muy inestable e incluso podía salir volando.

Lo interesante del efecto suelo es que aumenta considerablemente el esfuerzo límite de adherencia entre los neumáticos y el suelo aerodinámicamente, sin aumentar la masa del automóvil, haciendo que el agarre sea mayor a mayores velocidades. El problema se presenta cuando los materiales de la banda de rodamiento de los neumáticos llegan al límite de adherencia contra el suelo, o cuando por accidente se levanta una rueda o el monoplaza avanza ladeado. Cuando esto ocurre, el vehículo simplemente se vuelve incontrolable.

2.5 Efectos involucrados en el Análisis Aerodinámico

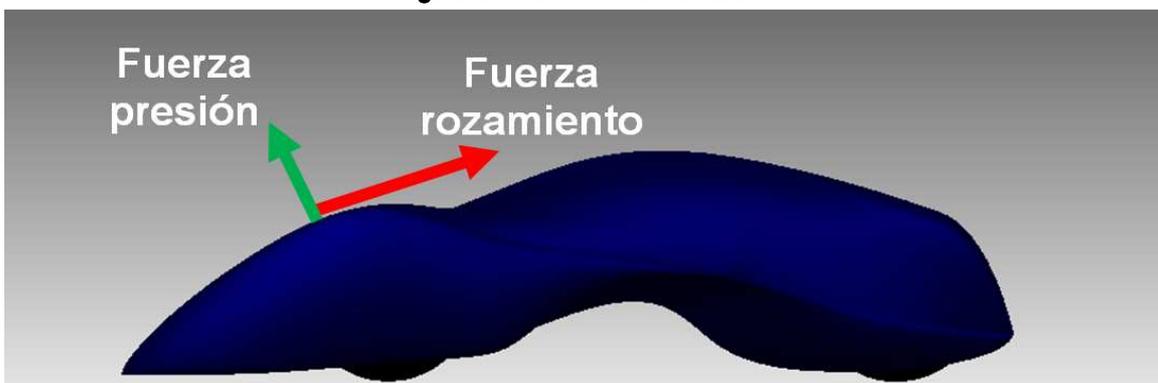
Tradicionalmente la resistencia aerodinámica se divide en dos grandes grupos atendiendo a la causa inmediata que la origina, hablándose de resistencia aerodinámica de origen viscoso y resistencia aerodinámica de origen potencial. Dentro de cada grupo se consideran a su vez otras dos subdivisiones, con lo que se tiene cuatro contribuciones distintas a la resistencia.

Los dos términos que se consideran en la resistencia aerodinámica de origen viscoso son las resistencias de rozamiento (o de fricción) y la resistencia de presión (también llamada resistencia de forma). En cuerpos con corriente no desprendida y que no generan sustentación, que se desplazan a través del aire en calma a velocidades subsónicas, como es el caso de los automóviles, la resistencia de fricción suele ser el término dominante.

En cada punto de la superficie de la carrocería del vehículo se producen estas dos fuerzas (presión y rozamiento) que tienen que ver con su movimiento en el aire. Una es la fuerza de presión que ejerce el fluido (normal a la superficie) y otra la fuerza de rozamiento con el fluido debida a efectos viscosos (tangencial a la superficie).

En la siguiente figura se ilustra el comportamiento de estas dos resultante.

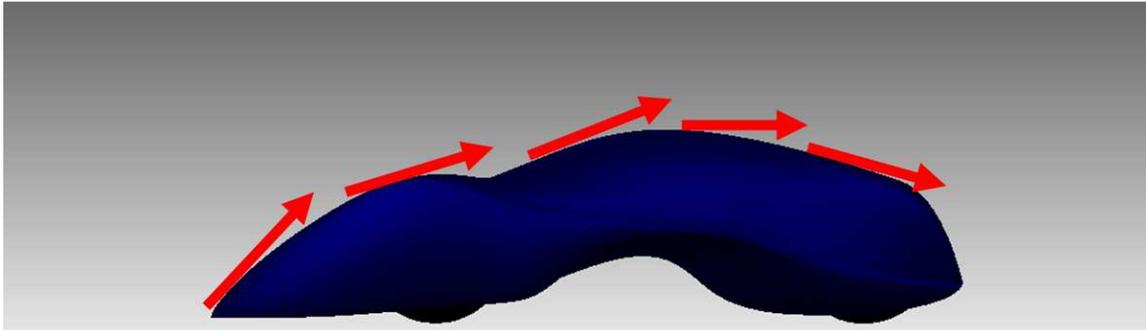
Figura 6 Fuerzas Resultantes



Fuente: autor del proyecto

En la siguiente grafica se puede apreciar cual sería la distribución de la fuerza de rozamiento sobre la carrocería del vehículo.

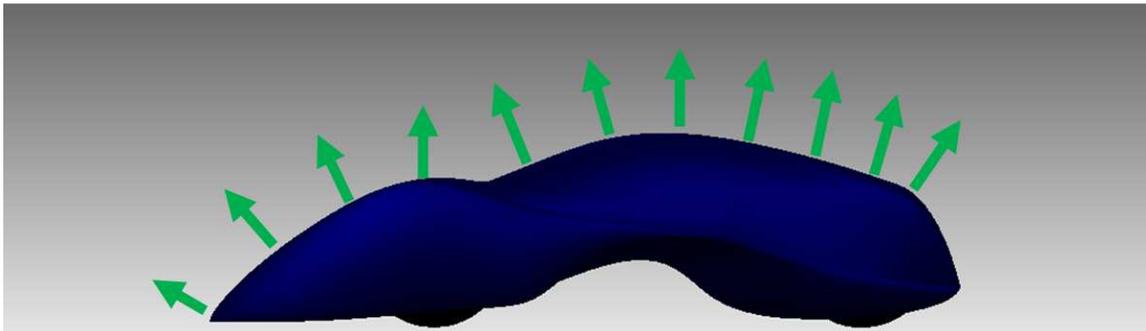
Figura 7 Distribución Fuerza de Rozamiento



Fuente: autor del proyecto

En la siguiente grafica se puede apreciar cual sería la distribución de la fuerza presión sobre la carrocería del vehículo.

Figura 8 Distribución Fuerza de Presión



Fuente: autor del proyecto

2.5.1 Coeficientes Aerodinámicos

Los coeficientes aerodinámicos son números adimensionales que se utilizan para el estudio aeronáutico o aerodinámico de las fuerzas y momentos que sufre un cuerpo cualquiera en movimiento a través del aire. Algunos de los coeficientes más conocidos son el coeficiente de penetración C_X , el coeficiente de sustentación C_L .

El C_X es el coeficiente más influyente en el comportamiento de un vehículo en cuanto a lo que se refiere a su aerodinámica y el desplazamiento de éste a través del aire, a continuación se extenderá la información de dicho coeficiente y adicionalmente se calculará el valor para el caso del vehículo utilizado en la competencia Eco-Shell.

2.5.1.1 C_x Coeficiente de Penetración

La resistencia aerodinámica es el componente de la fuerza experimentada por un cuerpo al moverse a través de un fluido, esta depende de la velocidad y siempre va en sentido opuesto al desplazamiento del cuerpo. Para dar un ejemplo se puede definir como la fuerza que necesita un vehículo para penetrar en un fluido, en este caso el fluido es aire. El coeficiente de penetración o coeficiente aerodinámico denominado C_x , depende de varios factores, entre ellos:

- El área y la forma del cuerpo al cual se le hace el análisis.
- la velocidad es otro factor que influye a mayor velocidad se tiene una fuerza resultante mayor, esta fuerza crece con el cuadrado de la velocidad.
- Otro factor importante es la densidad del medio (aire). Valores normales son $1,225 \text{ g/dm}^3$ y por cada 500 metros de altitud, disminuye un 5% aproximadamente.

Es evidente que cuanto menor sea el C_x de un coche, menos tiende a sufrir los efectos del aire.

La siguiente expresión es utilizada para hallar el coeficiente de penetración

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

Donde:

F_x : Fuerza de arrastre experimentada por el vehículo.

ρ : Es la densidad del fluido en el que se mueve el cuerpo.

V : Es la velocidad relativa de la corriente de aire incidente en el vehículo.

S : Es la superficie de referencia, suele emplearse la superficie frontal del mismo.

En el caso del vehículo para la competencia Eco-Shell se tendría:

F_x : 27,71N Tomado de los resultados de la simulación a 13,88 m/s

ρ : 1,204 Kg/m³ Densidad del aire a condiciones estándar

V : 13,88 m/s Velocidad utilizada para la simulación

S : 0,6834 m² Correspondiente al área frontal del vehículo (0,680mX1,005m)

Reemplazando en la formula se tendría

$$C_x = \frac{27,71 N}{\frac{1}{2} \left(1,204 \frac{kg}{m^3} \right) \left(13,88 \frac{m}{s} \right)^2 0,6834 m^2}$$

$$C_x = 0,349$$

A continuación algunos valores de coeficientes de penetración de algunas marcas de vehículos de calle⁵.

⁵ www.wikipedia.com

Modelo	Cx
Opel Kadett (1989)	0,38
Citröen CX (1974)	0,36
Opel Astra (2004)	0,32
Peugeot 807 (2002)	0,33
Renault Espace (1997)	0,36
Renault Espace (2002)	0,35
Renault Vel Satis (2002)	0,33
Hispano Divo (2003)	0,349
Irizar PB (2002)	0,55
Camión con deflectores	0,70
Autobús	0,49
Motocicleta	0,70
Fórmula 1 en Mónaco (el mayor)	1,084
Fórmula 1 en Monza (el menor)	0,7
Paracaídas	1,33
Perfil alar simétrico	0,05
Esfera	0,1
Cubo valor de referencia	1

3. Procedimiento para la Simulación

Durante el desarrollo de las simulaciones se tuvieron en cuenta las diferentes opciones proporcionadas por el modulo de simulación de fluidos, ofrecido por el software *UNIGRAPHICS NX*, de esta forma se estimaron los parámetros que se usarían y se ajustaron al modelo 3D de la carrocería del vehículo para la competencia *ECO-SHELL*.

El diseño desarrollado por la *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA* del Vehículo para la competencia *ECO-SHELL* fue desarrollado con el software *RHINOCEROS*, debido a esto se hizo necesario exportar a un formato que el software *UNIGRAPHICS NX* fuera compatible, en este caso sería en formato "*IGES*".

En primer lugar fue preciso preparar el fichero con el que se contaba en el formato "*IGES*", haciendo una costura de superficies para obtener un modelo de una única pieza el cual posteriormente se iría preparando a las condiciones requeridas para la simulación.

El procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Coser superficies
- Diseñar el túnel de viento
- Determinar la malla
- Determinar las condiciones del fluido

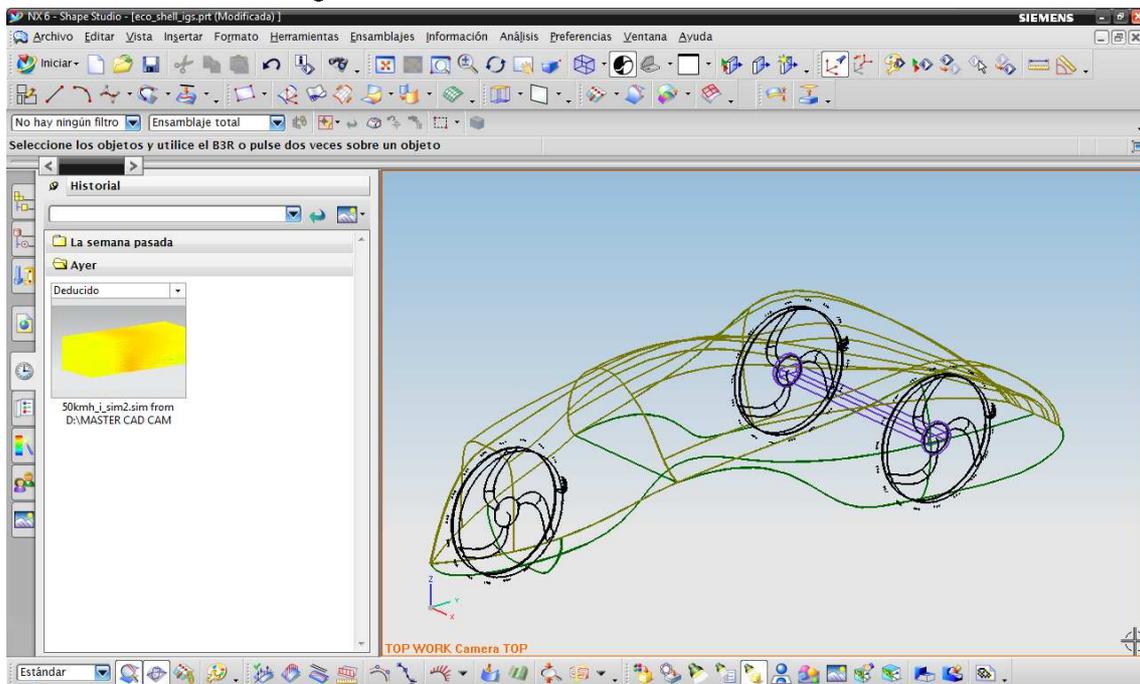
A continuación se explicará de forma más minuciosa cada uno de los procedimientos mencionados anteriormente.

3.1 Coser superficies

El formato IGES (Initial Graphics Exchange Specification) define un formato neutral de datos que permite el intercambio digital de información entre sistemas de diseño asistido por computadora CAD⁶.

En el software *UNIGRAPHICS NX* en el modulo “Shape Studio” se utiliza la herramienta “coser” con dicha herramienta se logra combinar los cuerpos laminares al coser bordes comunes o bien combina los cuerpos sólidos al coser las caras comunes.

Figura 9 Fichero del Vehículo en Formato IGES

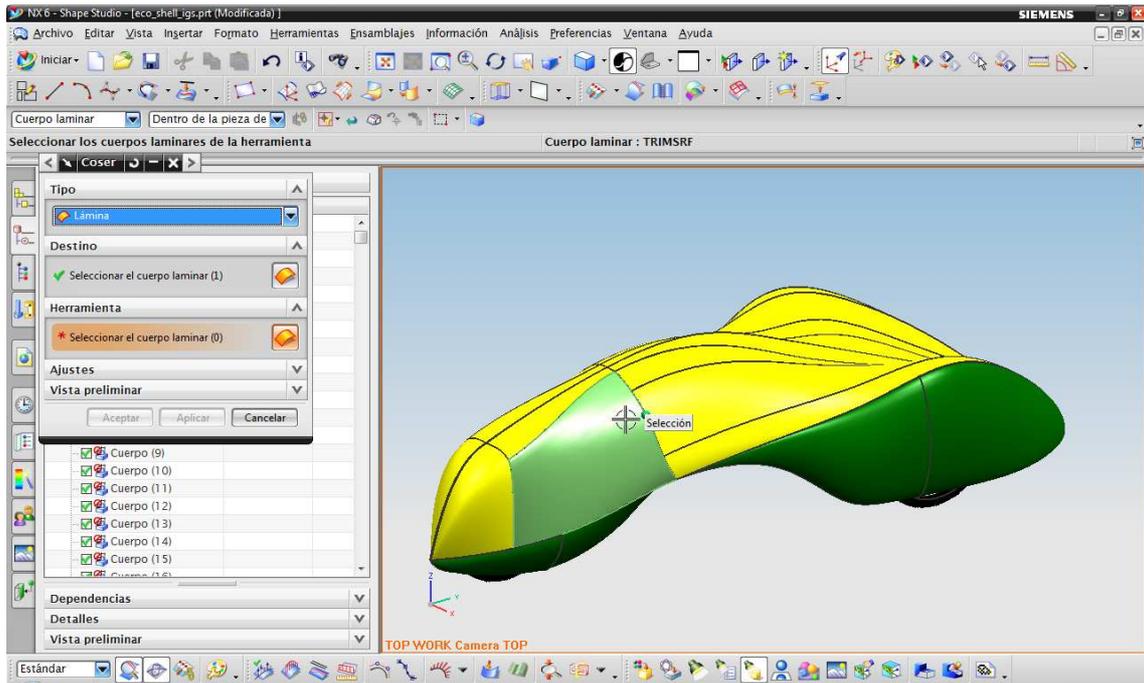


Fuente: autor del proyecto

En un principio el fichero existente muestra un grupo de superficies que al ser unidas formaran un solo cuerpo, pero estas superficies están separadas entre sí. A continuación se representa como se van uniendo una a una las superficies para conseguir un único modelo.

⁶ <http://es.wikipedia.org/wiki/IGES>

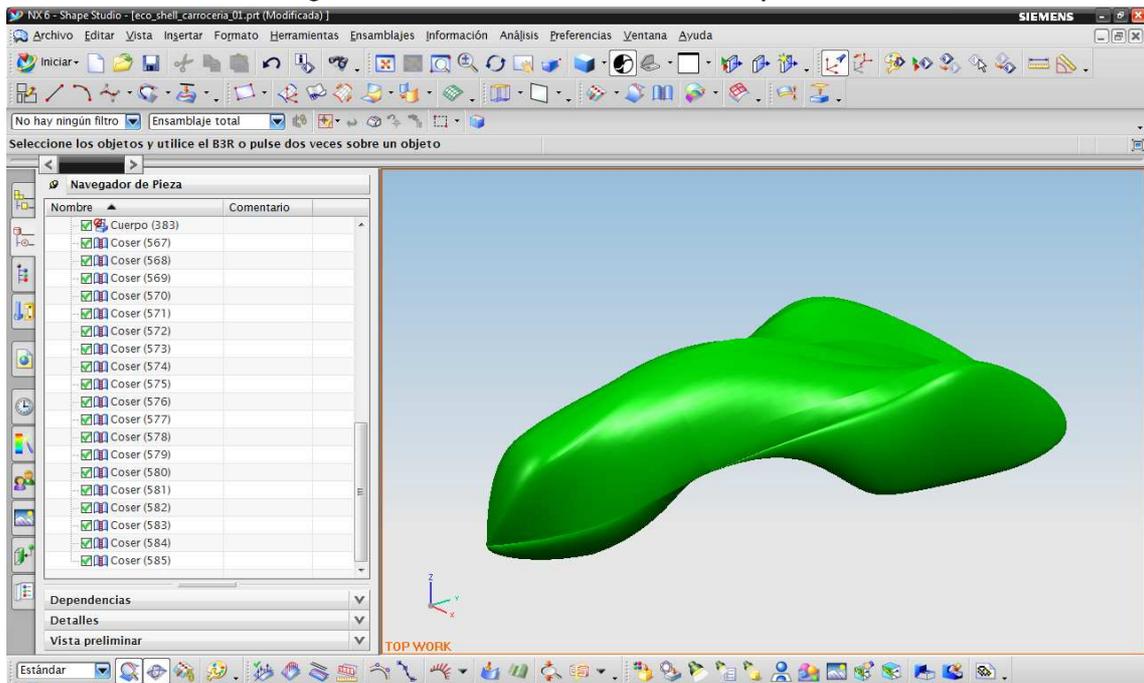
Figura 10 Proceso para Coser las Superficies



Fuente: autor del proyecto

Una vez se unen todas las superficies se consigue el siguiente modelo, donde se aprecia como todas forman una sola pieza ya que todas presentan un solo color.

Figura 11 Resultado de la Cosida de Superficies

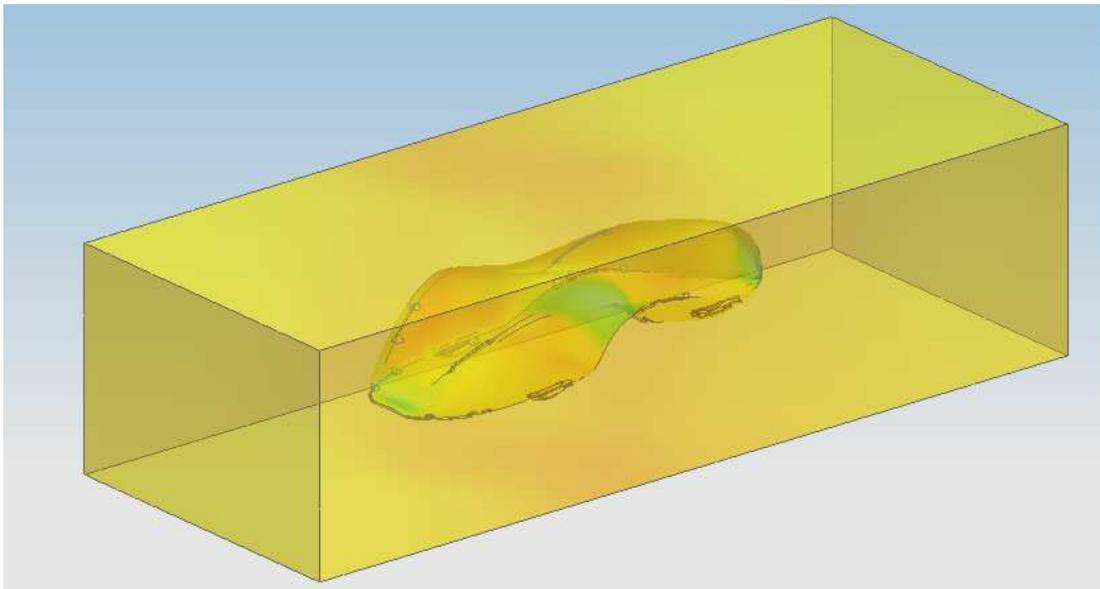


Fuente: autor del proyecto

3.2 Diseñar el túnel de viento

Tal como se mencionaba en el numeral *2.2 Túnel de viento*, la confiabilidad y proximidad al comportamiento en situaciones reales se obtiene utilizando el modelo con una escala lo más cercano al tamaño real, para este caso el modelo que se usa está en escala 1:1 siendo esto una ventaja considerable.

Figura 12 Túnel



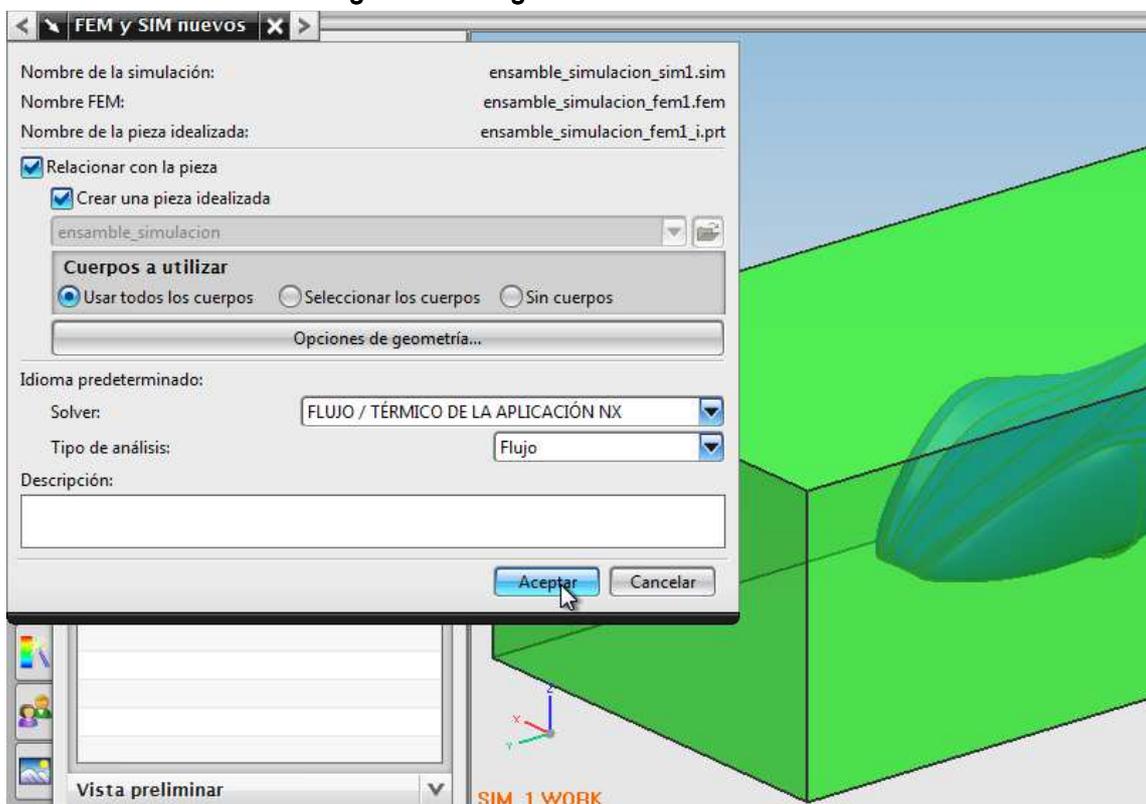
Fuente: autor del proyecto

Otro parámetro a considerar es el espacio libre alrededor del modelo, esto con el fin de evitar cualquier efecto que pudiera ser generado por las paredes del túnel, en la teoría del mismo numeral citado en el párrafo anterior se dice que la distancia óptima está dada de tal forma que el modelo debe ser como máximo cuatro quintos del tamaño total del túnel, para este caso el modelo es un tercio del tamaño total del túnel.

3.3 Condiciones Generales de la simulación

Una vez creado el túnel y exportado el fichero de *RHINOCEROS* a *UNIGRAPHICS NX*, se prepara el modelo para poder hacer la simulación, posteriormente se selecciona el tipo de simulación que se realizará, para esta simulación se elige del solver la opción “*FLUJO / TÉRMICO DE LA APLICACIÓN NX*” y en tipo de análisis “*FLUJO*”

Figura 13 Configuración de la Simulación



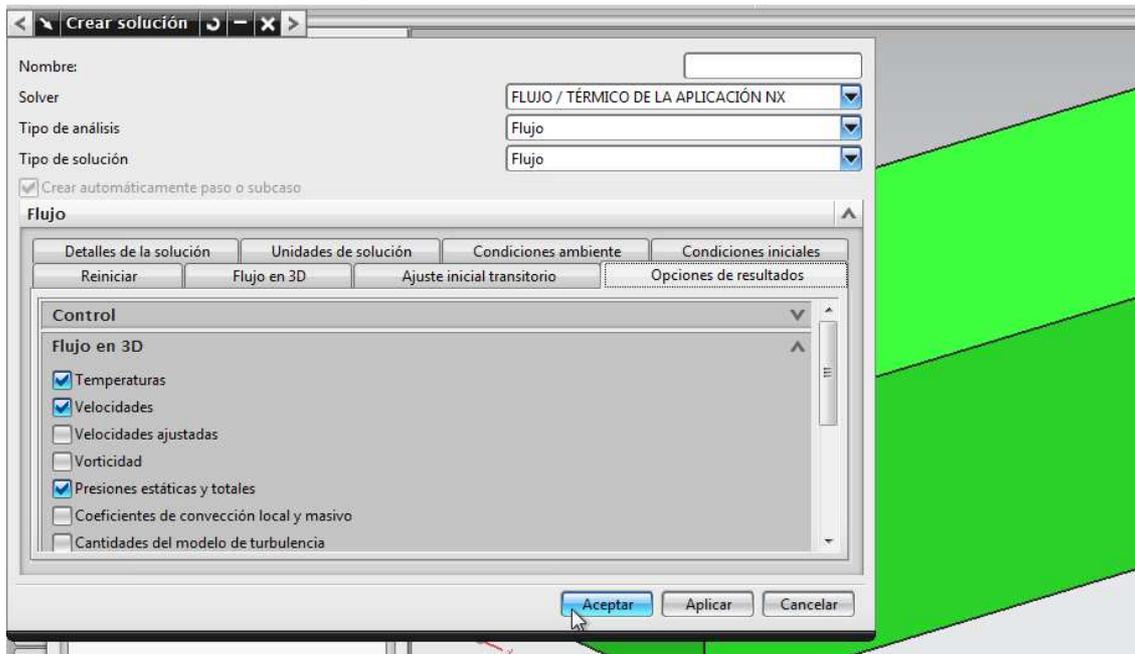
Fuente: autor del proyecto

Posteriormente se seleccionan otros parámetros que definirán los resultados que se soliciten como son:

- Unidades de solución, permite elegir el sistema de unidades en el que se tendrán los resultados.

- Condiciones ambientales, permite establecer las características del medio en el que se ejecutara la simulación por ejemplo, presión, temperatura, valor de la gravedad.
- Opciones de los resultados, permite seleccionar los resultados que calculara el solver y posteriormente se verán en la simulación.
- Parámetros de fricción, permite establecer la interacción de la fricción entre las superficies y el modelo cuando estas son suficientemente influyentes.

Figura 14 Parámetros de los Resultados



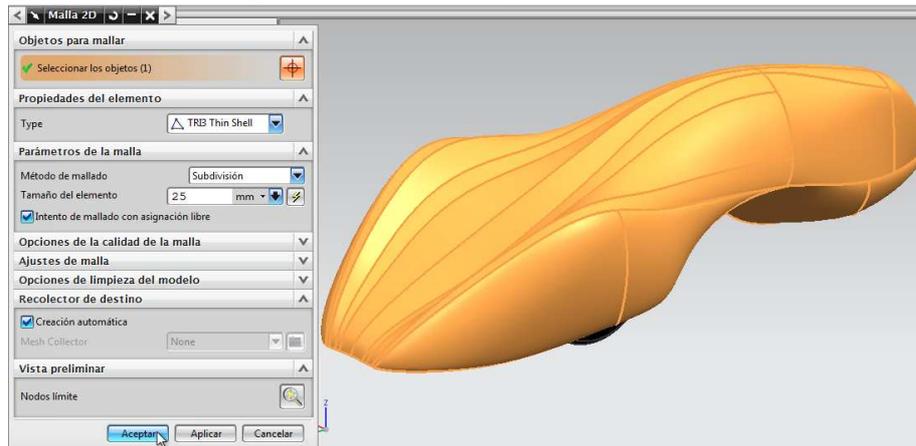
Fuente: autor del proyecto

Una vez determinados todos los parámetros mencionados en los dos pasos anteriores se dispone a la selección del tipo de malla que se debe usar y las características del fluido que se va hacer circular por el túnel diseñado

3.4 Mallado De La Carrocería

Después de haber establecido las condiciones generales de la simulación se procede a determinar las características de la malla que se va a utilizar en la carrocería que es el principal objetivo a analizar.

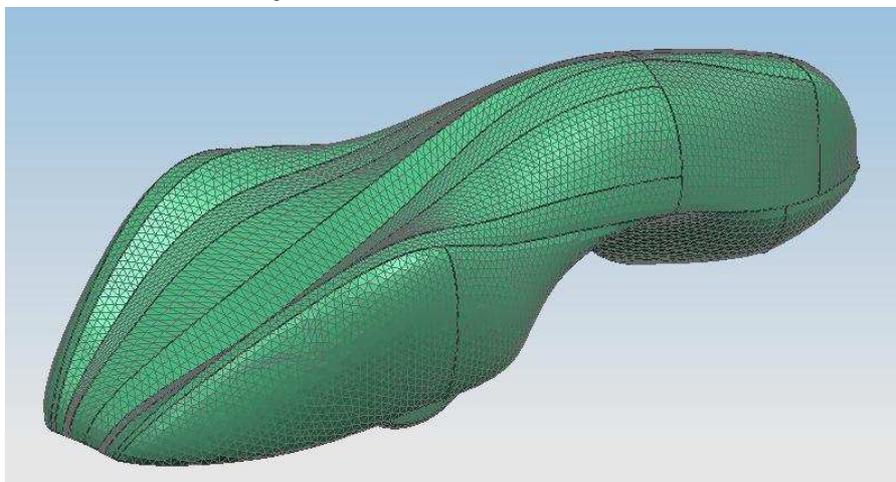
Figura 15 Características de la Malla



Fuente: autor del proyecto

Para la carrocería se utilizó una malla 2D; esta selección crea una malla de elementos de cascara fina en las caras de un sólido. El tipo es TRI3 thin Shell, y el tamaño de cada elemento es 25 mm para tener un resultado detallado, además se dan una serie de restricciones para evitar dificultades con el mallado entre ellos el tamaño mínimo de elemento.

Figura 16 Mallado de la Carrocería



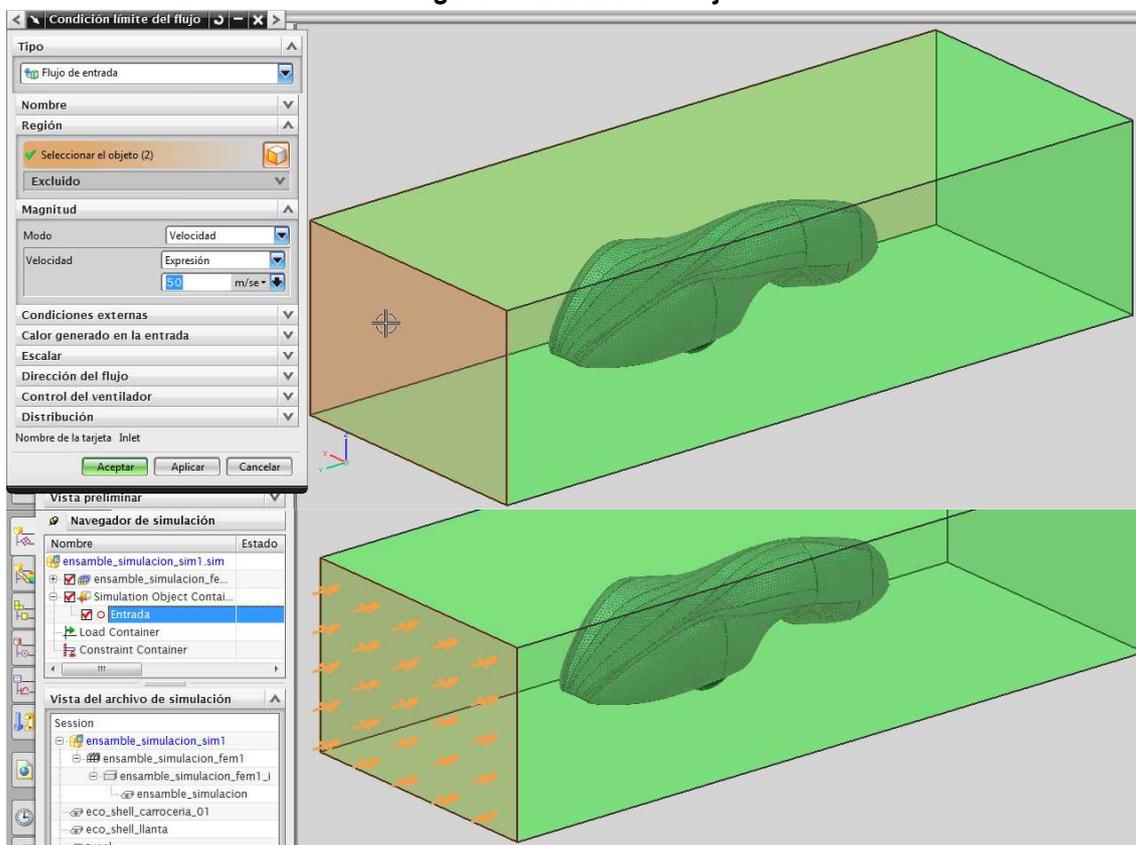
Fuente: autor del proyecto

3.5 Condiciones y Mallado del Flujo

Las condiciones del flujo juegan un papel importante en el desarrollo de la simulación, estas condiciones pueden caracterizarse en cuatro grupos característicos así, condiciones de entrada, condiciones de salida, capa limite y condiciones del flujo en movimiento.

En la siguiente imagen se muestra la configuración que se dispuso para la entrada del flujo.

Figura 17 Entrada del Flujo



Fuente: autor del proyecto

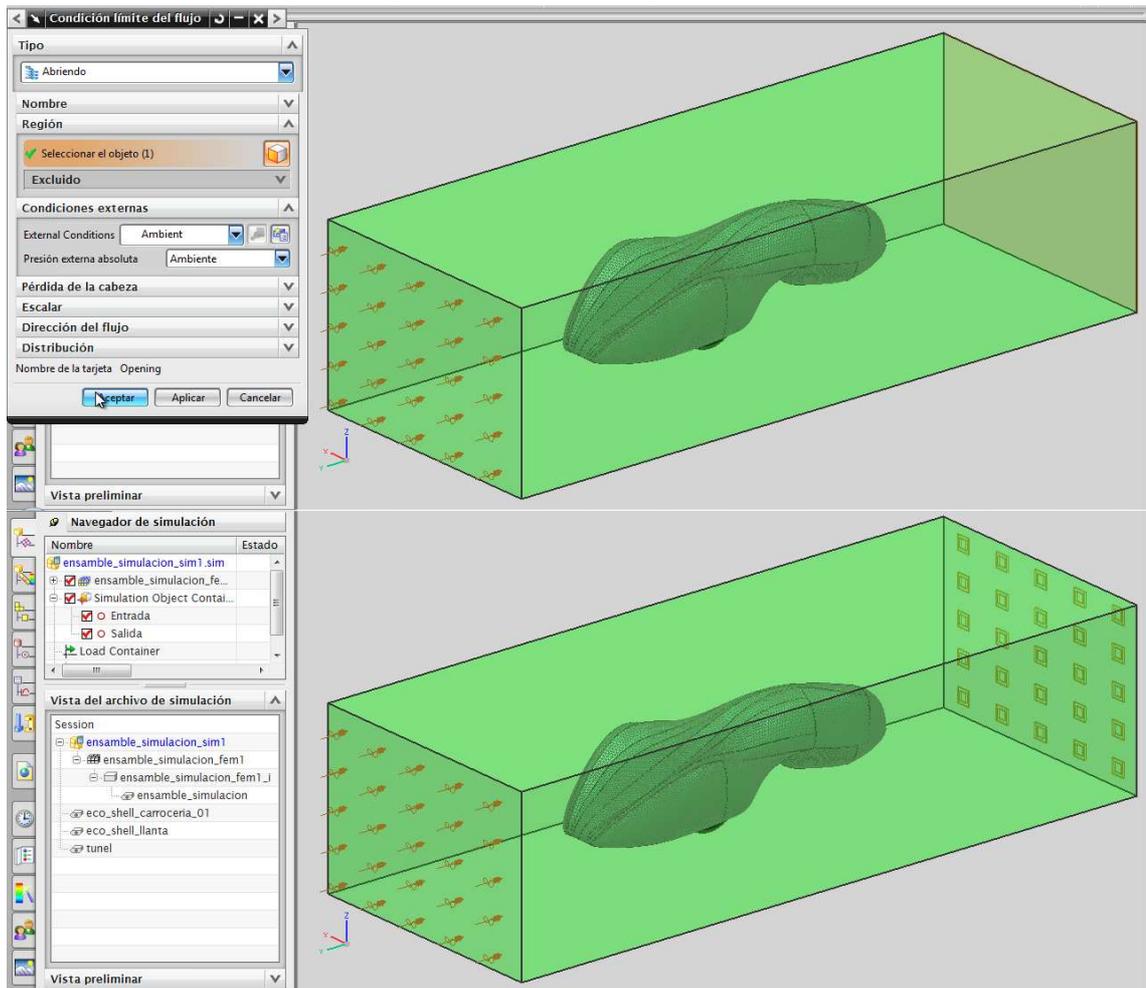
En el menú "*Condiciones Limite del Flujo*" se fijan varios parámetros, el primer paso es seleccionar la cara del túnel a la que se le aplicara dichos parámetros. Aquí es posible definir varias características entre ellas:

- Dar un nombre a este grupo de condiciones
- Determinar la velocidad de entrada del fluido en m/s

- El programa cuenta con las condiciones estándar para el aire y el agua, de ser necesario esta la opción de caracterizar otro fluido.
- Si se requiere se puede especificar algún tipo de inclinación para la entrada del flujo.

En la siguiente imagen se muestra la configuración que se dispuso para la salida del flujo.

Figura 18 Salida del Flujo



Fuente: autor del proyecto

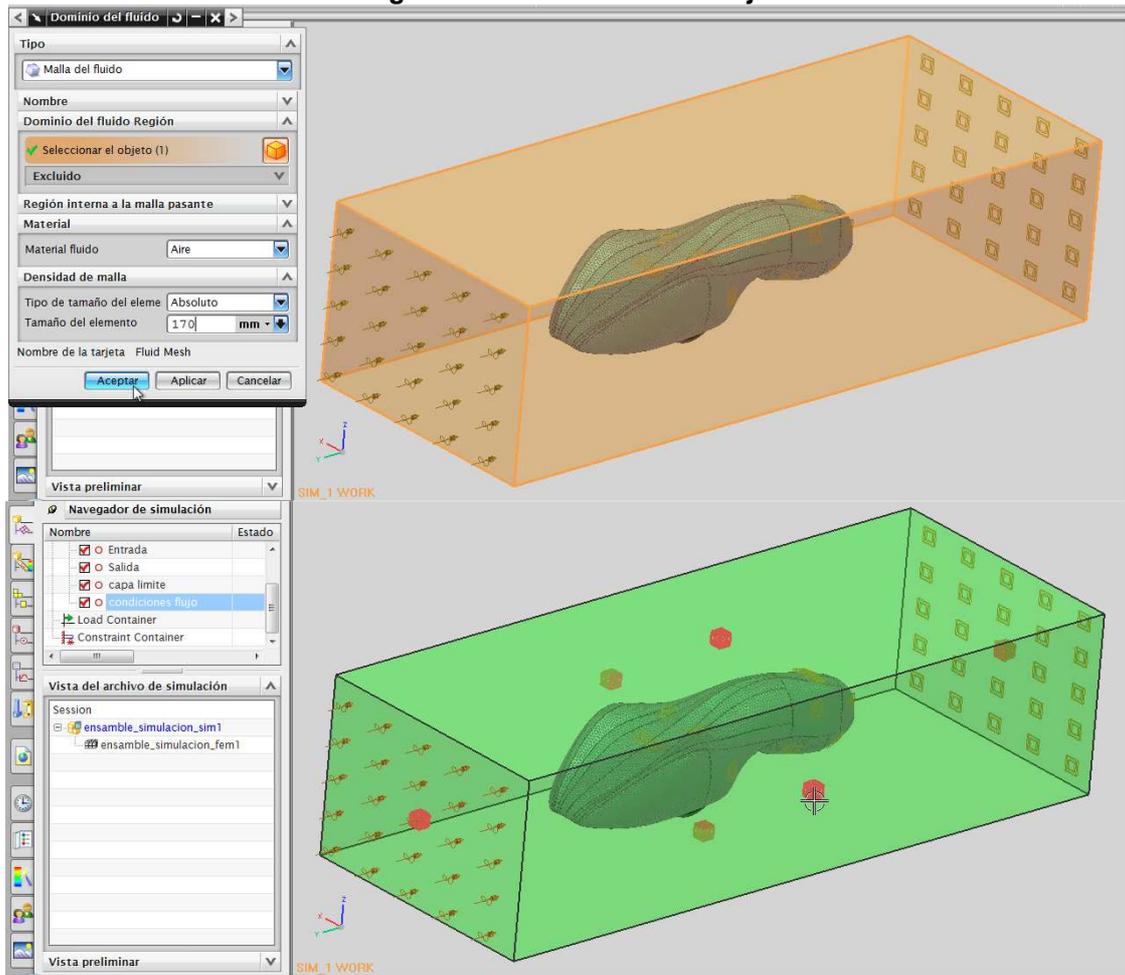
En el menú “*Condiciones Limite del Flujo*” se fijan varios parámetros, el primer paso es seleccionar la cara del túnel a la que se le aplicara dichos parámetros. Aquí es posible definir varias características entre ellas:

- Dar un nombre a este grupo de condiciones

- Se especifica si en la salida se tendrá alguna diferencia de presión para este caso la salida es al ambiente así que no afectan las condiciones internas del túnel, por ejemplo no hay efecto de succión

En la siguiente imagen se muestra la configuración que se dispuso para la el flujo durante su recorrido dentro del túnel.

Figura 19 Condiciones del Flujo



Fuente: autor del proyecto

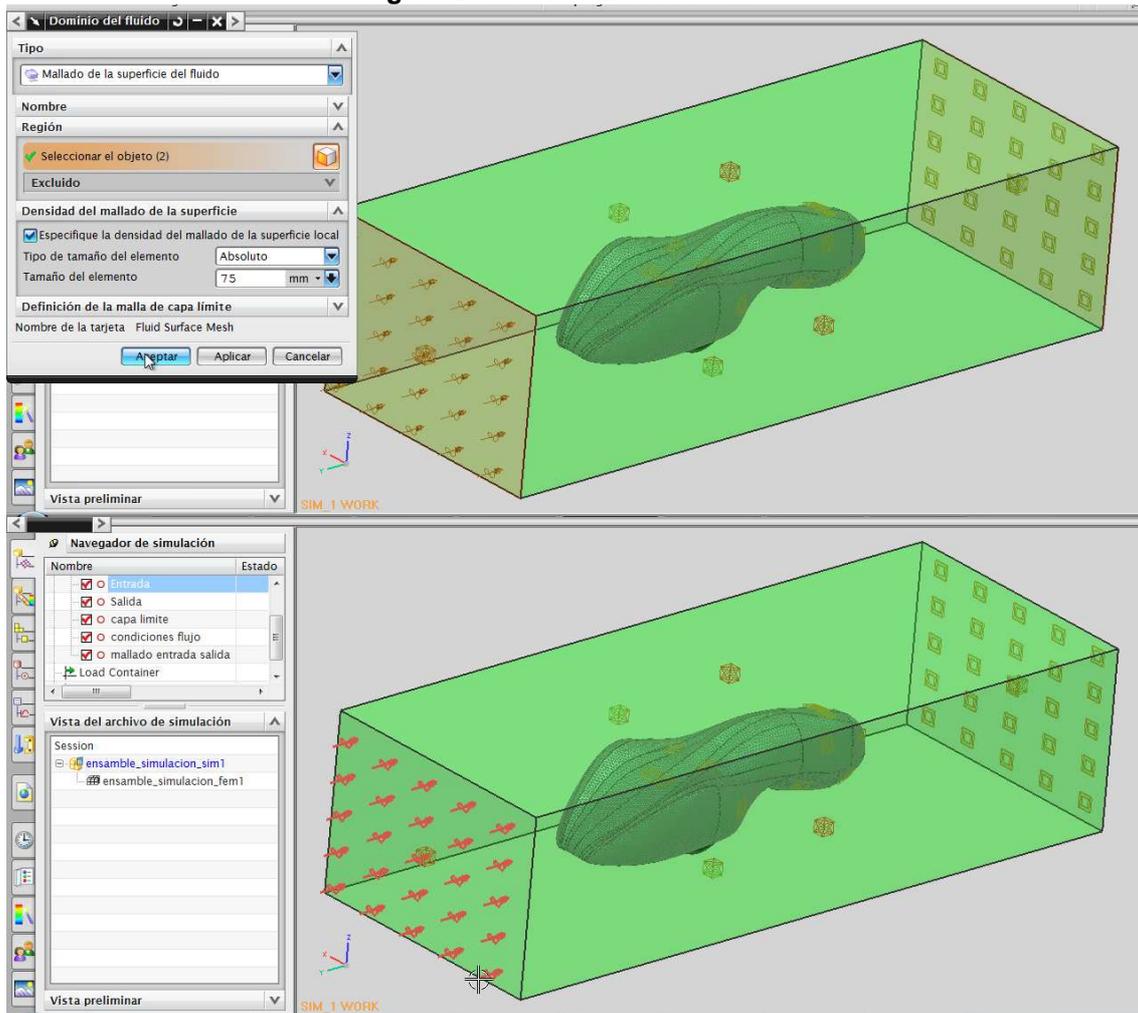
En el menú “*Condiciones Limite del Flujo*” se fijan varios parámetros, en primer paso se selecciona todo el túnel, esto para indicar que el flujo se desplazará a través de él. Aquí es posible definir:

- Dar un nombre a este grupo de condiciones.

- Se especifica la distancia de la malla 170mm para reducir la complejidad teniendo menos elementos.
- Una vez más se selecciona el tipo de fluido.

En la siguiente imagen se muestra la configuración que se dispuso para el mallado de la entrada y la salida del flujo.

Figura 20 Mallado Entrada Salida



Fuente: autor del proyecto

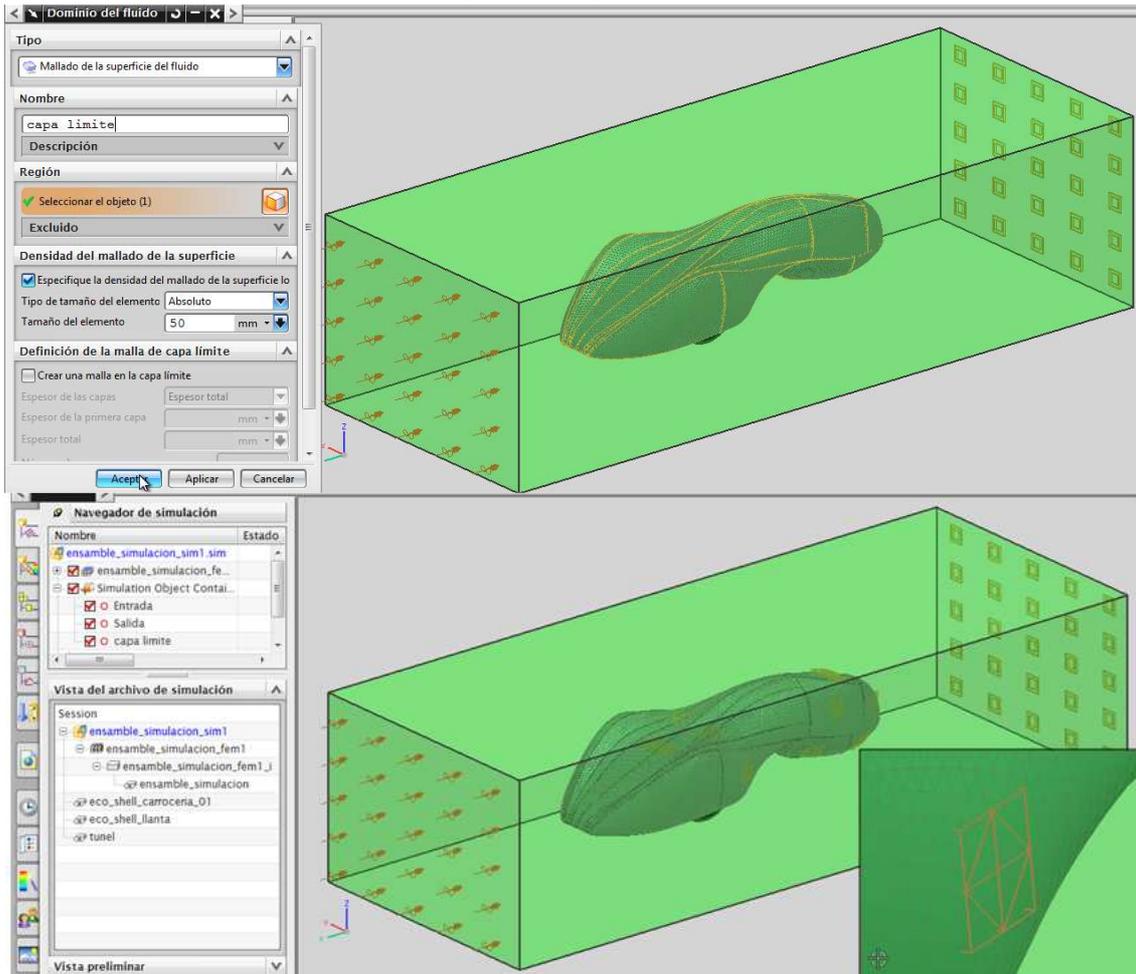
En el menú “*Condiciones Limite del Flujo*” se fijan varios parámetros, se selecciona la entrada y la salida del túnel. Aquí es posible definir:

- Dar un nombre a este grupo de condiciones.

- Se especifica la densidad de la malla de 75 mm para la entrada y la salida.

En la siguiente imagen se muestra la configuración que se dispuso para la capa límite.

Figura 21 Capa Límite



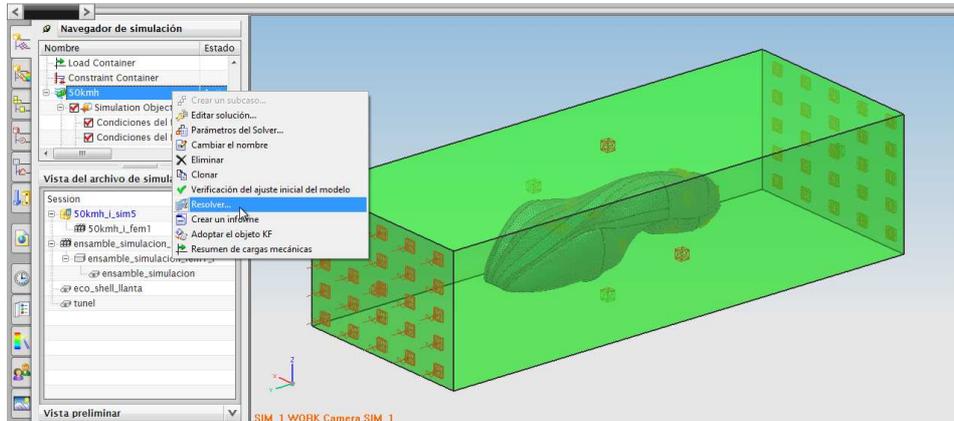
Fuente: autor del proyecto

En el menú "**Condiciones Limite del Flujo**" se fijan varios parámetros, el primer paso es seleccionar la superficie a la cual se le colocara la capa límite, en este caso la carrocería es el principal objetivo. Aquí es posible definir:

- Dar un nombre a este grupo de condiciones.
- Se especifica el tamaño de la capa límite.

Una vez aplicados todos los parámetros se ejecuta el solver para obtener la solución.

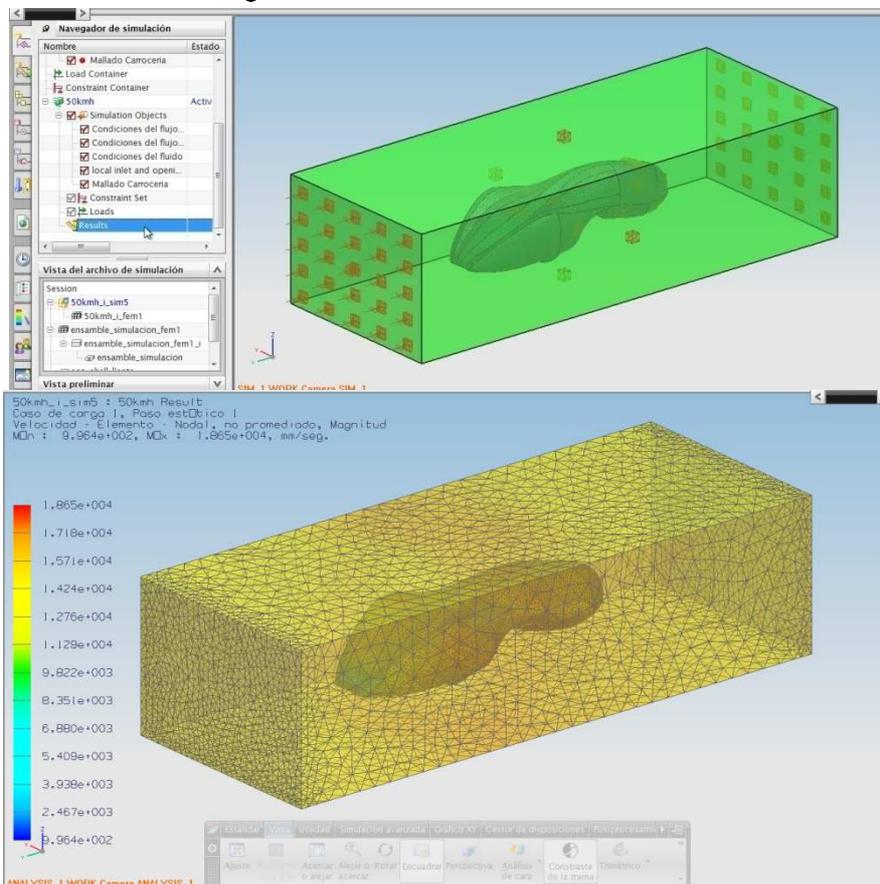
Figura 22 Resolver



Fuente: autor del proyecto

Una vez se pone a correr el solver tardara en hacer los cálculos pertinentes, posteriormente se cargan los resultados.

Figura 23 Animación de la Simulación



Fuente: autor del proyecto

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS SIMULACIONES

Las simulaciones realizadas fueron divididas en dos grandes grupos siendo clasificadas en un primer grupo por la cara usada para hacer incidir del flujo de aire y el segundo grupo por la velocidad del aire.

Después de analizar los resultados se llegó a la conclusión que el vehículo utilizado para la competencia Eco-Shell presentaba un comportamiento similar cuando se efectuaban cambios de velocidad, haciendo que los resultados apreciados a simple vista no reflejaran modificaciones significativas, esto quiere decir que las zonas de mayor y menor magnitud seguían siendo las mismas, por otra parte el cambio se veía reflejado en el valor de estas magnitudes ya que el aumento de la velocidad influye directamente en ellas.

La herramienta de software *UNIGRAPHICS NX* nos permite escoger entre varias opciones de visualización de resultados, entre ellas:

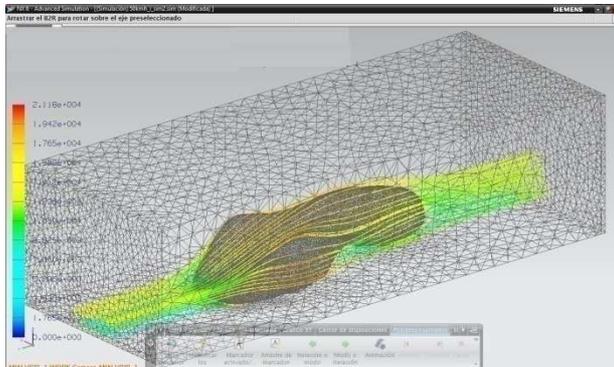
- Líneas aerodinámicas
- Flechas
- Volúmenes
- Elementos

La opción seleccionada para la visualización de los resultados de las simulaciones es la de "*líneas aerodinámicas*" esto con el propósito de ver hacia donde se dirige el flujo. Una línea aerodinámica traza el recorrido de un elemento o pequeña porción de fluido mientras viaja alrededor de la carrocería del vehículo utilizado para la competencia Eco-Shell

A continuación se presentaran los resultados obtenidos y se mostrarán los comentarios que éstos han suscitado teniendo en cuenta las bases teóricas citadas en el los primeros capítulos del documento.

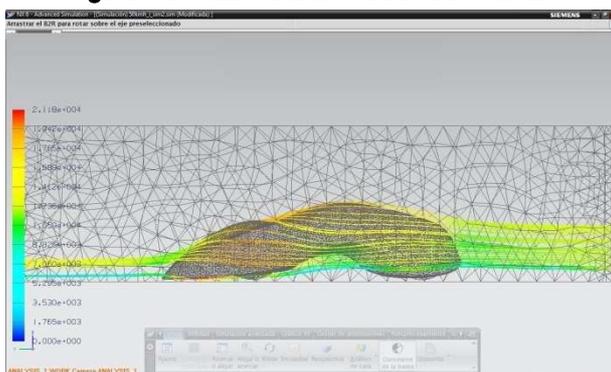
4.1 Simulación con Incidencia en la Cara Frontal

Figura 24 Isométrico Incidencia Frontal



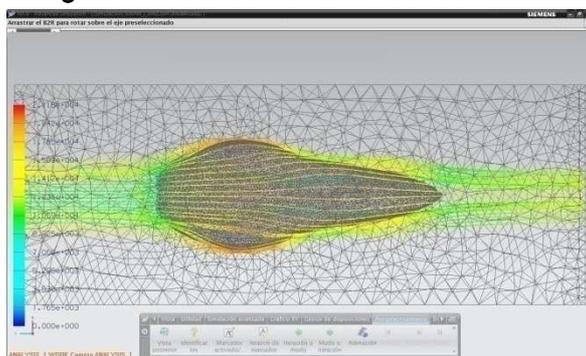
Fuente: autor del proyecto

Figura 25 Vista Lateral Incidencia Frontal



Fuente: autor del proyecto

Figura 26 Vista de Planta Incidencia Frontal



Fuente: autor del proyecto

En las figuras de la izquierda se puede observar el comportamiento presentado por el vehículo utilizado para la competencia Eco-Shell en esta ocasión se aplica un flujo de aire en la cara frontal a una velocidad de 13,88 m/s.

El comportamiento presentado por el vehículo es bastante bueno pues se observa como las líneas fluyen sin presentar alteraciones notables, queriendo decir esto que la aerodinámica de la carrocería ofrece poca resistencia al desplazamiento en el flujo de aire. Adicionalmente se logra apreciar claramente como se está generando el efecto suelo por las líneas verde en la parte inferior de la carrocería que indica una disminución en la presión.

También son evidentes algunas zonas de color naranja, esto se debe a que en estas zonas se presentan los mayores valores de resistencia, es allí donde se deben enfocar las mejoras del diseño.

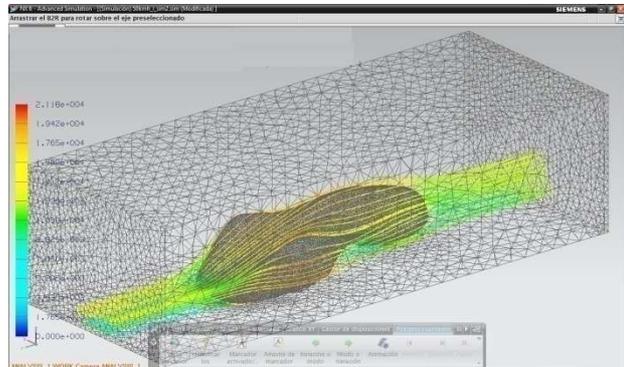
4.2 Simulación con Incidencia en la Cara Posterior

En las figuras de la derecha se observa el comportamiento presentado por el vehículo utilizado para la competencia Eco-Shell en esta ocasión se aplica un flujo de aire en la cara posterior a una velocidad de 13,88 m/s.

Existe bastante similitud con los resultados de la simulación con el incidencia en la cara frontal, al igual que en la simulación anterior las líneas tiene un comportamiento uniforme y no presentan alteraciones significativas el detalle que se puede resaltar es que al ser más alta la cara posterior del vehículo genera mayor resistencia, resistencia que podría ser un beneficio si en una competencia se presenta flujo de aire de características pues de cierta forma logra empujar el vehículo al estar en el mismo sentido del avance.

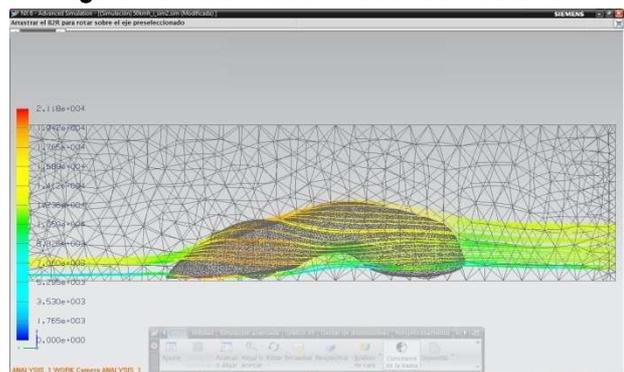
También se puede apreciar que las zonas de mayor resistencias son las mismas que el caso anterior.

Figura 27 Isométrico Incidencia Posterior



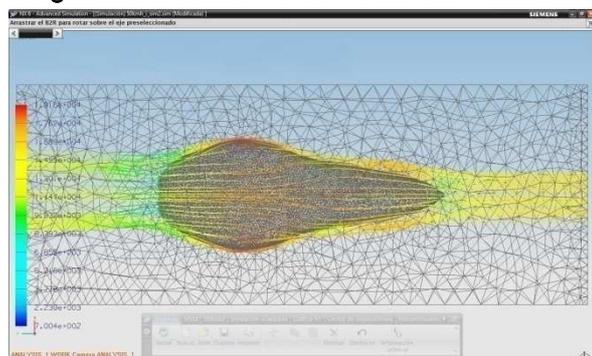
Fuente: autor del proyecto

Figura 28 Vista Lateral Incidencia Posterior



Fuente: autor del proyecto

Figura 29 Vista de Planta Incidencia Posterior



Fuente: autor del proyecto

4.3 Simulación con Incidencia en la Cara Lateral

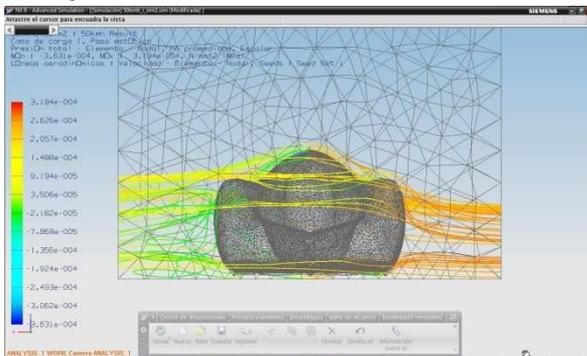
Figura 30 Vista de Planta Incidencia Lateral



Fuente: autor del proyecto

En las figuras de la izquierda se puede observar el comportamiento presentado por el vehículo utilizado para la competencia Eco-Shell en esta ocasión se aplica un flujo de aire en la cara lateral a una velocidad de 13,88 m/s.

Figura 31 Vista Frontal Incidencia Lateral



Fuente: autor del proyecto

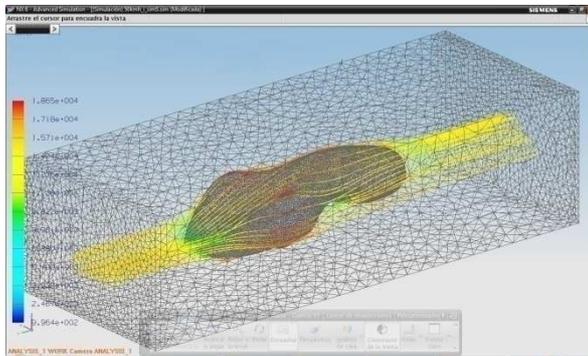
En este caso resalta como el flujo sufre alteraciones provocando turbulencias manifestadas una vez el flujo pasa por el vehículo, estas turbulencias se manifiestan con líneas onduladas que aparecen en verde.

Este comportamiento se debe a que visto de lado el vehículo aumenta su altura de manera más repentina dejando poco tiempo para que el flujo se acomode.

A pesar de los resultados negativos en esta simulación este comportamiento no influye mucho en el desempeño del vehículo en una competencia dado que el desplazamiento del vehículo no es en este sentido y en una competencia el viento solo incidiría en esta cara en un momento dado.

4.4 Simulación con Incidencia en la Cara Frontal Elevado del Suelo

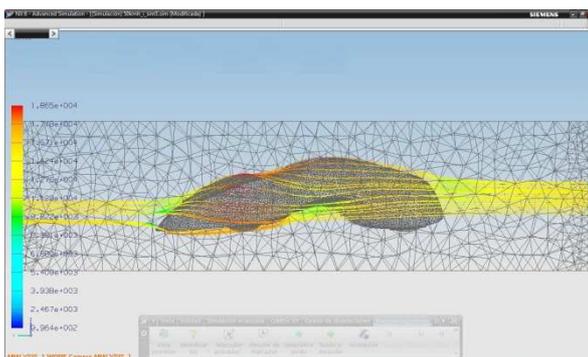
Figura 32 Isométrico Incidencia Frontal Elevado del Suelo



Fuente: autor del proyecto

En las figuras de la izquierda se puede observar el comportamiento presentado por el vehículo utilizado para la competencia Eco-Shell en esta ocasión se aplica un flujo de aire en la cara frontal con el vehículo elevado del suelo a una velocidad de 13,88 m/s.

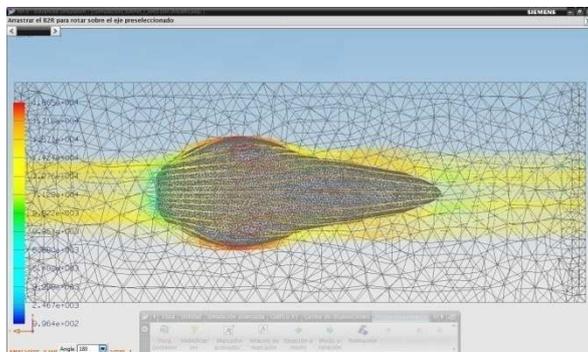
Figura 33 Vista Lateral Incidencia Frontal Elevado del Suelo



Fuente: autor del proyecto

El propósito de esta variante era verificar el efecto suelo y observa claramente como desaparecen las líneas verdes que se generaban bajo el vehículo cuando está apoyado sobre el suelo, de la misma forma se puede ver como el comportamiento de las líneas aerodinámicas sigue siendo muy homogéneo y las zonas de mayor resistencia siguen siendo las superficies laterales donde se alojan las llantas; lugar de especial atención para tener mejores resultados en la aerodinámica.

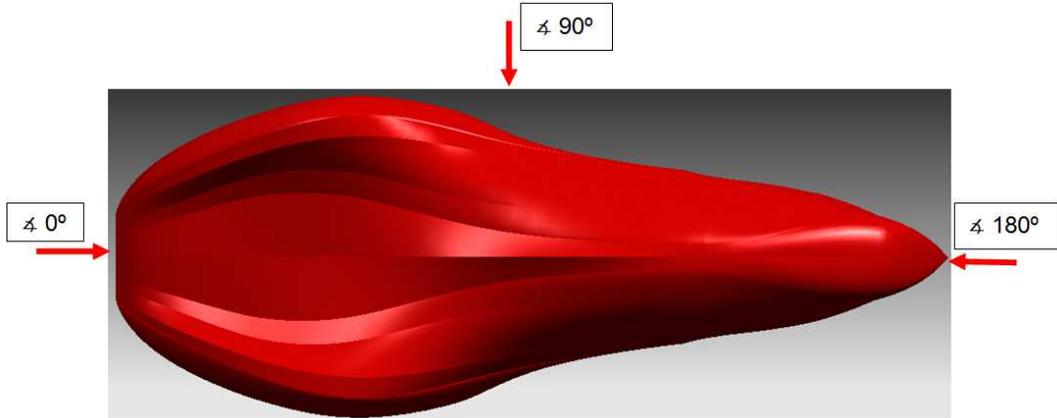
Figura 34 Vista de Planta Incidencia Frontal Elevado del Suelo



Fuente: autor del proyecto

Adicionalmente se realizaron pruebas a diferentes grados de incidencia del aire distribuidos como se muestra en la siguiente imagen.

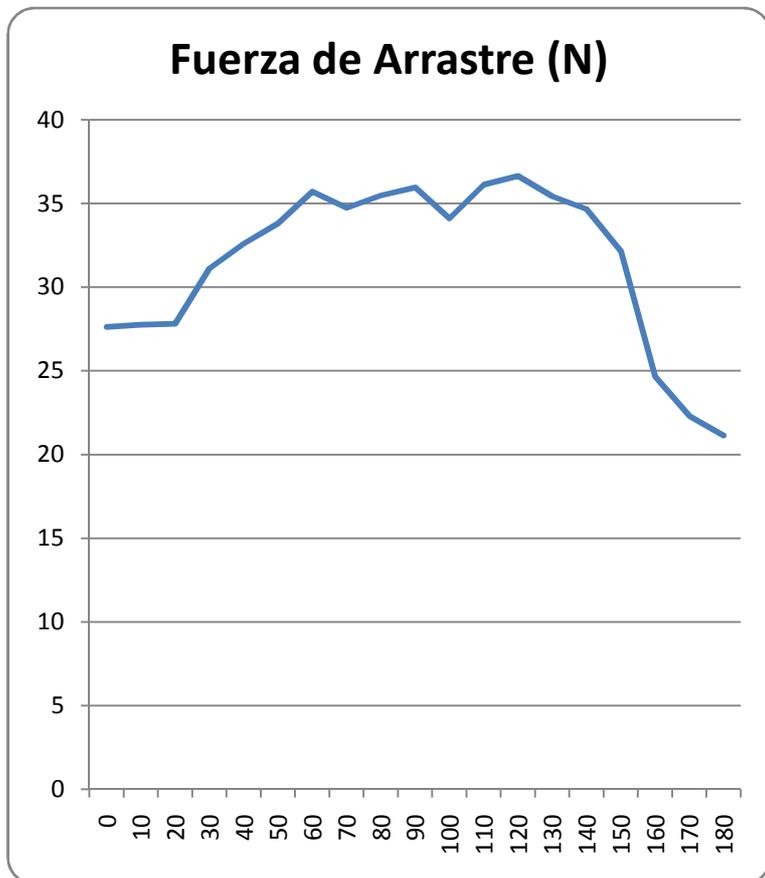
Figura 35 Incidencia del Aire

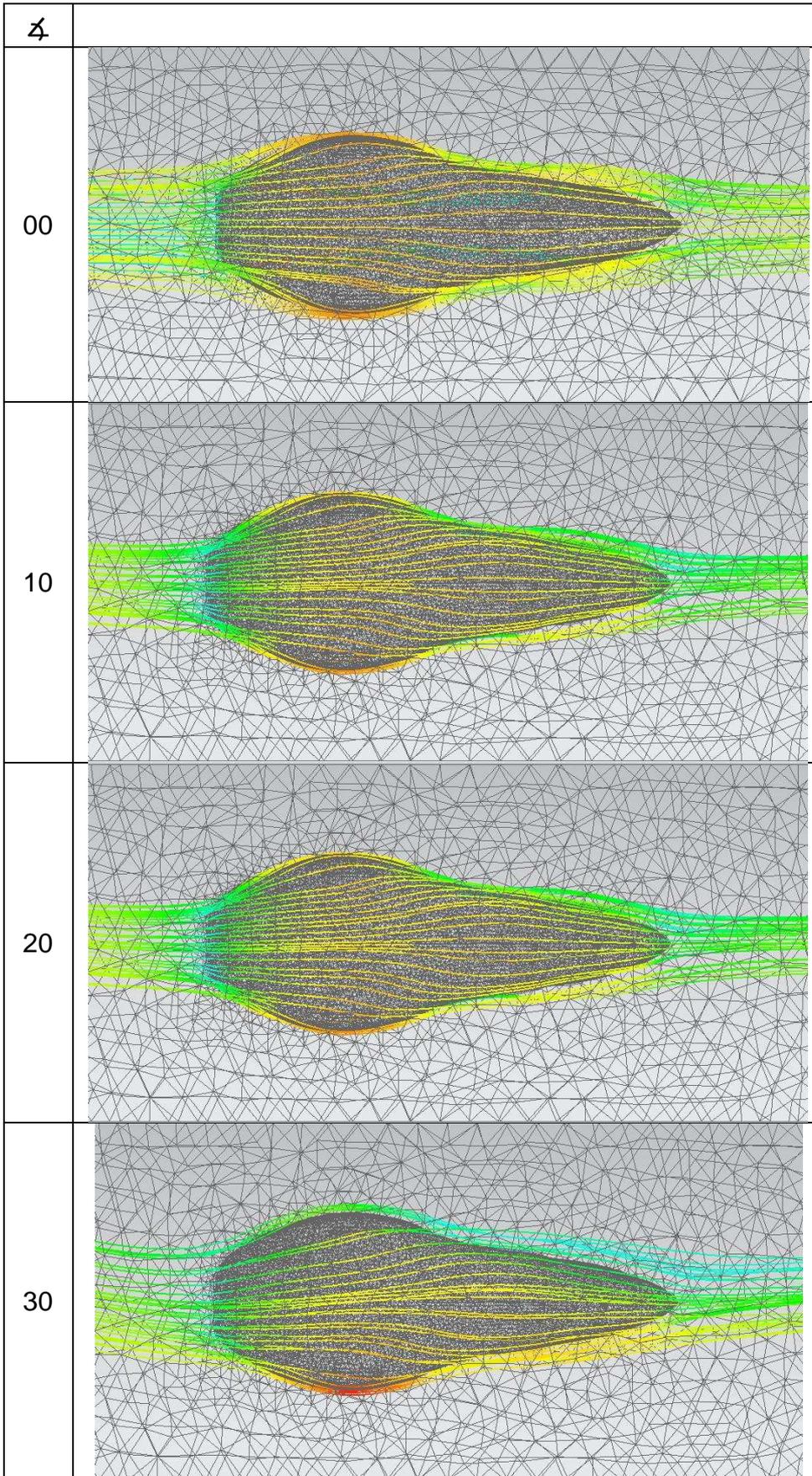


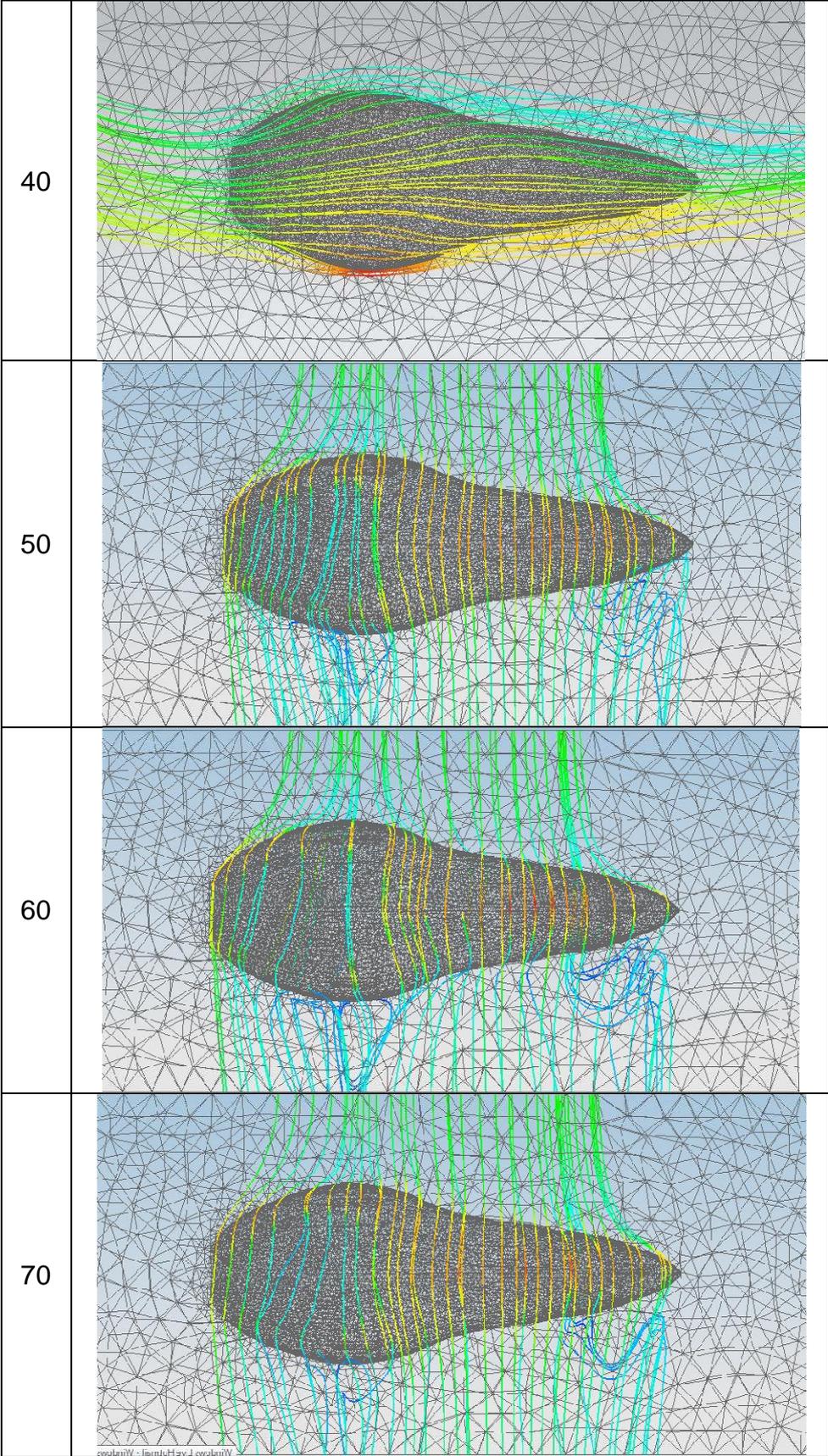
Fuente: autor del proyecto

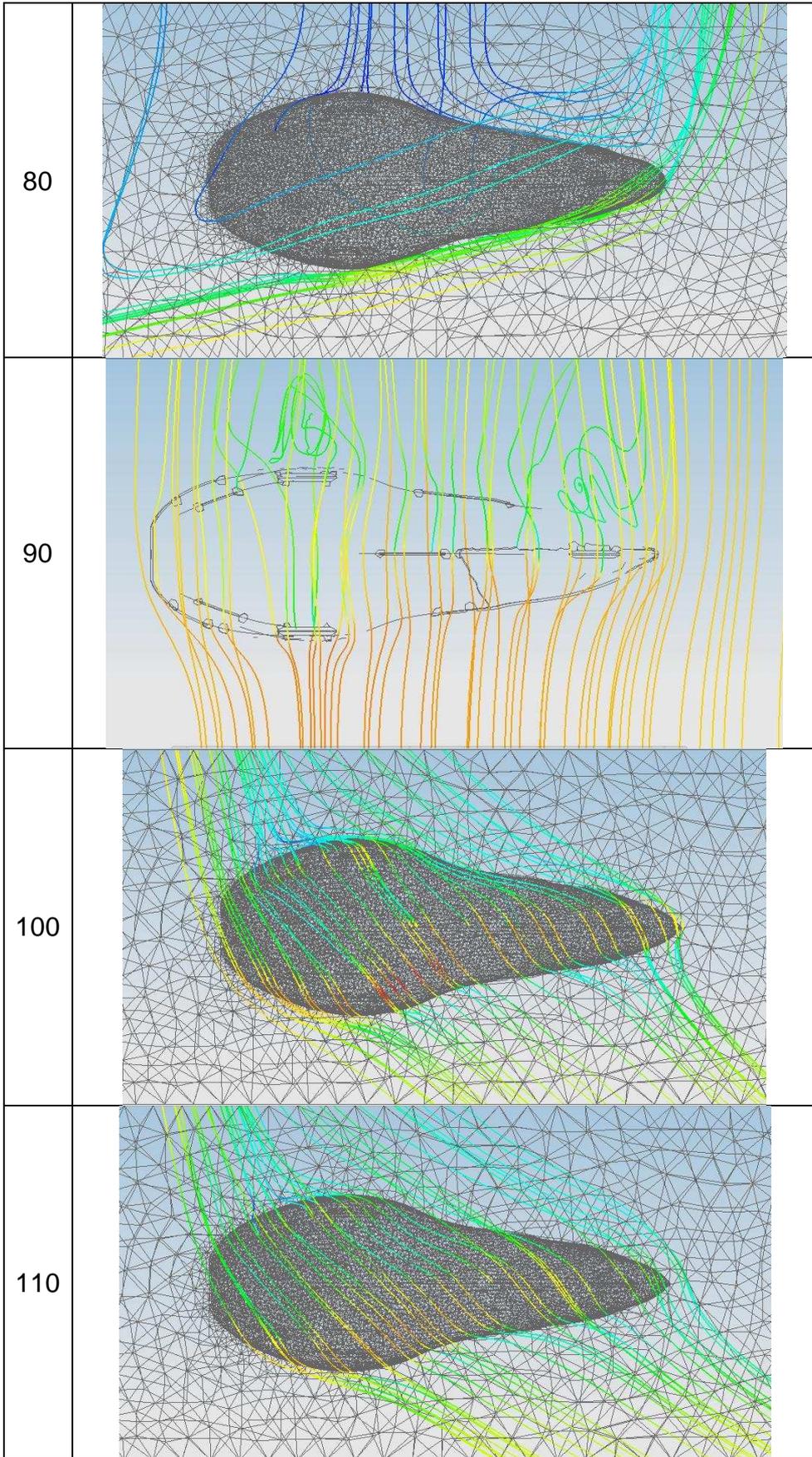
Los resultados obtenidos son los siguientes, en donde es evidente el aumento cuando el aire incide en la cara lateral.

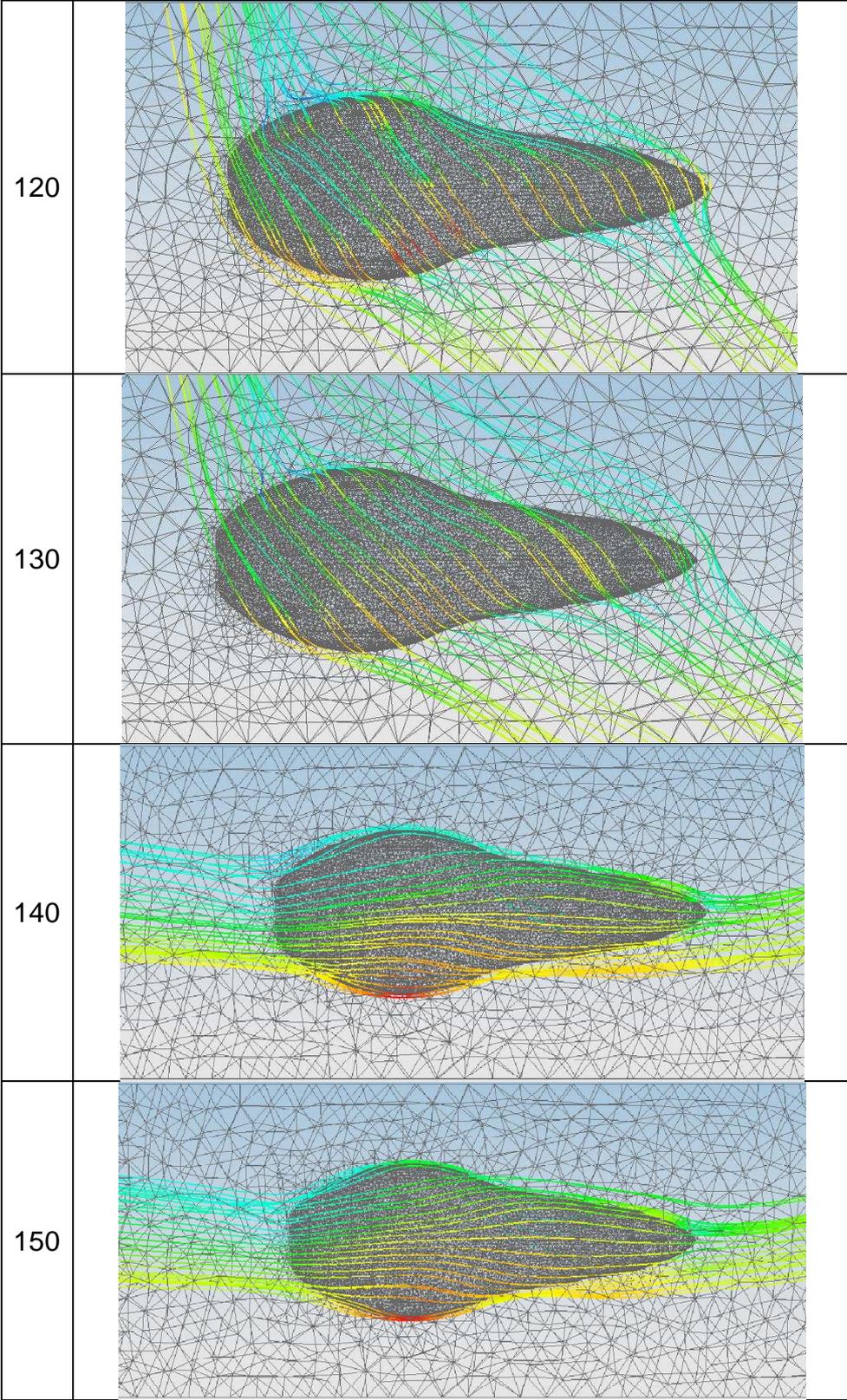
α	Fuerza de Arrastre (N)
0	27,71
10	27,60
20	27,81
30	31,10
40	32,60
50	33,80
60	35,70
70	34,72
80	35,47
90	35,94
100	34,09
110	36,11
120	36,63
130	35,42
140	34,64
150	32,13
160	24,66
170	22,31
180	21,14

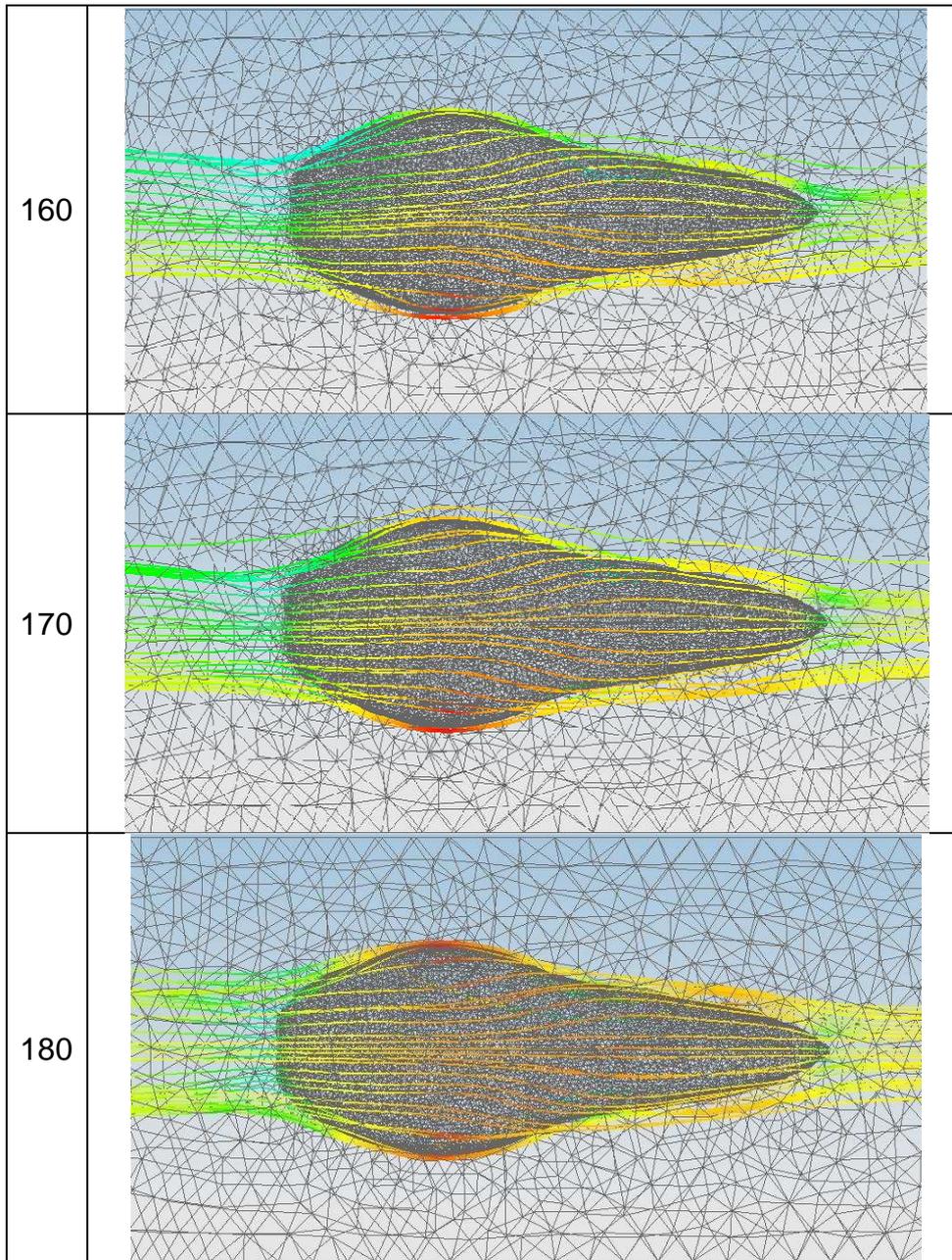










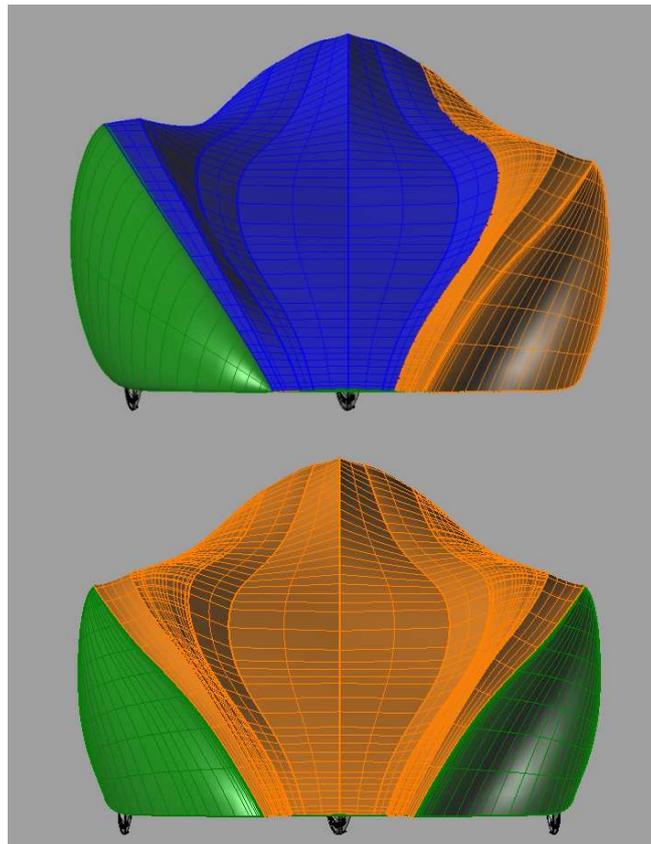


5. RECOMENDACIONES DE REDISEÑO

Después del análisis anterior se puede concluir que el comportamiento de la carrocería existente es bueno ya que no genera alteraciones relevantes en el flujo de aire al cual fue sometida, no obstante existe una zona de especial cuidado en la que se debe centrar la atención para mejorar los resultados obtenidos.

A continuación se hace una propuesta de rediseño modificando la zona de la cubierta de las llantas delanteras que de acuerdo a los resultados es donde más resistencia se presenta.

Figura 36 Propuesta de Rediseño



Fuente: autor del proyecto

En la parte superior de la de la figura anterior se muestra la modificación de la parte derecha de la carrocería para poder ver de forma comparativa cual es el cambio que se sugiere. En la parte inferior de la misma figura se presenta el resultado final una vez se modifican las dos superficies tanto a derecha como a izquierda.

Con los cambios propuestos se reducirá el área de la superficie de contacto disminuyendo así el requerimiento de potencia para llegar a una velocidad determinada. Con la siguiente expresión se demuestra lo anterior.

$$Potencia = \frac{Trabajo}{Tiempo} = \frac{Fuerza \cdot Espacio}{Tiempo} = Fuerza \frac{Espacio}{Tiempo}$$

$$= Fuerza \cdot Velocidad = F_x \cdot V = \frac{1}{2} \rho S C_x V^3$$

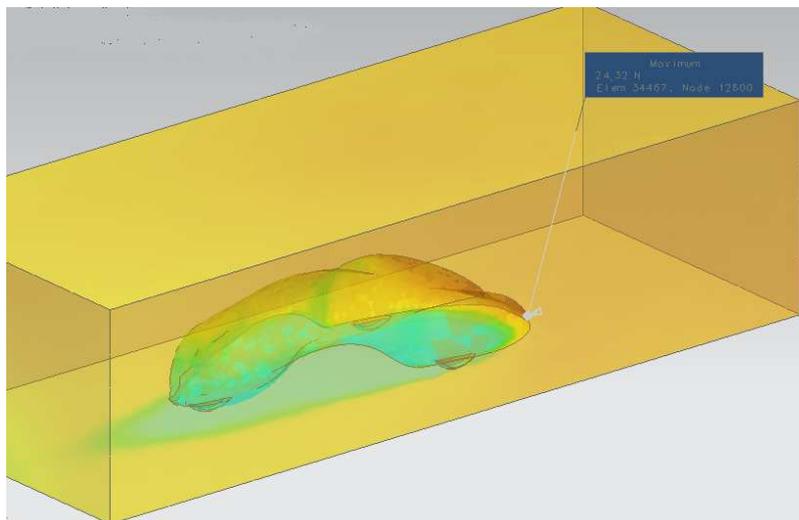
$$Potencia = \frac{1}{2} \rho S C_x V^3$$

Al reducir el término “S” (superficie de contacto) en la ecuación se tendrá una disminución el valor de la potencia necesaria para hacer que un vehículo se logre desplazar a través del aire.

Con los cambios sugeridos se logra una reducción del área de la superficie de contacto del 10%. Al mismo tiempo se reduce el valor del coeficiente de penetración, los valores utilizados en la siguiente formula han sido obtenidos de las simulaciones que en el siguiente capítulo se presentaran.

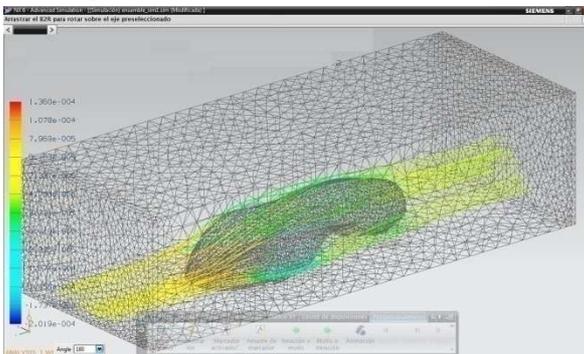
$$C_x = \frac{24,32 \text{ N}}{\frac{1}{2} \left(1,204 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(13,88 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 0,6151 \text{ m}^2}$$

$$C_x = 0,341$$



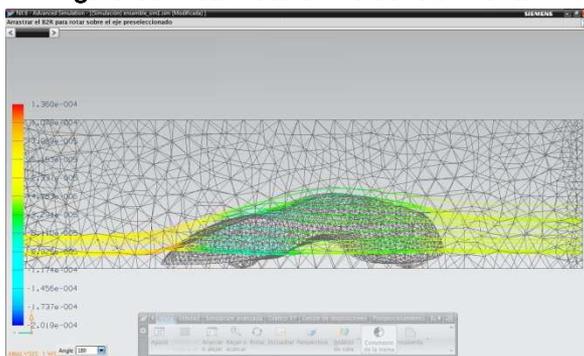
6. SIMULACIÓN CON LA CARROCERÍA REDISEÑADA

Figura 37 Isométrico Incidencia Frontal



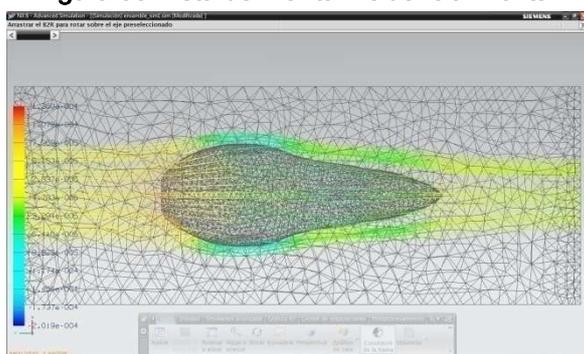
Fuente: autor del proyecto

Figura 38 Vista Lateral Incidencia Frontal



Fuente: autor del proyecto

Figura 39 Vista de Planta Incidencia Frontal



Fuente: autor del proyecto

En las figuras de la izquierda se puede observar el comportamiento presentado por el modelo propuesto como rediseño para el vehículo utilizado en la competencia Eco-Shell se aplicó un flujo de aire en la cara frontal a una velocidad de 13,88 m/s, con el fin de comparar los resultados con los del modelo anterior la simulación se efectuó bajo las mismas condiciones.

El resultado es muy favorable con el rediseño pues las zonas en las que antes presentaba mayor resistencia cambiaron su comportamiento tras los cambios hechos demostrando así que sería una buena alternativa para mejorar la aerodinámica del vehículo.

7. CONCLUSIONES

- El modulo de simulación de fluidos ofrecido por el software **UNIGRAPHICS NX** es una excelente herramienta que brinda numerosas alternativas para ajustar el ambiente necesario para las simulaciones y poder obtener así los resultados requeridos.
- Las simulaciones CFD son una herramienta muy versátil dado que con ella se logra sin mucha dificultad simular diferentes condiciones tanto de flujo como geométricas, sin necesidad de incurrir en gastos elevados, caso contrario sucede cuando se quiere realizar una simulación en un túnel de viento real donde las condiciones no son tan flexibles.
- El estado actual de la carrocería es bastante bueno pues después de todas las simulaciones realizadas se puede asegurar por los resultados obtenidos que el comportamiento del flujo de aire aplicado no revistió alteraciones considerables, no obstante se pueden llegar a tener mejores resultados tratando las zonas que ofrecen más resistencia.
- Las modificaciones propuestas resuelven el problema que se presenta en las superficies que cubren las llantas delanteras, así pues debe tener en cuenta para futuras reformas de la carrocería.
- Para cualquier modificación que se planee hacer es importante realizar nuevas simulaciones esto con el fin de estar seguro de que estas serán beneficiosas y así garantizar que todo lo que hasta ahora se tiene como los resultados de Cx y efecto suelo, no se vean afectados.

8. BIBLIOGRAFÍA

- McBeath Simon, Aerodinámica del automóvil de competición ISBN: 978-84-329-1167-5, CEAC. 2005
- Ven Te Chow, Open-channel Hydraulics. ISBN 978-0-07-100174-8, McGraw-Hill. 1988.
- Hucho Wolf-Heinrich. Aerodynamics of Road Vehicles. SOCIETY OF AUTOMATIVE ENGINEE. 1993.
- Fluid Mechanics Annual Review 25: 485-537
- Shaw, C.T., Predicting Vehicle Aerodynamics Using Computational Fluid Dynamics-A User's Perspective. Automotive Aerodynamics. Society of Automotive Engineers. 1988
- J.J. Santin & otros, The world's most fuel efficient vehicle Design and Development of PacCar II. VDF. 2005
- www.nas.nasa.gov/About/Education/Racecar/aerodynamics.html
- Mezquita Font Jose, tratado sobre automóviles tomo IV, ISBN: 978-84-7721-502-8, Universidad Politécnica de Valencia, 1997
- Hoffmann, Klaus A. & otros, Student guide to CFD, ISBN: 978-1-931222-00-6, ENGINEERING EDUCATION SYSTEM, 2001
- Vázquez Cendón María Elena, Introducción al método de volúmenes finitos, ISBN: 978-84-9887-031-2, Universidad de Santiago de Compostela, 2009