



4^{to} Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica



ESCANEEO 3D Y ESTUDIO AERODINÁMICO DE UN AUTOMÓVIL DE COMPETICIÓN

G. Gatto^a

^aEstudiante avanzado de la carrera de Ingeniería Aeronáutica, Instituto Universitario Aeronáutico, Córdoba, Argentina.

Palabras claves: Ingeniería inversa, Escaneo 3D, Modelado 3D, CFD

Resumen

En este trabajo final de grado se plantea desarrollar un proceso eficaz y repetible mediante el cual sea posible relevar y modelar en 3D la superficie exterior de un automóvil, y posteriormente realizar un estudio aerodinámico del mismo por medio de simulaciones con programas de dinámica de fluidos computacional (denominados genéricamente CFD). De esta manera se espera predecir el comportamiento del vehículo para distintas maniobras y velocidades teniendo en cuenta las variaciones de la altura respecto al piso debidas a las cargas aerodinámicas.

El proceso descrito se concibió con el fin de ser aplicado en automóviles de competición, donde los elementos aerodinámicos tales como spoiler delantero, pontones y patín inferior entre otros, en la mayoría de los casos son fabricados de forma artesanal bajo el concepto de prueba y error, con lo cual el empleo de ingeniería inversa en dichos elementos y en el vehículo completo permitiría estudiar su desempeño aerodinámico durante la carrera en una instancia previa a la puesta en pista.

1. INTRODUCCIÓN

Todo equipo de automovilismo de competición que desee realizar un estudio aerodinámico a uno de sus automóviles por medio de los programas de simulación conocidos como CFD, indudablemente requerirá disponer del modelo 3D representativo de la superficie exterior del mismo, y en caso que su fabricación no haya sido realizada en función de un diseño previamente definido y congelado hasta el final del campeonato se encontrará ante la necesidad de modelar tridimensionalmente el vehículo sin tener referencias tangibles que permitan validar el resultado obtenido o reducir el tiempo y los recursos a destinar para tal fin. Para satisfacer dicha necesidad se planteó desarrollar un método de trabajo eficaz y repetible que abarque todas las etapas a llevar a cabo para realizar las simulaciones que permitan analizar el desempeño aerodinámico del automóvil en su configuración más reciente en una instancia previa a la puesta en pista, sabiendo que la tendencia de los equipos durante el transcurso del campeonato es la de modificar continuamente la geometría de los elementos principales que lo componen, bajo una metodología de prueba y error.

Si bien el vehículo propuesto en este trabajo es un automóvil de calle, se logró llevar a cabo y validar cada etapa del proceso planteado, el cual no está exento de posibles mejoras a realizar en un futuro en función de la retroalimentación que se pueda obtener de próximos estudios.

2. RELEVAMIENTO Y MODELADO

2.1. Escaneo 3D

El relevamiento de la superficie exterior del automóvil se realizó por medio del escáner láser 3D Leica HSD3000, un instrumento de alta velocidad capaz de capturar un nivel de densidad de datos prefijado por el operador, en un campo máximo de visión horizontal y vertical de $360^{\circ} \times 270^{\circ}$.



Figura 1: Escáner láser Leica HSD3000

De esta manera se obtuvo la nube de puntos de elevada densidad que se muestra a continuación.

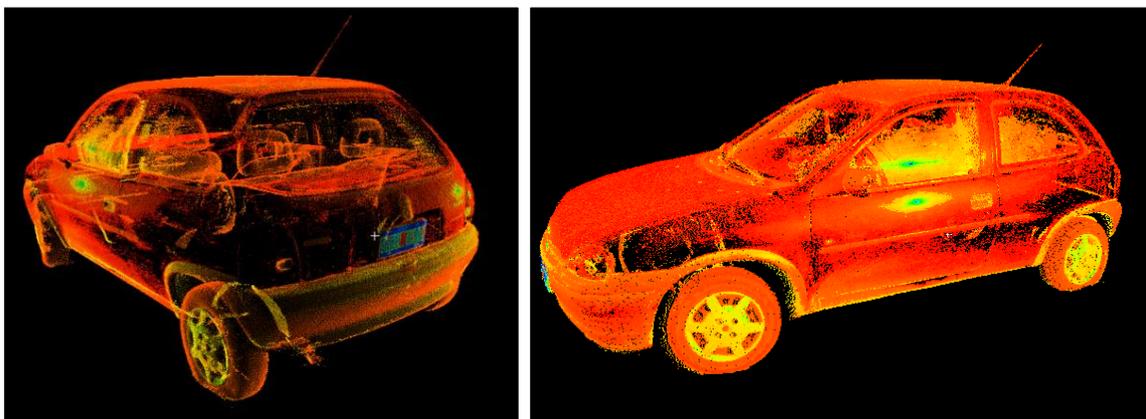


Figura 2: Nube de puntos relevada

2.2. Importación de puntos

El escaneo 3D dio como resultado una nube de puntos de más de un millón de elementos exportable como documento de texto en dos posibles formatos, uno con extensión “.xyz” que contiene los puntos relevados definidos por sus tres coordenadas cartesianas, y otro con extensión “.pts” que complementa la misma información con el color de cada punto.

La manipulación de una cantidad tan elevada de puntos por medio de un software CAD (Computer-Aided Design) puede ocasionar un alto consumo de recursos computacionales y consecuente lentitud del procesador, por lo cual se optó por importar el 100% de los mismos en el formato “xyz” por medio de la herramienta “Import” y desestimar la información del color, la cual se consideró de poca relevancia para este trabajo.

corsa.xyz: Bloc de notas			corsa.pts: Bloc de notas				
Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda			
0.359329	3.998032	-1.262070	1283873	0.359329	3.998032	-1.262070	-377 0 0
0.356247	3.999985	-1.263748	0.356247	3.999985	-1.263748	-367 0 0	
0.358017	3.997757	-1.258591	0.358017	3.997757	-1.258591	-382 0 0	
0.355362	3.999771	-1.260788	0.355362	3.999771	-1.260788	-383 0 0	
0.370285	3.997879	-1.294968	0.370285	3.997879	-1.294968	-361 0 0	
0.374802	3.998795	-1.307419	0.374802	3.998795	-1.307419	-345 0 0	
0.366440	3.999710	-1.301773	0.366440	3.999710	-1.301773	-346 0 0	
0.374527	3.998703	-1.304581	0.374527	3.998703	-1.304581	-358 0 0	
0.373856	3.998550	-1.299210	0.373856	3.998550	-1.299210	-367 0 0	
0.374619	3.996201	-1.299362	0.374619	3.996201	-1.299362	-370 0 0	
0.370224	3.997787	-1.289688	0.370224	3.997787	-1.289688	-361 0 0	
0.366867	3.999435	-1.295273	0.366867	3.999435	-1.295273	-357 101 99 82	
0.371078	3.997971	-1.292679					

Labels below the tables: x, y, z (under the first three columns of the first table); x, y, z, Información de color (under the columns of the second table). An arrow labeled 'N° de puntos' points to the first column of the second table.

Figura 3: Archivos de texto generados por el escáner

Una vez importada la totalidad de los puntos, seleccionando el milímetro como unidad de longitud y un factor de escala unitario, se modela en sentido transversal al automóvil un plano de simetría propuesto ubicado aproximadamente en el medio de la figura, se selecciona la mitad visualmente más completa y dejando un excedente de aproximadamente 300 mm se recorta la misma con el fin de reducir la cantidad de puntos a procesar y por ende el tiempo requerido para tal fin.

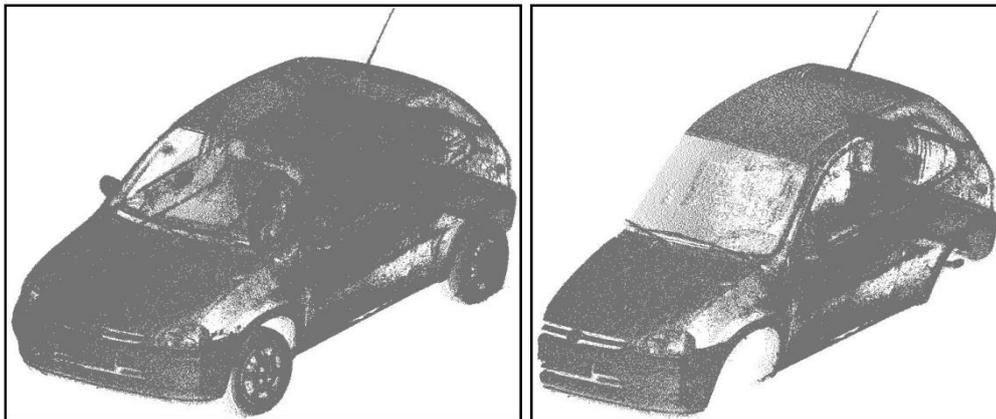


Figura 4: Nube de puntos reducida

2.3. Limpieza y filtrado de puntos

La operación de recortado agilizó notablemente la manipulación de la nube de puntos remanente, lo cual permitió analizar con mayor detalle los elementos representados en ella y encontrar una gran cantidad de información innecesaria y contraproducente a la hora de realizar el mallado previo al modelado de la superficie exterior del vehículo. Posteriormente se procedió a seleccionar y remover los puntos considerados irrelevantes para la obtención del resultado buscado, como por ejemplo los que constituyen el interior del habitáculo, cuya presencia no haría más que inducir errores en el modelado. Para un próximo relevamiento se sugiere tapar desde su interior el parabrisas y los vidrios laterales por medio de cartulinas oscuras, o de algún material similar, antes

de realizar el escaneo con el fin de generar una menor cantidad de puntos y evitar obtener resultados ambiguos a causa de la refracción de los rayos láser emitidos por el instrumento.

El paso siguiente consiste en generar una malla a partir de la nube de puntos, y ante la necesidad de elaborar una metodología de trabajo ordenada y eficiente se realizaron diferentes pruebas hasta definir la mejor estrategia a emplear. En un principio se experimentó el uso directo de la herramienta “Mesh Creation” sobre los elementos importados, dando como resultado una malla cerrada con un exiguo nivel de precisión, y luego de filtrar homogéneamente la totalidad de los puntos se repitió la operación y se percibió que la calidad de la malla obtenida se ve directamente afectada por los cambios de curvatura de los puntos de referencia. Por esta razón se decidió utilizar un criterio inspirado en el proceso de ensamble de la parte exterior del vehículo y se dividió la mitad del automóvil en 15 elementos principales, entre ellos el capó, el techo y los paragolpes, dejando abierta además la posibilidad de volver a modelar cada pieza de manera independiente. Esta subdivisión permite realizar un filtrado de puntos diferente para cada superficie y, en caso de requerir un mayor grado de precisión, modelar las luces de separación existentes entre las piezas. Para llevar a cabo lo planteado se remarcaron los contornos de las superficies previamente definidas realizando un filtrado homogéneo de los puntos que las conforman, operación que permite reducir su densidad en función del valor asignado al diámetro de una esfera que representa la distancia mínima objetivo entre los puntos contenidos en su interior. El mallado de un conjunto de puntos de menor densidad se muestra estéticamente más uniforme a costa de una mayor desviación con respecto a la nube de puntos original, por lo cual se recomienda emplear un valor de diámetro menor cuanto mayor sea la curvatura del panel a mallar.

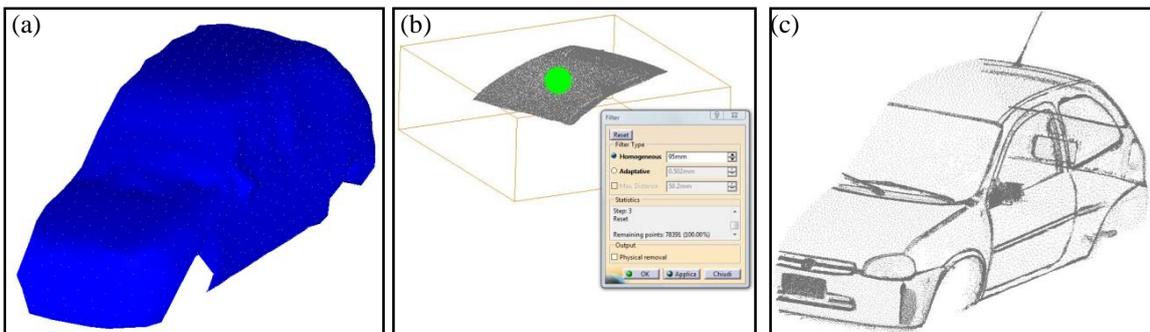


Figura 5: a) mallado de puntos sin filtrado previo; b) filtrado de la superficie del techo; c) superficies luego del filtrado

El paso siguiente consiste en seleccionar los puntos a utilizar como referencia y realizar el mallado de cada superficie empleando la herramienta “Mesh Creation”, para lo cual se deberá indicar un valor de “Neighborhood” que de forma similar al diámetro de la esfera empleada para el filtrado de los puntos, representa el tamaño mínimo del conjunto de elementos que conformarán la malla. Luego de experimentar con diferentes valores de “Neighborhood” se optó por mantener el definido por defecto, de modo que la calidad de la malla resultante dependerá exclusivamente de la correcta realización de la operación previa de filtrado.

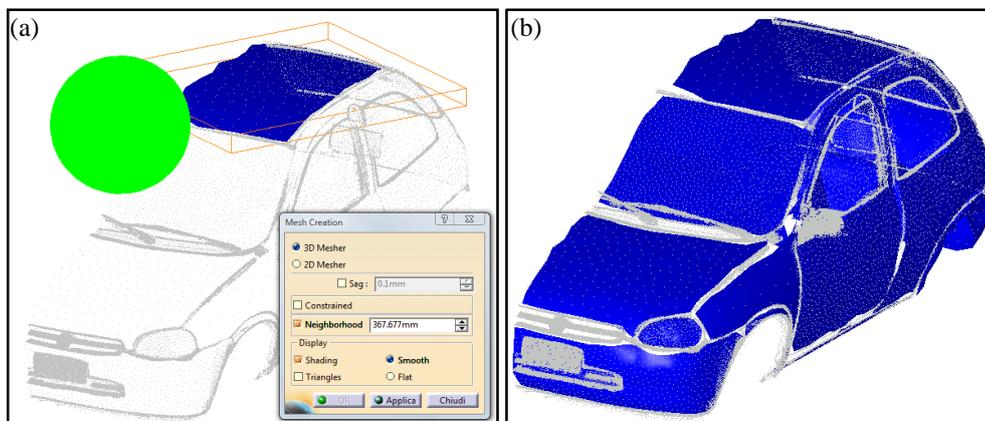


Figura 6: a) mallado del capó; b) mallas resultantes

Adicionalmente, por medio de la herramienta “Deviation Analysis”, es posible efectuar una comparación de precisión entre las mallas obtenidas y la nube de puntos inicial visualizando de manera gráfica y numérica el error resultante de las operaciones hasta ahora descritas. Sin embargo, luego de verificar en una pequeña muestra de elementos que el error no superaba los 2 mm se descartó la necesidad de emplear dicha herramienta en este trabajo, en cuanto los puntos relevados en el escaneo arrastran un grado de error desconocido, inducido por distintos factores relativos al instrumento de medición y al ambiente en el cual ha sido operado, lo cual se podría analizar y cuantificar en un análisis posterior.

2.4. Modelado de líneas de contorno

Para poder modelar las superficies exteriores del automóvil es necesario disponer de las líneas de contorno que las van a delimitar en cuanto las mallas obtenidas no se pueden convertir directamente en superficies a causa de las discontinuidades y del aspecto rugoso que presentan, pero pueden ser empleadas como elementos de apoyo para el modelado de curvas por medio de la herramienta “Curve on Mesh”. El procedimiento consiste en trazar consecutivamente sobre las mallas una cantidad de puntos directamente proporcional al grado de curvatura de la línea de contorno que se busque obtener, los mismos serán unidos de forma automática por medio de un spline tridimensional. En algunas circunstancias fue necesario extrapolar las curvas existentes, trazar puntos adicionales sobre el elemento resultante de la operación y utilizarlos posteriormente para obtener curvas polinómicas de orden definido manualmente, empleando la herramienta “3D Curves”. En cuanto a las superficies delimitadas por el plano medio del vehículo es preciso tener en cuenta que si bien se trabaja únicamente con la mitad del automóvil, cada una de ellas deberá ser continua y tangente a la superficie simétrica correspondiente, por lo cual será necesario emplear algún tipo de referencia y garantizar la obtención de una línea de contorno pasante por el plano de simetría propuesto de manera suave y continua. Para ello se utilizó la herramienta “Planar Section”, la cual permite seleccionar una nube de puntos y un plano, obtener el conjunto de puntos resultantes de su intersección y unirlos de forma automática por medio de una curva cerrada que en una posterior operación es posible recortar entre un punto inicial y un punto final determinados, delimitando así cada una de las superficies.

Una vez obtenidas todas las líneas de contorno se observa que en la mayoría de los casos los perímetros que éstas conforman son abiertos, haciendo imposible el posterior modelado de las superficies; por esta razón se generaron nuevos contornos cerrados usando la herramienta “Clean Contour”, la cual distribuye la desviación de las nuevas curvas obtenidas, con respecto a su forma original, entre todas las líneas de referencia seleccionadas.

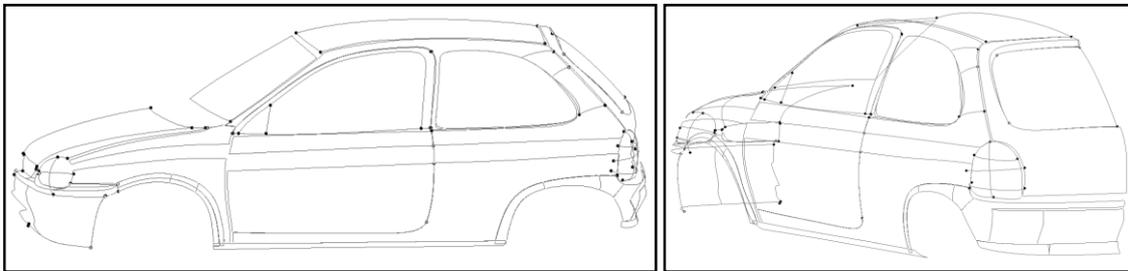


Figura 7: líneas de contorno finales

2.5. Modelado de las superficies

El modelado de las superficies se realizó por medio de la herramienta “Power Fit” seleccionando los contorno, la nube de puntos de referencia e ingresando parámetros tales como tolerancia, orden y n° de segmentos del elemento a obtener. Si bien inicialmente se dividió el automóvil en un determinado número de superficies se debe tener en cuenta que al modelarlas entre las curvas que las delimitan, la herramienta buscará conferirles una curvatura equivalente a la de los puntos incluidos en ellas, dando como resultado en el caso de elementos muy grandes una superficie no uniforme y notablemente distinta al aspecto exterior de los paneles de chapa empleados en el armado del vehículo. Por esta razón las superficies en las cuales las curvas de contorno longitudinales y transversales presentan una gran diferencia relativa de tamaño, deberán dividirse en al menos dos sub-superficies más pequeñas, con un luz de separación entre ambas tal de poder generar una superficie intermedia continua y tangente por medio de la herramienta “Bend”.

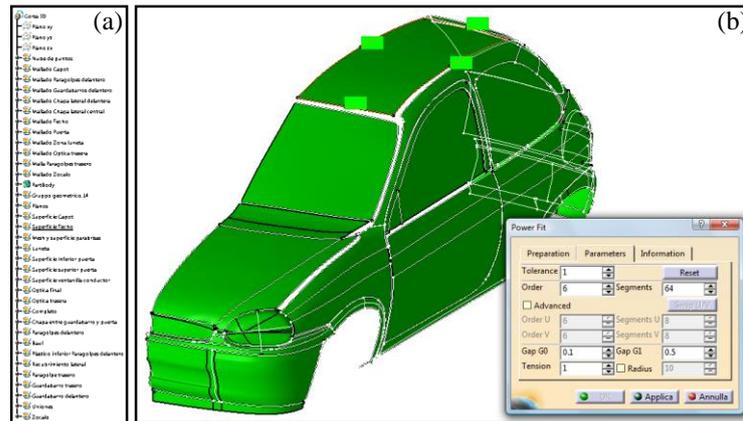


Figura 8: a) subdivisión de superficies; b) modelado de la superficie del techo

Una vez obtenida cada una de las superficies exteriores del vehículo se procedió a utilizar la herramienta “Join” para unir las de manera continua y así obtener un único elemento que represente la mitad de la carrocería; en este proceso se hicieron visibles las luces de separación existentes entre todas las piezas del automóvil real, que en algunos casos están contempladas en el diseño y en otros son selladas por medio de la instalación de burletes de goma con el fin de impedir el filtrado de líquidos, como por ejemplo entre el techo y el parabrisas o entre los vidrios y los paneles laterales. En realidad para el uso que se le pretende dar al modelo 3D no sería necesario considerar un nivel de detalle tan elevado, en cuanto a la hora de exportarlo y realizar el mallado del volumen de control necesario para efectuar las simulaciones, las luces de separación y los burletes serían irrelevantes y hasta contraproducentes y deberán ser eliminados para reducir el costo computacional y evitar en determinados casos la obtención de resultados erróneos causado por la presencia de excesiva información; de todas maneras se optó por abarcar una precisión tal que permita deducir el alcance del método empleado con respecto al uso de otros programas y/o de otras metodologías de trabajo, teniendo en cuenta además, que por medio de operaciones posteriores es posible eliminar burletes y luces de separación extrapolando las superficies adyacentes a ellas, mientras que el proceso inverso aportaría un excesivo nivel de error al tener que modelar los elementos de unión de una manera altamente aproximada por falta de datos de referencia.

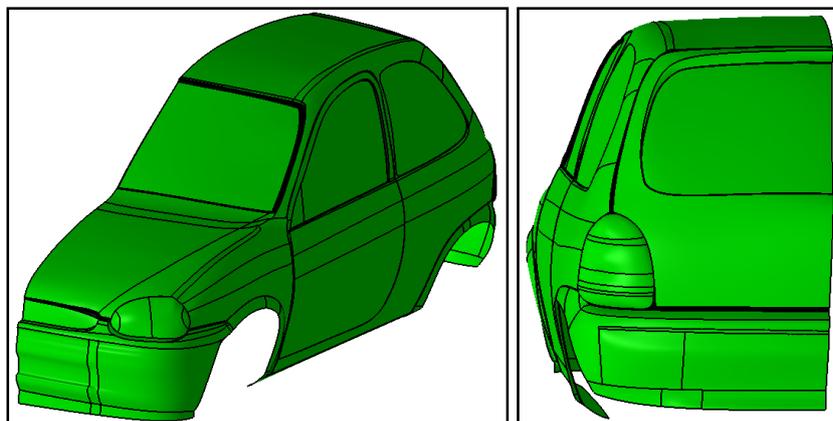


Figura 9: modelos de superficies, luces de separación y burletes de goma

Las superficies faltantes para completar la mitad del vehículo son el piso y los pasaruedas, pero para poderlos modelar se requiere de una referencia más precisa de los planos, ortogonales entre sí, correspondientes al suelo y al plano de simetría del automóvil que hasta ahora ha sido propuesto de forma aproximada con el único fin de desestimar la mitad del vehículo para reducir la cantidad de operaciones a realizar. A causa de la falta de referencias del suelo con la nube de puntos, para lograrlo fue necesario proponer una serie de líneas, planos y puntos que por medio de operaciones posteriores permitan ser empleados como referencia para el modelado del plano del suelo y del plano de simetría, fundamentales también para la obtención de la mitad faltante del automóvil y para el posicionamiento de las ruedas.

2.6. Obtención del plano de simetría real

El primer paso que se llevó a cabo para modelar el plano de simetría real del vehículo consistió en cargar nuevamente la nube de puntos original de modo de visualizar el automóvil entero, trazar un punto en la parte exterior del centro de ambas ruedas delanteras y unirlos por medio de una línea recta, y de la misma manera obtener una recta que una los centros de las ruedas traseras.

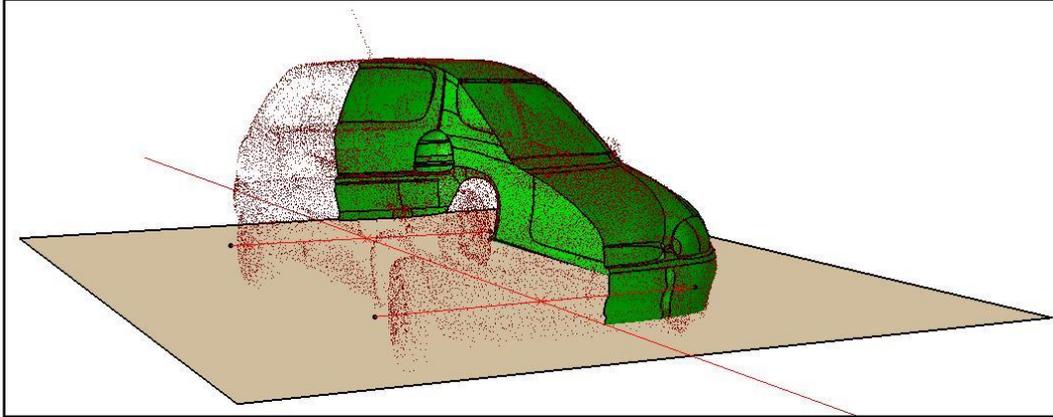


Figura 10: líneas de referencia trazadas

Un inconveniente que se presentó fue que la dirección de las ruedas delanteras no se encontraba en la posición neutra cuando se realizó el escaneo, con lo cual las dos líneas trazadas no resultaron paralelas entre sí como sería conveniente que lo fueran una vez modelado el automóvil. Por esta razón se trazó el punto medio de ambas rectas, se trasladó la línea trasera de un punto al otro obteniendo así la recta delantera ideal y se modelaron un plano pasante por ella y por la recta trasera y otro, correspondiente al plano real del suelo, paralelo a éste y desplazado hacia abajo una distancia medida físicamente en el automóvil real por medio de una cinta métrica, igual a la mitad del diámetro exterior de las cubiertas. Luego se trazó una recta pasante por los puntos medios de las dos líneas trazadas anteriormente y se tomó la misma como primera referencia para el modelado de un plano perpendicular al suelo, con respecto al cual posteriormente, usando la herramienta “Simmetry”, se realizó una operación de simetría de la primera mitad modelada dando origen a una segunda superficie que se puede observar notablemente desplazada de la posición que le correspondería según la nube de puntos.

Como esperado se deduce que el plano propuesto en la primera etapa del modelado no corresponde al verdadero plano de simetría.

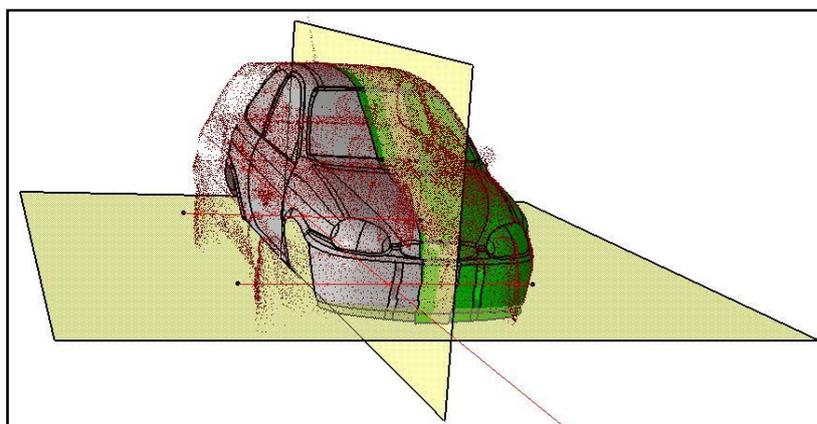


Figura 11: plano real del suelo y plano de simetría propuesto

Para obtener el plano de simetría real se realizaron operaciones de traslación y rotación de la mitad del auto obtenida por simetría hasta conseguir la mejor coincidencia posible con la nube de puntos, se trazaron tres puntos sobre el contorno central del techo de la segunda mitad y se modelaron un nuevo plano de corte y dos planos adicionales paralelos y equidistantes a éste con el fin de poderlos emplear para cortar ambas mitades de forma simétrica y unir las posteriormente por medio de una superficie de conexión tangente a ambas.

Se probaron distintos valores para la distancia de separación entre los planos de corte y el más eficiente resultó ser de 120 mm, en cuanto a la hora de cortar las superficies un valor mayor produce la remoción de una cantidad excesiva de elementos modelados, y un valor menor es insuficiente para obtener una superficie de conexión suave similar a la real. Sucesivamente se trazaron en ambas mitades del auto tres pares de puntos equivalentes, se emplearon los mismos como puntos iniciales y puntos finales para el trazado de tres líneas rectas y finalmente se modeló el plano de simetría real del vehículo pasante por los puntos medios de las rectas trazadas, y perpendicular al plano real del suelo.

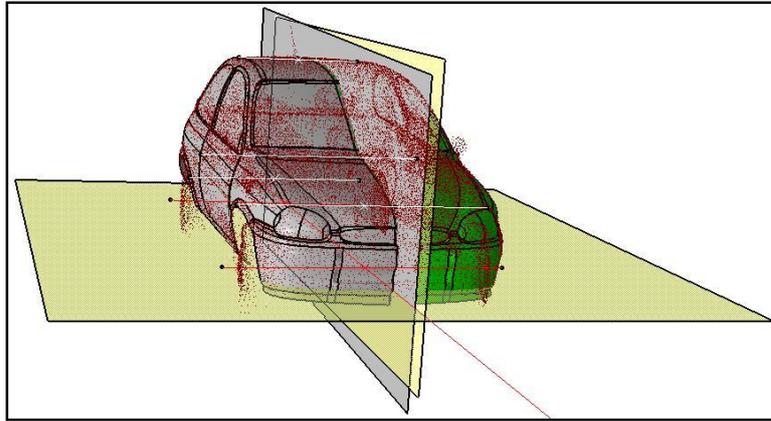


Figura 12: plano real del suelo, plano de simetría propuesto y plano de simetría real (de color gris)

2.7. Modelado de piso y pasaruedas

Con el fin de obtener una referencia útil para el modelado del piso del automóvil se generó un plano paralelo al plano real del suelo y desplazado hacia arriba 215 mm, distancia medida en el auto real por medio de una cinta métrica.

Por otro lado se inspeccionó físicamente la zona inferior del vehículo desde el interior de la fosa de un taller mecánico y se observó que piezas tales como el cárter de aceite y el caño de escape no sobresalen tanto como para ser tenidas en cuenta a la hora del modelado, por esta razón se consideró válido simplificar el piso como un elemento plano y simétrico compuesto por un único escalón en la zona del eje trasero. Finalmente se modelaron los pasaruedas y el piso usando como referencia el plano generado para tal fin.

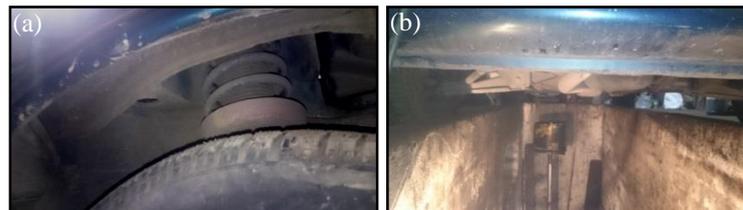


Figura 13: a) fotografía de pasaruedas delanteros; b) fotografía de zona piso

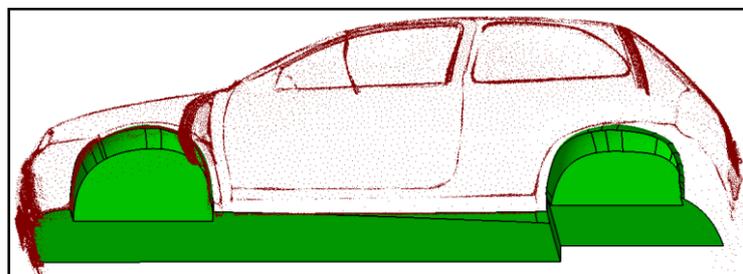


Figura 14: modelos de piso y pasaruedas

2.8. Unión de las superficies

El paso siguiente consistió en unir por medio de la herramienta “Join” todas las superficies modeladas hasta el momento y obtener así un único elemento continuo. Para ello fue necesario corregir manualmente las discontinuidades producidas en mayor proporción en las zonas de unión de dos o más elementos, como por ejemplo en la sección central del baúl donde se optó por suavizar la superficie de apoyo de la manija de plástico, cuya geometría produjo ambigüedades en los puntos relevados durante el escaneo.

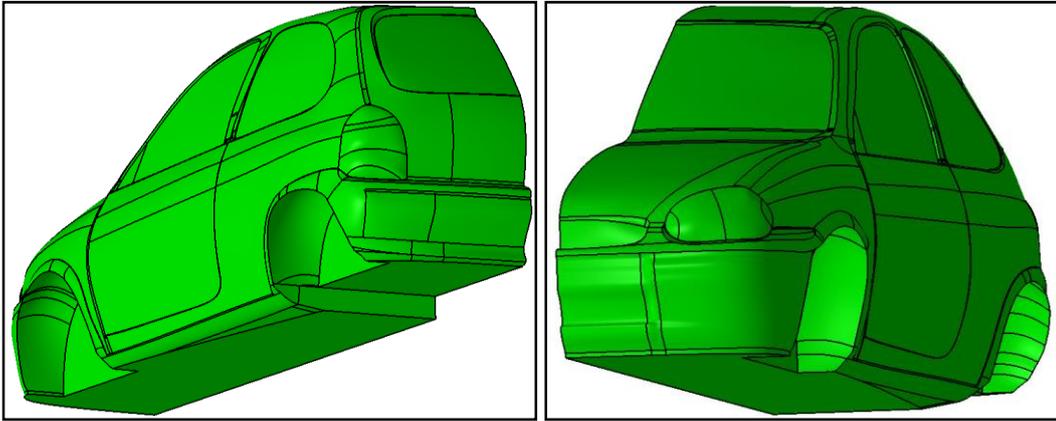


Figura 15: superficie final de la mitad del automóvil

2.9. Obtención de la superficie completa

Antes de poder obtener la segunda mitad del automóvil por simetría fue necesario cortar el elemento conformado por la unión de las superficies modeladas usando el plano de corte generado para tal fin. Luego se empleó nuevamente la herramienta “Symmetry”, esta vez con respecto al plano de simetría real, dando como resultado una segunda superficie tal que al unirla con la primera y con una tercera superficie modelada de forma tangente y continua a ambas, permitió obtener un único elemento cerrado capaz de ser convertido posteriormente en un sólido con la herramienta “Close Surface”.

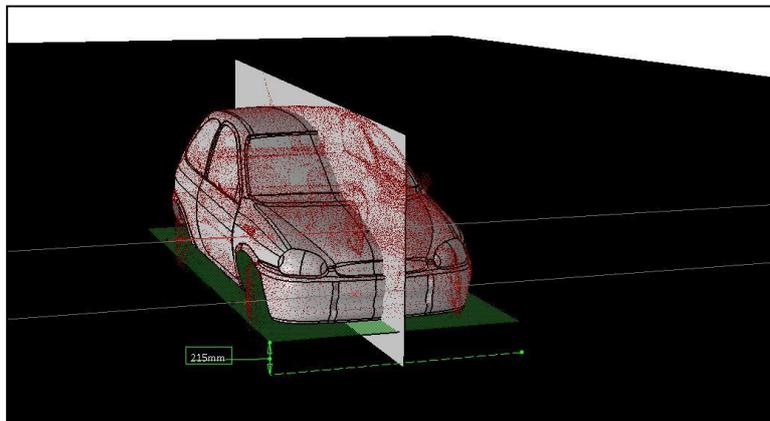


Figura 16: superficie del automóvil completo

2.10. Modelado de ruedas y ejes

A este punto los últimos elementos faltantes para completar el proceso de ingeniería inversa del vehículo son las ruedas, el eje trasero y los semiejes delanteros; por razones de simplicidad se optó por modelar cada uno de ellos como sólido usando como referencia de posición las rectas transversales al automóvil trazadas para la obtención del plano de simetría real. Las cuatro ruedas son iguales por lo cual fue necesario modelar una sola de ellas, y para hacerlo se simplificó la llanta como un elemento plano y cerrado y se modeló la cubierta en función de los tres números característicos indicados en la parte exterior de la misma, leídos en el neumático del auto real.

El eje trasero se modeló como una viga de sección rectangular mientras que para obtener los semiejes delanteros se ensambló una barra de sección circular con la superficie total del auto dando como resultado dos elementos simétricos separados por el piso y los pasaruedas delanteros. Finalmente se ensamblaron todos los elementos modelados y se obtuvo un único sólido completo exportable en el formato “stp”, el cual permite ser importado por el software de pre-procesamiento a emplear posteriormente.

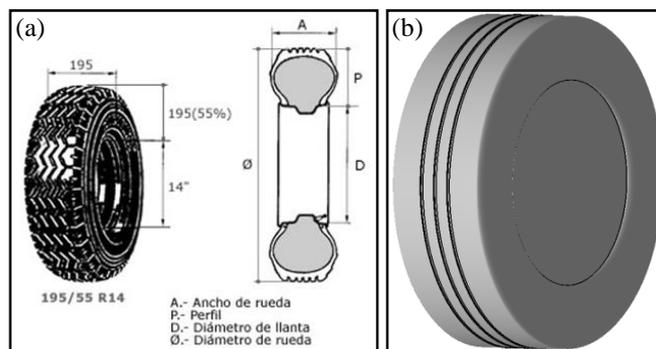


Figura 17: a) dimensiones características de un neumático; b) modelado de la rueda

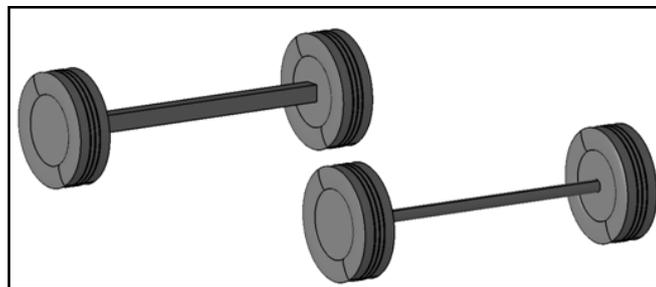


Figura 18: ensamble de ejes y ruedas

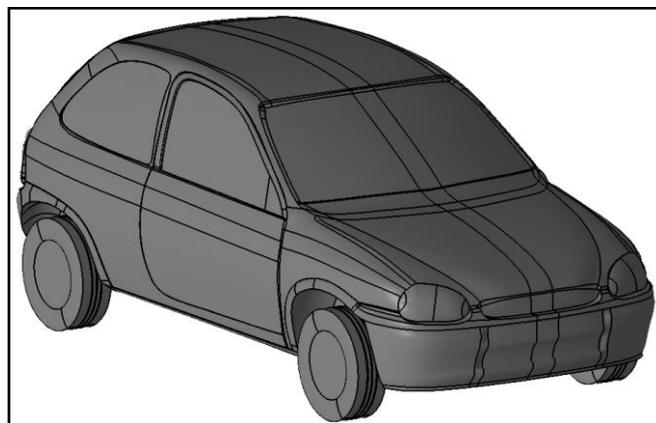


Figura 19: ensamble completo

2.11. Renderizado

De manera ilustrativa se realizó sobre el producto obtenido del ensamble final un renderizado con un nivel de detalles mínimo, de manera de poder dar una idea del posible resultado que se puede alcanzar por medio de operaciones adicionales.

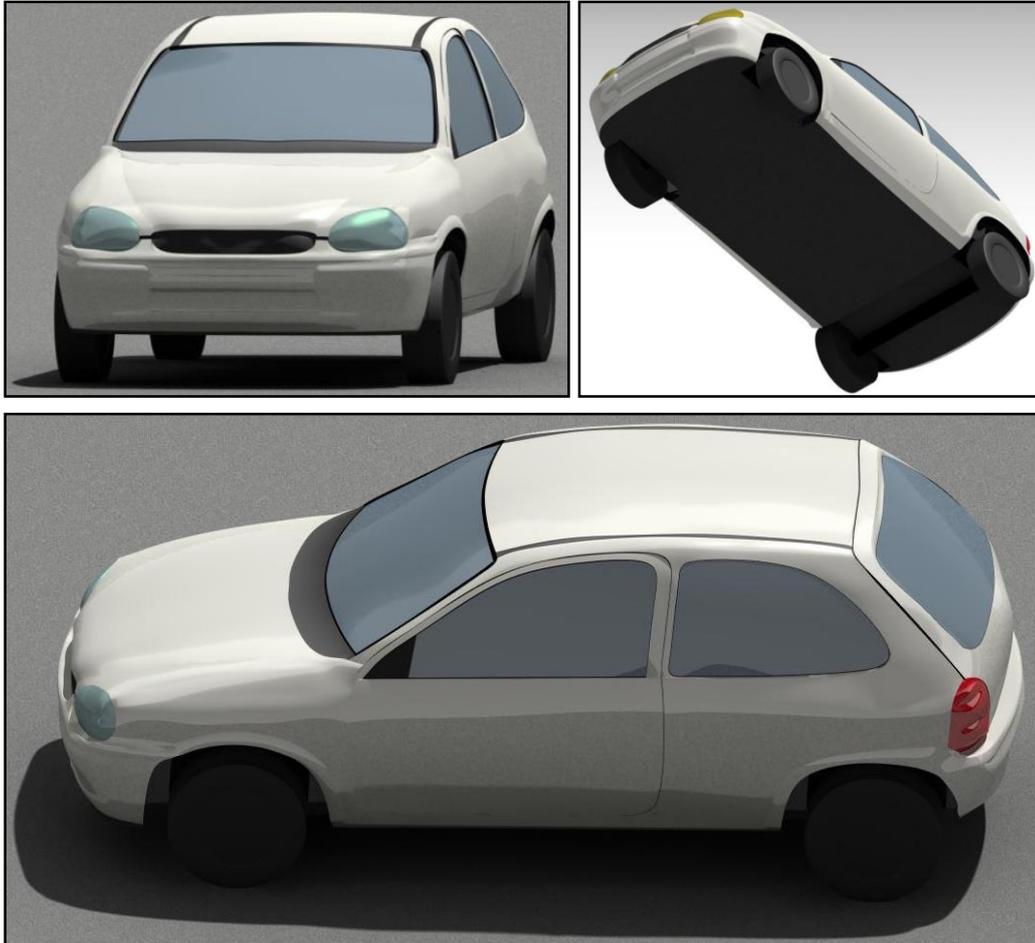


Figura 20: diferentes vistas del renderizado

2.12. Estimación del error

A continuación se comparan las dimensiones externas características del Chevrolet Corsa GL obtenidas en el modelo 3D con las definidas según diseño.

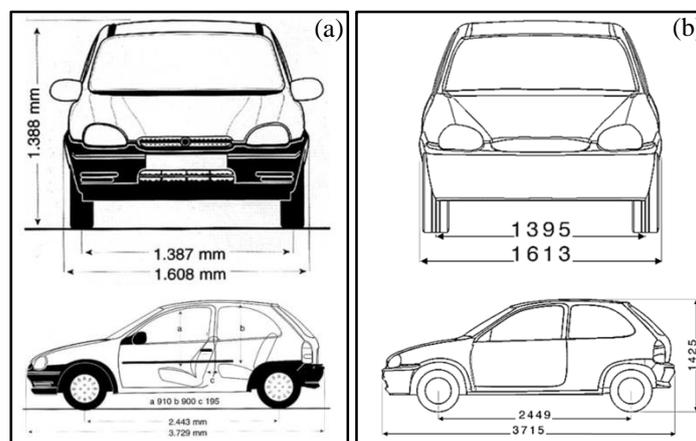


Figura 21: dimensiones externas características. a) según diseño; b) según modelo 3D

Dimensión	Según diseño	Según modelo	Error relativo
Trocha	1387 [mm]	1395 [mm]	0.6 [%]
Ancho	1608 [mm]	1613 [mm]	0.3 [%]
Alto	1388 [mm]	1425 [mm]	2.7 [%]
Entre ejes	2443 [mm]	2449 [mm]	0.2 [%]
Largo	3729 [mm]	3715 [mm]	0.4 [%]

Tabla 1: comparación entre dimensiones reales y modeladas

3. Mallado del volumen de control

3.1. Importación de superficies y modelado de volumen de control

Para realizar el mallado del volumen de control se optó por emplear un software CAE (Computed-Aided Engineering) de pre-procesamiento, por medio del cual es posible importar el modelo 3D exportado en formato “stp” y trabajar sobre el mismo. Considerando que la superficie modelada es simétrica y que los cálculos a realizar incluyen exclusivamente fuerzas en los sentidos longitudinal y vertical del automóvil, resulta conveniente modelar un volumen de control que contenga solo la mitad del vehículo de manera de reducir el costo computacional de las operaciones a desarrollar. En cuanto al modelado del volumen de control las dimensiones representadas en la figura se definieron empíricamente en unidades de milímetros, la cara que intersecta las superficies del automóvil coincide con su plano de simetría mientras que la cara inferior se modeló 12 mm por encima del suelo del modelo 3D, de manera de intersectarse con la geometría de los neumáticos y representar así la deformación de los mismos ocasionada por el peso del vehículo. Posteriormente se unieron todos los contornos por medio de la herramienta “Topo” y se removieron las geometrías excedentes con el fin de conformar un único elemento continuo que finalmente se alineó con los ejes cartesianos.

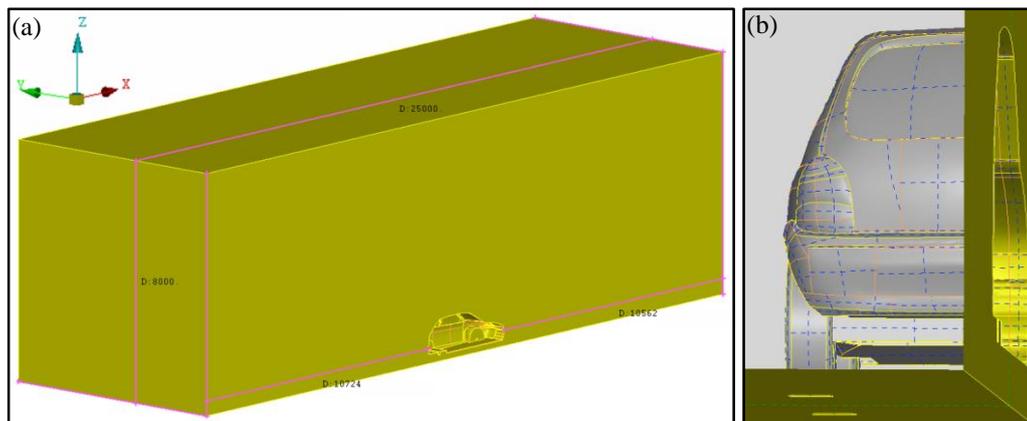


Figura 22: volumen de control. a) dimensiones; b) intersección entre la superficie del automóvil y el volumen de control

3.2. Limpieza de la geometría

Si bien permite utilizar geometrías generadas por medio de otros programas, el software de pre-procesamiento trabaja con resoluciones y tolerancias propias por lo cual es de esperar que a la hora de importar la superficie del automóvil se detecten interferencias o errores de conectividad en elementos que durante el modelado no presentaban novedades. Por esta razón antes de empezar con el mallado del volumen de control fue necesario analizar detalladamente la superficie importada y corregir manualmente los errores encontrados en cuanto la herramienta que lo hace de forma automática en la mayoría de los casos produce distorsiones excesivas del modelo de referencia. La forma más rápida de detectar dichos defectos es desactivando las curvas de contorno compartidas por dos superficies, representadas por el programa en color amarillo, visualizando únicamente las curvas de color rojo que al remover las superficies defectuosas y al reconstruir las mismas posteriormente con la herramienta “Coons” deberán convertirse en amarillas.

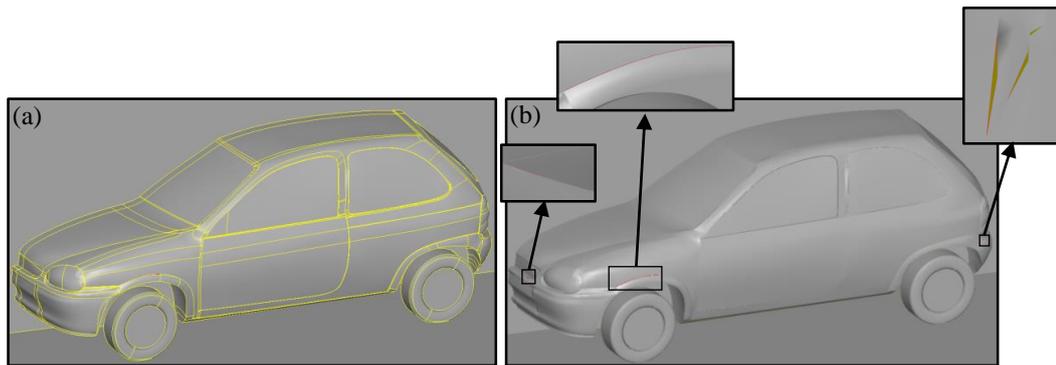


Figura 23: superficie importada. a) curvas compartidas por dos superficies; b) curvas con imperfecciones

En la figura anterior se puede observar que las curvas de contorno dividen las superficies principales del vehículo en un gran número de sub-superficies que si se tuvieran en cuenta a la hora del mallado serían redundantes y producirían un aumento innecesario de la complejidad de cálculo, por esta razón se unificó la mayor cantidad de sub-superficies posibles empleando la herramienta “Join”, la cual permite obtener elementos con menores discontinuidades sin dejar de respetar la geometría impuesta.

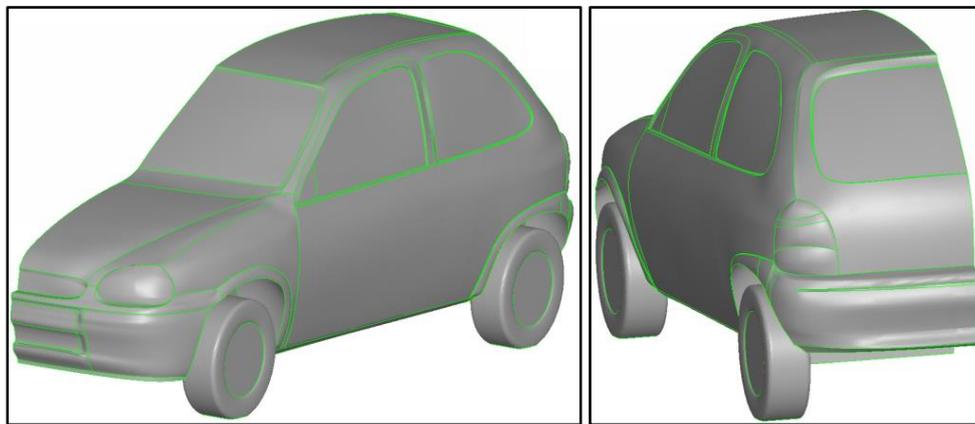


Figura 24: superficie simplificada

3.3. Mallado de la superficie del automóvil

La calidad del mallado depende en forma directa de la cantidad y de la distribución de los elementos de superficie empleados para representar la geometría original. Un gran número de elementos triangulares de pequeño tamaño es capaz de apegarse a todas las superficies del vehículo dando como resultado un cálculo de alta precisión pero de un costo computacional elevado; es por ello que se decidió utilizar elementos de entre 2 y 20 mm de largo y una tasa de crecimiento de 1.2 en toda la geometría del vehículo, distribuidos por medio del algoritmo de generación de malla “CFD” que impone automáticamente un tamaño de elementos menor en las zonas de mayor variación de curvatura y lo aumenta gradualmente hacia las zonas de mayor uniformidad, con el fin de perseguir un compromiso ideal entre costo y calidad del mallado. De esta manera fue posible mallar rápidamente la mayoría de la geometría, pero hubo casos puntuales en los cuales fue necesario unir y separar de maneras diferentes determinadas superficies, y otros donde la única solución posible fue asignar manualmente el tamaño de elementos a determinadas secciones de curvas por medio de la herramienta “Lenght”.

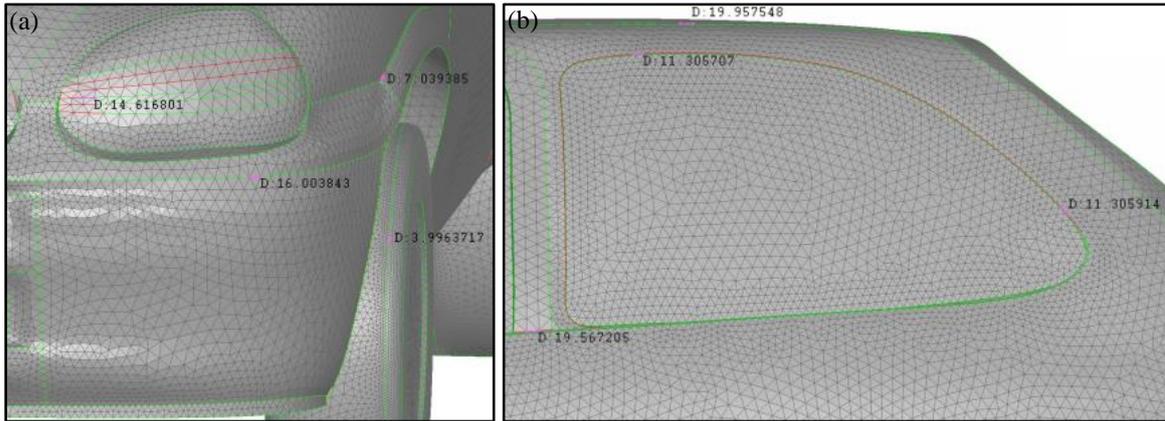


Figura 25: tamaño de los elementos de la malla superficial obtenida. El color rojo de algunas de las curvas indica que el tamaño de elementos fue asignado manualmente

3.4. Control de calidad de la malla

El nivel de calidad de la malla necesario para lograr la convergencia correcta de los cálculos, y por ende una optimización de los recursos utilizados, es relativo en función del estudio que se pretende realizar y por esta razón se dispone de diferentes criterios de calidad que dependiendo de los parámetros ingresados, en caso de encontrar alguno, muestra cuales son los elementos de calidad insuficiente. Los criterios empleados en el mallado de la superficie exterior del automóvil son el “Min. Length”, que permite verificar que el tamaño de los elementos obtenidos no sea inferior a un valor indicado, en este caso 0.8 mm; y el “Skewness”, propuesto en un valor de 70, el cual cuantifica la similitud entre la geometría de los elementos obtenidos y la geometría ideal correspondiente en esta ocasión a la de un triángulo equilátero. En la primera figura se muestra un caso en el cual el tamaño de elementos se definió en el rango de 2 a 20 mm pero el cateto menor del elemento triangular generado no se encuentra contenido en él; en la segunda figura se muestra la deferencia entre elementos de bajo y de alto skewness.

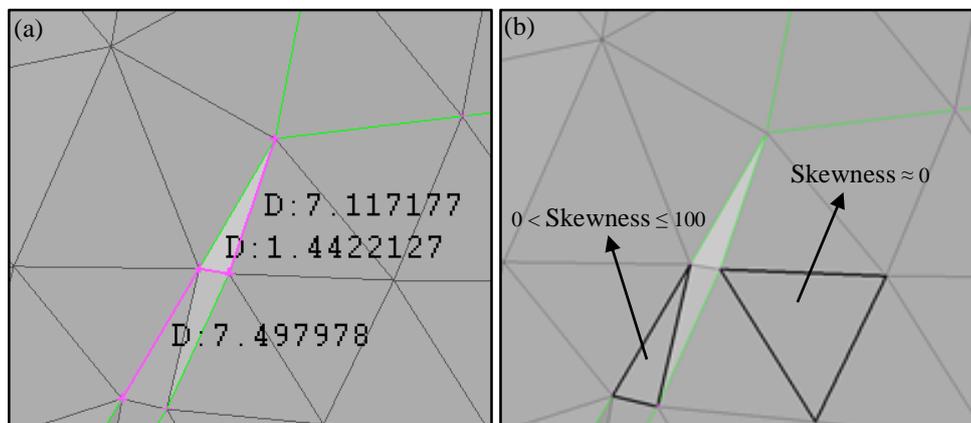


Figura 26: defectos detectados según dos criterios de calidad. a) min. length; b) skewness

3.5. Definición de Size Box

En las zonas del volumen de control donde se prevé un mayor gradiente de las magnitudes físicas resultantes de las simulaciones, es conveniente emplear elementos superficiales y de volumen de mayor densidad que los demás con el fin de proporcionar al cálculo un mayor grado de precisión sin engrosar innecesariamente la totalidad del volumen. Por esta razón se generó un “Size Box” mediante el uso de la herramienta homónima que permite definir un sub-volumen dentro del cual el tamaño de los elementos aumente a una tasa de crecimiento dada sin nunca superar un valor de longitud máxima preestablecido, en este caso 60 mm.

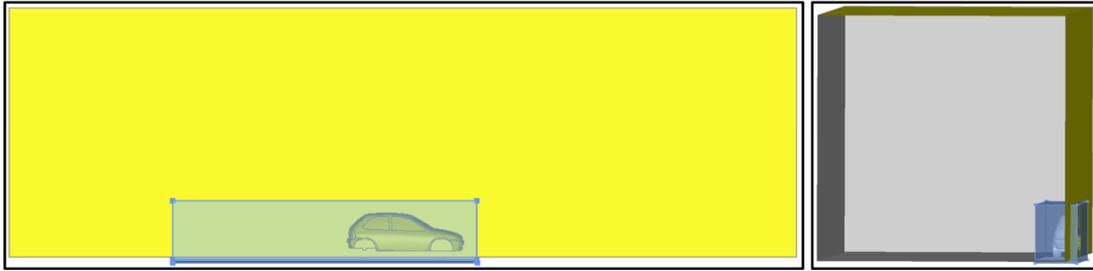


Figura 27: size box

3.6. Mallado de las caras exteriores del volumen de control

Para completar el mallado de los elementos superficiales se seleccionaron las caras exteriores del volumen de control y se volvió a emplear el algoritmo de generación de mallas “CFD”, imponiendo esta vez un tamaño de elementos comprendido entre 20 y 500 mm y una tasa de crecimiento de 1.1.

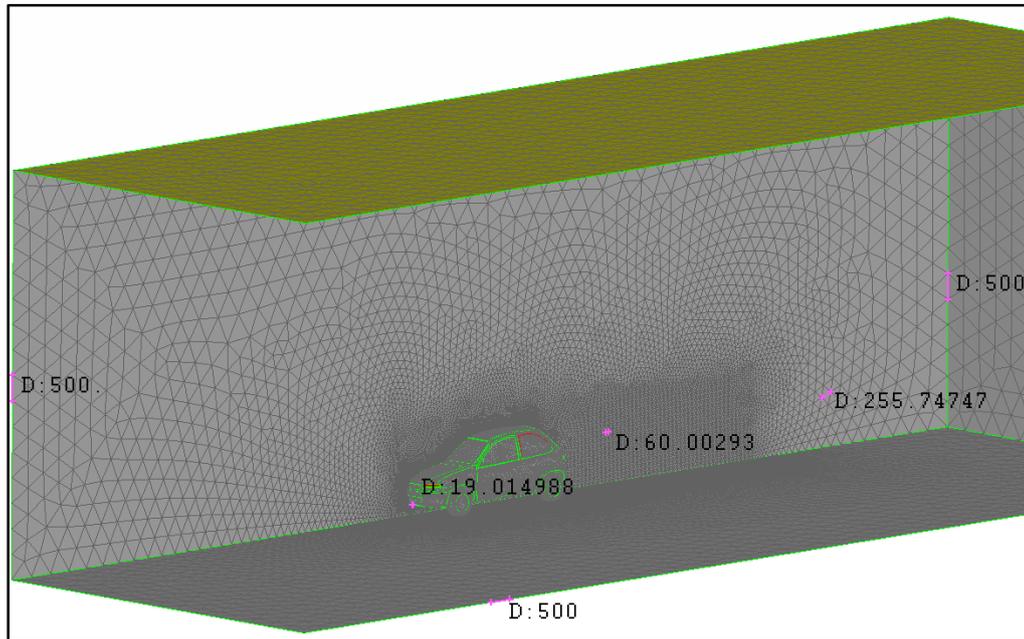


Figura 28: tamaño de elementos de la malla volumétrica obtenida

3.7. Asignación de propiedades de superficies

El paso siguiente consistió en asignar a todas las superficies las propiedades identificadoras, llamadas “PID”, lo cual permite designar a cada una de ellas diferentes condiciones de contorno antes de llevar a cabo las simulaciones, y cuantificar su contribución individual al resultado obtenido, una vez realizados los cálculos.

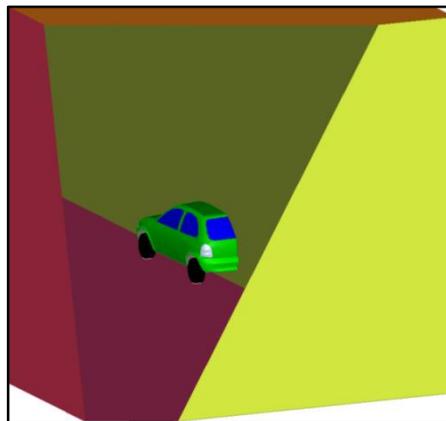


Figura 29: diferentes PID asignados (a cada uno corresponde un color distinto)

3.8. Mallado del volumen de control

Para llevar a cabo el mallado del volumen de control se seleccionaron todos los elementos generados hasta al momento y por medio de la herramienta “Define” se impuso una tasa de crecimiento de 1.3 y un tamaño máximo de 500 mm a los tetraedros que lo van a conformar una vez completado el mallado.

Como esperado a causa de la complejidad del cálculo, el tiempo requerido para completar la operación de mallado fue considerable, dando como resultado 198978 elementos triangulares de superficie y 3495777 elementos tetraédricos de volumen que finalmente se exportaron en formato “nas”.

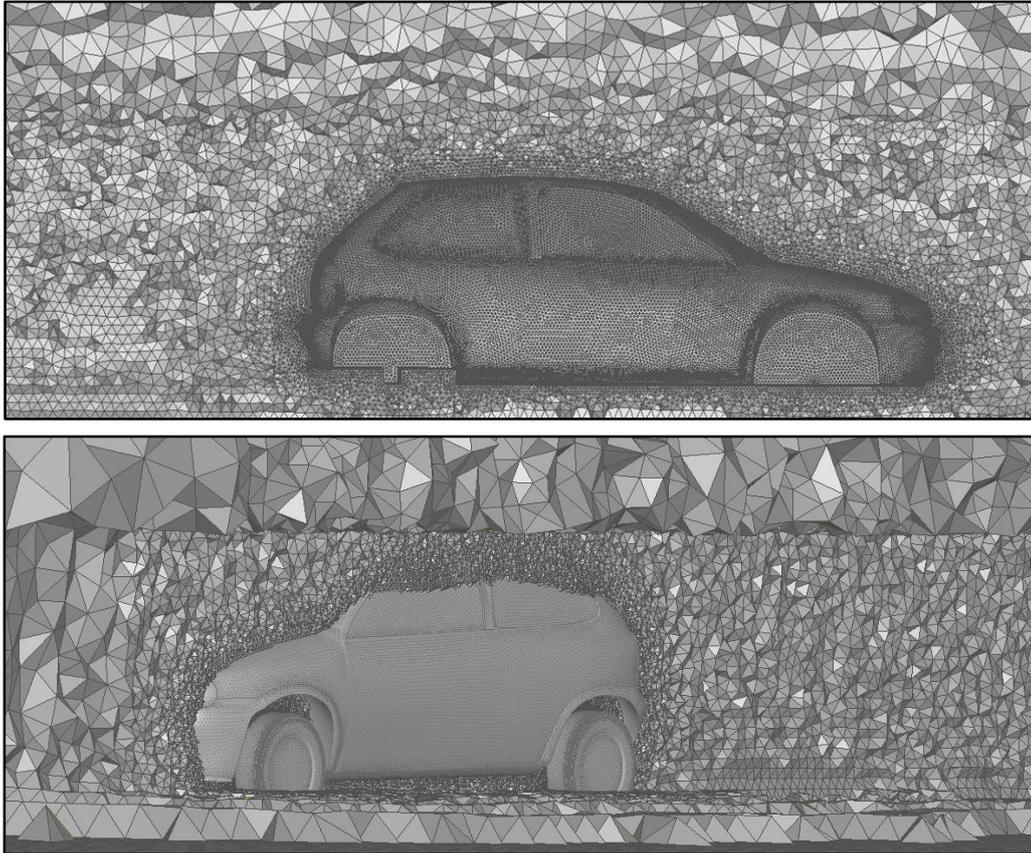


Figura 30: secciones del mallado superficial y volumétrico completo

4. Asignación de condiciones de contorno

Antes de poder realizar las simulaciones empleando la malla volumétrica obtenida es necesario asignar a la misma el tipo de problema y las condiciones de contorno, para ello se optó por utilizar otro software CAE de pre y post-procesamiento capaz de importar el archivo generado en formato “nas” y exportar luego el resultado en un formato válido para finalmente llevar a cabo las simulaciones.

Las condiciones de contorno asignadas son las siguientes:

- Velocidad fija en la entrada del dominio, en el suelo, en el techo y en la pared lateral.
- Presión fija en la salida del dominio.
- Velocidad normal en el plano de simetría.
- Movimiento fijo en las ruedas, en la entrada y en la salida del dominio, en el techo y en el suelo.
- Movimiento simétrico en el plano central.
- Movimiento libre en toda la geometría del automóvil a excepción de las ruedas.

5. Modelo matemático

El comportamiento dinámico de un fluido tratado como un medio continuo es gobernado por las ecuaciones de conservación conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes, enlistadas a continuación:

- Conservación de la masa o ecuación de continuidad.
- Conservación del momento cinético o de la cantidad de movimiento.
- Conservación de la energía.

La modelización que se desea analizar en este trabajo se realiza mediante la utilización de estas ecuaciones para flujo incompresible, donde se asume que la densidad permanece constante y por ende la ecuación de energía queda desacoplada y se deja de tener en cuenta. Bajo estas condiciones y luego de realizar operaciones intermedias entre los términos que las constituyen [1], la ecuación de continuidad (1) y las ecuaciones de Navier-Stokes (2) se reducen a:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right), \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

La solución del sistema de ecuaciones obtenido no presenta gran dificultad en el caso de un flujo laminar, o no viscoso, pero sí en el caso de un flujo turbulento, caracterizado por su irregularidad y variación aleatoria en el tiempo y en el espacio, para lo cual se cuenta con modelos de turbulencia tales como el Promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS) que se empleó en la programación del software de simulación desarrollado en el Departamento de Mecánica Aeronáutica.

6. Procesamiento y visualización de resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos por medio del software previamente mencionado para una velocidad de corriente libre de 30 m/s equivalente a 108 km/h; el post-procesamiento de los datos se realizó por medio del software CAE utilizado para asignar las condiciones de contorno al volumen de control.

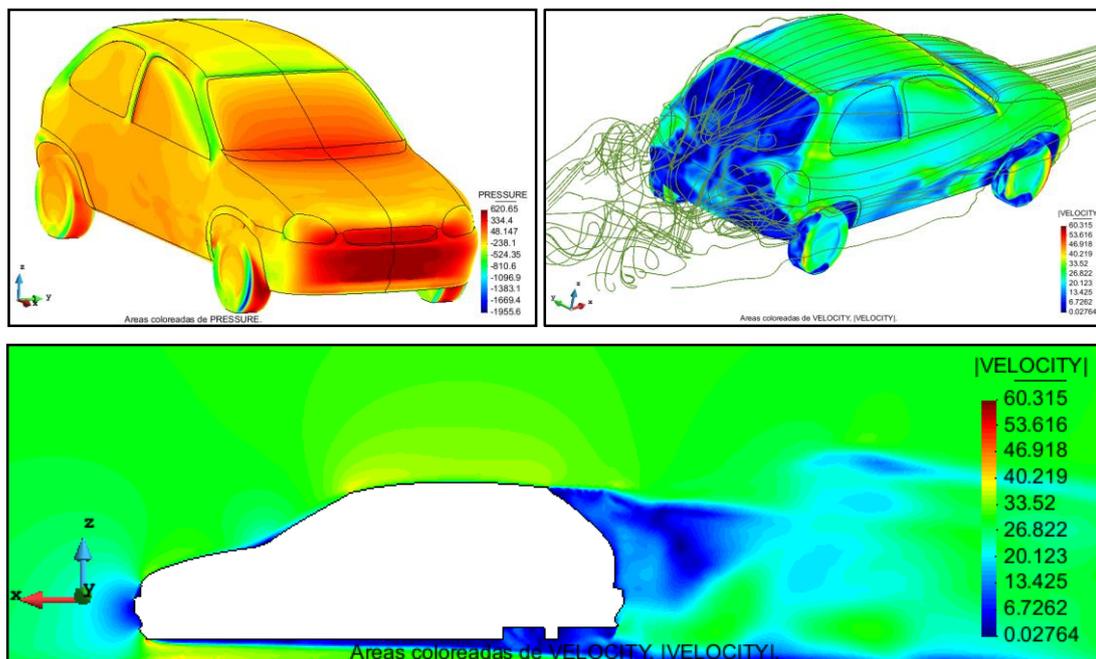


Figura 31: visualizaciones de flujo. a) variación de presión sobre la superficie del vehículo; b) líneas de corriente y variación de velocidad sobre la superficie del vehículo; c) variación de velocidad sobre plano de simetría del vehículo

7. Conclusiones

El proceso desarrollado para llevar a cabo el relevamiento y el modelado tridimensional de la superficie exterior de un automóvil dio un resultado satisfactorio, habiéndose demostrado la aplicabilidad del modelo generado en todas las operaciones necesarias para realizar un estudio aerodinámico del vehículo. El error relativo porcentual obtenido alcanza un valor máximo del 2.7 % en la dimensión correspondiente a la altura del techo con respecto al suelo, lo cual era de esperarse en cuanto las ruedas se modelaron usando referencias independientes del resto del automóvil y de manera simplificada, omitiendo la deformación de las cubiertas producida por el peso del vehículo, que en caso de ser tenida en cuenta reduciría la discrepancia detectada. El error de las demás dimensiones analizadas oscila entre un 0.2 % y un 0.6 %, valores irrisorios para el uso que se pretende al modelo tridimensional en trabajos de esta índole.

Por otro lado la calidad del mallado del volumen de control obtenida y la convergencia de las simulaciones realizadas hacia resultados coherentes con el problema físico planteado demuestran la eficacia y repetibilidad de la totalidad del método concebido con esos presupuestos.

8. Agradecimientos

Este trabajo no habría sido posible sin el apoyo del Ing. Marcelo Sarmiento, quien prestó el servicio de escaneo 3D profesional sin pretender remuneración alguna.

9. Referencias

[1] Fox – McDonald, "Introducción a la mecánica de fluidos," Ed. McGraw Hill, 1989, pp. 216-248.