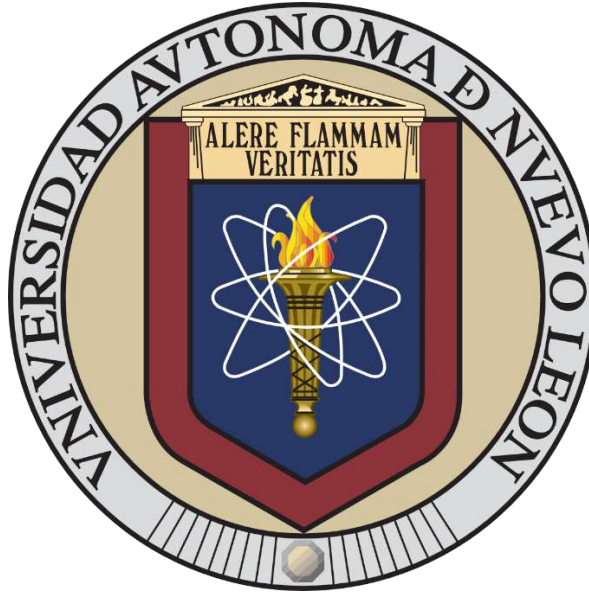


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“ESTUDIO AERODINÁMICO DE ALERONES EN AUTOMOVIL TSURU TIPO TAXI Y
SU IMPACTO EN EL COEFICIENTE DE ARRASTRE”**

Por:

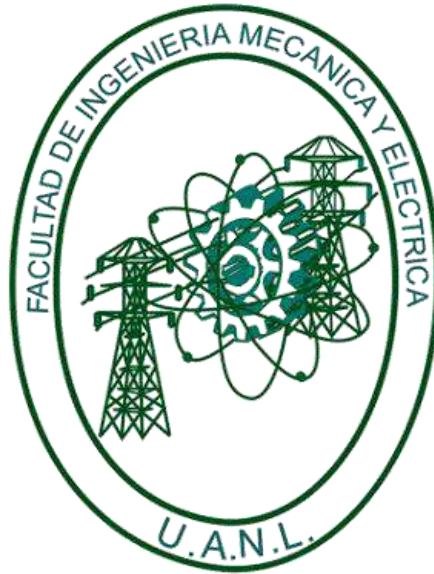
ING. ALEJANDRO MUÑOZ AOYAMA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**“ESTUDIO AERODINÁMICO DE ALERONES EN AUTOMOVIL TSURU TIPO TAXI Y
SU IMPACTO EN EL COEFICIENTE DE ARRASTRE”**

Por:

ING. ALEJANDRO MUÑOZ AOYAMA

EN OPCIÓN AL GRADO DE:

MAESTRIA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "Estudio aerodinámico de alerones en automóvil Tsuru tipo taxi y su impacto en el coeficiente de arrastre", realizada por el estudiante Alejandro Muñoz Aoyama, con número de matrícula 1889313, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández
Director

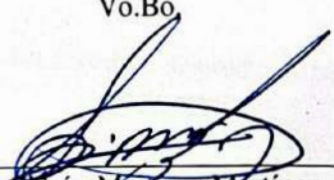
Dra. Flor Esthela Palomar Pérez
Co-director

Dra. Adriana Salas Zamarripa
Revisor

Dr. Diego Francisco Ledezma Ramírez
Revisor

Dr. Francisco Aurelio Pérez González
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 5545 02

Acta Núm. 4600

Ciudad Universitaria, a Enero 2026.

Índice

Lista de términos:	7
Lista de símbolos:.....	7
1.- Introducción.....	8
1.1 Planteamiento del problema.....	10
1.2 Justificación del proyecto.....	10
1.3 Hipótesis.....	11
1.4 Objetivos Específicos.....	12
1.5 Metodología.	12
1.6 Descripción general de los capítulos de la tesis.	13
1.7 Alcances del estudio.	13
1.8 Limitantes del estudio.	13
2.- Marco teórico y antecedentes	15
2.1 Aerodinámica de un automóvil y alerón	15
2.1.1 Tipos de fuerza involucradas.	16
2.1.2 Fuerzas aerodinámicas sobre un automóvil.....	16
2.1.3 Fuerza aerodinámica, presión y “tensión viscosa” que actúan en un ala.	18
2.1.4 Parámetros de la geometría del ala.	19
2.1.5 Espesor y curvatura del perfil aerodinámico.	20
2.1.6 Los 4 dígitos de los perfiles aerodinámicos NACA.	21
2.1.7 Definición de coeficiente de sustentación y de arrastre.	22
2.1.8 Similitud dinámica.....	23
2.1.9 Gráficas de desempeño aerodinámico.	24
2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes.	25
2.2.1 Descripción Lagrangiana y Euleriana.....	26
2.2.2 Volúmenes de control.	27
2.2.3 Relación entre las ecuaciones de Navier-Stokes y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).....	29
2.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD).	30
2.3.1 ¿Cómo funciona la dinámica de fluidos computacional?.....	32
2.3.2 Solución de problemas con CFD.	34
2.3.3 Historia del CFD.....	35

2.4 Pruebas en túneles de viento.	36
2.5 Ingeniería inversa.	37
2.5.1 Aplicaciones de la ingeniería inversa.	38
2.5.2 Métodos utilizados en ingeniería inversa.	39
2.6 Escáner EinScan Pro-HD.	40
2.6.1 Calibración.	42
2.6.2 Procedimiento de escaneo.	44
2.6.3 Preparación.	44
2.6.4 Marcadores.	44
2.6.5 Proyecto y proyecto en grupo.	45
2.6.6 Empezar a escanear.	45
2.6.7 Post procesado.	46
2.6.8 Crear nueva característica.	46
2.7 Conclusión del capítulo 2.	46
3.- Experimentación.	47
3.1 Practica de uso de escáner y metodología de escaneo.	47
3.2 Escaneo del alerón.	50
3.3 Conversión de nube de puntos a sólido en Fusion 360.	58
3.4 Simulación en SolidWorks.	60
3.5 Modelo de Nissan Tsuru con alerón escaneado agregado.	65
3.6 Alerón diseñado para competencia.	70
3.7 Conclusiones del capítulo 3.	71
4.- Resultados y discusión.	72
4.1 Resultados de simulaciones CFD.	72
4.1.1 Nissan Tsuru sin modificaciones (Primera iteración).	72
4.1.2 Nissan Tsuru sin modificaciones (Segunda iteración).	75
4.1.3 Nissan Tsuru sin modificaciones (Tercera iteración).	79
4.1.4 Nissan Tsuru sin modificaciones (Cuarta iteración).	83
4.1.5 Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado (Primera iteración).	85
4.1.6 Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado (Segunda iteración).	87
4.1.7 Simulación de alerón diseñado para competencia.	89
4.1.8 Resumen de resultados de coeficiente de arrastramiento.	91

4.2 Encuestas y entrevistas.....	91
4.3 Encuestas online.....	92
4.4 Encuestas físicas.....	92
4.5 Conclusiones del capítulo 4.....	93
5.- Conclusiones.....	94
5.1 Trabajo a futuro.	95
5.2 Contribución a la ciencia.	95
Referencias.....	97
Anexos.....	100
Anexo 1: Resultados de encuestas en Google Forms.....	100
Anexo 2: Simplificación de resultados de encuesta online:	103
Anexo 3: Notas de entrevistas presenciales.....	105
Anexo 4: Tutorial de simulación en Flow Simulation en SolidWorks.	107
Anexo 5: Resultados de simulaciones en Flow Simulation en SolidWorks.	114

Lista de términos:

- CAD: Computer Aid Desing (Diseño asistido por computadora).
- CFD: Computational Fluid Dynamics (Dinámica de Fluidos Computacional)
- CAE: Computer Aid Engineering (Ingeniería asistida por computadora)
- Condiciones de frontera: Restricciones de presión, velocidad o temperatura en los límites del dominio
- Dominio computacional: Volumen en el cual se resuelve el flujo.
- Malla: División del dominio en pequeñas celdas para resolver las ecuaciones.
- Iteraciones: Proceso numérico para aproximar la solución.

Lista de símbolos:

- | | |
|--|--|
| • C_L : Coeficiente de sustentación. | • t : Tiempo. |
| • C_D : Coeficiente de arrastre. | • x, y, z : Coordenadas espaciales. |
| • L : Fuerza de sustentación. | • q_x, q_y, q_z : Flujo de calor. |
| • D : Fuerza de arrastre. | • τ : Tensor de esfuerzos viscosos. |
| • S_{ref} : Área de referencia. | • c : Cuerda. |
| • b : Envergadura. | • Z_c : Línea de curvatura media. |
| • α : Ángulo de ataque. | • θ_c : Ángulo de la línea de curvatura |
| • α_L : Ángulo de sustentación cero. | • t : Espesor |
| • $C_{L_{max}}$: Sustentación máxima. | • m : Curvatura. |
| • $C_{D_{min}}$: Arrastre mínimo. | |
| • ρ_∞ : Densidad del aire en corriente libre. | |
| • α_∞ : Velocidad del sonido en corriente libre. | |
| • V_∞ : Velocidad del flujo en corriente libre. | |
| • Re : Número de Reynolds. | |
| • M_∞ : Número de Mach. | |
| • Pr : Número de Prandtl. | |
| • P : Presión. | |
| • ρ : Densidad del fluido. | |
| • T : Temperatura del fluido. | |
| • E : Energía total. | |
| • u, v, w : Componentes de velocidad. | |

1.- Introducción

El presente estudio se refiere al área de investigación de la aerodinámica y el diseño de alerones utilizados en vehículos Nissan Tsuru, utilizando programas CAD y de simulación para realizar las pruebas necesarias para obtener un resultado sobre la fuerza de arrastre sobre el vehículo y a partir de ahí determinar si afecta al consumo de combustible. SolidWorks fue la herramienta utilizada tanto en diseño CAD como para las simulaciones CFD necesarias para el cumplimiento del objetivo.

Se observaron automóviles usados en el área metropolitana de la ciudad de Monterrey se puede notar que el uso de alerones es común. La función teórica de los alerones en los automóviles es de, por medio de fuerzas aerodinámicas, mejorar el agarre y la tracción del vehículo, ayudando en curvas y tener mayor seguridad en el volante. Al incrementar la fuerza que el vehículo produce contra el suelo provocará un incremento en el consumo de combustible, además de desgaste en los neumáticos y los componentes del automóvil.

El Nissan Tsuru, conocido en otros mercados como Nissan Sentra, fue lanzado en México en 1992. Basado en la plataforma B14 de Nissan, el Tsuru se convirtió rápidamente en un automóvil popular debido a su fiabilidad, economía de combustible y bajo costo de mantenimiento. Durante su producción, el Tsuru pasó por varias actualizaciones, pero mantuvo su diseño clásico y su enfoque en la funcionalidad [1].

El modelo se fabricó en México hasta 2017, convirtiéndose en un ícono del transporte en el país, especialmente para taxis y flotas de empresas, debido a su durabilidad y eficiencia. Aunque su producción se detuvo, el Tsuru sigue siendo muy valorado en el mercado de autos usados [1].

Características del Nissan Tsuru

1. **Diseño:** El Tsuru tiene un diseño sencillo y funcional, con líneas rectas y una apariencia compacta. Su diseño se ha mantenido relativamente constante a lo largo de los años.
2. **Motorización:** Originalmente, estaba equipado con motores de 1.6 litros y, en algunos modelos, motores de 1.8 litros. Ofrecía tanto transmisión manual como automática.
3. **Eficiencia de combustible:** Una de sus características más destacadas es su economía de combustible, lo que lo hace atractivo para los conductores que buscan reducir costos.

4. **Espacio interior:** Aunque es un sedán compacto, ofrece un espacio interior razonable, con capacidad para cinco pasajeros y un maletero adecuado.
5. **Mantenimiento:** Los repuestos son fácilmente accesibles y a buen precio, lo que contribuye a su popularidad entre los usuarios.
6. **Seguridad:** Aunque los modelos más antiguos carecían de las características de seguridad modernas, los últimos años de producción incorporaron algunas mejoras, aunque no al nivel de los estándares actuales.

El Nissan Tsuru es un automóvil que ya ha dejado una huella significativa en el mercado automotriz mexicano y es utilizado y será recordado por su confiabilidad y bajo costo de operación.

El Nissan Tsuru 2004 cuenta con un peso bruto vehicular de 1343 kg para la edición manual de 4 velocidades, 1389 kg para la versión manual de 5 velocidades y 1434 kg para la versión automática de 4 velocidades, el vehículo cuenta con 105 caballos de fuerza de potencia neta y suspensión delantera y trasera McPherson. Las dimensiones del vehículo son 4.324 metros de largo, 1.640 metros de ancho y 1.369 de alto, el automóvil también cuenta con un tanque de gasolina de 50 litros [2].

Para validar el efecto del alerón sobre el automóvil, se plantean pruebas y simulaciones CFD que permitirán comprobar el impacto de la aerodinámica sobre el coeficiente de arrastre del vehículo. En avenidas primarias sin acceso controlado la velocidad permitida es 50 km/h y en carriles centrales de avenidas y carreteras estatales fuera de zonas urbanas son 80 km/h. En carreteras y autopistas de jurisdicción federal, la velocidad más alta permitida para automóviles es de 110 km/h [3]. Se proponen simulaciones CFD utilizando velocidades de 40, 60 y 100 km/h

Existen varios tipos de alerones, entre ellos se seleccionaron dos debido a su popularidad, el alerón de bajo perfil (Figura 1a) y el alerón de pedestal (Figura 1b).



Figura 1: Alerón, a) Bajo perfil, b) Pedestal [4, 5]

1.1 Planteamiento del problema

Al observar el tráfico de la ciudad de Monterrey se puede notar que un gran porcentaje de automóviles diarios tienen modificaciones en el modelo original del automóvil, el que más destaca de ellos es el alerón, una pieza diseñada para reducir el flujo de aire desfavorable que afecta el desempeño del automóvil, dirigida a autos de competición y deportivos. Sin embargo, esta pieza es utilizada en vehículos comerciales, entre ellos los taxis.

La función del taxi consiste en transportar personas de un punto a otro. Para esta tarea se necesita un vehículo confiable, de mecánica simple y lo más importante, que consuma la menor cantidad de combustible posible durante el día. En México, el automóvil que mejor ha cumplido esta tarea por años es el Nissan Tsuru. Vehículo emblemático dentro del folclore mexicano, alcanzando ventas de hasta 1.5 millones de Nissan Tsuru en 2008 en México [6].

En el presente trabajo se busca conocer y cuantificar, mediante experimentación y simulaciones, el impacto aerodinámico real que tendría la instalación de un alerón en un vehículo Tsuru. Asimismo, se pretende analizar las posibles ventajas y desventajas de su implementación, considerando efectos sobre la estabilidad, el rendimiento y el consumo de combustible, con el fin de evaluar la viabilidad técnica de incorporar este dispositivo.

1.2 Justificación del proyecto

Para este proyecto se eligió un vehículo Nissan Tsuru, este es el carro por excelencia utilizado por taxistas en toda la república mexicana, debido a que es económico, eficiente y de mecánica simple. Estas características permiten que el vehículo esté en operación durante intervalos prolongados de tiempo y que sea barato de mantener. A su vez, dentro del popular mexicano existe la idea para los taxistas que su vehículo es parte de su identidad, por esta razón existen unidades modificadas, dentro de las modificaciones más populares está el alerón del carro, esta modificación en particular además de resultar vistosa puede resultar en afectaciones de la aerodinámica del vehículo, por ende, su rendimiento.

En los automóviles, el alerón se utiliza para mejorar la aerodinámica y el rendimiento general del vehículo. Estos se usan especialmente en vehículos de alto rendimiento y deportivos debido a que conforme la velocidad del vehículo va aumentando, este tiende a elevarse por la

presión del aire ejercida sobre el automóvil. Los alerones ayudan a contrarrestar este efecto, mejorando la estabilidad y reduciendo la pérdida de control.

El alerón ayuda a mejorar el manejo al proporcionar una mayor carga aerodinámica, especialmente en curvas, también otorga mejor estabilidad en el frenado y dentro de competiciones, un alerón que se acople a las condiciones ideales del vehículo dará una mayor ventaja [7].

Estas ventajas que podría proporcionar el alerón son más visibles en vehículos de competición que alcanzan velocidades elevadas a comparación de vehículos de uso urbano. La economía del combustible, el ruido y las vibraciones además del costo del mismo alerón pueden no compensar la estética que estos proveen.

Para este proyecto se utilizó ingeniería inversa utilizando un escáner 3D e importando la geometría a un paquete CAD. SolidWorks fue el programa escogido para modelar y modificar el vehículo, siendo uno de los programas más populares dentro de la industria automotriz y el diseño industrial. Se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en SolidWorks donde se calcularon las fuerzas aerodinámicas a las que los alerones están expuestas.

Posteriormente, se puso a prueba tres diferentes configuraciones del vehículo utilizando paquetes para pruebas CFD. Una prueba con el vehículo sin modificaciones y dos diferentes alerones. Con la intención de observar el comportamiento con dos diferentes configuraciones. Los alerones fueron elegidos en base a los alerones más populares vistos en el centro de la ciudad.

El uso de ambas herramientas ayudó a poder realizar distintas simulaciones con distintas opciones de diseño, ahorrando tiempo y esfuerzo, todo esto con resultados realistas.

1.3 Hipótesis

Utilizando un paquete CAD-CAE, se analizarán diferentes configuraciones de alerones en el Nissan Tsuru. Tomando en cuenta las velocidades permitidas en las ciudades mexicanas se obtendrán las fuerzas aerodinámicas y el coeficiente de arrastre, determinando que el consumo de gasolina empeorará mientras que otros apartados, como el control o el manejo mejorarán, utilizando como bases gráficos de comportamiento del aire sobre la superficie del automóvil.

1.4 Objetivos Específicos.

1. Especificar la relación entre alerón y consumo de combustible.
2. Elaborar encuestas relacionadas al uso de taxis en la zona metropolitana.
3. Obtener parámetros relacionados al estudio aerodinámico sobre el vehículo y sus diferentes configuraciones de alerón.
4. Realizar modelos CAD del vehículo y sus alerones.
5. Realizar simulaciones CFD de las geometrías obtenidas del punto 4.

1.5 Metodología.

1. Revisión de literatura relacionada a aerodinámica.
2. Elaboración de encuestas visitando zonas concurridas de la zona metropolitana para identificar los vehículos más populares utilizados por taxis y que modificaciones predominan.
3. Desarrollar el diseño de los alerones de bajo perfil y de pedestal para vehículos tipo taxi por medio de softwares CAD. Con el uso de softwares de simulación CFD se visualizará de qué manera afectan a la aerodinámica del vehículo.
4. Realizar un análisis aerodinámico con los valores obtenidos de las simulaciones CFD para evaluar la geometría del vehículo siguiendo el punto 3.

A continuación, se muestra un diagrama de flujo que explica los pasos a seguir en la metodología (Figura 2).

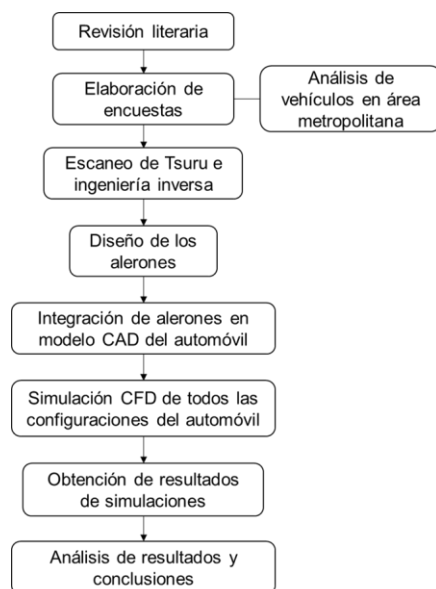


Figura 2: Diagrama de flujo de la metodología usada en la tesis.

1.6 Descripción general de los capítulos de la tesis.

La presente tesis estructura cuatro capítulos principales. El Capítulo 1 introduce el problema, se establece la relevancia del estudio y define una hipótesis, objetivos específicos y metodología general.

El Capítulo 2 presenta los fundamentos teóricos relacionados con la aerodinámica vehicular, perfiles aerodinámicos, herramientas de simulación y diseño, túneles de viento e ingeniería inversa. Proporciona el marco conceptual necesario para interpretar los resultados de estudio.

En el Capítulo 3 se describen los procesos experimentales, incluyendo el escaneo 3D del alerón, la reconstrucción CAD del modelo, así como la configuración y ejecución de las simulaciones CFD para las distintas configuraciones analizadas.,

Finalmente, el Capítulo 4 presenta los resultados obtenidos y su análisis, comparando el comportamiento aerodinámico del vehículo con y sin alerón, así como la percepción del público mediante encuestas y entrevistas.

1.7 Alcances del estudio.

- El estudio solamente evalúa el impacto aerodinámico del uso de alerones en un Nissan Tsuru bajo condiciones controladas de simulación CFD.
- Se analizan dos tipos de alerones: Uno escaneado comprado en una tienda de accesorios automotrices en la ciudad de Monterrey y uno diseñado para competencia.
- Las simulaciones consideran velocidades que representan escenarios urbanos y de carretera (40, 60 y 100 km/h).
- El modelo digital del vehículo se basa en una reconstrucción CAD representativa, adecuada para comparaciones del coeficiente de arrastre.
- Los resultados buscan identificar tendencias aerodinámicas y no establecer valores absolutos aplicables a todos los vehículos Nissan Tsuru.

1.8 Limitantes del estudio.

- Las simulaciones CFD se realizaron en un entorno virtual, por lo que no se incluyen pruebas experimentales en túneles de viento reales ni en calle o carretera.

- El estudio se enfoca únicamente en el coeficiente de arrastre. Otros parámetros como la sustentación o vibraciones no se evalúan.
- Las geometrías del vehículo y alerones, aunque son precisas, dependen del escaneo 3D y modelado CADA, lo cual puede influir en variaciones respecto a la realidad.
- Las condiciones del flujo del aire se consideran estacionarias y sin presencia de flujo lateral, lo cual limita la representación de condiciones reales.
- Las encuestas realizadas reflejan percepciones de un grupo específico de usuarios y no se pueden generalizar para toda la población de taxistas o conductores.

2.- Marco teórico y antecedentes

Este capítulo desarrolla los fundamentos teóricos necesarios para entender el análisis aerodinámico. Incluye conceptos como fuerzas aerodinámicas, coeficiente de arrastre y sustentación, geometría de las alas, perfiles NACA, similitud dinámica y ecuaciones de Navier-Stokes. También explica los principios y funcionamiento de la dinámica de fluidos computacionales (CFD), su historia, sus métodos y su relación con la experimentación real. Finalmente, aborda los conceptos de pruebas de túneles de viento e ingeniería inversa mediante escaneo 3D, describiendo métodos, aplicaciones y el uso del escáner.

2.1 Aerodinámica de un automóvil y alerón

En la industria automotriz, la aerodinámica vehicular tiene como objetivo ver las acciones y los efectos que ejerce el aire sobre el vehículo en movimiento, así como ver la forma de lograr que estos sean los mejores para el vehículo. La fuerza aerodinámica es generada cuando una corriente de aire fluye sobre y debajo del vehículo, esta fuerza aerodinámica es la resultante de dos fuerzas, la sustentación y la resistencia al avance [8].

En el estudio de la aerodinámica vehicular se tienen dos tipos de flujos, estos tienen un gran impacto sobre el desempeño final del vehículo:

- a) **Flujo de aire exterior al vehículo (Figura 3):** Este flujo de aire actúa sobre la superficie exterior produciendo zonas de presión, depresión y rozamiento. Estas zonas influyen en el avance del vehículo por la resistencia aerodinámica que generan, también generan esfuerzos sobre las llantas y a elevadas velocidades afectan la estabilidad direccional del vehículo [8].

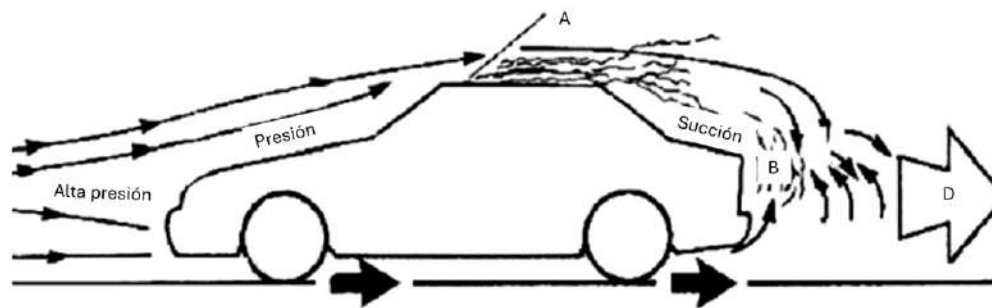


Figura 3: Flujo exterior de aire. [8]

b) Flujo de Aire Interior al vehículo (Figura 4): Este flujo es necesario en el vehículo, aporta a la refrigeración del motor y a la aireación de la cabina de pasajeros [8].

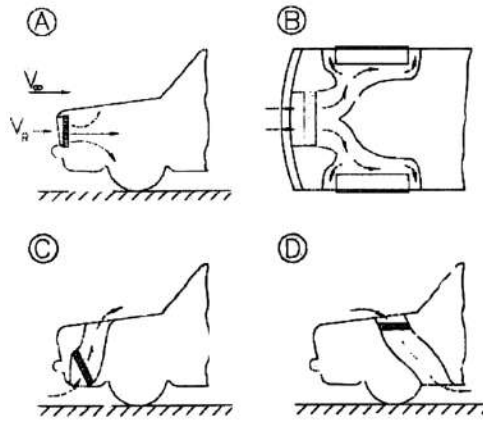


Figura 4: Flujo interior de aire [8].

2.1.1 Tipos de fuerza involucradas.

Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un automóvil (Figura 5) se pueden separar de la siguiente forma [9]:

- Gravitacional: Esta fuerza puede ser descrita como el peso del automóvil, generalmente representada por la letra W.
- Empuje: La fuerza de empuje es aplicada por los sistemas de propulsión, se representan con la letra T.
- Aerodinámica: Las fuerzas aerodinámicas se definen como las fuerzas del aire que actúan sobre las superficies del automóvil. Se representan con la letra A.

En la realidad, las fuerzas de empuje y las fuerzas aerodinámicas no son fáciles de separar, el sistema de propulsión y el resto del automóvil interactúan entre ellas. También las fuerzas aerodinámicas generadas por el vehículo se ven impactadas por la presencia de los sistemas de propulsión. A lo largo de la explicación se separarán las fuerzas aerodinámicas y las de propulsión, pero es importante reconocer que el empuje generado por los motores depende de las fuerzas aerodinámicas y las fuerzas aerodinámicas dependen de las fuerzas de empuje [9].

2.1.2 Fuerzas aerodinámicas sobre un automóvil

En aerodinámica, el flujo de aire respecto al automóvil (Figura 5) se analiza utilizando un sistema de coordenadas que toma el vehículo como punto de referencia (Figura 6). En un plano

inercial se consideran a las velocidades que actúan en el cuerpo V_a y V_w como vectores, donde V_a es la velocidad del vehículo y V_w la velocidad del aire frente al vehículo. La suma de estas dos velocidades da como resultado V_∞ que se define como “velocidad de corriente libre”. Esta define la dirección de la “velocidad de corriente libre”. Pilotos e ingenieros se refieren a esta variable como la “velocidad relativa del viento” ya que es la velocidad del viento relativa a la velocidad del automóvil [9].

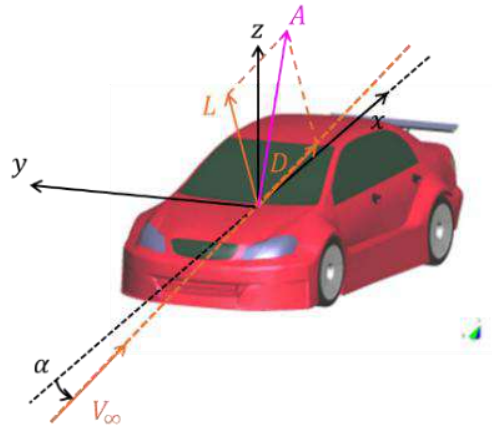


Figura 5: Fuerzas aerodinámicas para un cuerpo simétrico sin deslizamiento lateral (La fuerza de guiñada se supone cero y no se muestra) [45].

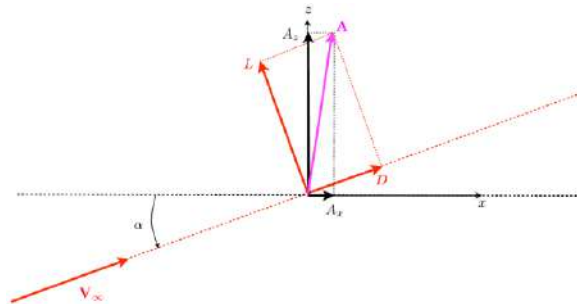


Figura 6: Diagrama vectorial de fuerzas de levantamiento y arrastre vistas en un plano x, z [9].

Tomando de referencia la Figura 6, las fuerzas aerodinámicas se pueden descomponer como [9]:

- Arrastre (Drag): El arrastre (D) es la componente de la fuerza aerodinámica que actúa en dirección de la “velocidad de la corriente libre”.
- Sustentación (Lift): El levantamiento (L) es la componente de la fuerza aerodinámica que actúa normal a la “velocidad relativa del viento”.
- Guiñada (Yaw): La fuerza de guiñada (Y) es el componente de la fuerza aerodinámica perpendicular a la fuerza de arrastre y levantamiento. Dentro de las consideraciones esta

fuerza siempre será 0, debido a que es un plano bidimensional se considera que el vehículo no “gira” en ese plano.

2.1.3 Fuerza aerodinámica, presión y “tensión viscosa” que actúan en un ala.

Las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre un cuerpo provienen de la presión y de la fricción ejercidas sobre sus superficies. La presión y la fricción no son fuerzas en sí mismas, sino tensiones que se definen como fuerza por unidad de área. A nivel molecular, estas tensiones son originadas por la interacción de las moléculas del aire con la superficie [9]. Este concepto se presenta como ejemplo para fundamentar el análisis aerodinámico del vehículo, ya que permite describir de manera clara el origen físico de las fuerzas que influyen directamente en el desempeño y estabilidad al instalar un alerón.

La tensión generada por la presión actúa de forma normal hacia el interior, es decir, perpendicular a la superficie, en el punto de contacto. Esta tensión está asociada con el cambio en la componente normal del momento de las moléculas de aire al impactar contra la superficie (Figura 7) [9]. Si se considera un punto específico de la superficie del cuerpo, la presión en dicha ubicación puede definirse como p . La fuerza debida a la presión actúa sobre un área infinitesimal (dS) y se expresa como (Ecuación 1):

$$-p\hat{n}dS \equiv \text{Fuerza generada por la presión que actúa en el área de superficie } dS \quad (1)$$

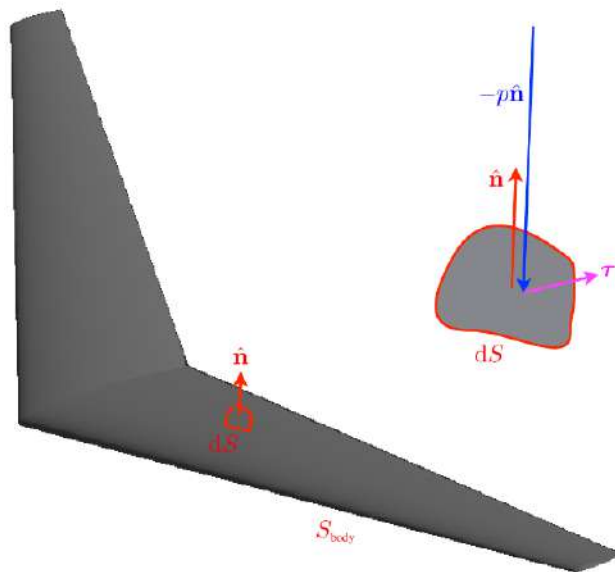


Figura 7: Representación de las fuerzas que se somete un ala [9].

La fuerza de fricción está relacionada con la viscosidad del aire, por esta razón se refiere a esta tensión como “tensión viscosa”. La tensión viscosa está orientada tangencialmente a la superficie, sin embargo, puede existir un componente normal a esta tensión viscosa relacionada a un flujo compresible inestable [9]. Se define el vector de esta tensión viscosa como τ . Esta fuerza viscosa actúa sobre el área de superficie dS como (Ecuación 2):

$$\tau dS \equiv \text{Fuerza viscosa actuando sobre } dS. \quad (2)$$

Las fuerzas aerodinámicas completas que actúan sobre el cuerpo pueden ser encontradas si se integra la presión y la tensión viscosa sobre la superficie del cuerpo (Ecuación 3).

$$A = \int \int_{S_{body}} (-p\hat{n} + \tau) dS. \quad (3)$$

2.1.4 Parámetros de la geometría del ala.

Un parámetro geométrico que tiene impacto significativo en el diseño de un ala es la relación de aspecto (AR) que se define de la siguiente forma (Ecuación 4):

$$AR = \text{relación de aspecto} = \frac{b^2}{S_{ref}} \quad (4)$$

Donde S_{ref} es un área de referencia a la geometría, es el área total del ala proyectada en el plano horizontal [9].

En la Figura 8 se muestran tres diferentes alas con diferentes relaciones de aspecto: Un ala delta con un AR de 2, un ala cónica con AR de 5, un ala rectangular con un AR de 10. Se puede notar que a medida que el AR incrementa, la envergadura se vuelve más larga en relación con la distancia de las cuerdas [9].

Otro parámetro geométrico importante es la relación de conicidad, entre más cercano sea el valor a 0, más afilada será la punta, mientras que un valor más cercano al 1 resultara en un ala más rectangular [9]. Se define como (Ecuación 5):

$$\lambda = \text{relación de conicidad} = \frac{c_t}{c_r} \quad (5)$$

Donde:

- c_t : Cuerda de punta (Tip chord) que es la longitud de la cuerda en el extremo del ala.

- c_r : Cuerda raíz (Root chord) que es la longitud de la cuerda en la parte de unión del ala con el fuselaje.

A continuación, se muestran 3 ejemplos de alas típicas (Figura 8).

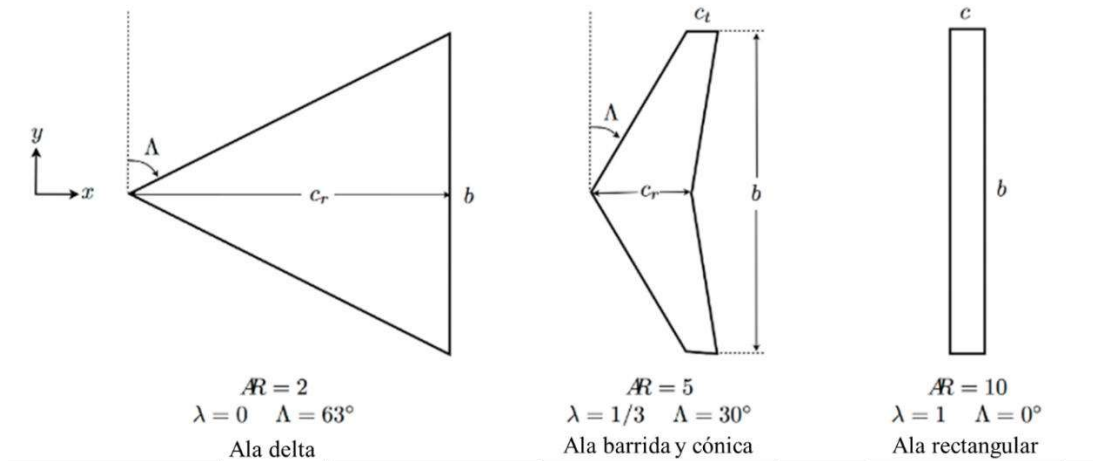


Figura 8: Figura de planos de tres alas típicas demostrando diferentes relaciones de aspecto (AR), relación de conicidad del ala (λ) y el ángulo de flecha del ala (Λ) [9].

Donde:

- b : Envergadura (Sobre el eje Y).
- c_r : Cuerda en la raíz del ala.
- c_t : Cuerda en la punta del ala.
- Λ : Ángulo de flecha.

2.1.5 Espesor y curvatura del perfil aerodinámico.

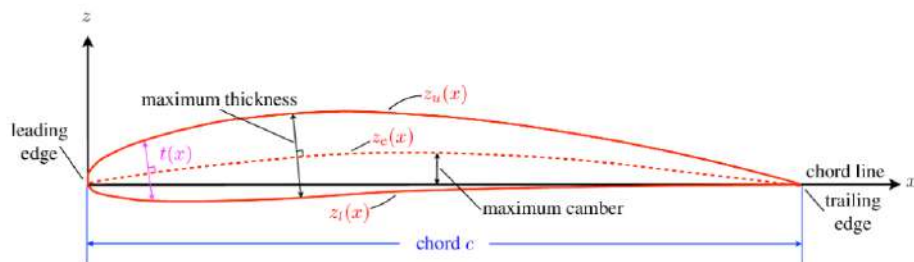


Figura 9: Definición de la geometría del perfil aerodinámico [9].

La sección transversal del ala a lo largo de la envergadura se conoce como perfil alar [9]. La figura 9 muestra la forma geométrica que se asocia al perfil alar, se definen sus partes como:

- **Cuerda (c):**

La cuerda (Chord) es una línea recta que conecta el borde de ataque (Leading edge) con el borde de salida (Trailing edge) [9].

- **Línea de curvatura media (Z_c):**

Se define como la curva que está a medio camino entre las superficies superior e inferior medida normal a la línea de curvatura media. Z_c es el valor máximo de la línea de curvatura media [9].

- **Distribución del espesor ($t(x)$):**

Se define como la distancia entre la superficie superior e inferior medida a la normal de la línea de curvatura media. El valor máximo de la distancia es $t(x)$ [9].

El ángulo de la línea de curvatura media (θ_c) se define como (Ecuación 6):

$$\tan(\theta_c) = \frac{dz_c}{dx} \quad (6)$$

- **Perfil aerodinámico simétrico o perfil aerodinámico sin curvatura:**

Un perfil aerodinámico con un valor de curvatura de cero ($z_c(x) = 0$) se conoce como un perfil aerodinámico simétrico. Se pueden emplear ambos términos porque significa que el perfil aerodinámico tiene una superficie superior e inferior simétricas al eje de la z [9].

- **Perfil aerodinámico curvo:**

Un perfil aerodinámico curvo es un perfil aerodinámico con un valor diferente de cero en Z_c [9].

2.1.6 Los 4 dígitos de los perfiles aerodinámicos NACA.

Estos números de perfil aerodinámico fueron desarrollados por la “National Advisory Committee for Aeronautics” (NACA) que fue precursora de la NASA. Los 4 números se denotan como *MPTT* [9].

Los valores de M y P significan los valores de la línea de curvatura. M da el valor máximo de curvatura como porcentaje de la cuerda, P da la localización máxima de la curvatura como una décima parte de la cuerda. Los últimos valores TT da el valor máximo de espesor del perfil alar como un porcentaje de la cuerda [9].

Por ejemplo, el perfil alar NACA 4510 tiene un espesor máximo que es el 10% de la cuerda, una curvatura máxima que es el 4% de la cuerda y la ubicación de la curvatura máxima está en el 50% de la cuerda. La figura 10 muestra los perfiles alares NACA 0012 y 4412. El NACA 0012 es un perfil alar simétrico (de hecho, todos los perfiles alares NACA son simétricos), mientras que el NACA 4412 es un perfil alar curvado [9].



Figura 10: Perfil alar NACA 0012 en la izquierda y NACA 4412 en la derecha [9].

2.1.7 Definición de coeficiente de sustentación y de arrastre.

En el campo de la aerodinámica es común trabajar con formas adimensionales de sustentación y arrastre, llamadas coeficientes de sustentación (C_L) (Ecuación 7) y de arrastre (C_D) (Ecuación 8) [9]. Estos se definen de la siguiente forma:

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_{ref}} \quad (7)$$

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} V_{\infty}^2 S_{ref}} \quad (8)$$

Donde:

- ρ_{∞} : Densidad del aire en la corriente que asciende respecto al cuerpo.
- S_{ref} : Referencia al área del plano del perfil aerodinámico.

Trabajar con coeficientes de sustentación y arrastre adimensionales es una elección, se pueden sustituir los valores de la velocidad que asciende respecto al cuerpo (V_{∞}) a la velocidad del flujo del fluido con relación al sonido (a_{∞}) [9] (Ecuación 9).

$$\frac{L}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} a_{\infty}^2 S_{ref}}, \quad \frac{D}{\frac{1}{2} \rho_{\infty} a_{\infty}^2 S_{ref}} \quad (9)$$

O también se pueden sustituir el valor del área del plano del ala (S_{ref}) por el valor de la envergadura del ala (b) [9] (Ecuación 10).

$$\frac{L}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2b}, \quad \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{\infty}V_{\infty}^2b} \quad (10)$$

La ventaja que da trabajar con valores adimensionales es que, si logran asemejar los valores de coeficientes teóricos a los valores de coeficientes de modelos a escala real, se obtienen valores aproximados a los valores reales. Esta estandarización de los coeficientes tiende a capturar más de la dependencia de parámetros en la sustentación y el arrastre en las condiciones de velocidad del flujo y del tamaño del cuerpo. Como resultado, se obtiene un coeficiente de levantamiento que tiende a tener magnitudes similares a la sustentación y arrastre real, pero pueden variar en ordenes de magnitud [9].

Mientras que los flujos aerodinámicos reales son tridimensionales, se puede conocer bastante del comportamiento de flujos en dos dimensiones [9]. Para los perfiles alares la sustentación y el arrastre están dados por unidad de longitud.

2.1.8 Similitud dinámica.

Este es un concepto crítico en todos los aspectos de la aerodinámica, incluyendo análisis experimental, teórico y computacional [9]. Como resumen se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- El coeficiente de sustentación, de arrastre, etc. (Ecuaciones 11 y 12) para una figura geométrica específica, así como sus estados de flujo en una forma no dimensional están dadas en función de su número Mach, numero de Reynolds y su ángulo de ataque [9]. Otros parámetros también pueden ser importantes, pero estos son los parámetros dominantes para un amplio rango de la aerodinámica. Para una geometría específica, se consideran C_L (Coeficiente de levantamiento), C_D (Coeficiente de arrastre) y α (Velocidad del flujo del fluido con relación al sonido) como funciones:

$$C_L = C_L(M_{\infty}, Re_{\infty}, \alpha) \quad (11)$$

$$C_D = C_D(M_{\infty}, Re_{\infty}, \alpha) \quad (12)$$

- Para un modelo a escala, como podría ser una prueba en túnel de viento, el coeficiente de sustentación, de arrastre, etc. así como los estados de flujo en forma no dimensional, serán iguales a los valores de un modelo de escala real si sus valores de numero Mach, numero

de Reynolds y su ángulo de ataque (así como cualquier parámetro no dimensional importante) sean iguales [9].

2.1.9 Gráficas de desempeño aerodinámico.

La variación del coeficiente de sustentación y arrastre con respecto al ángulo de ataque para un perfil alar común (Un perfil alar común en un plano bidimensional) se muestra en la figura 11 [9].

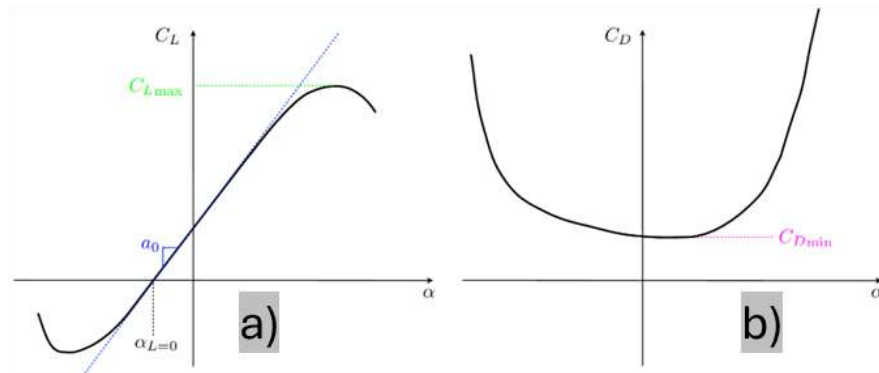


Figura 11: Variación de coeficiente de sustentación (a) y arrastre (b) común con respecto al ángulo de ataque para un perfil alar [9].

Para valores de ángulo de ataque bajos, el coeficiente de sustentación depende casi linealmente del ángulo de ataque (La curva de $C_L - \alpha$ es casi recta). Conforme aumenta el ángulo de ataque, el levantamiento eventualmente llega al valor máximo, que se conoce como $C_{L_{max}}$. Este valor de sustentación máxima a menudo se conoce como condición de pérdida para el perfil alar, este parámetro es clave en el diseño de aeronaves, pues genera un impacto directamente en el despegue y aterrizaje [9].

También dentro de la gráfica de sustentación vs ángulo de ataque existe un ángulo donde la sustentación es cero, $\alpha_L = 0$. Este ángulo usualmente se usa para describir el bajo rendimiento de un valor pequeño de ángulo de ataque [9].

Por último, si el valor de α_L es menor que 0, el levantamiento alcanza valores mínimos. Estos valores son de menor importancia para aeronaves, pero son valores cruciales para el desempeño de aspas en turbo maquinaria [9].

El coeficiente de arrastre (C_D) llega a su valor mínimo ($C_{D_{min}}$) y sus valores más bajos en los valores de ángulo de ataque (α) donde el coeficiente de arrastre se encuentra comportándose

de manera lineal. Mientras más incrementa el valor de α , rápidamente incrementa el valor de C_D conforme más se acerca a $C_{L_{max}}$ [9].

Una mejor forma de visualizar las variaciones del coeficiente de arrastre no es respecto al ángulo de ataque, sino hacer una gráfica de $C_D(\alpha)$ y $C_L(\alpha)$ sobre X y Y respectivamente (Figura 12). Esta lleva el nombre de gráfica de arrastre polar (Figura 12) y hace énfasis en la relación entre sustentación y arrastre. Una forma fácil de visualizar esta gráfica es describiendo el valor de C_D como el arrastre que se tiene que “pagar” para generar cierto levantamiento [9].

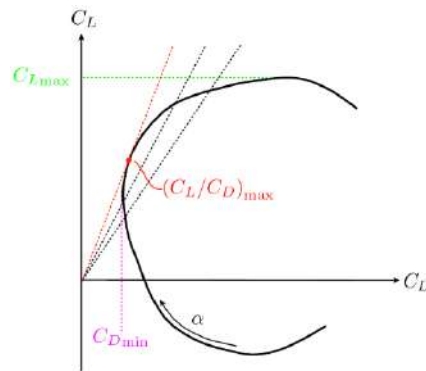


Figura 12: Gráfica común de arrastre polar de un perfil alar [9].

2.2 Ecuaciones de Navier-Stokes.

Para poder conocer mejor cómo funcionan las simulaciones CFD primero es importante conocer de donde provienen las ecuaciones y los modelos matemáticos empleados por los paquetes CFD, estos paquetes permiten modelar y predecir como un fluido interactúa con superficies y como este se comporta bajo diversas condiciones. Las ecuaciones de Navier-Stokes describen justamente ese comportamiento.

Las ecuaciones de Navier-Stokes son un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido viscoso. Estas ecuaciones destacan por su capacidad para describir con precisión movimiento de fluidos caóticos, turbulentos o armoniosos. Gobiernan la atmosfera terrestre, las corrientes oceánicas, el flujo alrededor de vehículos o proyectiles y, en general, cualquier fenómeno en el que se involucren fluidos newtonianos [10].

Durante el siglo XVIII, los matemáticos Bernoulli y Euler estudiaron la mecánica de fluidos, estudiando el movimiento y la estructura de los fluidos. También estudiaron las interacciones entre el fluido y el contorno que las limita. Estas ecuaciones siguen ciertos principios

que se saben que cumplen los fluidos, se asume que los fluidos siguen las leyes de la conservación de la masa y de conservación de movimiento, entre otras leyes [11].

Las ecuaciones de Bernoulli y Euler tienen ciertas limitaciones, según estas leyes los barcos no flotarían y los aviones no volarían. En respuesta a las limitaciones era necesario actualizar las ecuaciones, llegando a un modelo superior. Cauchy, Navier y Stokes hicieron sus aproximaciones incluyendo efectos realistas con fluidos viscosos [11].

Las ecuaciones de Navier-Stokes son una familia de ecuaciones que considera todas las interacciones físicas de los fluidos, el calor, la densidad, momento, viscosidad, entre otras. En la física clásica la interacción con la realidad era limitada, por ejemplo, en el caso de lanzar una piedra se debe considerar su velocidad inicial, ángulo de lanzamiento, fuerza de gravedad, tiempo en el aire, etc.; sin embargo, se despreciaban otros factores importantes, la forma de la piedra, la viscosidad del aire, el momento angular de rotación o cambios de trayectoria [12].

Al ser un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales no se dispone de una solución general para este conjunto de ecuaciones. La dinámica de fluidos computacionales (CFD) por medio de métodos numéricos y algoritmos analiza las ecuaciones y simula el comportamiento de los fluidos, llegando a resultados aproximados.

2.2.1 Descripción Lagrangiana y Euleriana.

Es de suma importancia saber que existen dos modos de describir el movimiento de un fluido. En la descripción Lagrangiana, las partículas del fluido son seguidas una a una y de manera independiente a medida que estas se mueven, y la descripción euleriana fija un volumen de control (El fluido se contiene en un tramo definido, por ejemplo, una tubería) y se analizan las características del flujo del fluido interior. (Figura 13) [12].

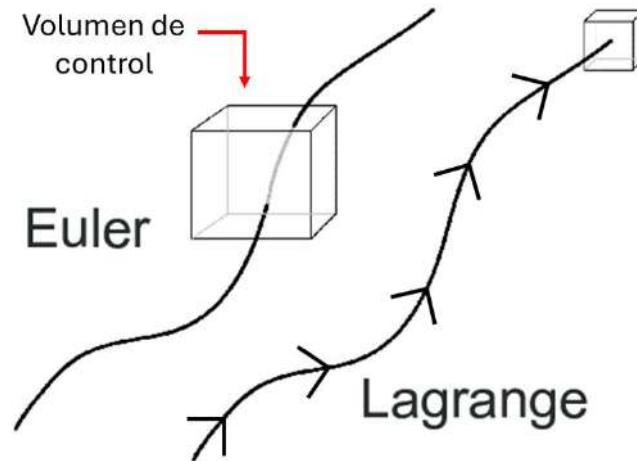


Figura 13: Diferencia visual de ambos modelos de fluidos [12].

Dentro de las consideraciones de las ecuaciones de Navier-Stokes se combinan ambos puntos de vista para poder aplicar las leyes de Newton al fluido [12].

2.2.2 Volúmenes de control.

Para mejor comprensión, se describen a continuación 3 diferentes tipos de volúmenes de control que se emplean en la mecánica de fluidos [12]:

- **Volumen variable arbitrario:** Es un volumen que puede cambiar de forma y tamaño con el tiempo mientras el fluido fluye a través de él. Útil para analizar problemas donde hay superficies en movimiento. También se conoce como volumen de control deformable o arbitrario-Lagrangiano-Euleriano (ALE).
- **Volumen material:** En este enfoque el volumen se mueve con el fluido, lo que significa que las partículas dentro del volumen siempre son las mismas. Se usa el análisis Lagrangiano, las ecuaciones se describen desde el punto de vista de la partícula de fluido en movimiento.
- **Volumen fijo:** Se estudia el cambio de las propiedades del fluido en un volumen definido, sin seguir a las partículas individuales, utiliza el enfoque Euleriano.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen como la velocidad, presión, temperatura y densidad están relacionadas con un fluido en movimiento. Son una extensión de las ecuaciones de Euler e incluyen efectos de viscosidad en el flujo [13].

Ecuación de continuidad (Ecuación 13):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (13)$$

Ecuación de cantidad de movimiento en X (Ecuación 14):

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (14)$$

Ecuación de cantidad de movimiento en Y (Ecuación 15):

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (15)$$

Ecuación de cantidad de movimiento en Z (Ecuación 16):

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (16)$$

Ecuación de Energía (Ecuación 17):

$$\begin{aligned} \frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = & -\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + \\ & \frac{1}{Re_r} \left[\frac{\partial}{\partial x} (u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz}) \right] \end{aligned} \quad (17)$$

Las ecuaciones consisten en una ecuación de continuidad dependiente del tiempo para la conservación de la masa, tres ecuaciones de conservación del momento dependientes del tiempo y una ecuación de conservación de energía dependiente del tiempo. Existen cuatro variables independientes en el problema: Las coordenadas en el espacio x , y y z y el tiempo t . Hay seis variables dependientes: Presión p , densidad ρ , temperatura T (Contenida en la ecuación de energía total E) y tres vectores de velocidad. La componente u corresponde a la dirección x , la componente v corresponde a la dirección y y la componente w corresponde a la dirección z [13].

Todas las variables dependientes son funciones de las cuatro variables independientes. Por lo tanto, las ecuaciones diferenciales son ecuaciones diferenciales parciales y no ecuaciones diferenciales ordinarias. También existe Re , numero de Reynolds, un parámetro de similitud que representa la relación entre la inercia del flujo y las fuerzas viscosas en el flujo. La variable q representa los componentes del flujo de calor, y Pr es el número de Prandtl, un parámetro de

similitud que indica la relación entre las tensiones viscosas y las tensiones térmicas. Las variables τ son los componentes del tensor de esfuerzos [13].

Los términos del lado izquierdo de las ecuaciones de momento se llaman términos de convección. La convección es un proceso físico que ocurre en un flujo de gas en el que alguna propiedad es transportada por el movimiento ordenado del flujo [13].

Los términos del lado derecho de las ecuaciones de momento, que están multiplicados por el inverso del número de Reynolds, se llaman términos de difusión. Este es un proceso físico en el que una propiedad se transporta debido al movimiento aleatorio de las moléculas del gas. La difusión está relacionada con el tensor de esfuerzos y con la viscosidad del gas [13].

La turbulencia y la generación de capas límite son el resultado de la difusión en el flujo. Las ecuaciones de Euler solo contienen los términos de convección de las ecuaciones de Navier-Stokes, por lo que no pueden modelar las capas límite. Sin embargo, existe una simplificación especial de las ecuaciones de Navier-Stokes que describe los flujos de capas límite [13].

Cabe destacar que todas las variables dependientes aparecen en cada ecuación, lo que significa que para resolver un problema de flujo es necesario resolver las cinco ecuaciones simultáneamente [13].

Además, se requieren ecuaciones adicionales para resolver completamente este sistema. En el caso de las ecuaciones mostradas se muestran solo cinco ecuaciones para seis incógnitas. Se necesita una ecuación de estado que relacione la presión, temperatura y densidad del gas. También es necesario especificar todos los términos del tensor de esfuerzos. En el contexto de la dinámica de fluidos computacionales (CFD), a menudo se aproximan mediante un modelo de turbulencia [13].

2.2.3 Relación entre las ecuaciones de Navier-Stokes y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

En el corazón de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se encuentran el conjunto de ecuaciones fundamentales conocidas como ecuaciones de Navier-Stokes. Describen el movimiento de fluidos viscosos e incompresibles, así como el cambio de velocidad y la presión de un fluido en función del tiempo y la posición en el espacio. Estas ecuaciones incluyen términos que representan la viscosidad del fluido, la inercia y las fuerzas externas aplicadas al sistema. Para

resolver las ecuaciones es necesario especificar las condiciones de contorno que describirán el comportamiento del fluido en los límites del dominio de interés, como la velocidad y la presión en las fronteras del dominio [14].

Combinando principios de física, matemáticas e informática para simular y analizar el comportamiento de fluidos (y utilizando métodos numéricos), las ecuaciones de Navier-Stokes se discretizan y se resuelven utilizando algoritmos computacionales para obtener soluciones aproximadas a problemas de flujo de fluidos en sistemas complejos [14].

La utilización de métodos numéricos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes presenta varios desafíos y limitaciones. Entre ellos se incluye la necesidad de discretizar el dominio de cálculo, la sensibilidad a las condiciones iniciales y de contorno, la complejidad computacional y los errores de aproximación asociados con la discretización numérica. Además, en ciertos tipos de flujos por ejemplo flujos turbulentos o de alta velocidad, es necesario recurrir a técnicas más avanzadas de simulación para obtener resultados confiables [14].

2.3 Dinámica de fluidos computacional (CFD).

La dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) es el análisis de sistemas que involucran el flujo de fluidos, la transferencia de calor y otros fenómenos asociados por medio de simulaciones en computadora (Figura 14). Esta técnica es muy poderosa y abarca una amplia gama de aplicaciones tanto industriales como no industriales [15].

Algunos ejemplos incluyen [16]:

- Aerodinámica de aeronaves y vehículos: sustentación y arrastre.
- Hidrodinámica de embarcaciones
- Plantas de energía: Combustión en motores de combustión interna y turbinas de gas.
- Turbomáquinas: Flujos dentro de pasajes rotativos, difusores, etc.
- Ingeniería eléctrica y electrónica: Refrigeración de equipos, incluidos microcircuitos.
- Ambientes internos y externos de edificios: Carga del viento y sistemas de calefacción/ventilación.
- Ingeniería marina: Cargas sobre estructuras en alta mar.
- Ingeniería ambiental: Distribución de contaminantes y efluentes.
- Hidrología y oceanografía: Flujos en ríos, estuarios y océanos.

- Meteorología: Predicción del clima.
- Ingeniería biomédica: Flujo sanguíneo a través de arterias y venas.

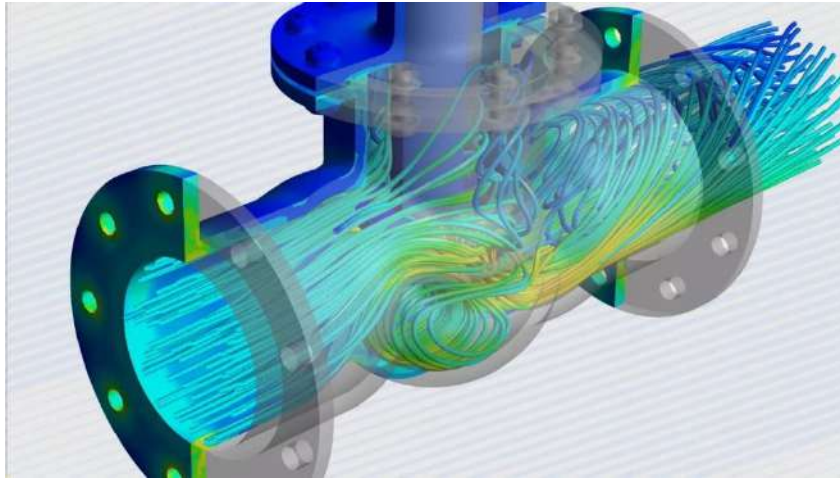


Figura 14: Ejemplo de dinámica de fluidos computacional [15].

El objetivo final del desarrollo del campo del CFD es proporcionar una capacidad comparable a otras herramientas de ingeniería asistida por computadora como análisis de esfuerzos, por ejemplo. La razón principal por la que CFD ha avanzado más lento en comparación con otras disciplinas es por la complejidad del comportamiento subyacente, lo que impide una descripción del flujo de fluidos que sea al mismo tiempo económica y suficientemente completa. Sin embargo, la disponibilidad de hardware de alto rendimiento a precios accesibles y la introducción de interfaces fáciles de usar han generado un auge reciente en el interés por esta tecnología, permitiendo que el CFD se incorpore ampliamente en la industria desde la década de los 90's [16].

Las simulaciones CFD cuentan con varias ventajas a los acercamientos que podrían tener las simulaciones experimentales de sistemas de fluidos, entre ellas:

- Reducción de los tiempos de desarrollo y costos de nuevos diseños.
- Capacidad de estudiar sistemas en los que los experimentos controlados son difíciles o imposibles de realizar (Por ejemplo, sistemas a gran escala).
- Posibilidad de analizar sistemas en condiciones peligrosas, tanto en sus límites normales de rendimiento como más allá de ellos (Por ejemplo, estudios de seguridad y escenarios de accidentes).
- Nivel prácticamente ilimitado de detalle en los resultados.

2.3.1 ¿Cómo funciona la dinámica de fluidos computacional?

Los códigos de CFD están estructurados en torno a algoritmos numéricos capaces de abordar problemas de flujo de fluidos. Los programadores para facilitar el acceso y la capacidad de resolución de los paquetes comerciales de CFD crearon interfaces de usuario sofisticadas para introducir los parámetros del problema y examinar los resultados. Todos los paquetes CFD incluyen tres elementos principales [16]:

- **Preprocesador**

El preprocesamiento consiste en introducir los datos de un problema de flujo a un programa CFD mediante una interfaz fácil de usar. Los datos que puede introducir el usuario en esta etapa incluyen:

- Definición de la geometría de la región de interés: Dominio computacional.
- Generación de la malla: Subdivisión del dominio en múltiples subdominios más pequeños y no superpuestos, formando una malla de celdas llamadas volúmenes de control.
- Selección de los fenómenos físicos y químicos que deben modelarse.
- Definición de las propiedades del fluido.
- Especificación de condiciones de frontera apropiadas en las celdas que coinciden o tocan el límite del dominio.

La solución a un problema de flujo se define en los nodos dentro de cada celda. La precisión de una solución CFD depende del número de celdas en la malla. Cuanto mayor sea el número de celdas, mejor será la precisión de la solución. El tiempo de procesamiento y la demanda al hardware dependen de la finura de la malla. Una malla optima suele ser no uniforme, más fina en áreas donde ocurren grandes variaciones y más gruesas en regiones donde ocurren cambios pequeños [16].

Los preprocesadores más avanzados también proporcionan acceso a bibliotecas de propiedades de materiales para fluidos comunes y la posibilidad de solicitar modelos físicos y químicos especializados junto con las ecuaciones principales del flujo de fluidos [16].

- **Solucionador**

Existen tres enfoques distintos para las técnicas de soluciones numéricas: El método de diferencias finitas, el método de elementos finitos y los métodos espectrales. El método de

volúmenes finitos es fundamental en los paquetes CFD más consolidados en la industria, como CFX, ANSYS, FLUENT, PHOENICS y STAR-CD [16].

El algoritmo numérico en términos generales sigue los siguientes pasos:

- Integración de las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluidos sobre todos los volúmenes de control (finitos) del dominio.
- Discretización: conversión de las ecuaciones integrales resultantes en un sistema de ecuaciones algebraicas.
- Resolución del sistema de ecuaciones algebraicas mediante un método iterativo.

Dentro del primer paso, la integración de volúmenes de control, se distingue el método de volúmenes finitos de otras técnicas de CFD. Las ecuaciones obtenidas expresan la conservación exacta de las propiedades relevantes en cada celda finita, esta relación entre el algoritmo numérico y los principios físicos de conservación es una de las principales ventajas del método de volúmenes finitos. [16]

- **Postprocesador**

Los principales paquetes de CFD están equipados con herramientas versátiles de visualización de datos. Estas incluyen:

- Visualización de la geometría del dominio y la malla.
- Gráficos de vectores.
- Gráficos de contornos en líneas y sombreados.
- Gráficos de superficie en 2D y 3D.
- Seguimiento de partículas.
- Manipulación de vistas (Traslación, rotación, escalada, etc.).
- Salida en color mediante PostScript.

Estas herramientas incluyen animación para la visualización dinámica de resultados. Además de las capacidades gráficas, todos los códigos generan resultados alfanuméricos fiables y cuentan con funciones de exportación de datos para su manipulación externa.

Al igual que en muchas otras ramas del CAE, las capacidades gráficas de los códigos de CFD han revolucionado la comunicación de ideas con personas no especializadas en el área [16].

2.3.2 Solución de problemas con CFD.

Antes de configurar y ejecutar una simulación es necesario identificar y formular el problema de flujo en términos de los fenómenos físicos y químicos a considerar. Algunas decisiones típicas incluyen:

- Determinar si se modelará el problema en dos o tres dimensiones.
- Excluir o incluir los efectos de la temperatura o presión ambiente en la densidad de un flujo de aire.
- Decidir si resolver las ecuaciones de flujo turbulento.
- Evaluar si es necesario considerar los efectos de pequeñas burbujas de aire disueltas en el agua.

Es necesario tomar las decisiones correctas para reducir el nivel de complejidad del problema a un nivel manejable sin perder las características esenciales del problema. La calidad de la información generada por CFD depende en gran medida de la adecuación de estas simplificaciones. El usuario debe ser consciente en todo momento de las suposiciones explícitas e implícitas que ha realizado [16].

Las principales tareas en la etapa de entrada son la especificación de la geometría de dominio y el diseño de la malla. Los dos aspectos que caracterizan dicho resultado son la convergencia y la independencia de la malla. El algoritmo de solución es de naturaleza iterativa, y en una solución convergente, los llamados residuales (medidas de conservación global de las propiedades del flujo) son muy pequeños [16].

No existe un método formal para estimar los errores introducidos por un diseño de malla inadecuado para un flujo general. Un buen diseño inicial de la malla depende en gran medida de una visión anticipada de las propiedades esperadas del flujo. La única forma de eliminar los errores debidos a la baja resolución de una malla es realizar un estudio de independencia de la malla, que consiste en refinar sucesivamente una malla inicial gruesa hasta que ciertos resultados claves no cambien. En ese punto la simulación se considera independiente de la malla, esta parte es esencial en todos los estudios CFD de alta calidad [16].

Al final de una simulación, el usuario debe juzgar si los resultados son lo suficientemente buenos. Es imposible evaluar la validez de los modelos físicos y químicos integrados en un

programa tan complejo como un código CFD o la precisión de sus resultados finales por otros medios que no sean la comparación con pruebas experimentales [16].

Para validar estos resultados de manera significativa es necesario producir datos experimentales de alcance similar, existen diferentes maneras de medir la velocidad de flujo, mediante anemometría de hilo caliente, anemometría láser Doppler o velocimetría por imágenes de partículas (Figura 15). Sin embargo, si el entorno es demasiado hostil para este tipo de pruebas, las mediciones de presión estática y temperatura, complementadas con travesías con tubos de Pitot estáticos, también puede ser útiles para validar ciertos aspectos de un campo de flujo [16].

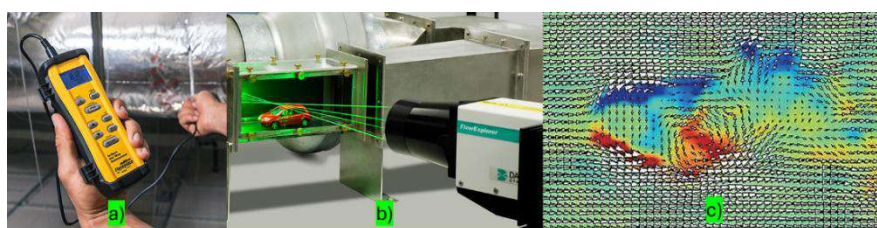


Figura 15: a) Anemómetro de hilo caliente [17], b) Anemometría de láser Doppler [18], c) Velocimetría por imágenes de partículas [19].

A veces las instalaciones para realizar experimentos pueden no existir aún, o no estar disponibles, en cuyo caso el usuario de CFD debe basarse en [16]:

1. Experiencia previa.
2. Comparaciones con soluciones analíticas de flujos similares, pero más simples.
3. Comparaciones con datos de alta calidad de problemas estrechamente relacionados informados en la literatura científica.

2.3.3 Historia del CFD.

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (siglas en ingles de Computational Fluid Dynamics) se enfoca en la simulación numérica de flujos de fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados, tales como reacciones químicas, combustión, aeroacústica, entre otros. El CFD se originó mediante la combinación de dos disciplinas: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que rigen el flujo del fluido se originan en la mecánica de los fluidos y pueden ser resueltas a través de diferentes métodos numéricos [20].

Entre mediados de los 60's y 70's, Dudley Brian Spalding, profesor de transferencia de calor y jefe de la unión de dinámica de fluidos computacionales en el Imperial College London, fue uno de los pioneros en el campo del CFD [21].

Durante los 60's la fluidodinámica computacional (CFD) fue principalmente empleada en la industria aeroespacial, integrando CFD para realizar el diseño y la manufactura de nuevas aeronaves y motores del mismo avión [21].

Conforme fueron avanzando los años, el interés por el CFD creció a gran escala, optimizando los códigos y utilizando ecuaciones más precisas. Entre ellas destacan en la década de los 70's las ecuaciones de flujo potencial, en los 80's las ecuaciones de Euler y Navier-Stokes, en los 90's optimizaciones en las formas aerodinámicas y en los 00's los métodos de elementos finitos discontinuos [21].

En la actualidad, el uso de simulaciones CFD ayuda a resolver una amplia variedad de problemas en distintas industrias. Entre ellas las que más destacan son la industria aeroespacial, automotriz, energética, industria química, procesamiento de materiales, investigaciones médicas, construcción, meteorología, entre muchas otras. La simulación CFD permite llegar a resultados aceptables, con una condición de detalle que un modelo físico no podría proporcionar, ahorrando tiempo y dinero. Sin embargo, estas simulaciones no son un reemplazo de estudios experimentales físicos, pues ambos se pueden complementar y retroalimentar [22].

2.4 Pruebas en túneles de viento.

Durante el diseño y desarrollo de nuevos modelos de automóviles, la industria automotriz se beneficia del uso de túneles de viento como herramienta esencial (Figura 16). Ofrece un medio para medir y estudiar los efectos de la resistencia y la aerodinámica en el rendimiento y la eficiencia del vehículo [23]. Un automóvil se somete a pruebas rigurosas en el túnel de viento para evaluar cómo el aire fluye alrededor y dentro del vehículo a diferentes velocidades y condiciones.

El uso de túneles de viento otorga beneficios a la automoción. Proporciona información crucial para optimizar la aerodinámica del vehículo, mejora la eficiencia en el consumo de combustible, la velocidad máxima y estabilidad a velocidades altas [23].



Figura 16: Vehículo tipo Formula 1 puesto a prueba en túnel de viento equipado con cintas transportadoras [24].

A pesar de sus muchas ventajas, el uso de túneles de viento tiene desventajas. La construcción y operación del túnel de viento puede ser bastante costoso y requiere una gran área de trabajo (Figura 17). Además, las simulaciones en túneles de viento no siempre pueden replicar las condiciones del mundo real [23].

Existen técnicas de simulación computarizada para complementar las pruebas en túneles de viento, permiten a los ingenieros realizar cambios en tiempo real sin la necesidad de construir un prototipo físico completo [23].

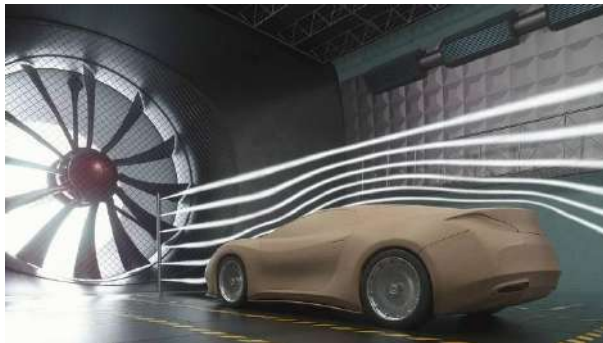


Figura 17: Demostración de tamaño de túnel de viento [25].

2.5 Ingeniería inversa.

La ingeniería inversa se refiere a la técnica utilizada en la industria manufacturera para descomponer y buscar comprender a fondo la estructura y el funcionamiento de un producto existente [26]. Es un proceso mediante el cual se observa cómo está construido, como funciona un objeto, proceso, programa o sistema con la intención de mejorarlo o duplicarlo [27]. Las observaciones se pueden basar en distintos factores, como averiguar cuáles son sus componentes, como estos interactúan entre sí o como se fabricó el producto. La figura 18 muestra un ejemplo real de ingeniería inversa tomando una motocicleta como referencia.



Figura 18: Ejemplo real de ingeniería inversa [26].

2.5.1 Aplicaciones de la ingeniería inversa.

- **Reproducción de equipos [28]:**
 - Piezas obsoletas: Reproducción de piezas que ya no se fabrican en modelos detallados.
 - Componentes personalizados: Diseño de componentes compatibles para operaciones específicas donde no existen soluciones estándar.
- **Mantenimiento y reparación [28]:**
 - Análisis de fallas: Investigación de piezas desgastadas o dañadas para comprender las causas de fallos y mejorar su durabilidad.
 - Producción de repuestos: Uso de ingeniería inversa para fabricar piezas de respuesta para equipos antiguos.
- **Optimización de procesos [28]:**
 - Comprensión del sistema: Obtención de información sobre procesos o equipos patentados para optimizar su rendimiento y eficiencia
 - Eficiencia energética: Identificación de áreas para reducir el consumo energético mediante rediseño o mejoras en el sistema.
- **Cumplimiento y seguridad [28]:**
 - Alineación con normativas: Asegurar que los sistemas antiguos cumplan con los estándares modernos de seguridad y medio ambiente mediante su análisis y modificación.
 - Inspección y pruebas: La ingeniería inversa ayuda en el desarrollo de técnicas y herramientas para pruebas no destructivas.
- **Transformación digital [28]:**

- Modelado 3D: Creación de gemelos digitales de activos físicos para simulaciones, mantenimiento predictivo y gestión avanzada de activos.
- Integración de sistemas legados: Adaptación de sistemas antiguos para que funcionen con infraestructuras digitales modernas.

2.5.2 Métodos utilizados en ingeniería inversa.

Escaneo 3D.

Permite capturar con precisión la forma y las dimensiones de un objeto mediante tecnologías de escaneo avanzadas. Los datos escaneados se convierten en un modelo digital en 3D, que puede analizarse, modificarse o reproducirse [29].

- Tipos de escáneres 3D (Figura 19): Existen escáneres láser, escáneres de luz estructurada y escáneres de tomografía computarizada (CT), cada uno adecuado para diferentes materiales y niveles de precisión [29].

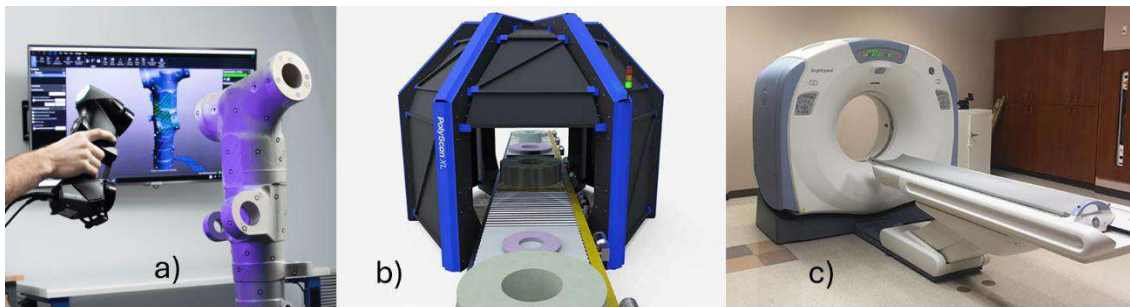


Figura 19: a) Escáner láser [30], b) Escáner de luz estructurada [31], c) Escáner CT [32].

Se emplean en industrias como la automotriz, aeroespacial y de salud. Permiten modelado de alta precisión, reduce errores en mediciones manuales y acelera el proceso de diseño [29].

Diseño asistido por computadora (CAD).

Los softwares CAD permiten convertir los modelos escaneados en 3D en diseño digitales editables, lo que permite a los ingenieros modificar, analizar y optimizar componentes mecánicos [29]. A continuación, se describe el flujo de trabajo típico de ingeniería inversa con programas CAD y en la figura 20 se puede ver un ejemplo:

1. Importación de datos del escaneo 3D en el software CAD.
2. Limpieza y refinamiento de la malla escaneada para eliminar ruido.
3. Conversión del modelo en diseños paramétricos con características editables.

4. Simulación y optimización para fabricación.

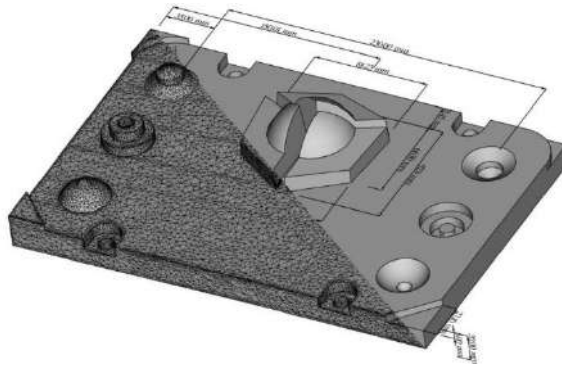


Figura 20: Ejemplo de pieza creada con escáner 3D e importada a software CAD [33].

Existen herramientas CAD como SolidWorks, AutoCAD, CATIA, CREO, NX, entre otras. La aplicación de este método es el rediseño de productos, manufactura y creación de piezas personalizadas para componentes obsoletos [29].

Análisis de Elementos Finitos (FEA).

El análisis de elementos finitos es una técnica computacional utilizada para predecir como reaccionaría un componente mecánico ante fuerzas reales, vibraciones, calor y otros efectos físicos. Es esencial en la ingeniería inversa para validar la integridad de piezas rediseñadas o replicadas [29].

Ampliamente utilizado en la industria aeroespacial, automotriz y maquinaria pesada para mejorar la durabilidad y el rendimiento de los productos, también reduce costos de prototipos físicos, mejora la seguridad del producto final y permite iteraciones rápidas de diseño [29].

2.6 Escáner EinScan Pro-HD.

El manual de usuario del escáner EinScan Pro-HD describe el escáner de la siguiente forma (traducido al español).

“El escáner 3D portátil EinScan Pro-HD (Figura 21) hereda el diseño multifuncional y modular de la serie EinScan Pro, ofreciendo un rendimiento inigualable en la captura de alta resolución y precisión mediante escaneo portátil. Su excepcional versatilidad y potentes optimizaciones se combinan para brindar una experiencia de escaneo 3D profesional y altamente eficiente. Es un asistente confiable para diseñadores e ingenieros que buscan una modelización 3D de alta calidad.” [34]



Figura 21: Escáner EinScan Pro-HD [35].

El manual de usuario del escáner muestra una introducción al hardware, su configuración, la instalación del software para operar el escáner, así como su uso y los requerimientos mínimos para poder manejar el escáner [34].

El escáner cuenta con dos posibles configuraciones, “Industrial pack” y “Color pack”, adecuados para diferentes escenarios [34].

Para poder utilizar el escáner es necesario instalar el software EXScan Pro. Este software pide una configuración de PC recomendada (Tabla 1). A su vez, el manual también solicita una tarjeta gráfica marca NVIDIA exclusivamente para utilizar el escáner [34].

Configuración	Recomendación
Sistema Operativo	Windows 10 (64-bit) y Windows 11 Pro (64-bit).
CPU	Intel Core i7-11700 o superior.
Tarjeta Gráfica	NVIDIA RTX 3060 o superior.
VRAM	8 GB o superior.
RAM	32 GB o superior.
USB	USB 3.0.
Resolución	1920 x 1080 3840 x 2160 3840 x 1080 2560 x 1080

Tabla 1: Configuración recomendada para software EXScan Pro.

Dentro del software EXScan Pro solicita crear una cuenta para poder utilizar el software [34].

2.6.1 Calibración.

Para garantizar la exactitud del escáner es necesario calibrarlo, esto recalculara los parámetros del escáner y mejorar la calidad del escaneo. Se recomienda calibrar el dispositivo cada vez que se vaya a usar [34].

La calibración del dispositivo es necesaria después de las siguientes condiciones:

- La primera vez que se utilice el escáner o 7 días después de la última calibración.
- El escáner fue sacudido agresivamente durante la transportación de este.
- Se observan inexactitudes severas, como podrían ser errores frecuentes de alineamiento o marcas no reconocidas.
- Datos incompletos durante el escaneo o deterioro de la calidad de la información escaneada.

A continuación, se muestran los pasos específicos para la calibración del escáner. Durante este proceso se pide colocar el tablero de calibración en cinco diferentes orientaciones y capturar la imagen en cinco diferentes alturas [34].

1. Colocar el tablero de calibración boca arriba en una superficie plana y alinear en la misma orientación mostrada en la figura 22 [34].



Figura 22: Referencia de paso 1 de calibración de escáner EinScan Pro-HD [34].

2. Después de levantar el escáner, se coloca sobre el tablero de calibración. El escáner debe estar posicionado de forma vertical orientado directamente hacia la mesa, en la misma dirección que se muestra en la figura 23. La mira (cruz) proyectada por el escáner esté ubicada dentro del cuadro blanco en el centro del tablero de calibración [34].

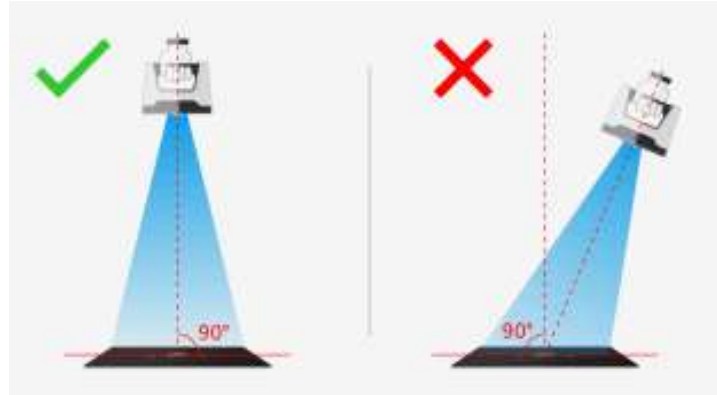


Figura 23: Demostración de la manera correcta de posicionar el escáner para calibración [34].

3. Presionar el botón “Click to start” o presionar el botón de reproducción en el escáner para iniciar la calibración [34].
4. Durante el proceso de recolección de datos es necesario mover el escáner arriba y abajo (asegurándose que la cruz proyectada siempre se mantenga dentro de los límites del recuadro blanco) hasta que el indicador de distancia del software se muestre en verde (Figura 24). Una vez el software detecte la recolección de datos como completa cerrará automáticamente la ventana de recolección de datos continuará a la siguiente etapa de calibración y emitirá un sonido de “beep” como notificación [34].



Figura 24: Demostración de calibración correcta [34].

5. Continuar con las instrucciones mostradas por el software y complete la calibración [34].

Durante la calibración es posible encontrarse con errores de reconocimiento de marcas, el software proporciona avisos en caso de que estos errores se encuentren durante el proceso de escaneo. Se recomienda realizar una evaluación de exactitud para determinar si existe un error

excesivo. Si el error detectado es mayor de 0.05 mm, se recomienda realizar una recalibración [34].

2.6.2 Procedimiento de escaneo.

Existen 3 modos de escaneo para el escáner EinScan Pro HD: Escaneo fijo, escaneo portátil en alta definición y escaneo portátil rápido [34].

2.6.3 Preparación.

Antes de empezar a escanear es necesario conocer recomendaciones importantes para lograr un escaneo exitoso [34].

Objetos que no se recomienda escanear:

- En el modo de escaneo fijo, objetos que se muevan o vibren.
- Materiales suaves que no puedan ser colgados.
- Estructuras con agujeros demasiado pequeños.

2.6.4 Marcadores.

Si la forma del objeto no se puede apreciar bien se pueden colocar marcadores (círculos adheribles de 3mm de diámetro) sobre el objeto para facilitar su escaneo. Al colocar los marcadores se recomienda:

- Colocar los marcadores de forma uniforme y aleatoria (Figura 25).
- Se requieren al menos cuatro marcadores para la alineación en las áreas comunes.
- Asegurarse que la cámara del dispositivo pueda captar al menos 4 marcadores dentro del rango normal de escaneo.
- No colocar los marcadores sobre superficies con alta curvatura.
- No utilizar marcadores dañados o incompletos.
- No utilizar marcadores grasientos, polvorientos o sucios.

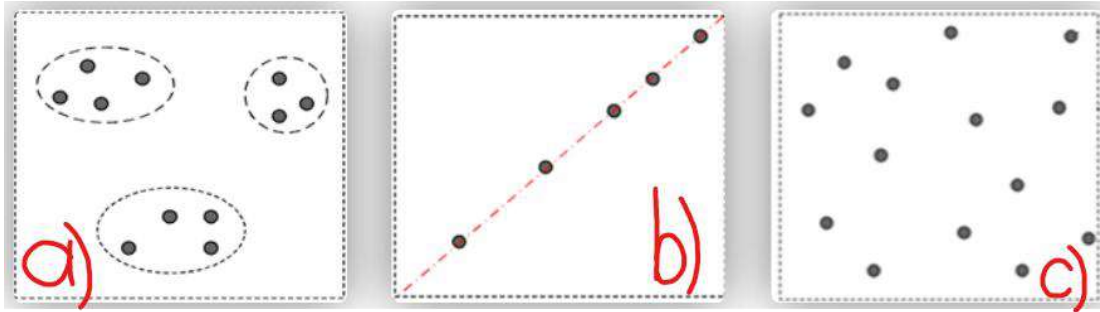


Figura 25: a) Forma incorrecta de poner agrupar los marcadores, b) Marcadores incorrectos sobre una línea. c) Forma correcta [34].

2.6.5 Proyecto y proyecto en grupo.

Antes de escanear es necesario crear un proyecto en grupo.

Dentro de la barra de navegación, entrar al “Scan Mode” y seleccionar el modo scan. Seleccionar en la pantalla pop-up un nuevo proyecto. En la pantalla de diálogo hay que darle nombre y una ruta al proyecto [34].

Después de crear el proyecto se configura la resolución, la textura y el alineamiento de los objetos rígidos [34].

El modo de escaneo fijo es adecuado para capturar detalles de alta definición y precisión para objetos tamaño medio. Existen dos opciones para escanear, scan con textura y scan sin textura, con textura es posible capturar textura del objeto y asignarle color al objeto. La opción sin textura no captura el color del objeto. Si se quiere escoger la opción de escaneo con textura es necesario tener el pack de color instalado [34].

2.6.6 Empezar a escanear.

Después de configurar el proyecto hay que configurar las opciones de escaneo. Se configurará el brillo del escáner (Figura 26), la alineación, HDR (High Dynamic Range) recomendable para objetos que tengan alto contraste entre blanco y negro, ventana de cámara, detección de plano, calidad de escaneo, puntos de distancia, entre otros [34].



Figura 26: Ejemplo de buena configuración de brillo [34].

Ya configurado todo es momento de empezar a escanear, se selecciona la opción de iniciar escaneo. Después de terminar el escaneado se generan nubes de puntos, se pueden editar las nubes de puntos en el apartado de editar datos dentro de escaneo para generar mejores definiciones [34].

2.6.7 Post procesado.

Ya generadas las nubes de puntos, en el apartado de mallado, se convierten en el área de post procesado en una superficie con malla triangular. Esta malla se puede optimizar por medio de la opción filtro, suavizar, remover partes flotantes, simplificar, triángulos máximos, remover picos, entre otras [34].

Damos clic en la opción de previsualización para confirmar las configuraciones y empezará el mallado [34].

2.6.8 Crear nueva característica.

Ya escaneada la pieza, utilizando la opción de crear nueva característica para añadirle datos reales, como las medidas reales, puntos, líneas, planos, alienación, planos de coordenadas, entre otras opciones [34].

Finalizando se guarda el escaneado y ya es posible exportarlo a softwares de terceros para editar el objeto escaneado [34].

2.7 Conclusión del capítulo 2.

El capítulo 2 proporciona el soporte teórico necesario para comprender como interactúa el aire con un objeto en movimiento y cómo herramientas modernas, como el escaneo 3D y las simulaciones CFD sirven para experimentar y obtener resultados en un proyecto.

3.- Experimentación.

Dentro del Capítulo 3 se describe el trabajo práctico realizado. Detalla el proceso de escaneo 3D del alerón real, obtención de la nube de puntos y su conversión a modelo CAD utilizando Fusion 360. Luego se explica cómo se integró el alerón escaneado al modelo del Nissan Tsuru en SolidWorks, y cómo se prepararon las simulaciones CFD para las 3 distintas configuraciones: sin alerón, con el alerón escaneado y con un alerón diseñado para competencia. También se incluyen las entrevistas y las encuestas realizadas.

3.1 Practica de uso de escáner y metodología de escaneo.

Se empezó calibrando el escáner, utilizando una placa calibradora incluida con el escáner (Figura 27a). El software facilita el escaneo con ayudas visuales y aprobaciones (Figura 27b).



Figura 27: a) Escáner junto a placa calibradora [45], b) Procedimiento de calibración [45].

Una vez calibrado el escáner se preparó la pieza. Se aplicó “DNF Developer” (Figura 28a), un aerosol con tinta penetrante, empleada principalmente para encontrar fallas en estructuras metálicas, ayuda al escáner a detectar las superficies más fácil. Después de aplicar se procedió a limpiar la superficie con una servilleta para eliminar residuos del tinte en la superficie y permitiendo que los marcadores se adhirieran mejor a la superficie (Figura 28b). Se añadieron suficientes marcadores a la superficie de la pieza (Figura 28c).

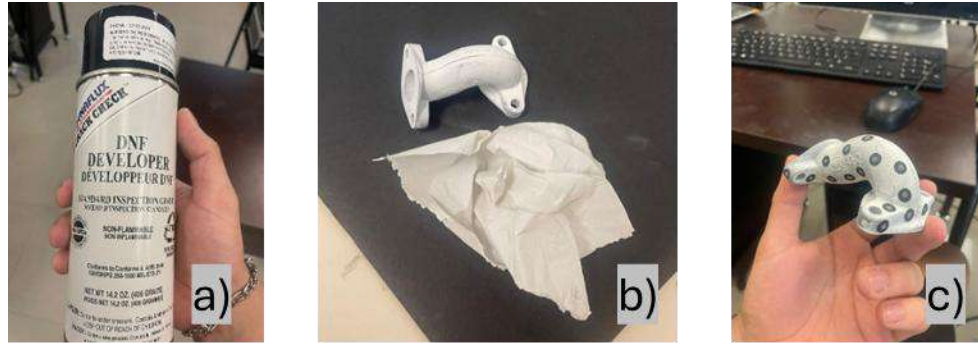


Figura 28: a) Tinte DNF Developer [45], b) Pieza y pañuelo utilizado para limpiar la superficie [45], c) Pieza con los marcadores aplicados [45].

Con la pieza lista se escanearon 6 diferentes vistas de la pieza y utilizando la herramienta de alineación se juntaron las vistas de la pieza, dando como resultado un escaneo completo de la pieza con algunas imperfecciones (Figura 29).

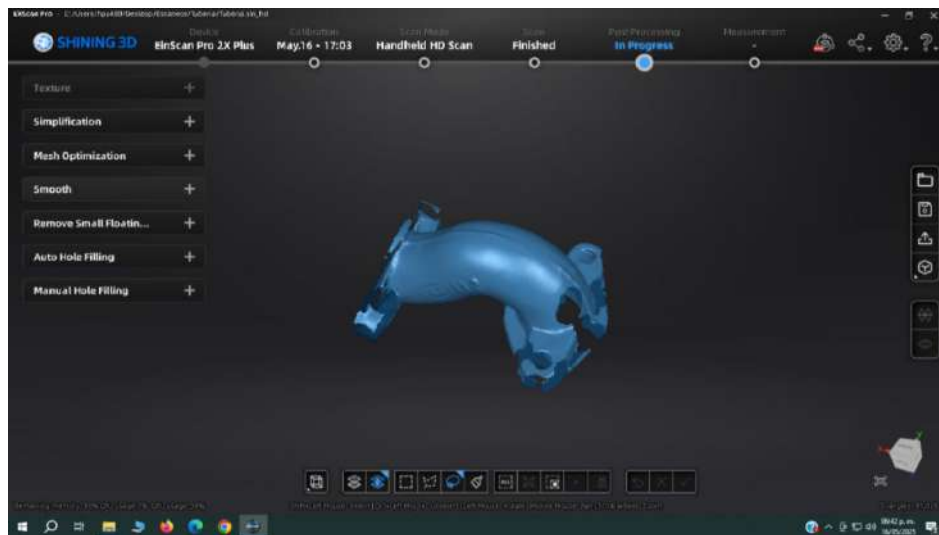


Figura 29: Escaneo con imperfecciones dentro del software [45].

El escaneo se guarda como archivo .stl y es exportado al software Fusion de Autodesk. Dentro de la aplicación, la pieza escaneada se convierte de archivo .stl a un sólido completo, que podrá ser utilizado en pruebas CFD en el software SolidWorks.

Al exportar el archivo a Fusion, se muestra el escaneo realizado, pero con mallas en forma de triángulo (Figura 30).

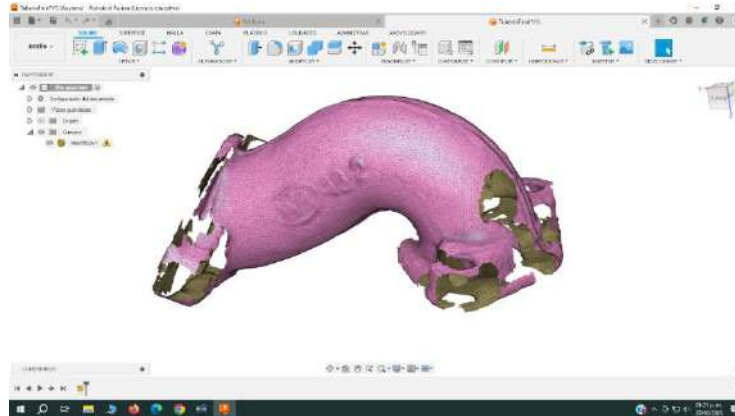


Figura 30: Archivo .stl importado a la aplicación Fusion [45].

Como primer paso, es necesario reparar la geometría, eliminando los espacios en blanco, Fusion cuenta con una opción de reparar el mallado, se seleccón la opción y el programa reparara la pieza (Figura 31).

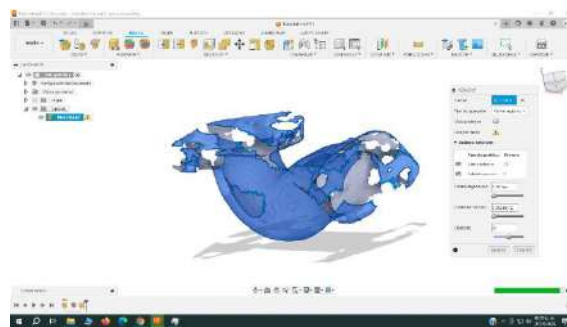


Figura 31: Archivo .stl en proceso de reparación [45].

Una vez reparada la malla (Figura 32), en la pestaña de malla, aplicando la opción de preparar, se generaron grupos de cara para la geometría (Figura 33). Después que se haya generado grupos de cara, utilizando la opción de modificar es posible convertir la malla.

Ya con los grupos de cara creados, se selecciona la opción de método: prismático (Figura 34). Dará un sólido más definido.

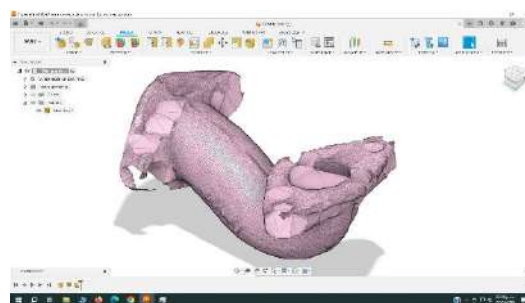


Figura 32: Malla reparada utilizando la opción de reparar malla de Fusion [45].

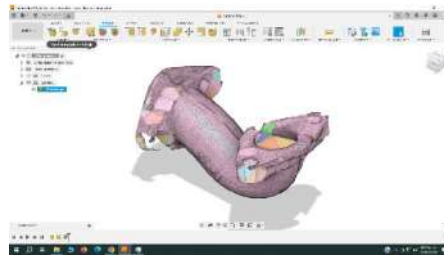


Figura 33: Malla reparada convertida en grupos de cara en la aplicación Fusion [45].

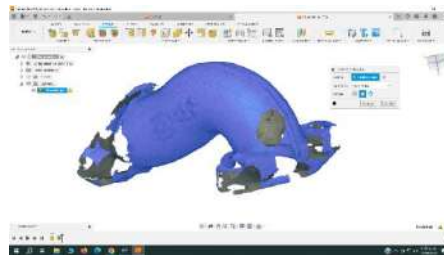


Figura 34: Malla convertida en sólido utilizando la opción método prismático [45].

Para usos de practica y con el fin de convertir un objeto escaneado a un sólido digital se tomó la decisión de utilizar el modelo aun con imperfecciones, al ser una pieza compleja y reducida en tamaño el escaneo se vuelve más complicado, para el escaneo más grande y con geometrías menos complicadas como podría ser el alerón, se prevé obtener resultados más acertados en la geometría.

3.2 Escaneo del alerón.

Para estudio de esta tesis, se utilizó un alerón de Tsuru (Figura 35a). El alerón es de un material de fibra de vidrio y tuvo un costo de \$850 pesos mexicanos.

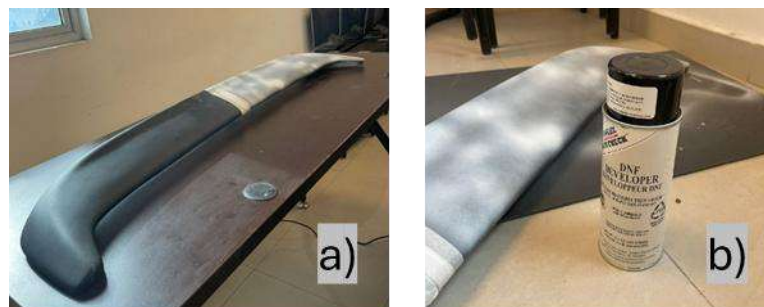


Figura 35: a) Alerón de Nissan Tsuru utilizado en la tesis [45], b) Alerón de Nissan Tsuru junto al tinte en aerosol utilizado [45].

La pieza se preparó para el escáner, primero se aplicó cinta masking separando a la mitad el alerón (con el propósito de escanear la mitad del modelo y dentro del software de diseño 3D,

para realizar un efecto espejo, logrando obtener copia exacta de la otra mitad, facilitando el proceso) y se aplicó el tinte en aerosol sobre la mitad separada (Figura 35b).

También fue necesario preparar una superficie donde el escáner pueda leer datos, sobre una cartulina se aplicaron puntos de marcado para que el escáner 3D tenga una referencia (Figura 36). En ayuda a esto, la mesa donde se posicionó la superficie marcada está bien iluminada y cerca a paredes blancas, ayudando al escáner a poder reflejar bien la luz y el escaneo sea más preciso. También, la mesa se posicionó en forma que permite moverse alrededor de la mesa.



Figura 36: Cartulina con puntos de referencia utilizada para el escaneo del alerón [45].

Ya con el área de trabajo preparada, se realizaron dos escaneos del alerón, con la pieza viendo hacia arriba y la pieza viendo hacia abajo. Gracias a la configuración que se preparó, se pudo caminar en torno a la pieza, facilitando el escaneo y mejorando su precisión. Se obtuvieron dos escaneos (Figura 37 y 38).

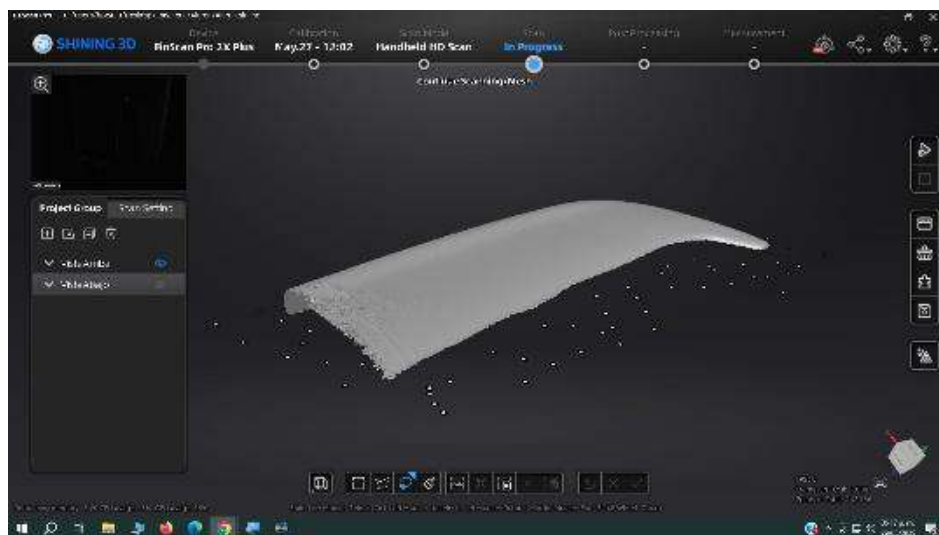


Figura 37: Escaneo de la vista de arriba de alerón [45].

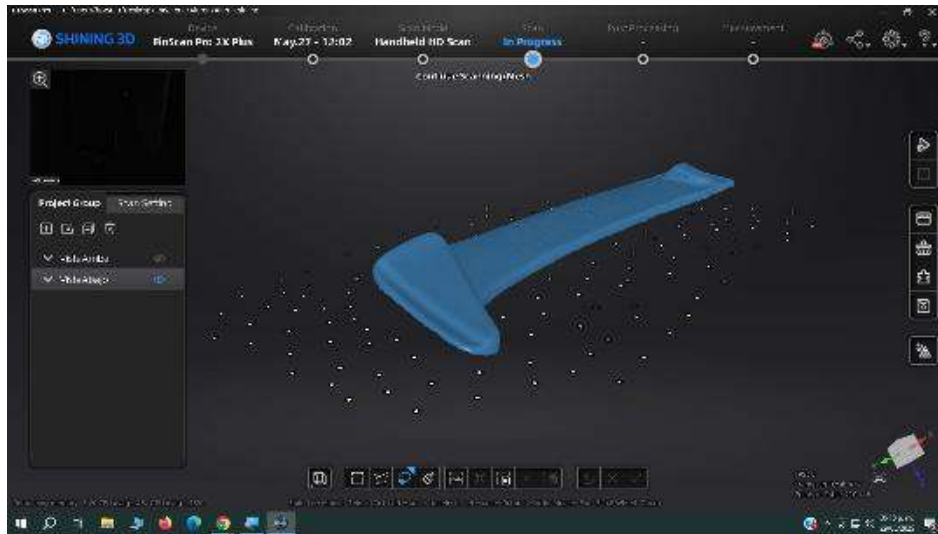


Figura 38: Escaneo de la vista inferior del alerón [45]

Para terminar el apartado de escaneo se utilizó la herramienta “align” para juntar ambos escaneos. Con este proceso se obtuvo una figura realista del alerón (Figura 39).

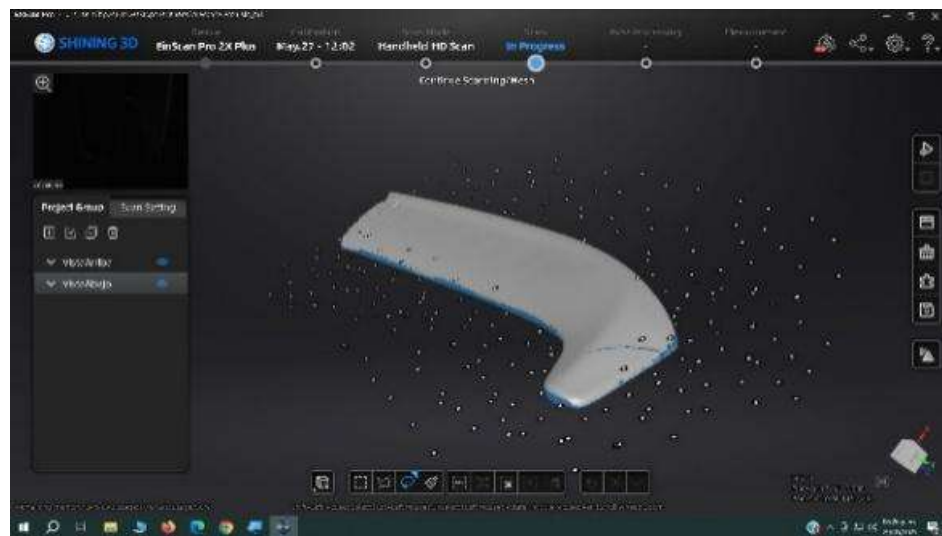


Figura 39: Escaneos de vista superior e inferior unidas utilizando la herramienta "Align" [45].

Una vez terminada la parte de escaneo, se realizó el post procesamiento de la pieza, paso necesario para poder generar la malla que se exportó como archivo. stl al software Fusión. El software del escáner EXScan Pro cuenta con opciones de optimización de malla, donde se escogió generar una superficie con una suavidad alta, filtro al máximo, el máximo número de triángulos que el software permite y también que remueva partes flotantes que pudieran afectar la calidad de nuestra malla (Figura40a). Después de que la malla se generó, la pieza siguió con algunas

imperfecciones, utilizando las herramientas de post procesamiento brindadas por el software se eliminaron los agujeros que presente el escaneo dejando un mejor acabado (Figura 40b).

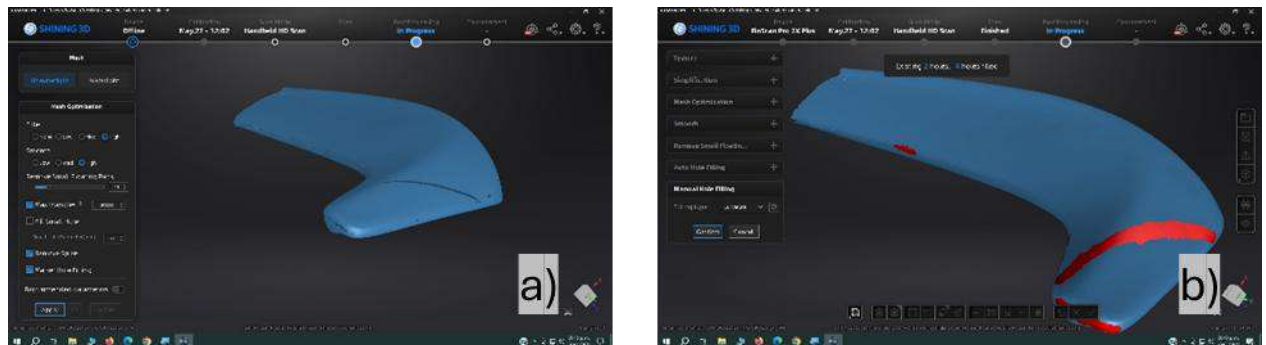


Figura 40: a) Configuración de optimización de malla [45], b) Reparación de escaneo utilizado herramientas de post procesamiento [45].

Dentro del apartado de post procesamiento se realizaron modificaciones al escaneado para dejar un mejor acabo con el propósito de facilitar el manejo del archivo .stl en el software Fusion. Se selecciono una superficie que se sabe que es plana (Figura 41 y 42) para tomarla como marco de referencia para un plano de referencia, se realizó un corte a la pieza para tener la mitad del alerón (Figura 43) y poder realizar una operación de espejo.

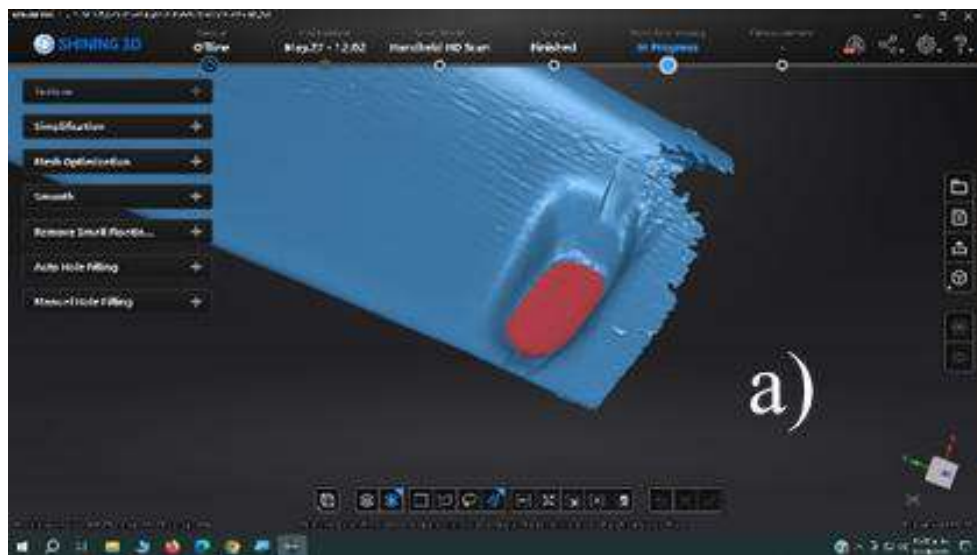


Figura 41: Selección del área plana [45].

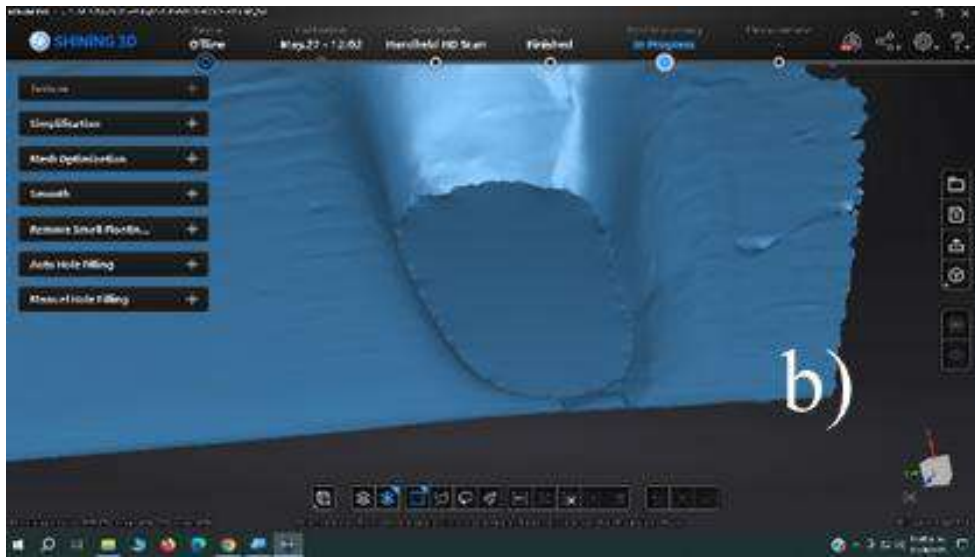


Figura 42: Creación de área plana [45].

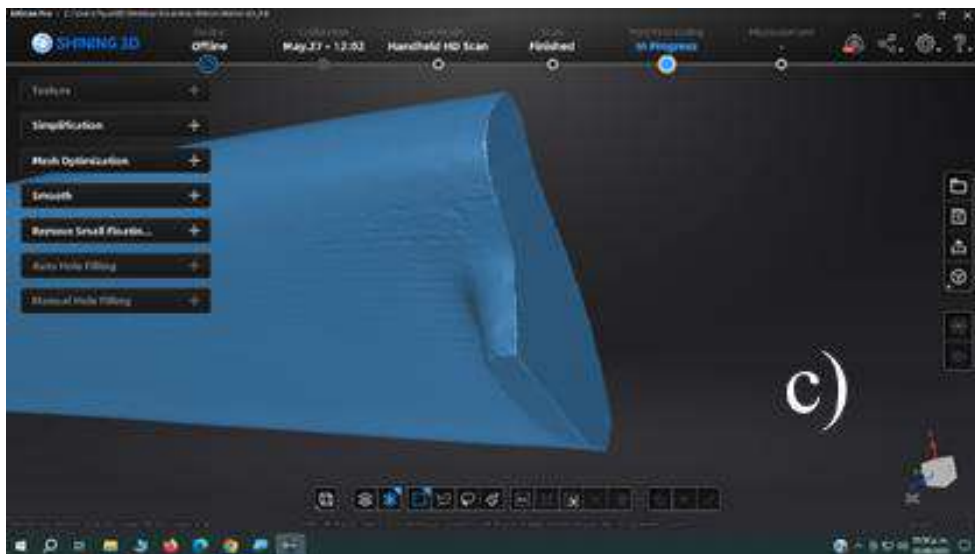


Figura 43: Corte de la pieza [45].

En el apartado de post procesado, se utiliza la herramienta simplificación. Para realizar un buen escaneo, es necesario seleccionar opciones de escaneo donde el grano sea lo mejor detallado posible, en consecuencia, el resultado final es una superficie donde se generan demasiados triángulos. En una pieza como la del alerón escaneado, donde no es necesario que haya detalles tan precisos y las superficies que se buscan son planas la herramienta de simplificación ayuda a reducir ese número de triángulos, también reduce el peso del archivo y ayuda a optimizar procesos posteriores (Figura 44, 45 y 46).

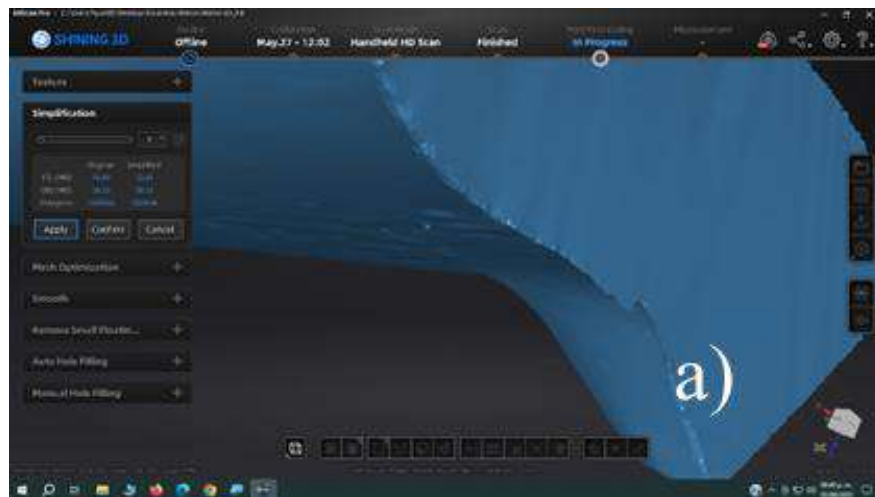


Figura 44: Simplificación 0 [45].

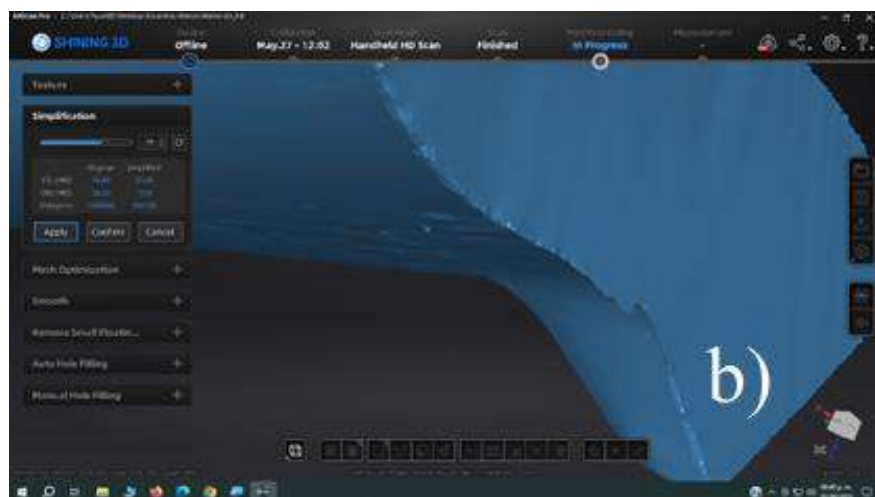


Figura 45: Simplificación 75 [45].

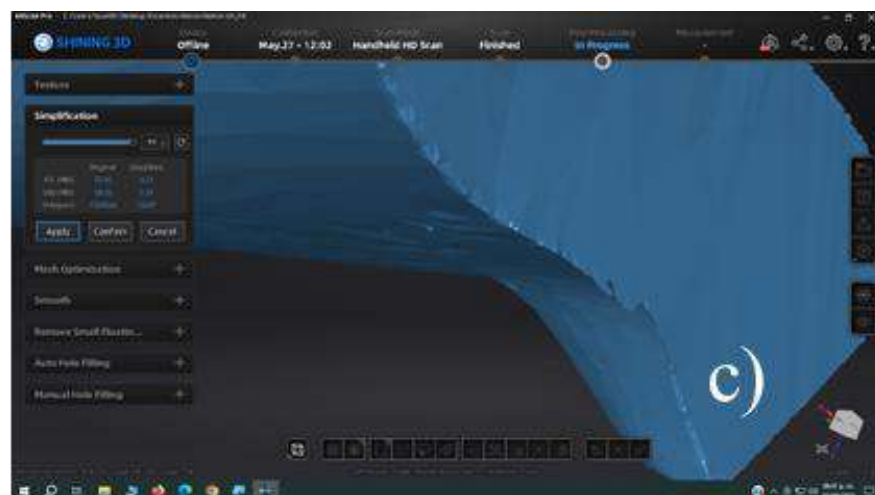


Figura 46: Simplificación al máximo [45].

Para terminar el apartado de post procesado se eliminaron las partes flotantes (Figura 47 y 48) y se suavizaron los bordes (Figura 49 y 50).

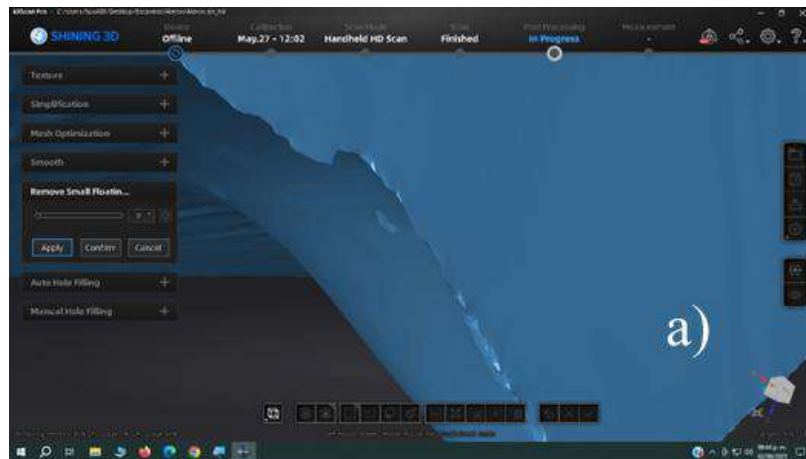


Figura 47: Sin eliminación de partes flotantes [45].

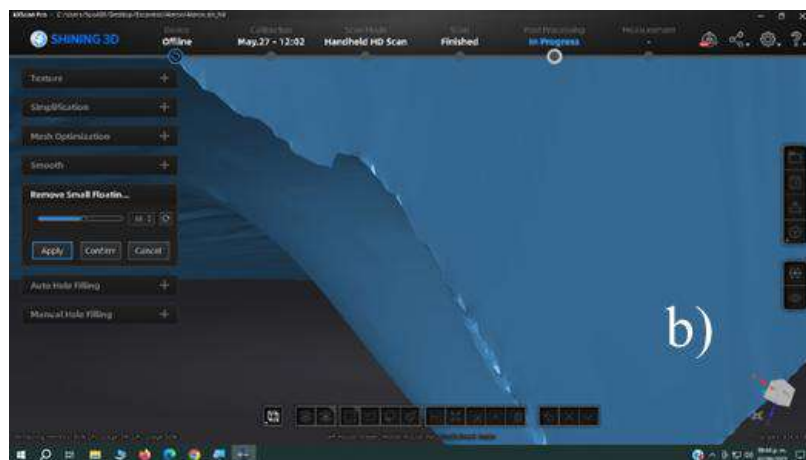


Figura 48: Con eliminación de partes flotantes [45].

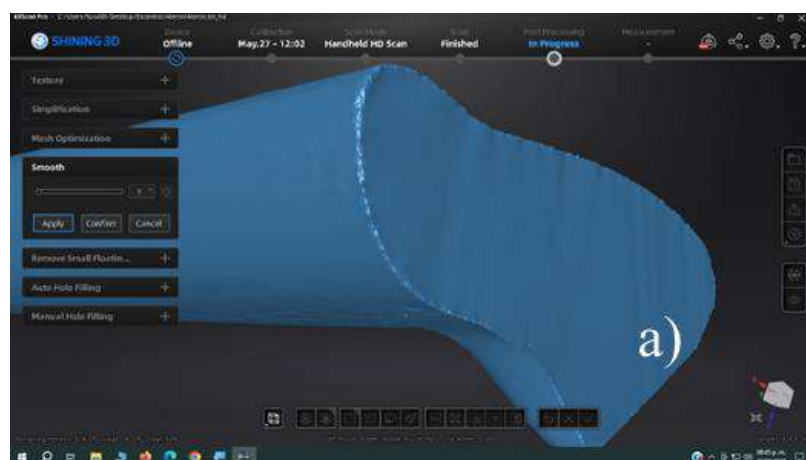


Figura 49: Sin suavizado de bordes [45].

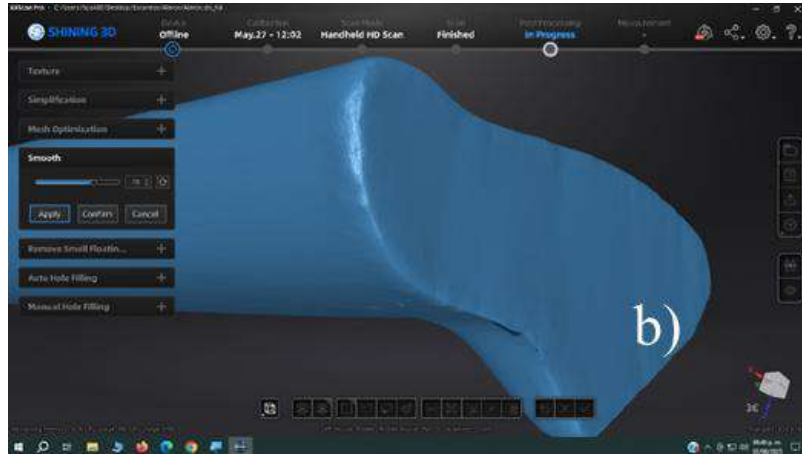


Figura 50: Con suavizado de bordes [45].

Para terminar la pieza en el software EXScan Pro, se utilizó la pestaña medidas para asignar planos (Figura 51a) y un origen para el sistema de coordenadas (Figura 52b).

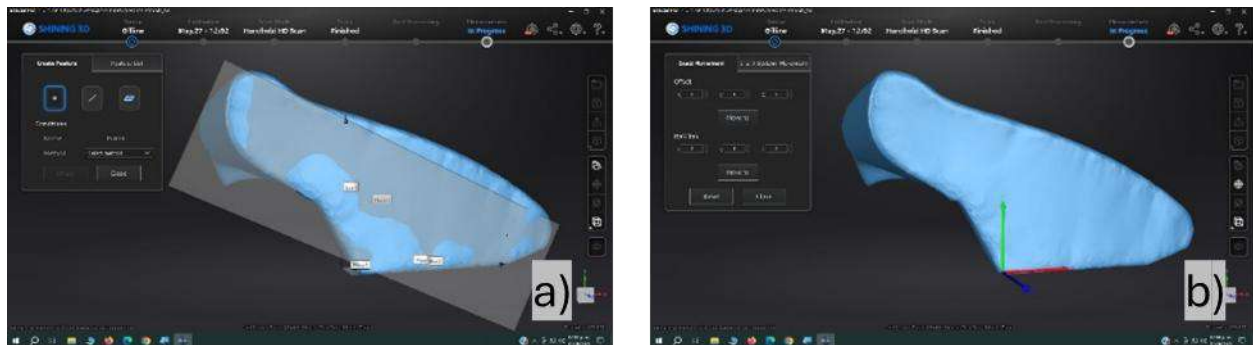


Figura 51: a) Asignación de planos [45], b) Asignación de origen en el sistema de coordenadas [45].

La pieza se exportó al software Fusion y se convirtió en sólido. Convertido en sólido podrá ser utilizado para realizar pruebas CFD y modificaciones (Figura 52).

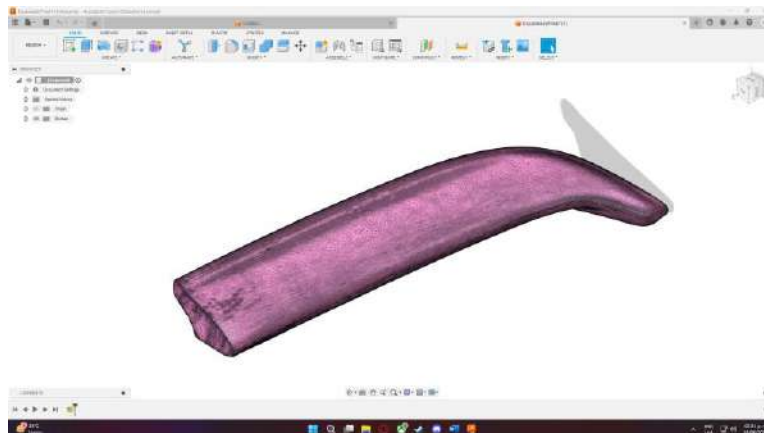


Figura 52: Pieza exportada a Fusión [45].

3.3 Conversión de nube de puntos a sólido en Fusion 360.

En esta sección de la tesis se busca convertir la nube de puntos obtenida por el escáner en un sólido para poder realizar simulaciones dinámicas de fluidos. Al exportar la nube de puntos al software Fusion 360 e intentar convertir la malla creada por la nube de puntos a un sólido se detectó que la definición del escáner es demasiado alta, más de cien mil grupos de triángulos han conformado la malla que la nube de puntos que se creó al momento de escanear el alerón (Figura 53a), por lo que fue necesario reducir el tamaño de la malla para que la computadora pueda realizar de manera más eficiente la conversión a sólido. Se redujo el tamaño de la malla con una tolerancia de 0.80 mm, esta reducción en el número de triángulos permite optimizar el modelo y tener confiabilidad en los resultados de la simulación (Figura 53b).

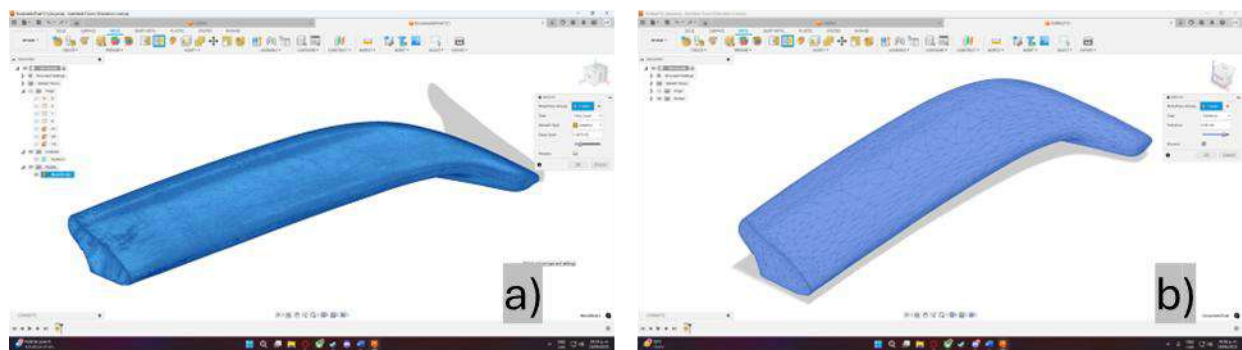


Figura 53: a) Tamaño de malla de más de 100 mil triángulos por malla [45], b) Tamaño de malla de 40 mil triángulos por malla [45].

Con la reducción realizada aún hay que optimizar más la malla, inicialmente la pieza se separó en 4 partes, conforme avanzaba la conversión de la pieza ha solido algunas secciones seguían siendo demasiado grandes para que la computadora pudiera convertir las piezas, por lo que se optó por separar los cuartos en mitades, empezando con la cuarta sección como prueba (Figura 54a), las pruebas funcionaron, entonces la pieza fue separada en mitades, terminando con la pieza mostrada en la Figura 54b.

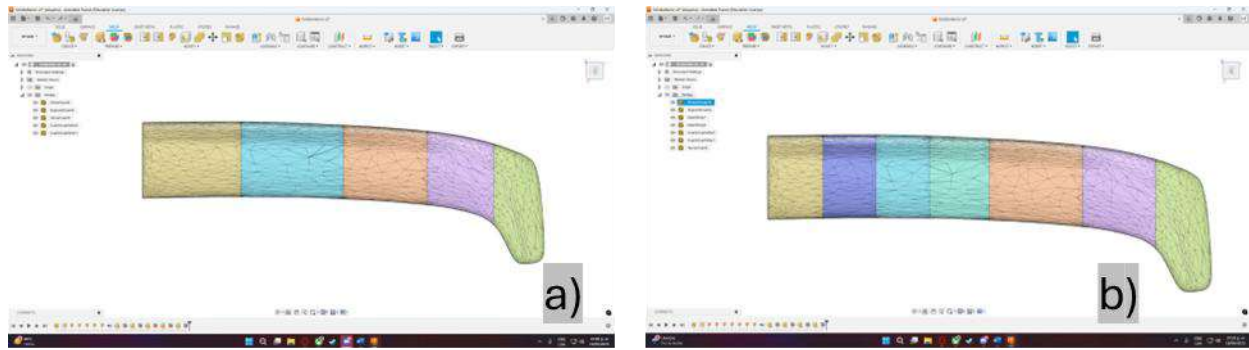


Figura 54: a) Separación de piezas del modelo, originalmente 4 con la cuarta parte separada en 2 partes [45], b) Separación final del modelo [45].

Cada separación de la malla tuvo que pasar por la herramienta de reparación y se separó cada parte individual en un grupo de 3. Los dos lados laterales y la superficie del alerón. Se puede observar en la parte inferior de la ventana de Fusion o bien de manera detallada en la Figura 55.

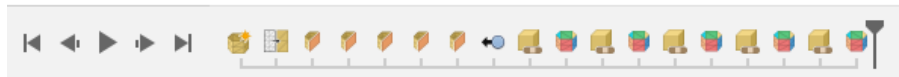


Figura 55: Serie de pasos realizados en la separación de la pieza en diferentes partes [45].

Utilizando la herramienta de convertir malla se convirtieron los grupos de mallas que han sido separados en una pieza sólida. Seleccionando el método “orgánico”, disponible autorizando una suscripción de pago en el apartado profesional de diseño en Fusion (Se utilizó una prueba gratis de 30 días). Dentro de las opciones de edición del método “orgánico” se seleccionaron las opciones mejor apropiadas para la confiabilidad del escaneo a la importación del sólido (Figura 56a). Al finalizar la conversión de malla a sólido se obtuvo un resultado como el de la Figura 56b.

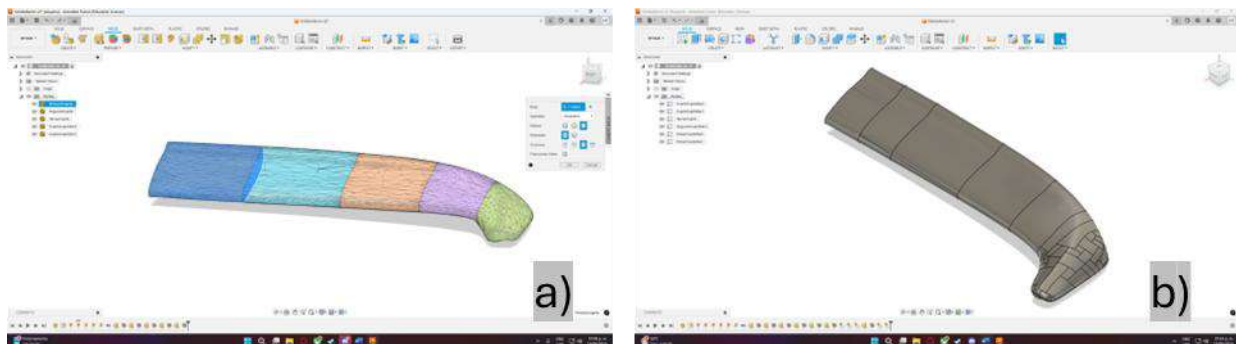


Figura 56: a) Opciones utilizadas en la conversión de malla a sólido en Fusion [45], b) Mallado de alerón convertido a pieza sólida en Fusion [45].

Realizando un espejo del sólido de la mitad derecha y haciendo un render se obtuvo un alerón listo para ser incluido en el modelo de Nissan Tsuru (Figura 57).

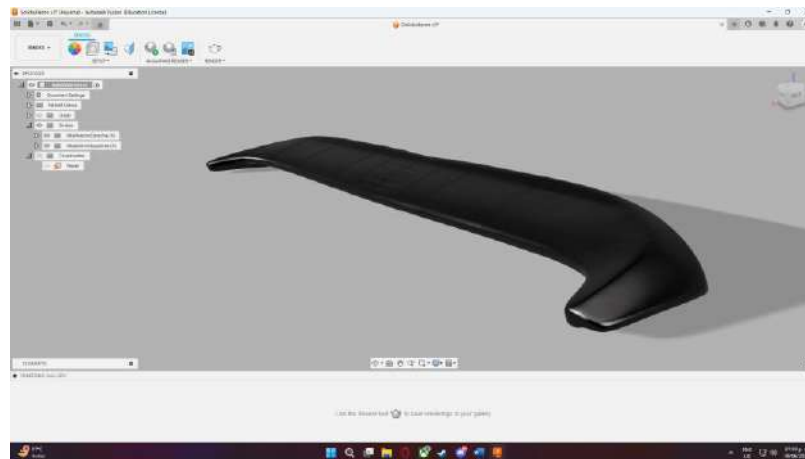


Figura 57: Resultado final de alerón escaneado [45].

3.4 Simulación en SolidWorks.

Para las pruebas CFD que se hicieron sobre el alerón se exploraron varias opciones para conseguir un modelo de Nissan Tsuru ideal. Un modelo de Nissan Tsuru del año 1997 (Figura 58) fue la primera opción. Obtenido del canal de Telegram @VirtualVehicles [36], este canal de Telegram para aficionados y entusiastas del modelismo automotriz contiene cientos de modelos 3D de automóviles populares, el modelo fue exportado como un archivo .fpx y fue convertido a archivo .stl para poder trabajar con él en SolidWorks.

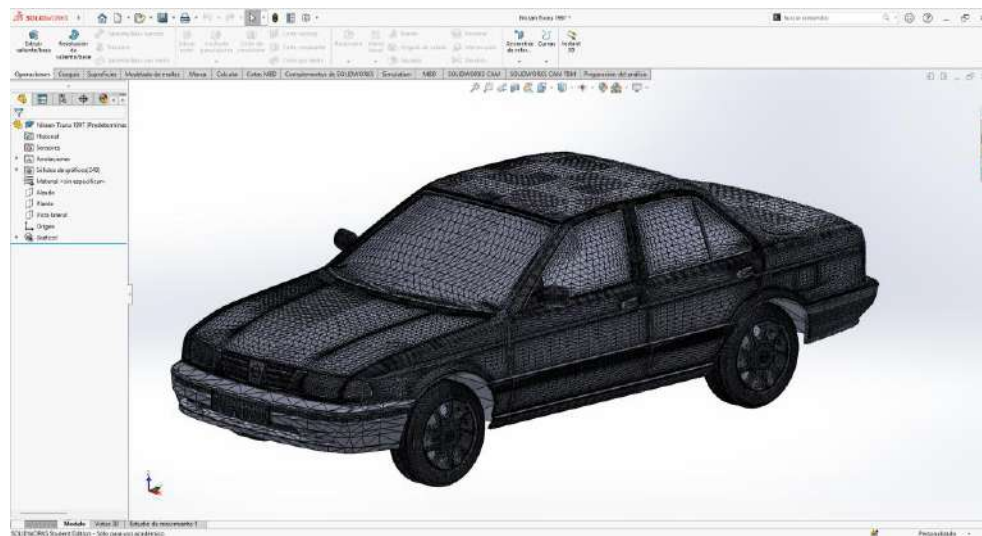


Figura 58: Modelo de Nissan Tsuru 1997 [45].

Al exportarlo surgieron varios problemas que no permitieron trabajar con el modelo. El primero y más importante es el nivel de detalle del modelo. Al ser un modelo con acabados tan realistas, el exportarlo al software SolidWorks ese nivel de detalle se ve reflejado en mala optimización de mallas y problemas futuros en la simulación.

Por lo tanto, se optó por maneras alternativas de editar el modelo, primero se redujo el nivel de detalle y se mantuvieron solo las partes necesarias para la simulación como sería la carrocería del automóvil. El modelo contaba con placas, logos de la empresa, asientos interiores, volante, limpia parabrisas, llantas, rines, entre otras cosas que no aportaban nada a la simulación y solo añadían polígonos que complicaban la simulación y el manejo del modelo (Figura 59).

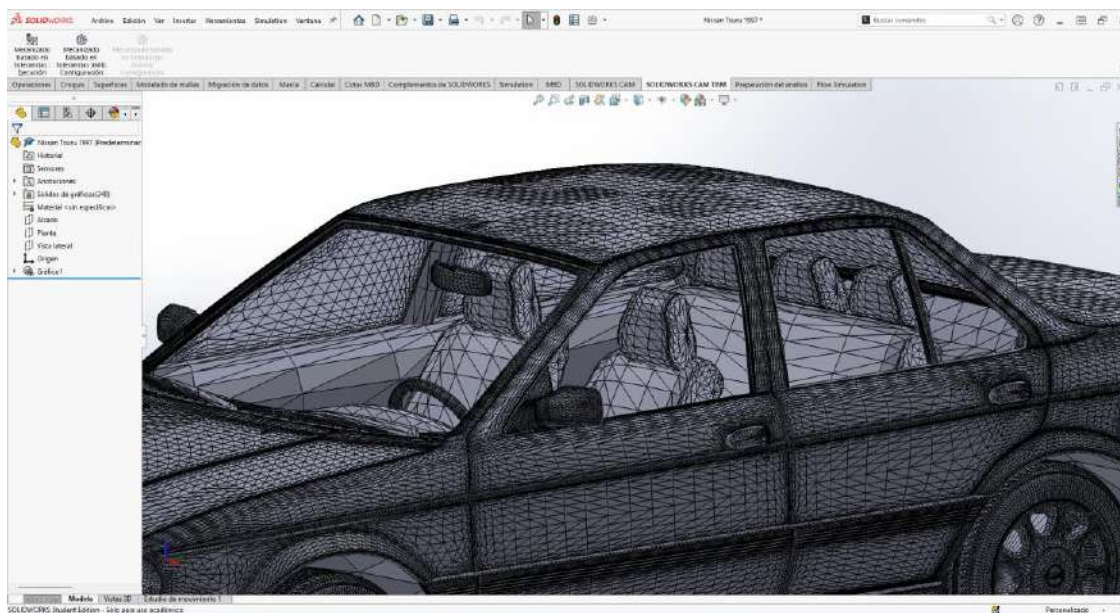


Figura 59: Detalles del modelo exportado de internet.

La pieza se editó al punto de quedar solo lo esencial para la simulación, también surgió el problema que el modelo estaba dado en forma de superficies y gráficos, lo que hacía imposible realizar una simulación pues no era un modelo sólido capaz de ser simulado, se tuvo que utilizar un software para convertir el modelo en sólido. Blender fue la herramienta utilizada tanto para re-escalar el modelo como para convertirlo en sólido. Al exportarlo a Blender surgió el problema de que el modelo estaba dado en un tamaño de miles de metros, para ser exactos de una longitud de 8371 metros, una altura de 2561 metros y una anchura de 3589 metros. El modelo se re-escaló a una relación de 0.005:1, teniendo unas dimensiones más realistas, de 4.19 metros de longitud, 1.28 metros de alto y 1.79 metros de ancho (Figura 60).

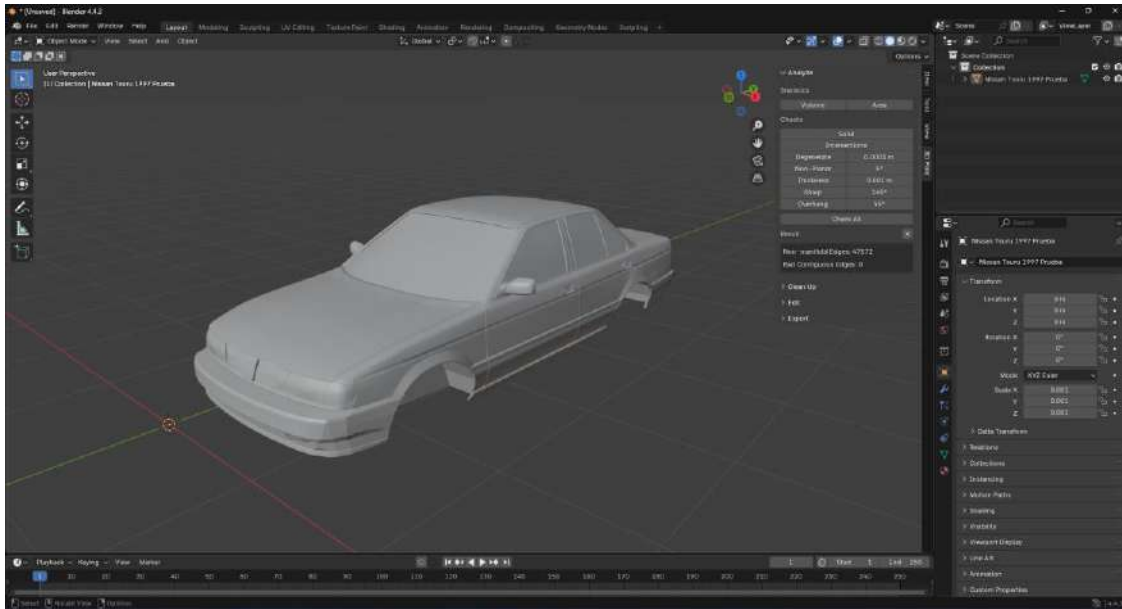


Figura 60: Objeto exportado a Blender y re-escalado a dimensiones realistas. [45]

El modelo también contaba con un alto número de vértices (Figura 61) (comprensible si se toma en cuenta el nivel de detalle y tamaño del modelo) por lo que también fue necesario reducir el número de polígonos utilizando herramientas de Blender.

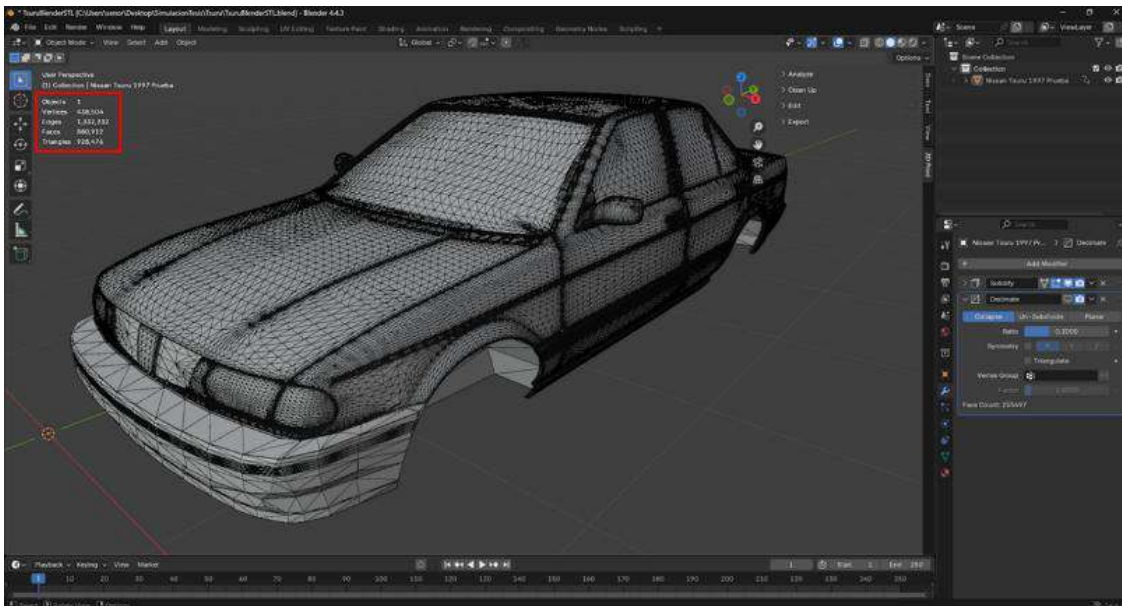


Figura 61: Estadísticas de polígonos encontradas en el modelo Nissan Tsuru 1997. [45]

A pesar de las modificaciones realizadas en el modelo y después de reducir la cantidad de polígonos a menos de 50, 000 triángulos fue imposible trabajar con él en SolidWorks, el archivo una vez convertido a solido utilizando múltiples herramientas no ejecutaba por la gran cantidad de

polígonos y cuando lo hacía solo presentaba fallos, por lo que se recurrió a la alternativa de crear de 0 el modelo del carro utilizando la herramienta de modelaje 3D Blender. Se siguió una guía para la creación, utilizando un plano de referencia obtenido de la página web The-Blueprints.com [37] (Figura 62) se realizó primero un modelo “low poly” (polígonos reducidos) que posteriormente se aliso, obteniendo un acabado realista. Durante la creación se tomó la decisión de omitir algunos detalles presentes en el vehículo que no aportarían nada a la simulación, como podrían ser contornos de puertas, espejos retrovisores, aspersores de agua para el limpiaparabrisas, limpiaparabrisas, llantas, etc.

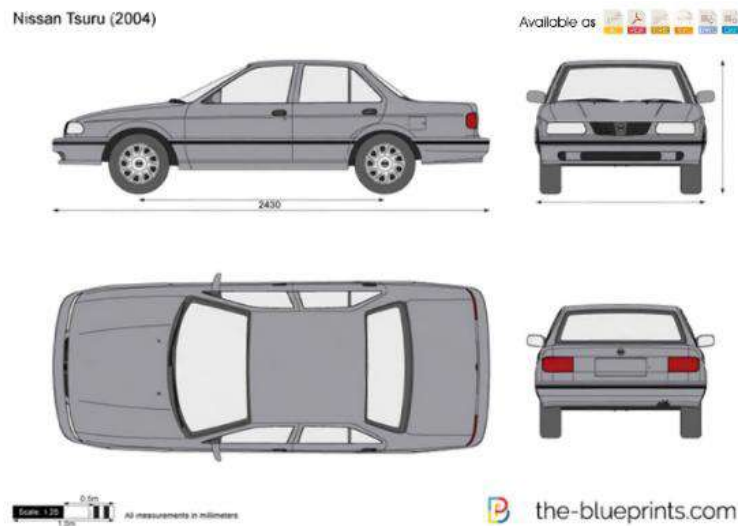


Figura 62: Plano de Nissan Tsuru 2004 obtenido de The-Blueprints.com [37].



Figura 63: Nissan Tsuru 2004 realizado en Blender [45].

Una vez terminado el modelo en Blender (Figura 63), este fue exportado a Fusion 360 para convertir el objeto de malla a sólido. El paquete CFD incluido en SolidWorks exige, que para que el modelo pueda ser sometidos a simulaciones CFD, debe existir un sólido para generar el mallado. Al exportarlo primero se reparó la malla y después se volvió a construir la malla a una malla más uniforme (Figura 64). Por último, se convirtió la malla a sólido (Figura 65) utilizando la herramienta del software “convertir malla”. El acabado obtenido fue acertado y se conservaron los detalles de la carrocería, ideal para las simulaciones que se realizaron.

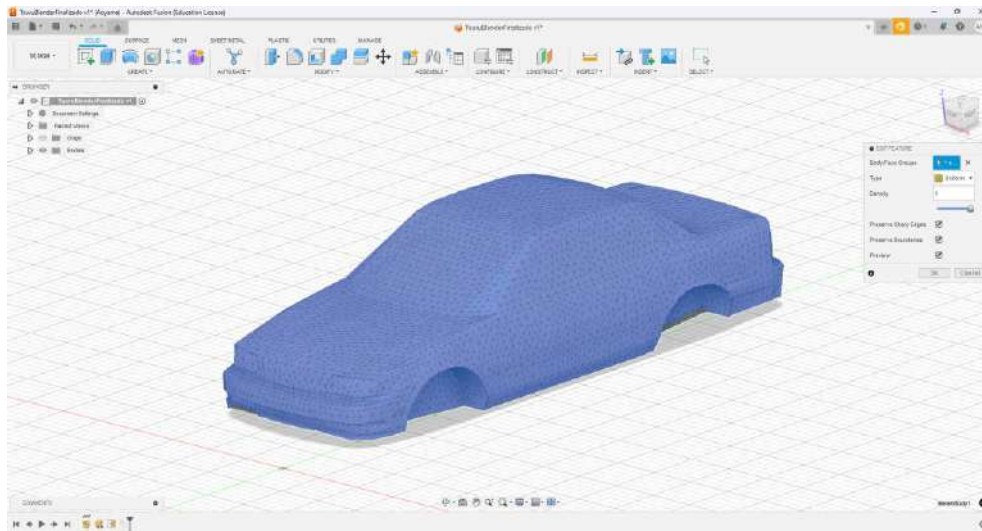


Figura 64: Reconstrucción de la malla a una malla más uniforme en el modelo [45].

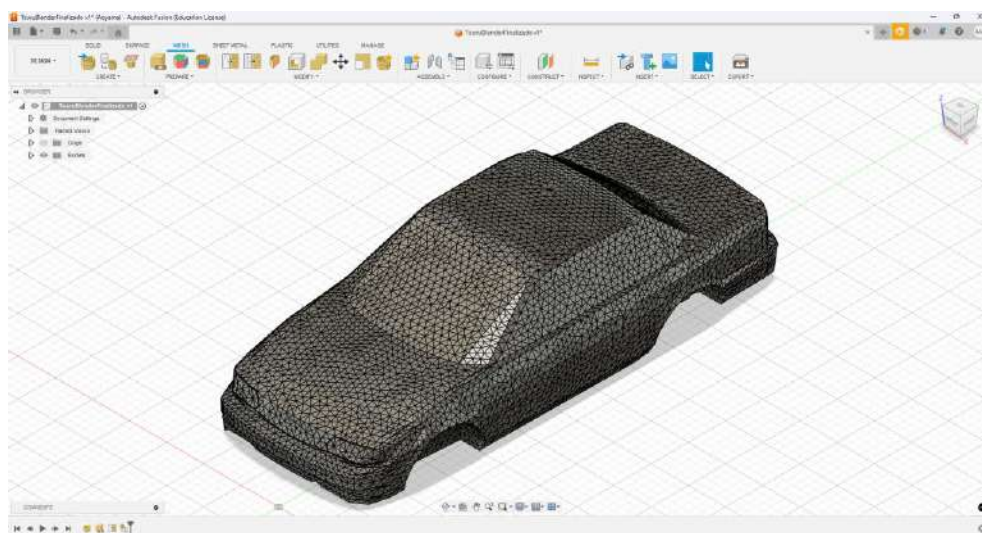


Figura 65: Conversión del modelo mallado a modelo sólido [45].

Aun sin el alto nivel de detalle que presento el modelo obtenido en internet, el modelo realizado presentó alto nivel de similitud, pues se utilizó un plano realista del Nissan Tsuru del 2004. El modelo está dado en unidades de milímetros, en las simulaciones se busca obtener el valor de coeficiente de arrastre, se tomó la decisión de reducir el modelo a milímetros para un tiempo de simulación más corto y generar menos carga a la computadora. De la herramienta medir de SolidWorks se obtuvieron la medida de longitud total del modelo que es 58.46 mm y la altura total del modelo es 14.71 mm. También, por temas de diseño se midió la distancia de punto a punto en la cajuela del carro, con la intención de integrar el alerón en la zona seleccionada, la distancia es de 17.99 mm, redondeada a 18 mm.

3.5 Modelo de Nissan Tsuru con alerón escaneado agregado.

Para las iteraciones de simulaciones CFD se agregó el alerón al modelo sólido del Nissan Tsuru (Figura 66) y se intentaron realizar simulaciones, el alerón fue puesto como un ensamble y se malló manualmente la zona donde el aire impactaría al modelo (Figura 67).

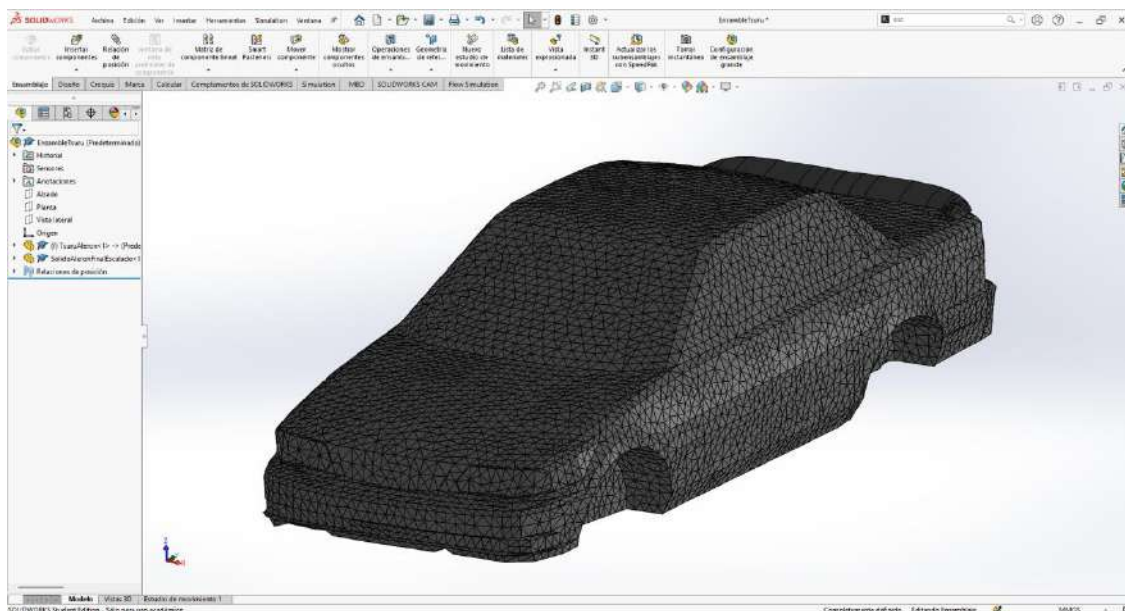


Figura 66: Modelo de Nissan Tsuru con alerón escaneado ensamblado [45].

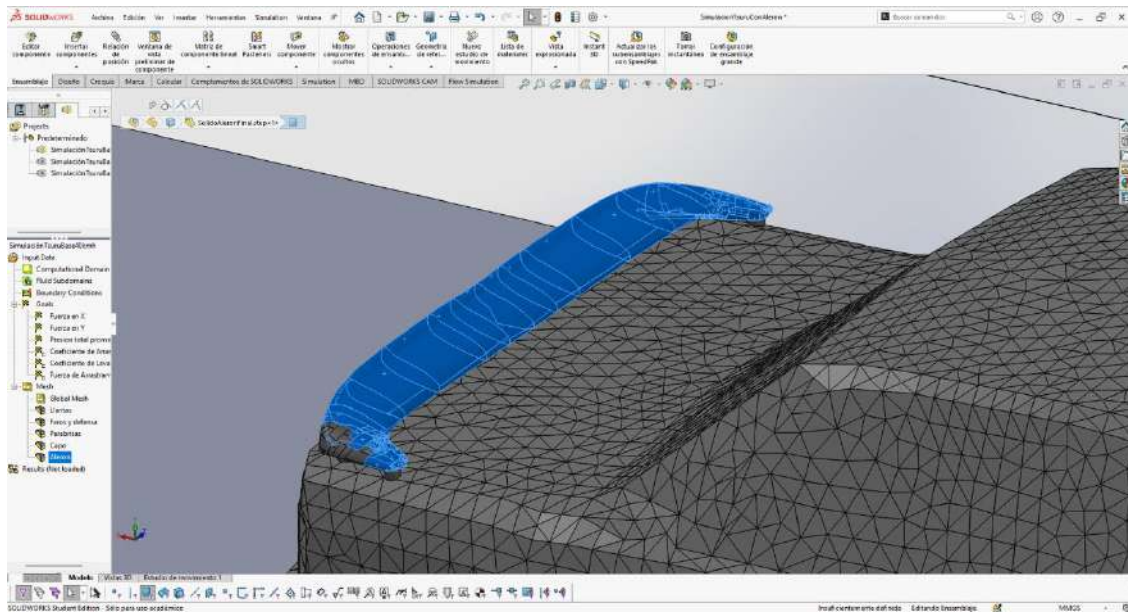


Figura 67: Mallado manual donde el aire impactara al alerón [45].

El alerón generó problemas en las simulaciones. El escaneo al ser realizado de forma manual contó con imperfecciones (Figura 68), esto estaba previsto y se decidió seguir trabajando con el modelo, desgraciadamente al importarlo al complemento Flow Simulation las imperfecciones que el modelo contaba no permitían realizar las simulaciones. La sección más importante del alerón, el borde de ataque contaba con filos (Figura 69 y 70) y bordes que no permitían al programa interpretar las geometrías.

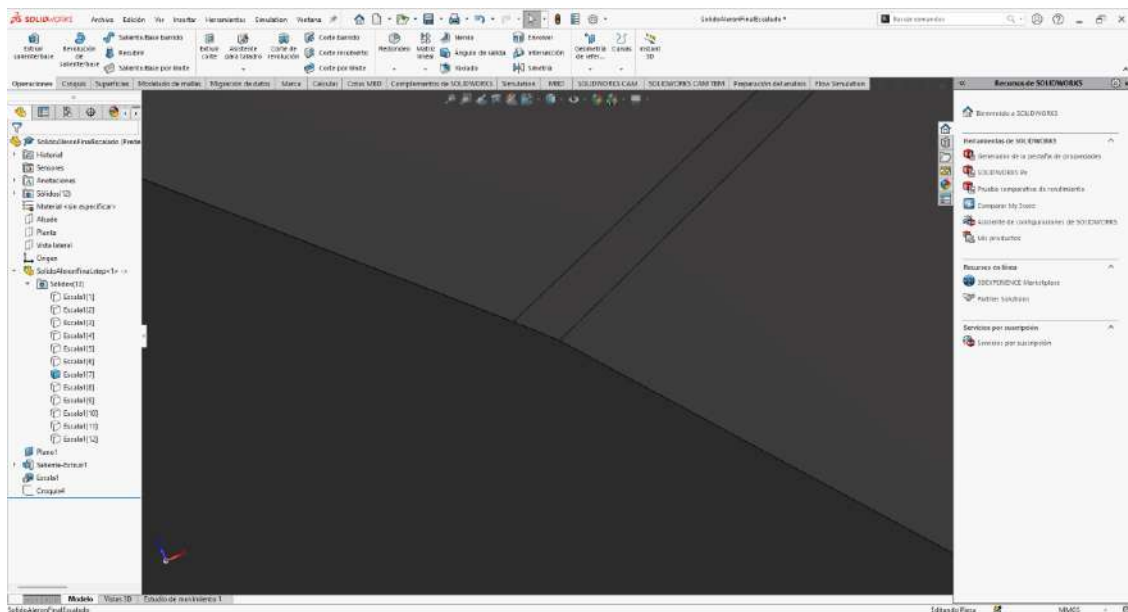


Figura 68: Imperfecciones vistas con zoom en borde de ataque del alerón de alerón escaneado. [45]

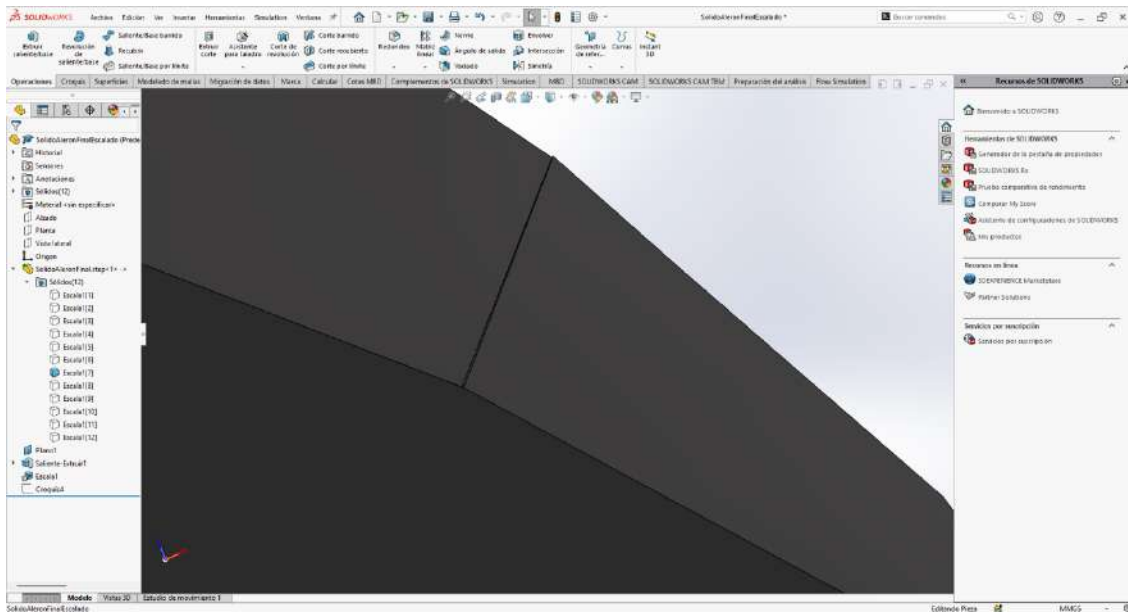


Figura 69: Filo en borde de ataque de alerón escaneado. [45]

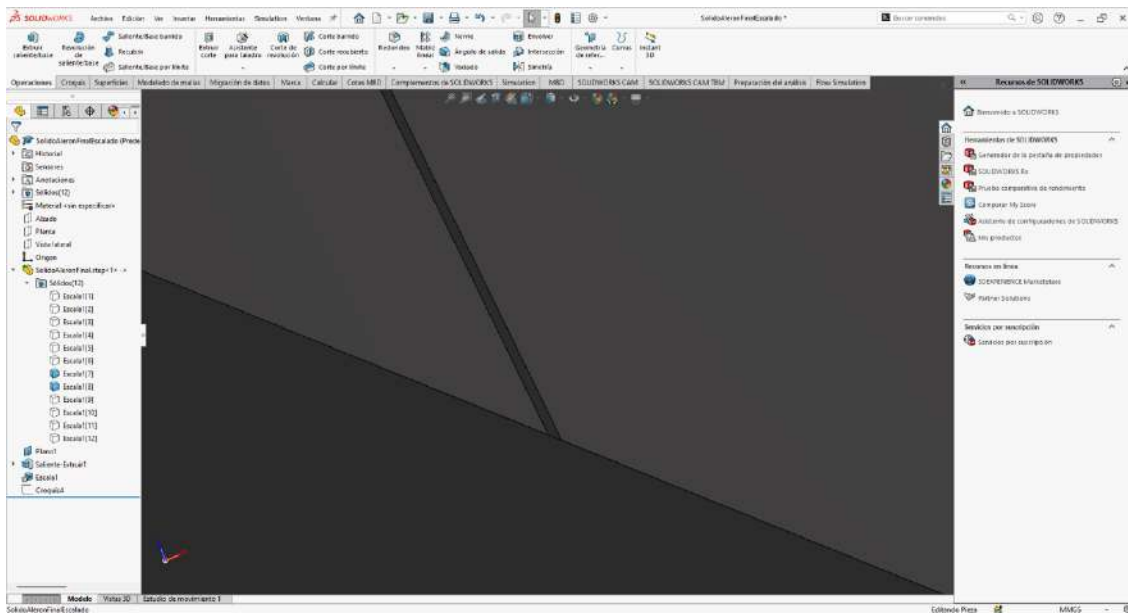


Figura 70: Filo en borde de ataque de alerón escaneado desde otra vista. [45]

Se intentaron realizar arreglos a las imperfecciones del alerón utilizando el software SolidWorks (Figura 71), pero por limitantes del mismo software no fue posible realizar otro modelo idéntico utilizando la base del alerón (Figura 72). Se tomó la decisión de rescatar el perfil alar del alerón, ya que es la figura geométrica que determina como afecta el impacto del aire a la aerodinámica del alerón (Figura 73).



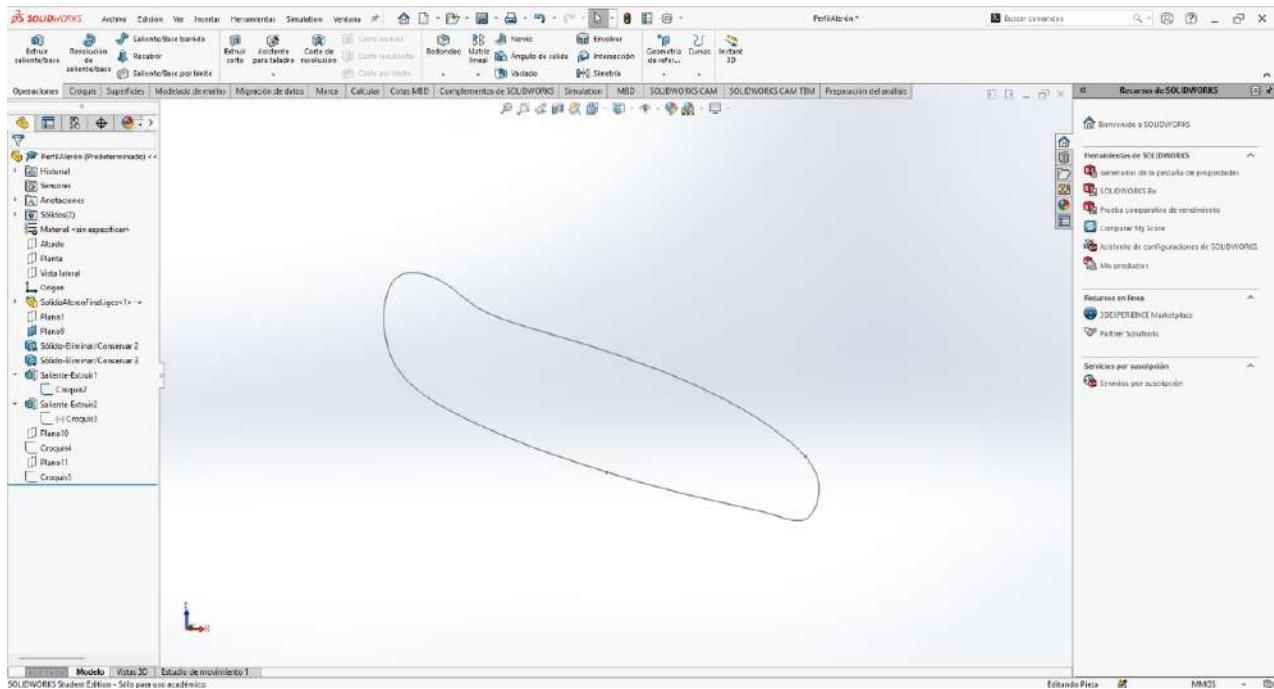


Figura 73: Contorno del área del escaneo del sólido del alerón [45].

Utilizando la herramienta de extrusión se logró crear un alerón que imita la forma del perfil alar (Figura 74) sin considerar los detalles del alerón escaneado, pero generando fuerzas aerodinámicas similares. Este nuevo alerón se ensambló en el sólido del Nissan Tsuru y se utilizó para las simulaciones CFD (Figura 75).

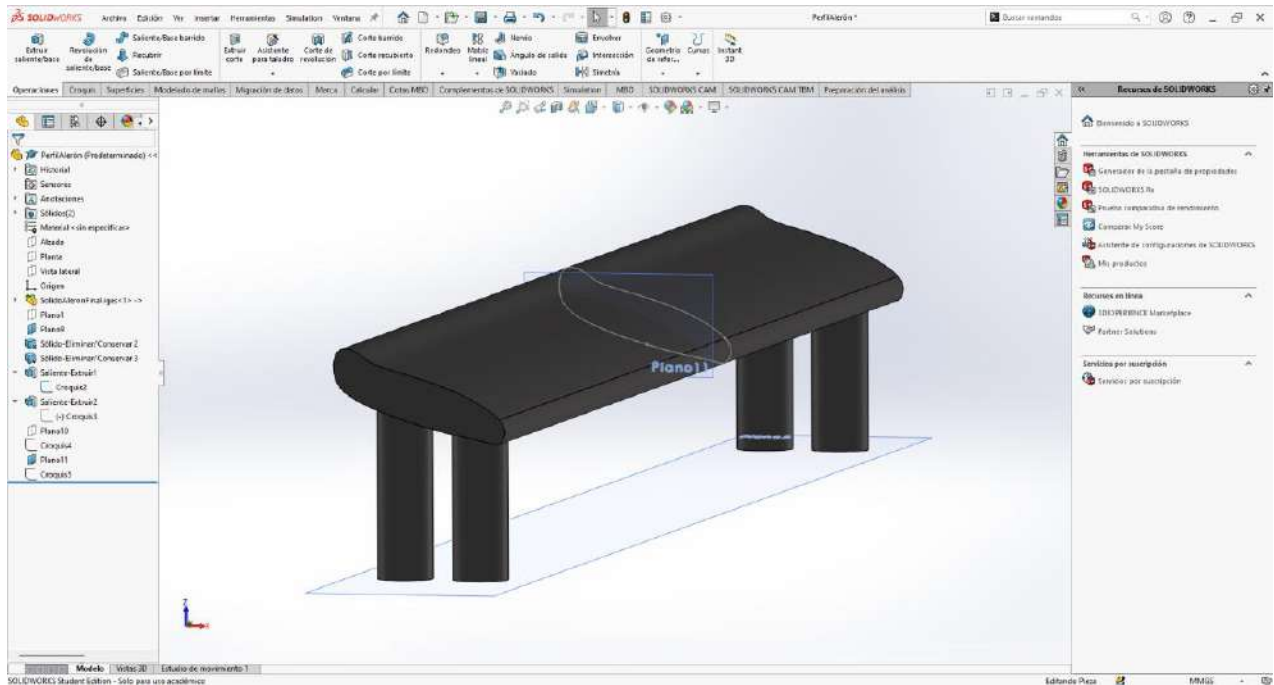


Figura 74: Sólido extruido del contorno del sólido del alerón escaneado [45].

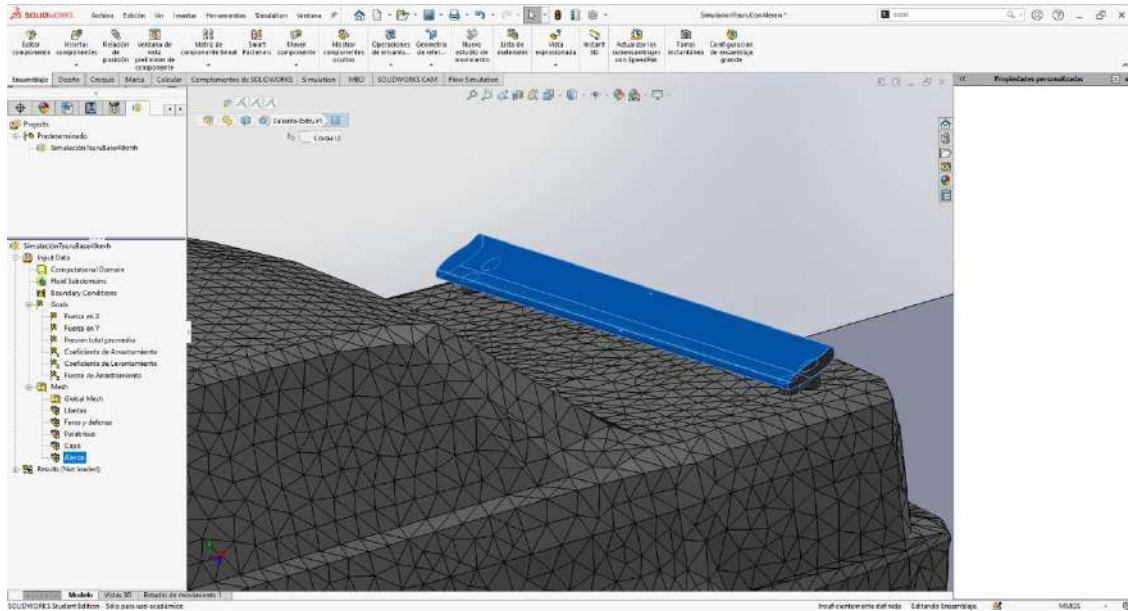


Figura 75: Sólido extruido del contorno del sólido del alerón escaneado ensamblado en el modelo de Nissan Tsuru [45].

3.6 Alerón diseñado para competencia.

El alerón utilizado para las simulaciones de alerón diseñado para carreras fue obtenido de la página web GrabCAD (Figura 76) [38]. El usuario que compartió el modelo comenta que es un alerón con buenos detalles, perfecto para cualquier vehículo tipo sedan, posible de manufacturar y fue analizado y puesto a prueba en ANSYS. El perfil alar está basado en el perfil alar NACA S1223 (Figura 77), un perfil alar utilizado comúnmente en vehículos tipo formula de competición estudiantil [39] debido a su alta relación de coeficiente de sustentación / arrastre a bajos números de Reynolds, este perfil puede ser obtenido en la página web “Airfoil Tool” [40].

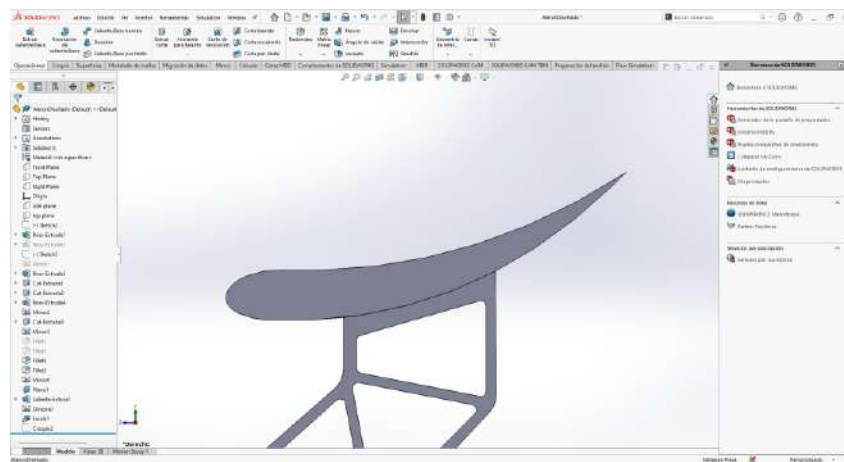


Figura 76: Vista lateral de alerón, mostrando el perfil alar utilizado [45].

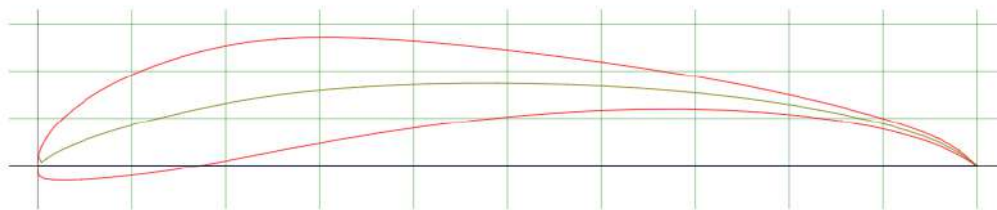


Figura 77: Perfil alar NACA S1223 [42].

El alerón fue ensamblado de la misma forma que el alerón creado por nosotros y se puso a prueba utilizando la misma configuración que la cuarta iteración del Nissan Tsuru sin modificaciones y ambas simulaciones del perfil alar escaneado. En la figura 78 se muestra el modelo completo con el alerón ensamblado y a continuación se muestran los resultados:

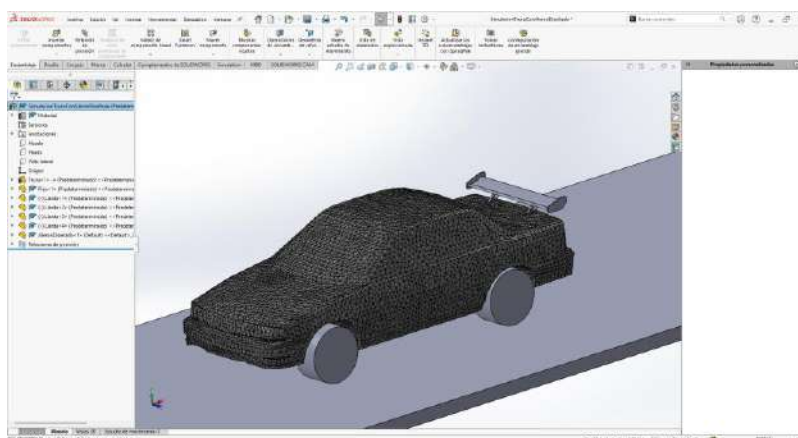


Figura 78: Ensamblaje de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición. [45]

3.7 Conclusiones del capítulo 3.

El capítulo establece la construcción completa del modelo digital, los métodos de simulación y las variantes evaluadas. Deja preparados los elementos necesarios para obtener resultados comparativos de desempeño aerodinámico.

4.- Resultados y discusión.

El capítulo 4 presenta los resultados de las simulaciones CFD para las tres configuraciones del vehículo a diferentes velocidades. Se comparan valores de coeficiente de arrastre, distribuciones del flujo, zonas de presión y comportamiento aerodinámico general.

Se observa el cómo con cada iteración se mejora el entendimiento del análisis, terminando en 3 iteraciones a cada velocidad propuesta (40, 60 y 100 km/h) en cada modelo distinto, sin alerón, con alerón escaneado y finalmente con alerón diseñado para competencias.

Por ultimo se analizan los resultados de las encuestas online y presenciales, mostrando tendencias sobre el uso de alerones en taxis y percepciones de los conductores y pasajeros.

4.1 Resultados de simulaciones CFD.

4.1.1 Nissan Tsuru sin modificaciones (Primera iteración).

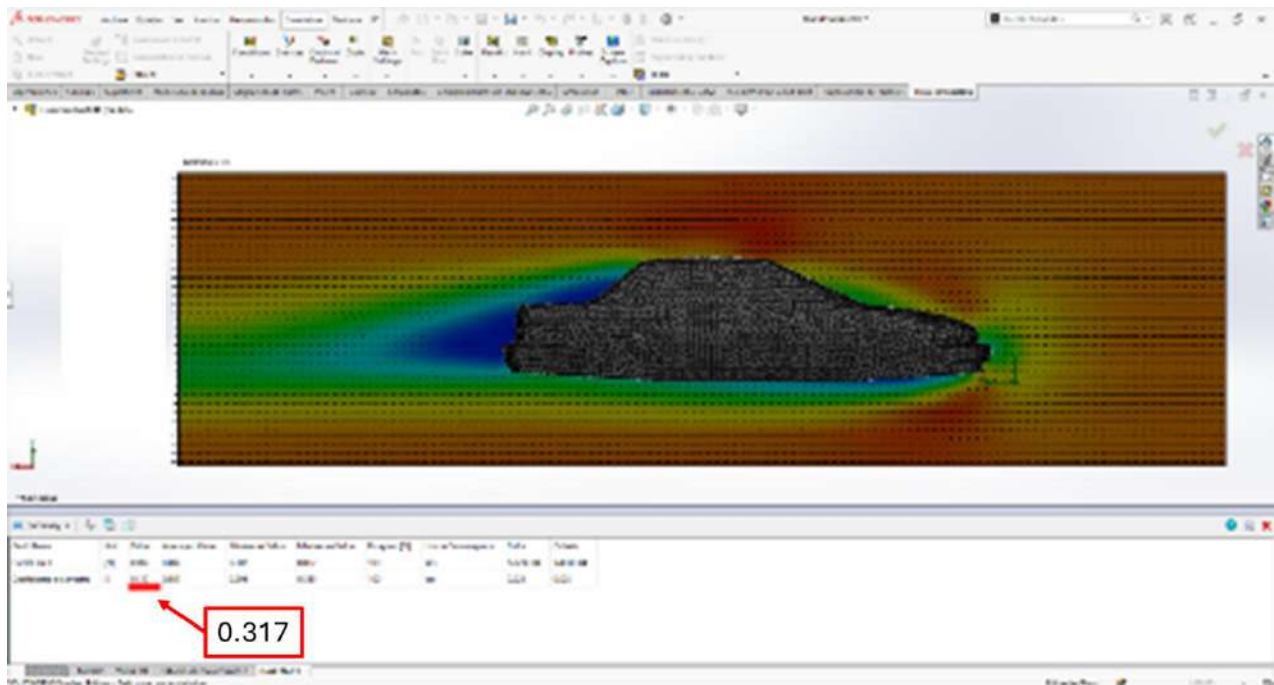


Figura 79: Visualización del resultado de la primera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastramiento (C_d) expresado con una línea roja [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.317** (Figura 79).

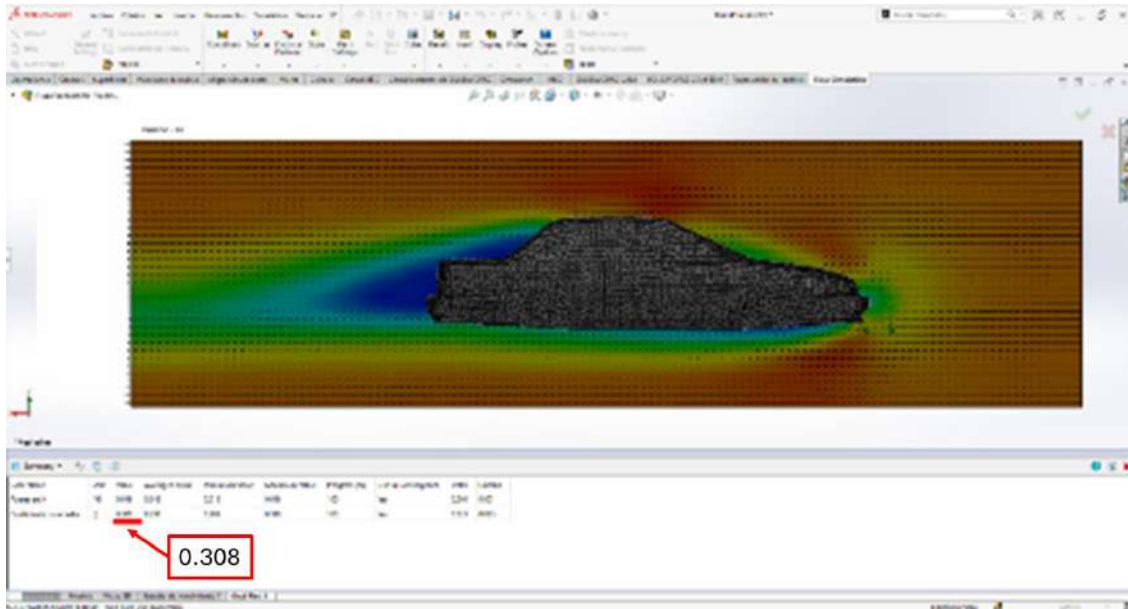


Figura 80: Visualización del resultado de la primera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) expresado con una línea roja [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.308** (Figura 80).

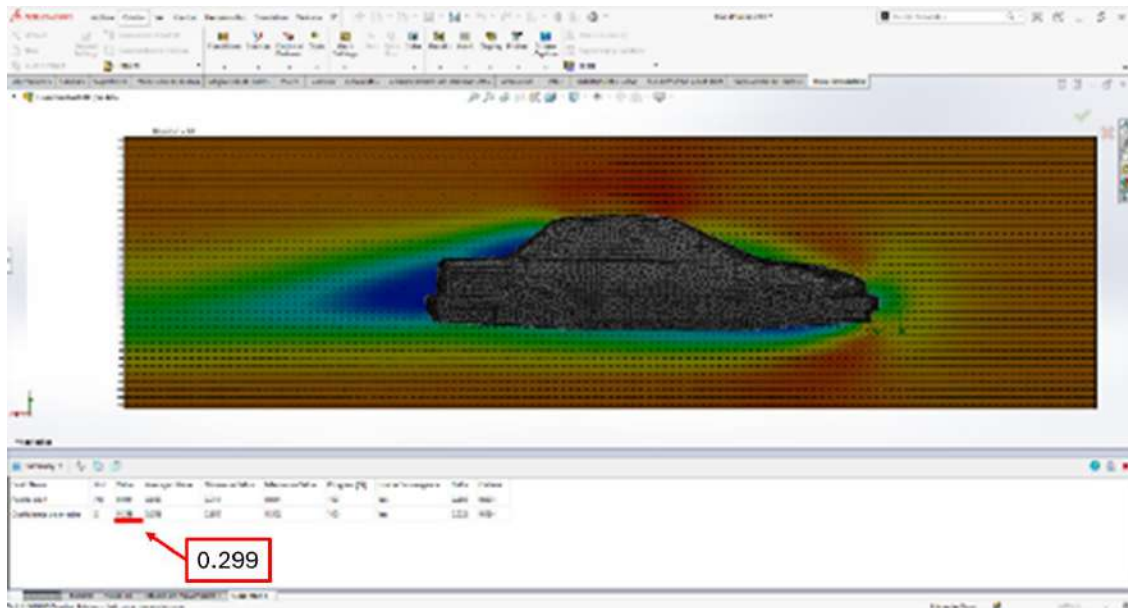


Figura 81: Visualización del resultado de la primera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) expresado con una línea roja [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.299** (Figura 81).

El primer estudio se realizó tomando en cuenta un acabado de malla siguiendo las configuraciones mostradas en la figura 82. Para el análisis que se realizó un acabado de malla tan grande lleva a resultados poco realistas, por lo que se tomó esta primera iteración como una prueba donde se encontraron áreas de oportunidad, en la Figura 83 se observa como al tener una malla tan grande en comparación con el modelo los resultados de presión apenas pueden apreciarse. También se tomó la decisión de agregar llantas al modelo siguiendo la referencia del plano mostrado en la Figura 62 y recortar el dominio computacional simulando que es el piso en donde el vehículo opera. La primera iteración mostró resultados cercanos (Figura 83), pero lejos de la realidad, pues no se consideraron varios factores que mejorarían los resultados obtenidos, esta primera iteración encaminó el proyecto a resultados más realistas.

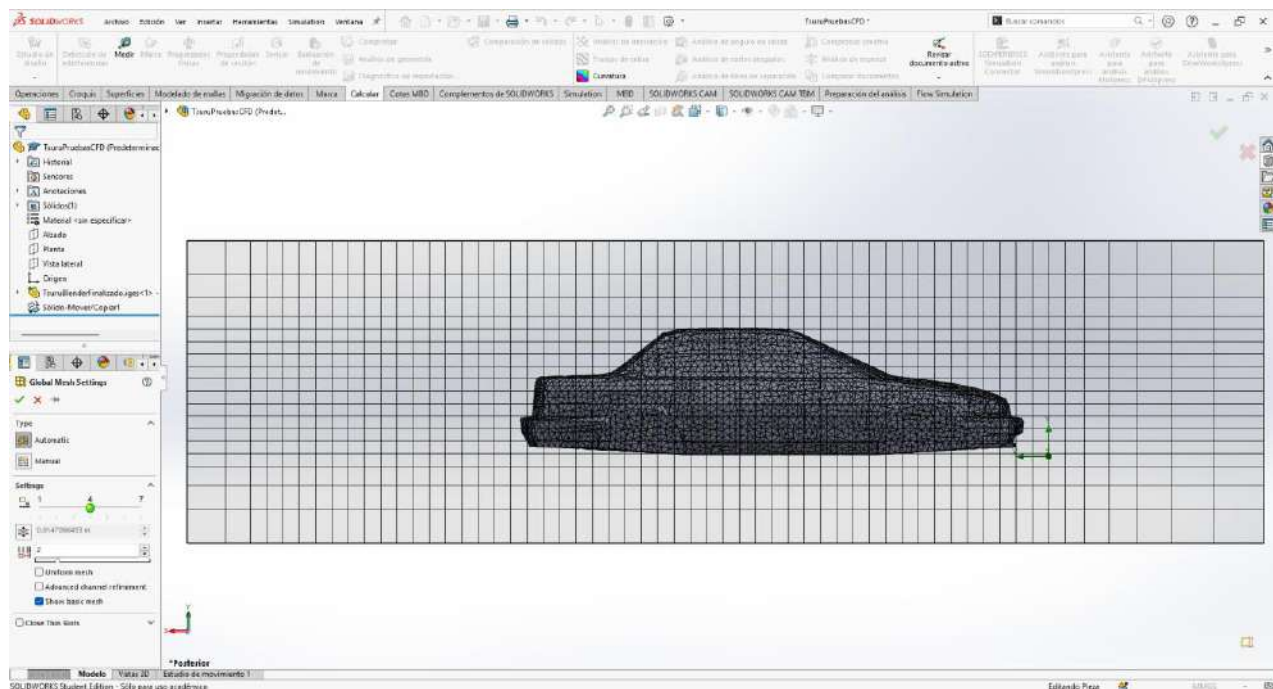


Figura 82: Mallado utilizado en la primera iteración del proyecto. [45]

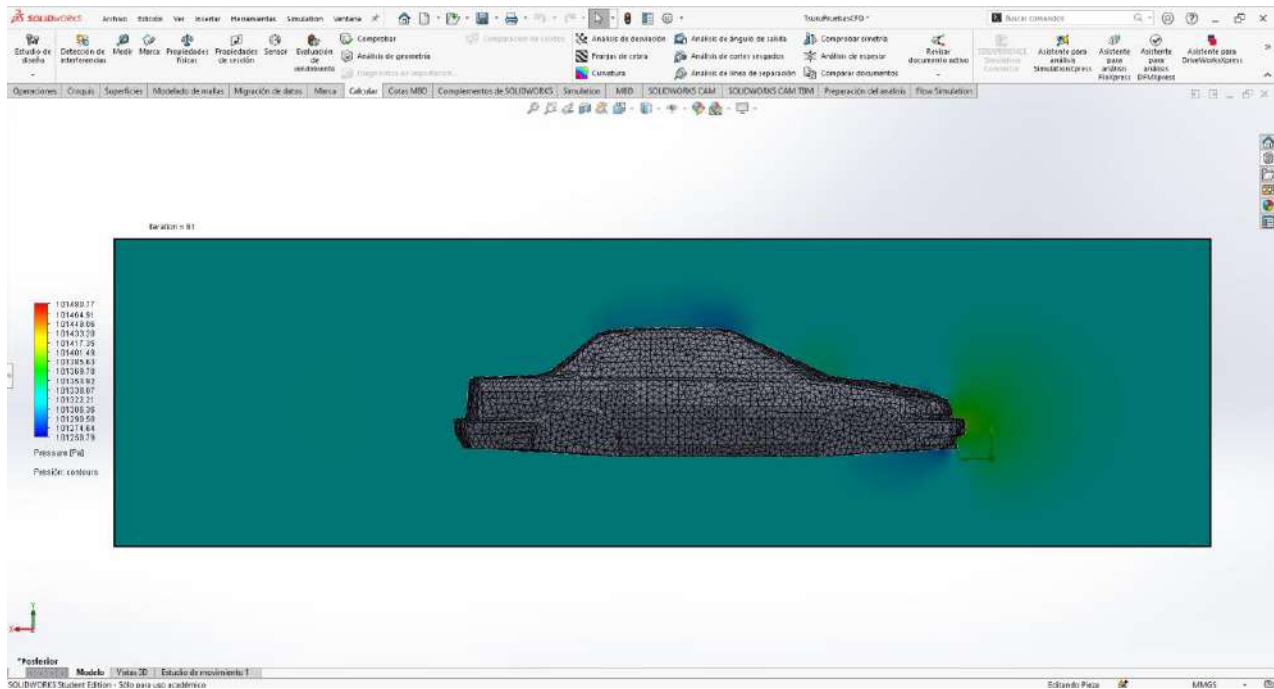


Figura 83: Resultados de presión en la primera iteración a 40 km/h. [45]

4.1.2 Nissan Tsuru sin modificaciones (Segunda iteración).

Para las siguientes iteraciones se utilizó el siguiente modelo de Nissan Tsuru 2004 con llantas (Figura 84). También se cambió el dominio computacional como se muestra en la figura 85, y se cambió el tamaño de malla de simulación como se muestra en la figura 86. Como se modificó la geometría del modelo, es necesario volver a conseguir el área frontal de la geometría (Figura 87), esta cambió a 320.895901 mm^2 .

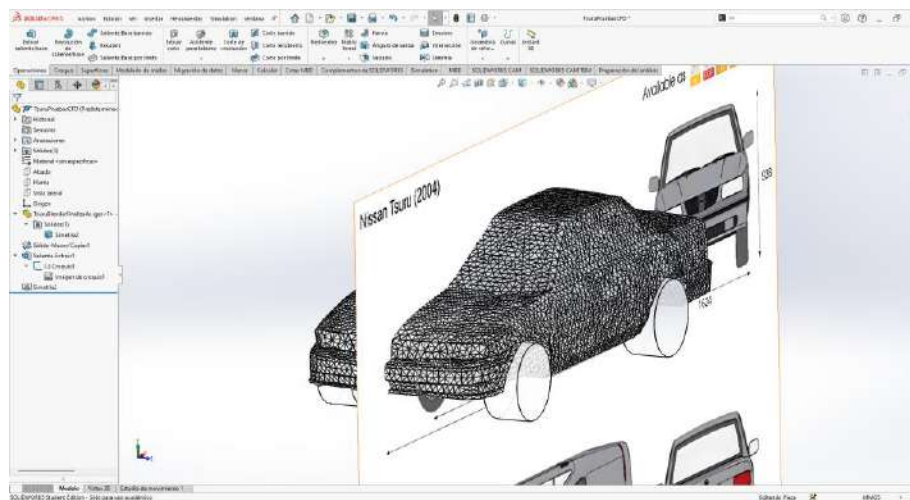


Figura 84: Modificación en el modelo Nissan Tsuru 2004, agregándole llantas [45].

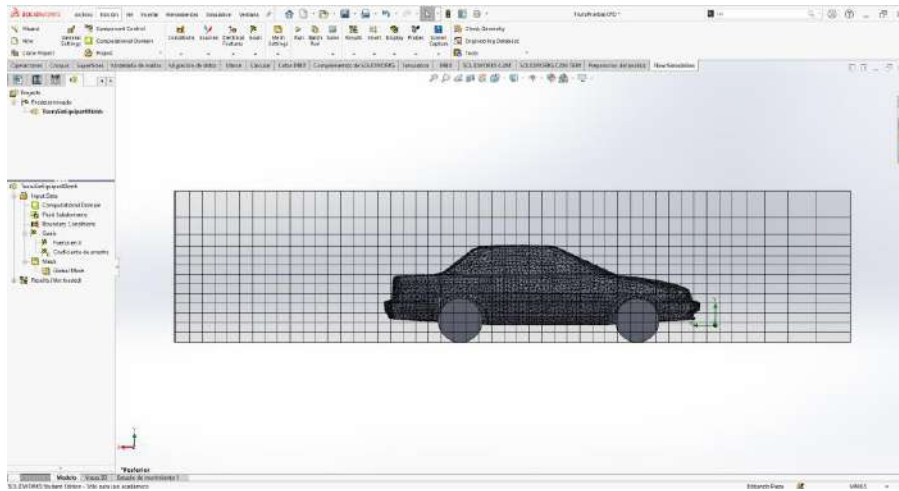


Figura 85: Reducción del dominio computacional a nivel del piso [45].

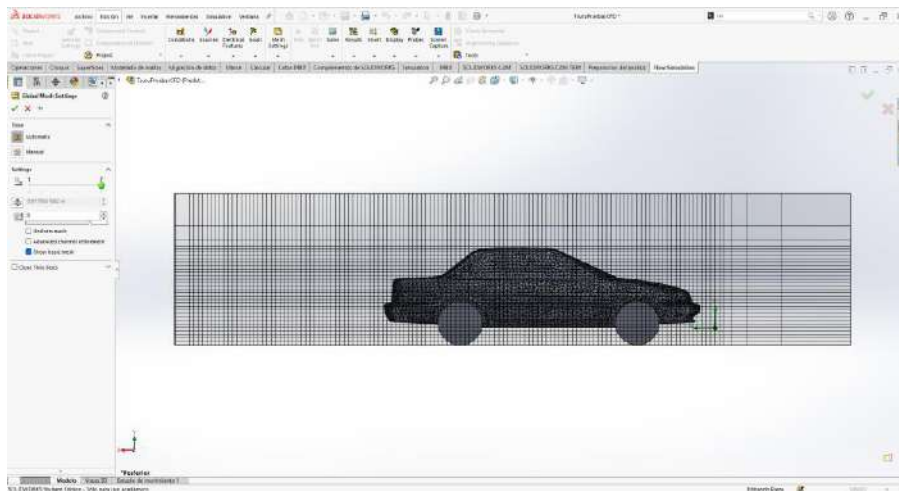


Figura 86: Nuevo acabado de malla más fino que la primera iteración [45].

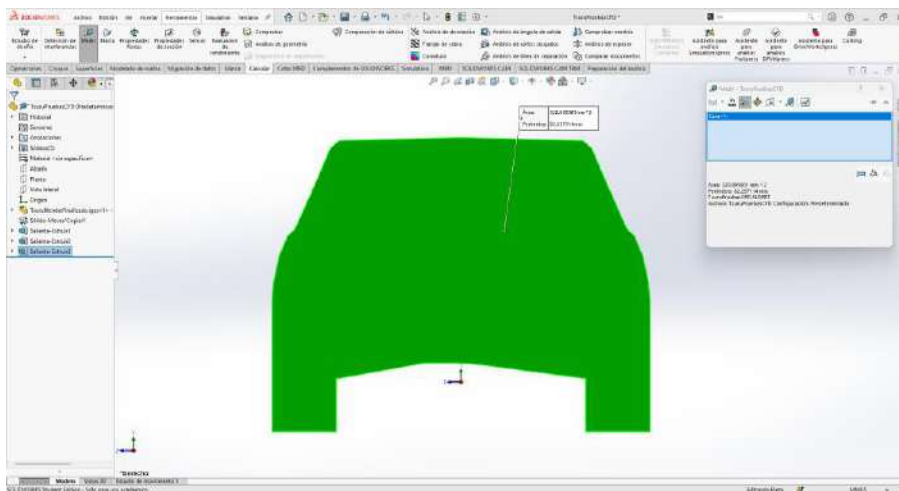


Figura 87: Nueva área de referencia considerando llantas en el modelo original [45].

El tiempo de simulación cambió considerablemente, mientras que en la primera iteración la simulación podía durar menos de 15 minutos, las modificaciones a los parámetros impactan el tiempo de simulación y puede llegar a durar más de 25 minutos.

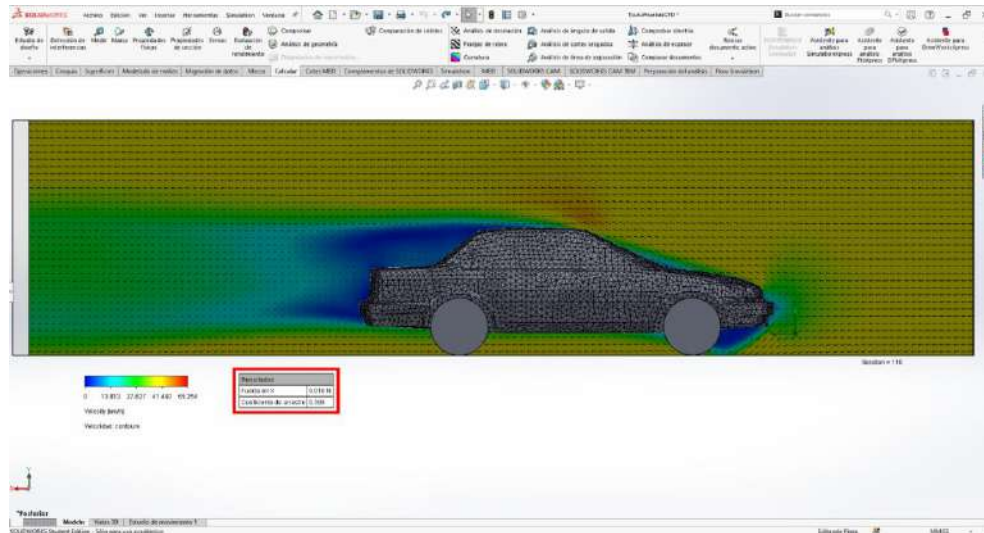


Figura 88: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y resultado de coeficiente de arrastamiento (C_d) mostrado en un cuadro rojo. [45]

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.398** (Figura 88).

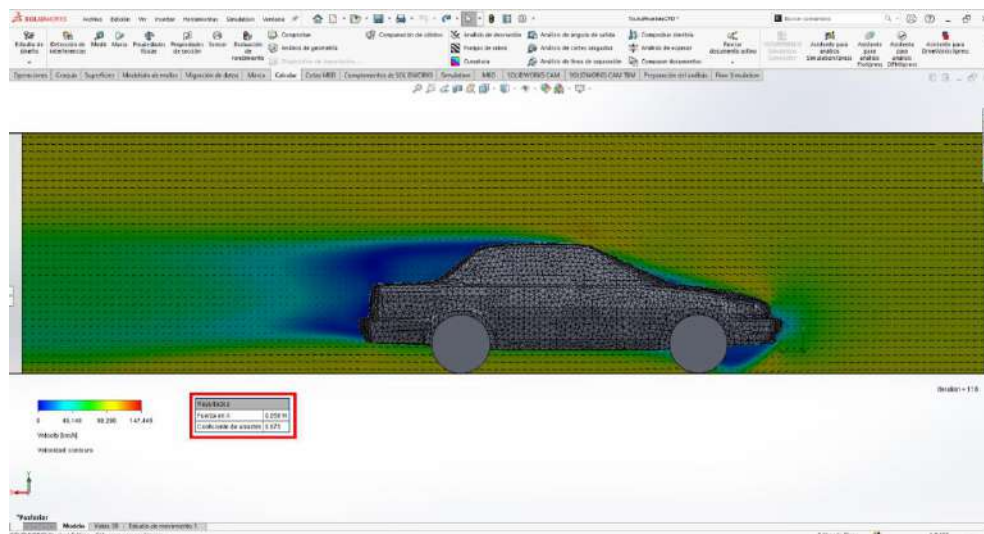


Figura 89: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastamiento (C_d) mostrado en un cuadro rojo. [45]

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.975** (Figura 89).

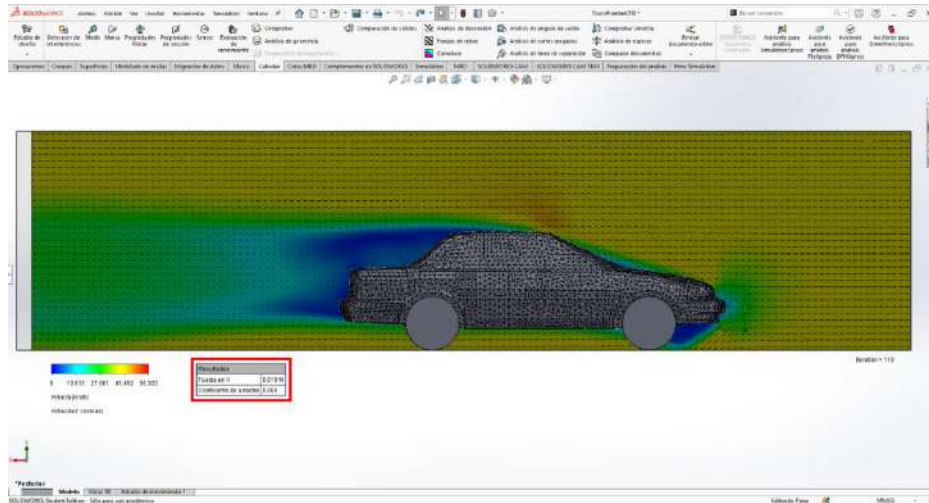


Figura 90: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastramiento (C_d) mostrado en un cuadro rojo. [45]

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.064** (Figura 90).

Los resultados obtenidos en la segunda iteración contaron con una gran variación entre cada valor de velocidad. En la primera iteración se puede ver que el valor se encuentra dentro de los parámetros comunes, mientras que la segunda y tercera iteración tienen una variación anormal, por lo que los resultados son incorrectos. Si se comparan los resultados de presión obtenidos en la iteración dos (Figura 91) con los obtenidos en la iteración uno podemos ver que, los resultados en la iteración dos son más visibles y mejor detallados que en la primera iteración por lo que mientras que los resultados obtenidos en 60 km/h y 100 km/h se alejan de ser correctos.

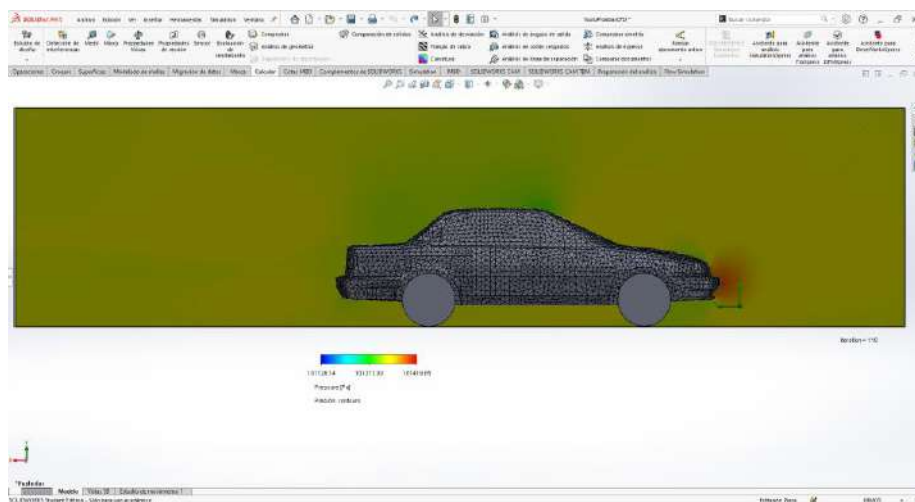


Figura 91: Resultados de presión en la segunda iteración a 40 km/h. [45]

4.1.3 Nissan Tsuru sin modificaciones (Tercera iteración).

Para la tercera iteración, se tomó la decisión de cambiar por completo el enfoque al que estaba sometido a estudio, se cambió el sólido por un ensamblaje donde se agregaron las llantas y un piso físico, con la intención de mejorar los resultados obtenidos de la iteración dos (Figura 92), se realizó la simulación desde 0, se cambió el mallado global y, además, se agregaron parámetros de búsqueda a los resultados como son presión total promedio, fuerza en Y y coeficiente de levantamiento (Figura 93). Se consideró agregar estos resultados para tener más valores que comparar durante las conclusiones, buscando un análisis más acertado. El dominio computacional se adaptó al nuevo modelo, tomando en cuenta el suelo, pero sin agregarlo por completo (Figura 94).

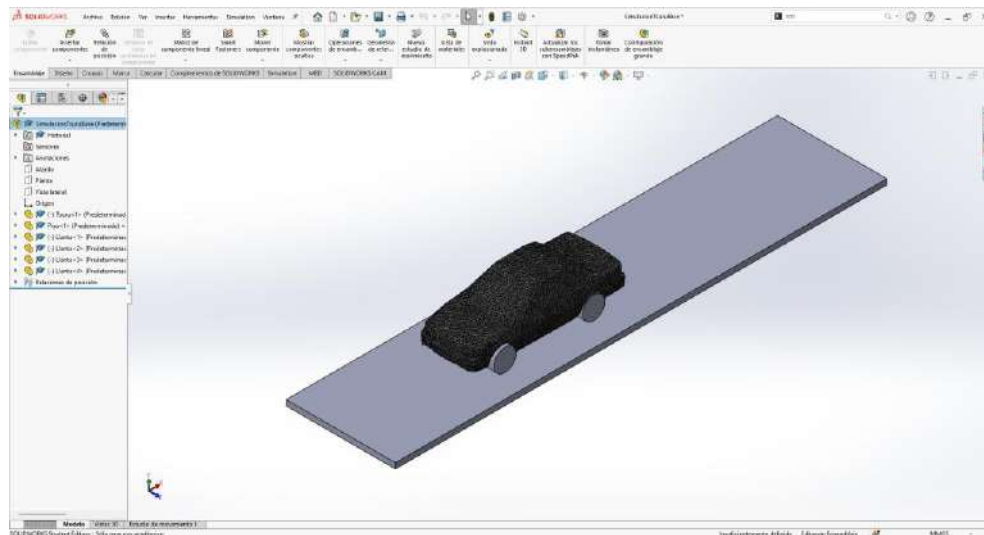


Figura 92: Ensamblaje de modelo Nissan Tsuru considerando suelo real [45].

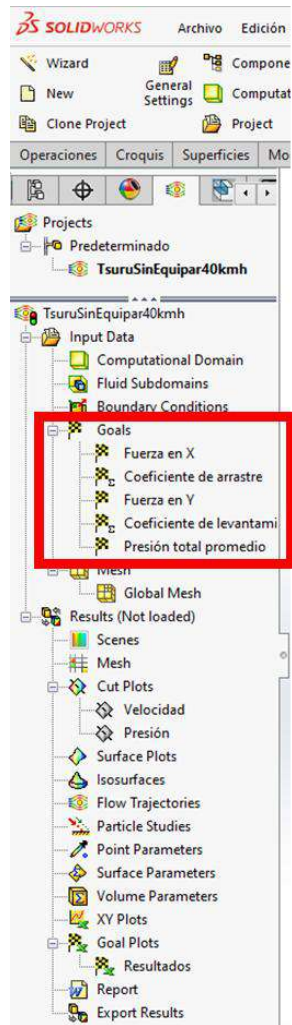


Figura 93: Resultados buscados para la tercera iteración [45].

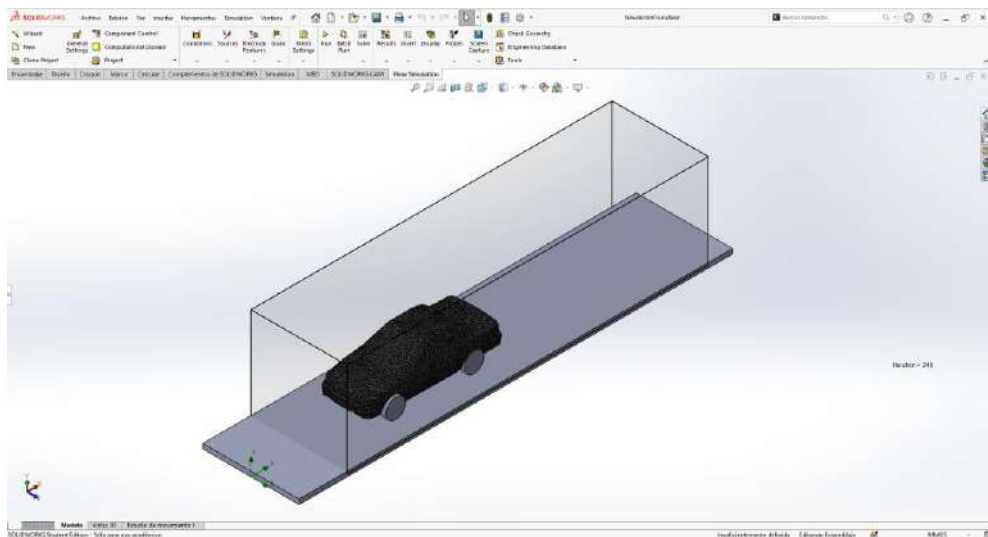


Figura 94: Dominio computacional utilizado en la tercera iteración del modelo Tsuru sin modificaciones [45].

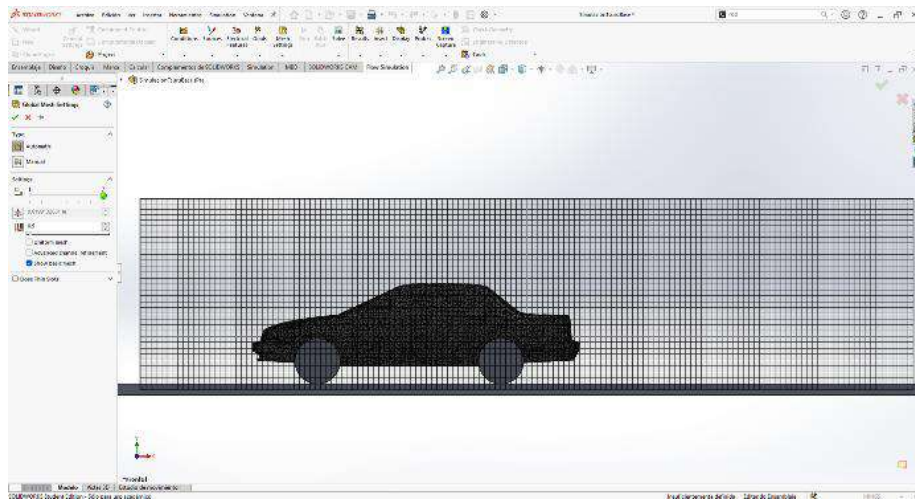


Figura 95: Nueva definición de malla para futuras iteraciones [45].

En esta iteración, se modificó la malla del cuerpo (Figura 95), en las dos iteraciones anteriores solo se creaba una malla global que no tomaba en cuenta las áreas donde más impacta el aire en el cuerpo, generando problemas en los resultados (Anexo 4, paso 10). Se realizó una malla local de todas las partes del sólido donde se conoce que el aire impactará. En el anexo 4, paso 11 se adjuntan imágenes mostrando las áreas que se tuvieron que mallar manualmente y como esto mejora el acabado final de la simulación.

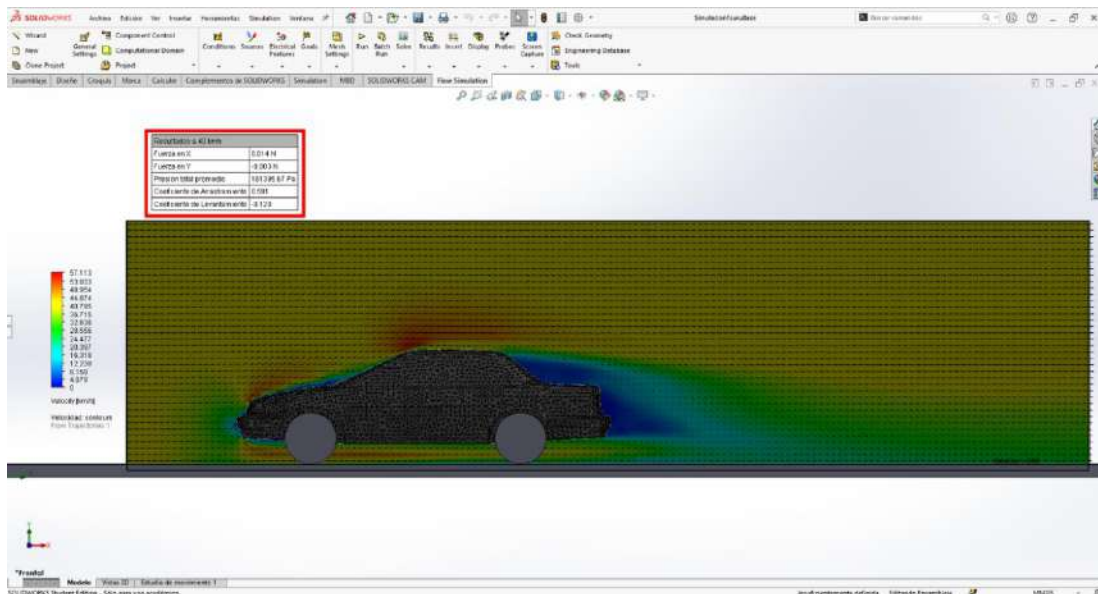


Figura 96: Visualización del resultado de la tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y resultado de coeficiente de arrastre (Cd) mostrado en un cuadro rojo. [45]

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.581** (Figura 96).

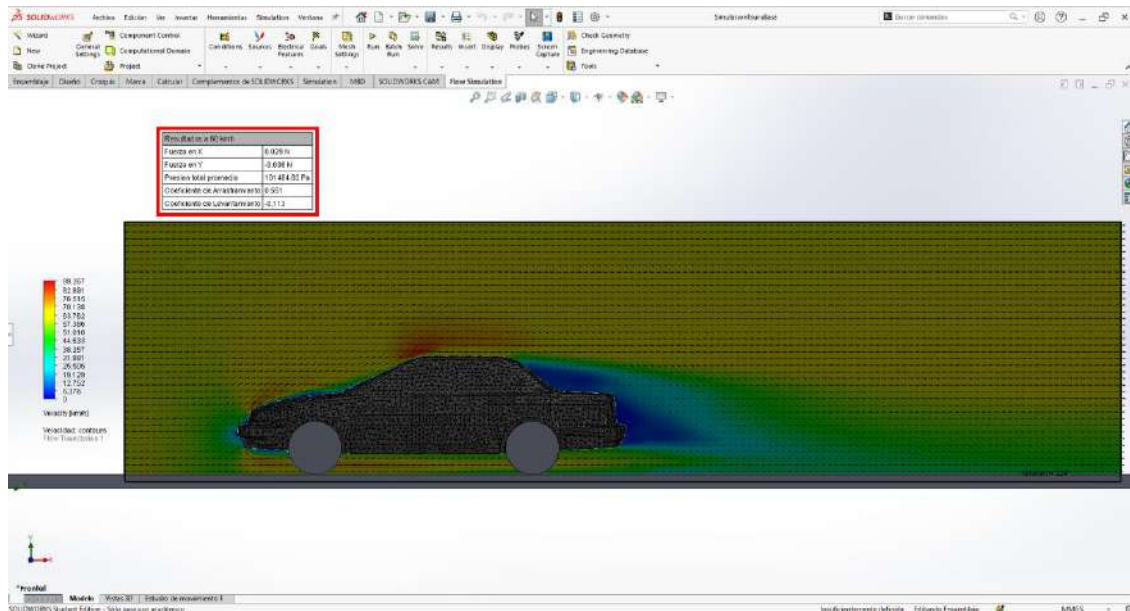


Figura 97: Visualización del resultado de la tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo. [45]

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.551** (Figura 97).

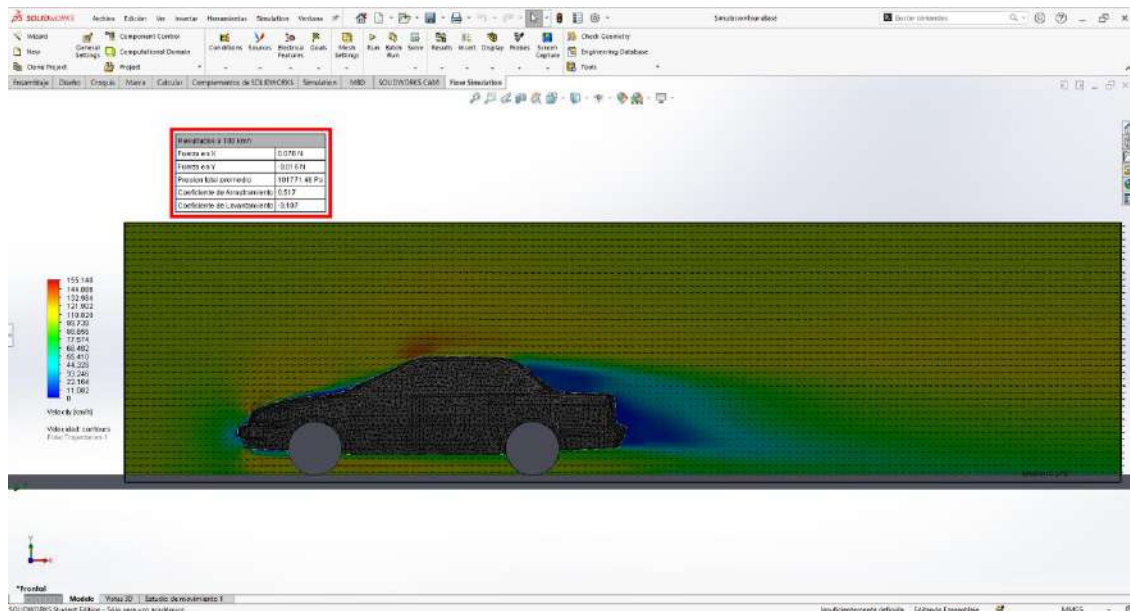


Figura 98: Visualización del resultado de la tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo. [45]

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.517** (Figura 98).

Los resultados obtenidos en la tercera iteración dan mayor confianza y se consideran correctos dentro de las simulaciones, pese a que los resultados son relativamente altos para valores de coeficiente de arrastre convencionales que oscilan entre 0.25 y 0.40 [41], en el caso de nuestras simulaciones existen factores que afectan este resultado. La geometría del vehículo no es 100% exacta a la del modelo real y la malla del modelo del Tsuru no está perfectamente definida, el suelo y las llantas inmóviles también generan un aumento en el coeficiente de arrastre, en pruebas reales para obtener el coeficiente de arrastre y coeficiente de levantamiento real de un vehículo se utilizan túneles de viento equipados con cintas transportadoras, en la vida real, las llantas y el movimiento con el suelo reducen la resistencia al viento [42], observando las simulaciones se puede observar cómo se generan capas límite debajo del coche, aumentando la resistencia, el dominio computacional es pequeño en comparación a pruebas reales en túneles de viento, las pruebas se realizan en espacios grandes, donde el aire puede fluir en todas las direcciones, en nuestro caso se tomó la decisión de realizar las simulaciones a la medida, la licencia de estudiante limita a espacios más pequeños de simulación y de hacerlo más grande la computadora donde se realizan las simulaciones deja de funcionar y toma mucho tiempo de simulación.

4.1.4 Nissan Tsuru sin modificaciones (Cuarta iteración).

Esta fue la última iteración de las simulaciones para Nissan Tsuru sin modificaciones y será la base para las siguientes simulaciones con el perfil del alerón escaneado y el alerón diseñado para carreras. Para la cuarta iteración, se decidió hacer el dominio computacional más largo por el frente y por el detrás, buscando tener mayor área donde el fluido pueda interactuar con el modelo.

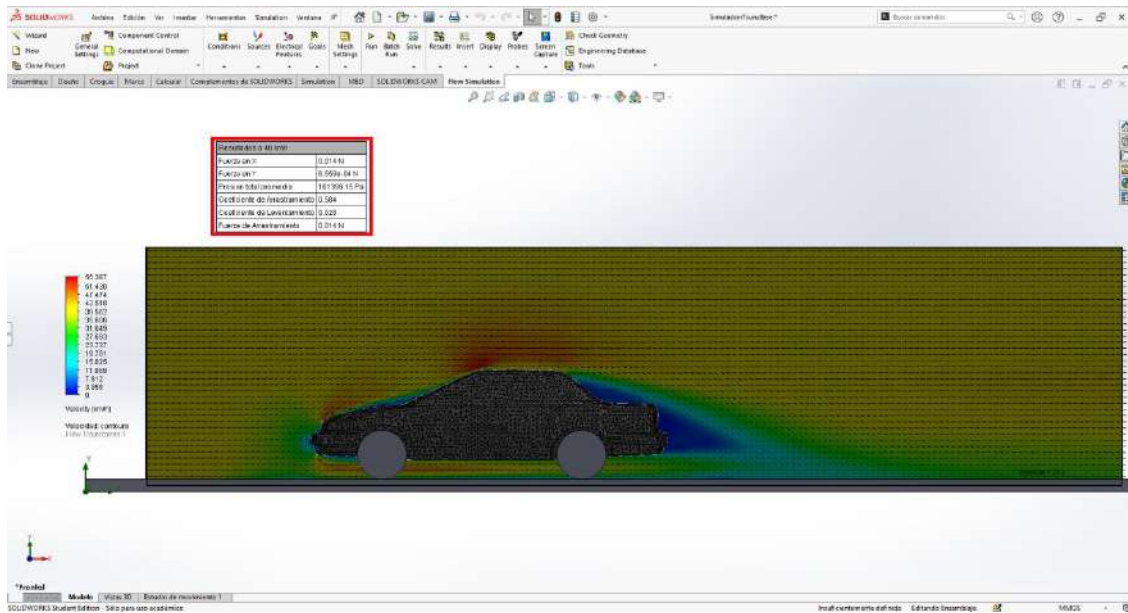


Figura 99: Visualización del resultado de la cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y resultado de coeficiente de arrastramiento (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.584** (Figura 99).

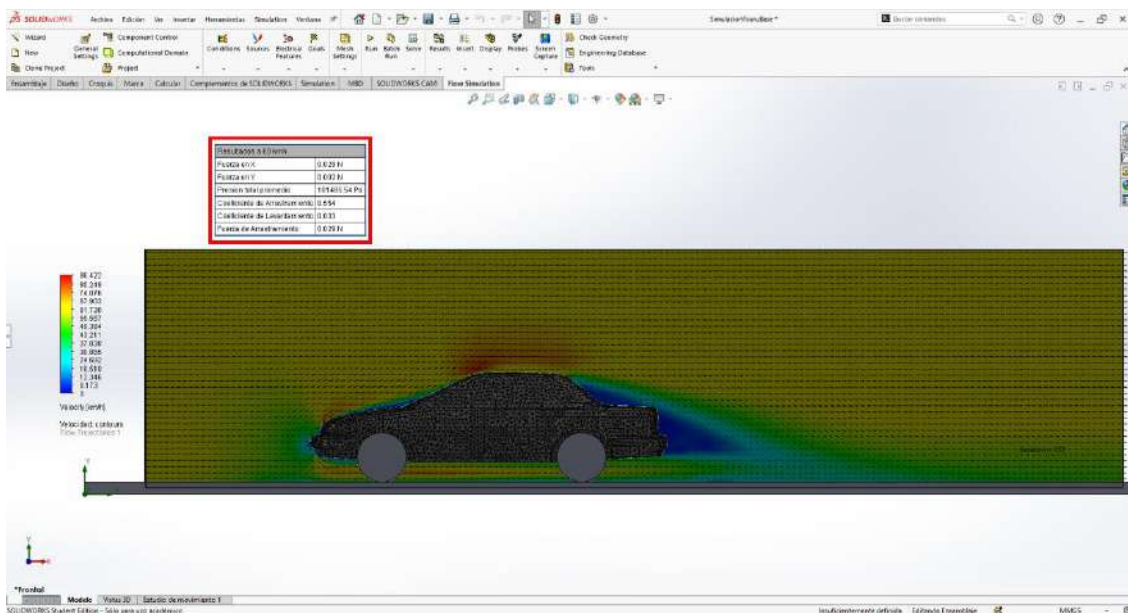


Figura 100: Visualización del resultado de la cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastramiento (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.554** (Figura 100).

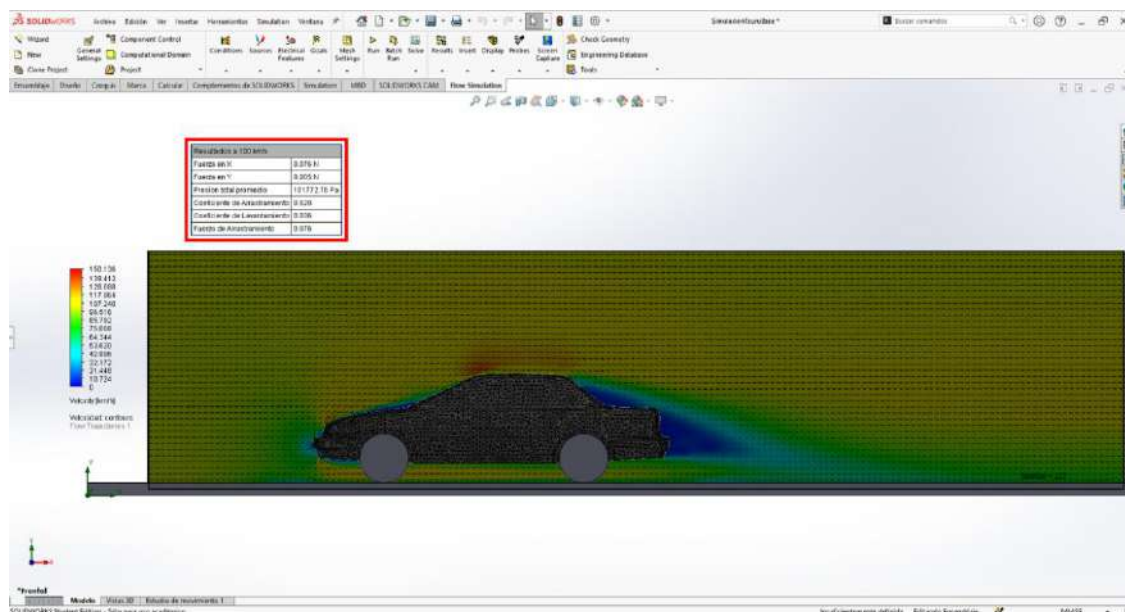


Figura 101: Visualización del resultado de la cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.520** (Figura 101).

4.1.5 Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado (Primera iteración).

Para las simulaciones CFD se utilizó la misma configuración que en la cuarta iteración de las simulaciones para Nissan Tsuru sin modificaciones. Se obtuvieron los siguientes resultados:

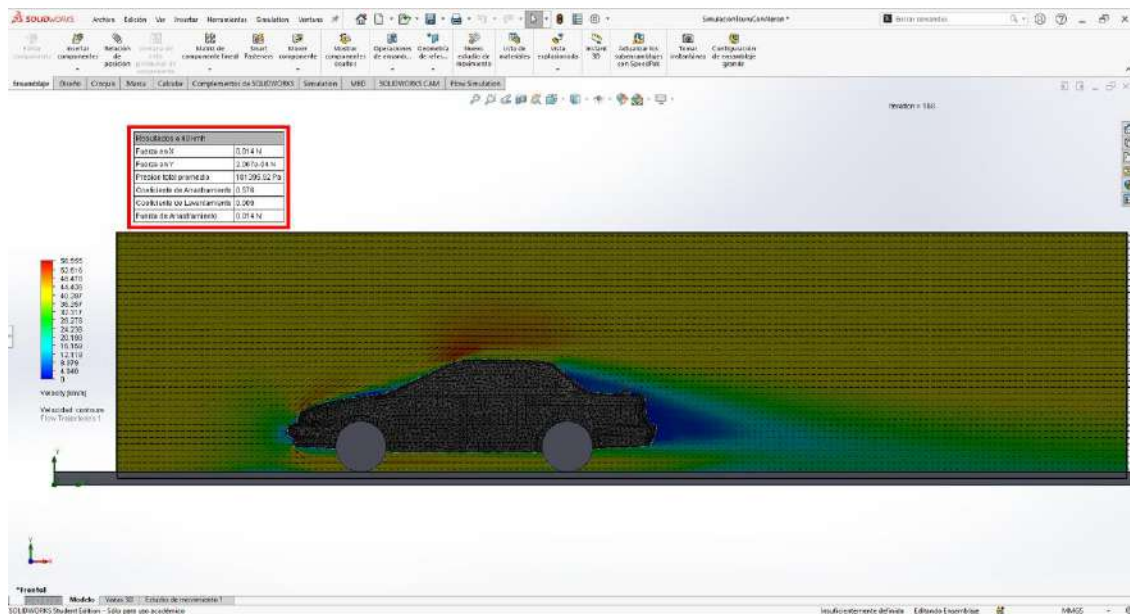


Figura 102: Visualización del resultado de la primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.576** (Figura 102).

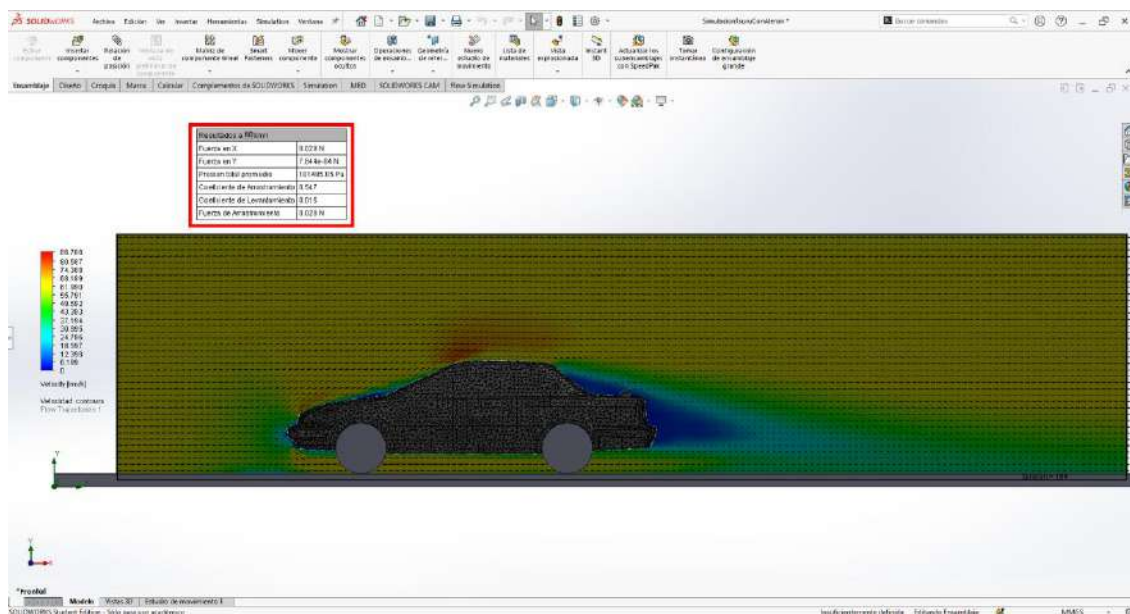


Figura 103: Visualización del resultado de la primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 60 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.547** (Figura 103).

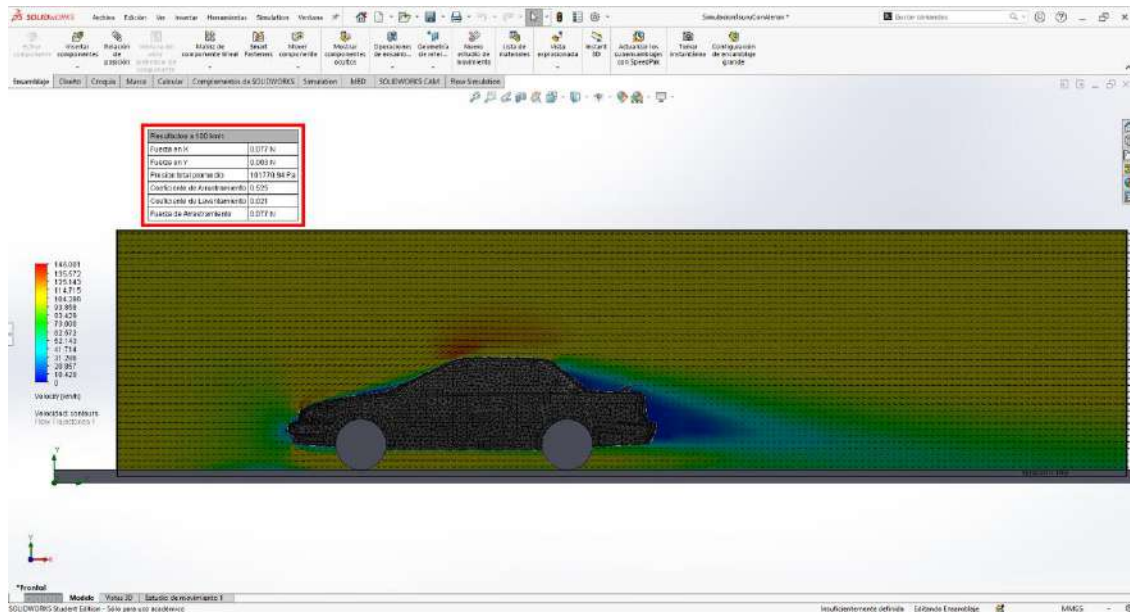


Figura 104: Visualización del resultado de la primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.524** (Figura 104).

4.1.6 Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado (Segunda iteración).

En esta segunda iteración se buscó corregir el posicionamiento del alerón, en la primera iteración el alerón se posicionó más cercano al frente de la proporción real, por lo que en la segunda iteración se movió ligeramente hacia atrás (1 mm), más pegado hacia el borde. Los resultados fueron los siguientes:

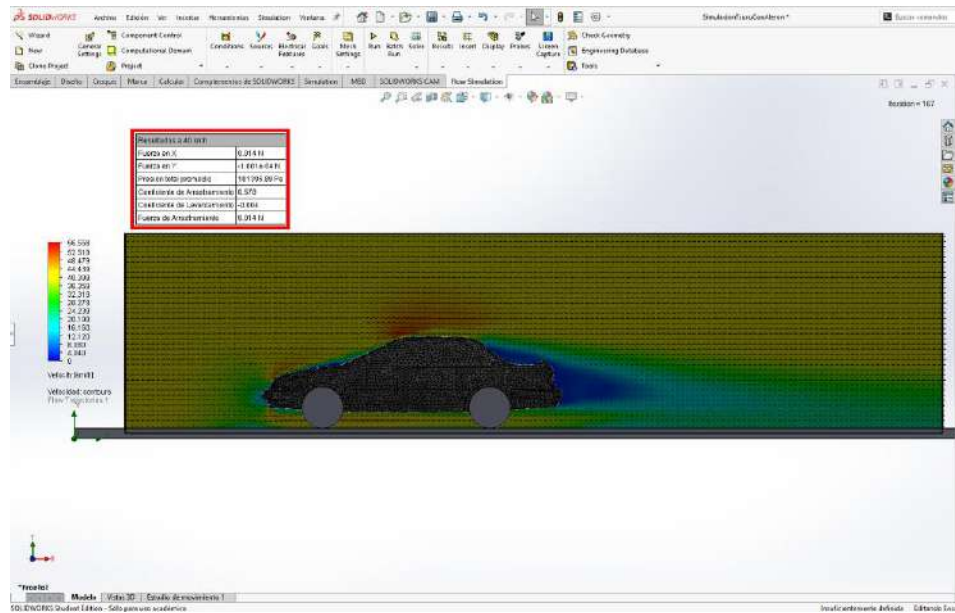


Figura 105: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.578** (Figura 105).

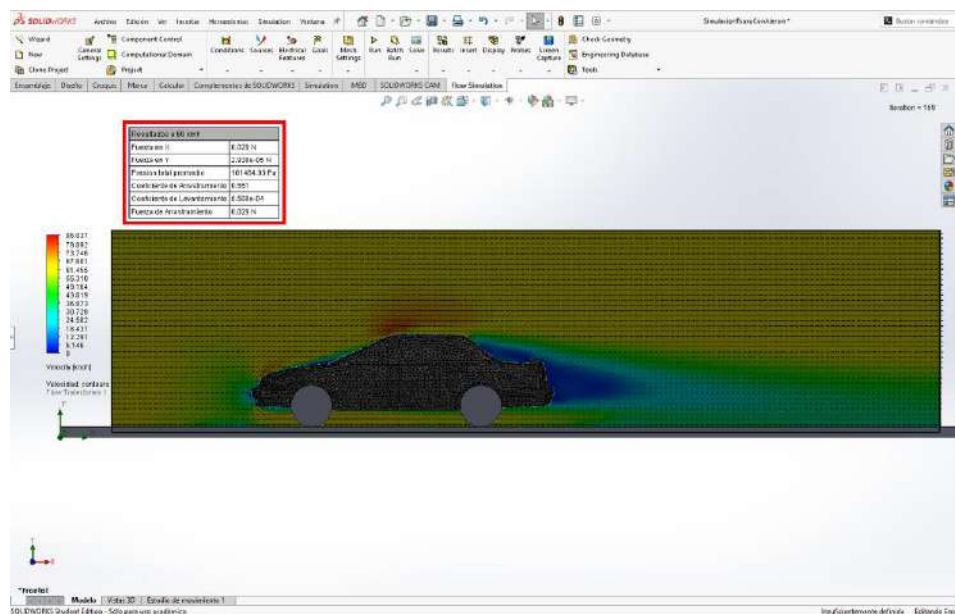


Figura 106: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 60 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.551** (Figura 106).

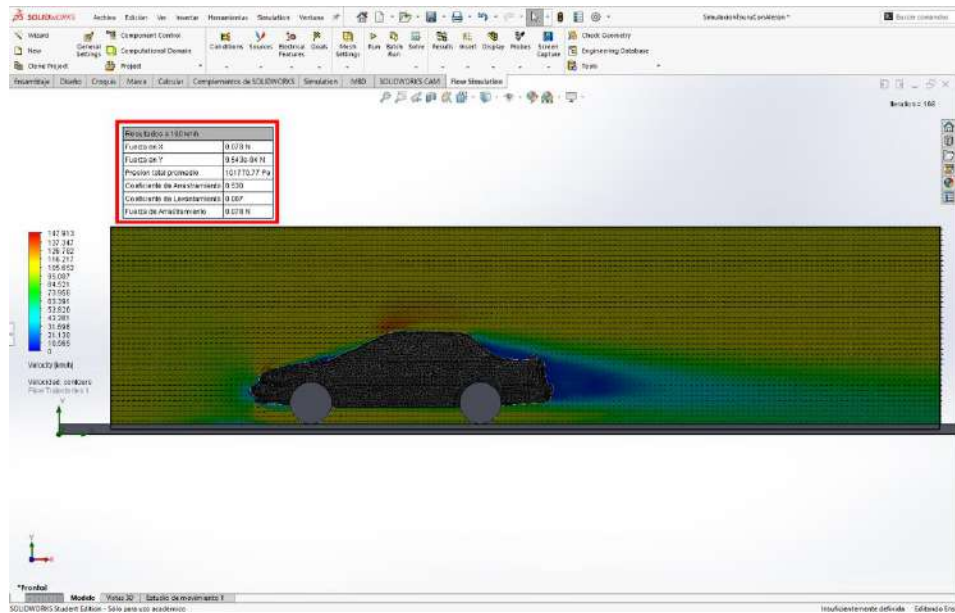


Figura 107: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.530** (Figura 107).

4.1.7 Simulación de alerón diseñado para competencia.

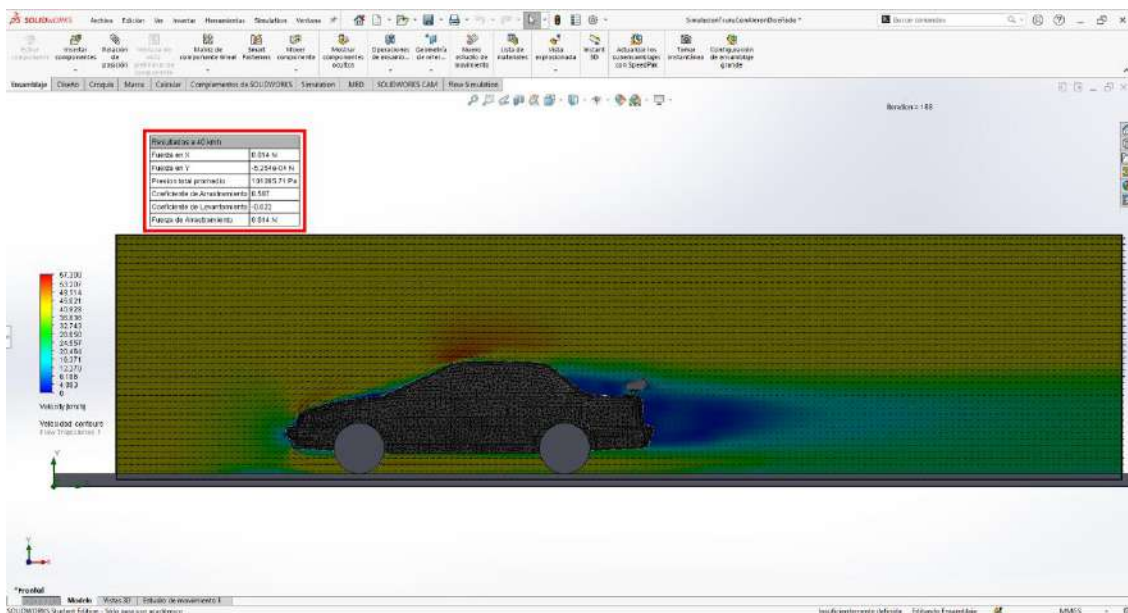


Figura 108: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 40 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y resultado de coeficiente de arrastre (C_d) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 40 km/h fue de **0.596** (Figura 108).

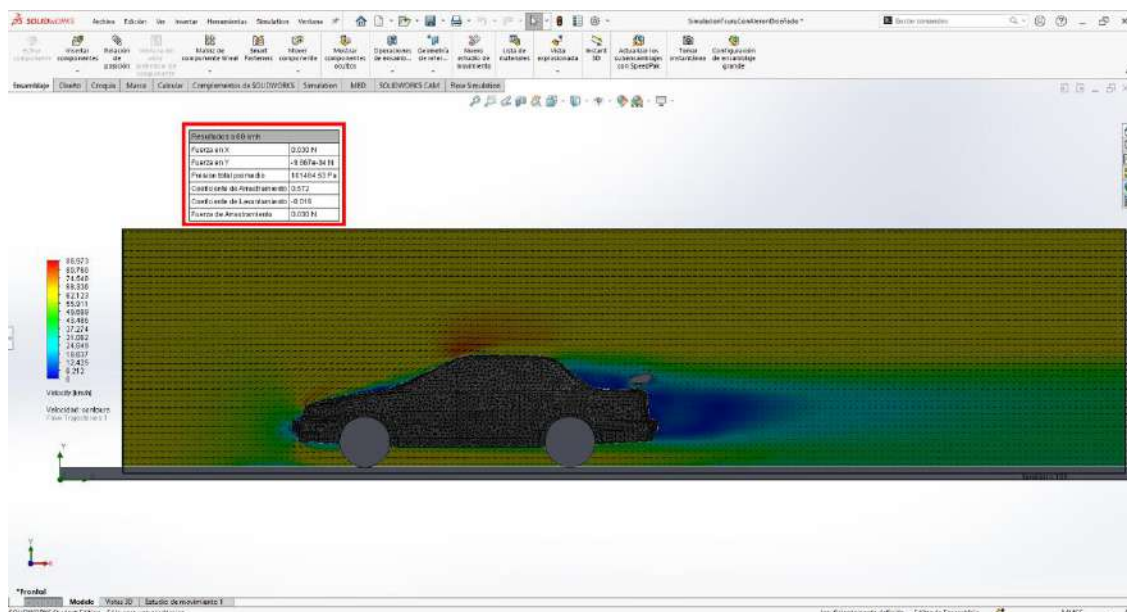


Figura 109: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 60 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (Cd) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 60 km/h fue de **0.572** (Figura 109).

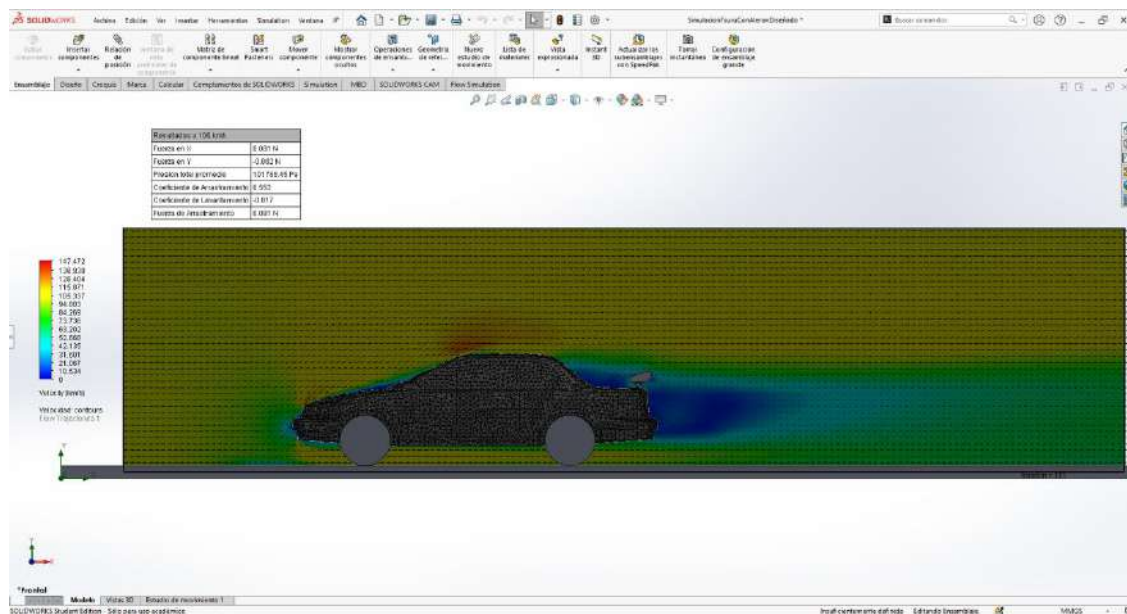


Figura 110: Visualización del resultado de la segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado a 100 km/h, donde se muestran los vectores de velocidad afectando al vehículo y el resultado de coeficiente de arrastre (Cd) mostrado en un cuadro rojo [45].

El resultado obtenido del coeficiente de arrastre del Nissan Tsuru a 100 km/h fue de **0.553** (Figura 110).

4.1.8 Resumen de resultados de coeficiente de arrastramiento.

En la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos de todas las iteraciones que utilizaremos en la conclusión.

	40 km/h	60 km/h	100 km/h
<i>Nissan Tsuru sin modificaciones (4ta Iteración)</i>	0.584	0.554	0.520
<i>Nissan Tsuru con alerón de perfil alar escaneado.</i>	0.578	0.551	0.530
<i>Nissan Tsuru con alerón diseñado para competencia.</i>	0.596	0.572	0.553

Tabla 2: Resultados de simulaciones realizadas sobre Nissan Tsuru.

Al día 30 de noviembre de 2025, el litro de gasolina verde esta en 23.99 pesos mexicanos. De las encuestas realizadas, los taxistas comentan que se gasta en promedio 600 pesos de gasolina a la semana. A partir de los coeficientes de arrastre obtenidos, se estimó el efecto directo en el gasto semanal de combustible tomando como referencia el Nissan Tsuru sin modificaciones, cuyo conductor invierte aproximadamente 600 pesos por semana, equivalentes a 25.01 litros de gasolina al precio de 23.99 pesos por litro. El vehículo equipado con el alerón escaneado mostró reducciones de consumo del 1.03% a 40 km/h y 0.54% a 60 km/h, lo que representa ahorros semanales de 0.26 L (6.3 pesos) y 0.13 L (3.1 pesos) respectivamente; sin embargo, a 100 km/h presentó un aumento del 1.92%, equivalente a 0.48 L adicionales (11.5 pesos). En contraste, el alerón diseñado para competencia incrementó el consumo en todos los casos: 2.05% a 40 km/h (0.51 L adicionales; 12.2 pesos), 3.24% a 60 km/h (0.81 L; 19.4 pesos) y 6.40% a 100 km/h (1.60 L; 38.3 pesos). Estos resultados indican que el alerón comercial tiene un impacto prácticamente insignificante en el gasto del operador, mientras que el alerón de competencia genera incrementos económicos medibles, especialmente a velocidades elevadas.

4.2 Encuestas y entrevistas.

Se llevaron a cabo entrevistas y encuestas, tanto presenciales como en línea, dirigidas a usuarios de vehículos Tsuru equipados con alerón, con el objetivo de analizar las percepciones y experiencias de conductores habituales en relación con el uso de este aditamento en contextos urbanos.

De las entrevistas presenciales la mayoría fueron realizadas en la ciudad de Poza Rica, Veracruz. Preguntando a taxistas todos afirmaron que, en la ciudad, existen 6000 taxistas registrados en el gremio, sin contar los taxistas de ciudades conurbadas (Tehuacán, Papantla, Cazones y Coatzacoatlán). La gran mayoría de estos taxis son Nissan Tsuru y es común verlos modificados.

Las encuestas se realizaron utilizando Google Forms [Anexo 1] publicando el enlace de la encuesta en grupos de Facebook especializados en Tsurus modificados. Se obtuvieron 35 resultados de encuestas online [Anexo 1 y 2], y 5 encuestas presenciales a usuarios con Tsurus modificados [Anexo 3].

4.3 Encuestas online.

En base a los resultados obtenidos en Google Forms, se concluye que el promedio de dinero gastado por usuarios de Nissan Tsuru con alerón en promedio es de 650 pesos mexicanos a la semana. Recorriendo distancias de entre 35 y 70 km al día a una velocidad de entre 60 a 90 km/h y en las distancias recorridas habrá tráfico asegurado. La mayoría de las personas encuestadas no notan cambio en el consumo de combustible, pero si notan una mejora en el control del vehículo, con un énfasis en que solo a altas velocidades. De 25 respuestas obtenidas en la pregunta ¿Por qué se instaló el alerón en el vehículo? La gran mayoría respondió que por estética y solo 6 personas respondieron que por un mejor rendimiento [Anexo 2].

En el anexo 2, se puede encontrar una versión simplificada de los resultados de las encuestas.

4.4 Encuestas físicas.

Se encuestaron 5 personas entre las ciudades de Monterrey, Nuevo León y Poza Rica, Veracruz (Figura 111). Se hicieron preguntas relacionadas con el costo, rendimiento, instalación, consumo de combustible y razones para instalación [Anexo 3].

De las entrevistas y con la compra del alerón que se hizo para el escaneo 3D, se puede concluir, que un taxista que trabaja en jornadas de 8 horas, que transita en zonas con alto flujo de tráfico, viaja a velocidades de entre 50 km/h y 60 km/h gasta aproximadamente \$2100 pesos mexicanos de gasolina al mes. Todos los encuestados respondieron que el alerón es imperceptible en rendimiento, control del vehículo y consumo de combustible en la ciudad, pero dos de los

encuestados respondieron que a altas velocidades (140 km/h a 200 km/h) mientras se maneja en carretera el vehículo se siente más pegado al piso y con mayor control. Los alerones de los encuestados y el alerón comprado para usos de la tesis están realizados con fibra de vidrio y tienen un costo de compra e instalación de aproximadamente \$1500 pesos mexicanos. En comparación, se entrevistaron a dos dueños de vehículos BMW M4 y Mitsubishi Lancer, ambos usados en competiciones de carreras, y los precios de un alerón de fibra de carbono oscilan entre los 135 dólares y 300 dólares americanos.



Figura 111: Fotografías junto a usuarios de Nissan Tsuru con alerón instalado en el automóvil. [45]

4.5 Conclusiones del capítulo 4.

El capítulo 4 integra todos los hallazgos numéricos y experimentales, permitiendo comprar el impacto real de alerones en términos de arrastre y percepción social. Prepara el terreno para sintetizar los resultados en las conclusiones.

5.- Conclusiones.

De los resultados obtenidos en las simulaciones se puede concluir que, tomando en cuenta el valor de coeficiente de arrastre como valor determinante para el consumo de gasolina del vehículo, y para uso de nuestros resultados, el Nissan Tsuru sin modificaciones es el modelo base del carro. Instalar un alerón de bajo perfil, similar a los encontrados en hojalaterías o tiendas de refacciones especializadas en accesorios vehiculares, dará un beneficio en el consumo de gasolina, a velocidades menores a 60 km/h y en velocidades mayores a 60 km/h aumentará el consumo de gasolina. Mientras que un alerón diseñado para competencia aumentara el consumo de gasolina a todas las velocidades, en comparación del modelo Nissan Tsuru base (Tabla 2).

Analizando las tendencias actuales en cuanto a diseño automotriz en los modelos de vehículos populares se observa que los vehículos vienen con alerones ya integrados en la cajuela en forma de ligeras inclinaciones (Ilustraciones 112 y 113). Un alerón de bajo perfil puede beneficiar la aerodinámica del vehículo, reduciendo su consumo de gasolina a bajas velocidades y mejorando sus prestaciones a altas velocidades.



Figura 112: Volkswagen Jetta 2025 [43].



Figura 113: KIA K3 2025 [44].

Por otra parte, el instalar un alerón de competencias a un vehículo como el Nissan Tsuru no beneficiaría el vehículo, pues el aumento en el consumo de combustible es considerablemente más alto.

En ambos casos, los beneficios no solo serian económicos, las pruebas realizadas en todos los casos muestran los vectores de velocidad en X (Eje longitudinal) y se puede apreciar el comportamiento del aire en el automóvil. Sin un alerón instalado (Figura 164), la forma en la que el aire curva la superficie del carro termina generando turbulencias en la cola del automóvil, generando un aumento en el coeficiente de arrastramiento y afectando la estabilidad. Al agregar el

alerón de perfil alar escaneado (Figura 188), se mejoró el impacto del flujo del aire al final del vehículo, alargando el espacio donde impacta el aire contra el suelo y, en el alerón para competencia (Figura 200) la distribución es uniforme, lo que mejoraría la estabilidad en el vehículo y daría una mejor sensación de manejo.

En conclusión, el agregar un alerón de bajo perfil, encontrado en cualquier refaccionaria de accesorios automovilísticos daría un beneficio en el consumo de combustible y estabilidad del vehículo, entre mayor sea la velocidad se volverá más notoria la estabilidad en el vehículo, pero a costo de un aumento en el consumo de combustible. Un alerón diseñado para competencias brindará peor consumo de combustible, pero mejorará por mucho la estabilidad del vehículo base. En la hipótesis se menciona que el vehículo tendría un peor rendimiento en el consumo de combustible agregando cualquier alerón al automóvil, la tabla 2 muestra comparaciones que vuelven a la hipótesis no válida, los alerones de bajo perfil a bajas velocidades si muestran un coeficiente de arrastre menor que el modelo base a las mismas velocidades.

5.1 Trabajo a futuro.

Existen áreas de oportunidad para mejorar los resultados obtenidos que se evaluarán en futuras continuaciones al proyecto, la malla final del vehículo podría causar aumentos no deseados en los resultados de coeficiente de arrastramiento. El complemento Flow Simulation de SolidWorks es una herramienta poderosa, da un entendimiento en el comportamiento de fluidos y da resultados acertados y realistas, sin embargo, existen paquetes CFD especializados para este tipo de análisis que brindan más opciones de manejo de malla y pueden dar aun mejores resultados. Una plataforma giratoria garantizaría un mejor escaneo en las superficies del alerón, donde el pulso humano no podría afectar la calidad del escaneo ni generaría errores. Por último, SolidWorks funciona como una herramienta de diseño simple pero no cuenta con las mejores opciones para exportar objetos escaneados por lo que se sugiere utilizar softwares utilizados en la industria automotriz para exportar y trabajar con modelos, como podría ser CREO o NX.

5.2 Contribución a la ciencia.

La contribución de esta investigación se centra en el análisis del efecto aerodinámico de alerones instalados en un vehículo de gran relevancia social como el Nissan Tsuru, empleando herramientas de diseño asistido por computadora y dinámica de fluidos computacional (CFD). En el ámbito de la ingeniería, el trabajo ofrece resultados cuantitativos que vinculan la geometría de

los alerones con el coeficiente de arrastre y el consumo de combustible, aportando una base sólida para la evaluación y el desarrollo de componentes aerodinámicos en futuros estudios. Desde la perspectiva científica, se amplía el entendimiento sobre el flujo de aire en vehículos de uso urbano, un campo poco explorado en comparación con los automóviles de alto desempeño, lo que abre nuevas oportunidades de investigación orientadas a la eficiencia y desempeño en contextos reales. Asimismo, en términos de responsabilidad social, los hallazgos permiten valorar con mayor claridad el impacto de modificaciones comunes en unidades de transporte público, subrayando su influencia en la seguridad vial, la economía de los conductores y el consumo responsable de recursos energéticos.

Referencias.

1. Jimenez, G. (2022, 25 marzo). *Nissan Tsuru 2017: Características y atributos*. KAVAK. <https://www.kavak.com/mx/blog/tsuru-2017-caracteristicas-y-atributos>
2. 2004 Nissan Tsuru. (s. f.). Nissan Orizaba. <http://www.nissanorizabaeosa.com/tsuruesp.html>
3. Redacción. (2022, 13 octubre). *¿Cuáles son los límites de velocidad permitidos en México?* El Financiero. <https://www.elfinanciero.com.mx/nacional/2022/10/13/cuales-son-los-limites-de-velocidad-permitidos-en-mexico/>
4. TikTok - Make your day. (s. f.). <https://www.tiktok.com/@rotularteoficialcdmx/video/7241257870396787974>
5. CLUB NISSAN TSURU MÉXICO. (2025, 15 marzo). Facebook. <https://www.facebook.com/groups/637726440031080/posts/2184462152024160>
6. Nosotros. (s. f.). Nissan. <https://www.nissan.com.mx/corporate/nosotros.html>
7. Palencia, J., García, N., & Pinto, M. (2008). Estudio del comportamiento aerodinámico de un alerón trasero en el diseño de vehículo tipo formula SAE.
8. Fraija B., I., (2006). Estudio de la aerodinámica en los vehículos. PROSPECTIVA, 4(2), 66-70.
9. MITx. (2018). *Introduction to Aerodynamics (16.101x)* [Curso en línea]. edX. https://learning.edx.org/course/course-v1:MITx+16.101x_2+3T2018/home
10. Rodríguez, H. (s. f.). Los 7 problemas matemáticos del millón de dólares. *National Geographic España*. https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/7-problemas-matematicos-millon-dolares_18751
11. Heredia, D. (s. f.). Matemáticas Fluidas. Roberto Rubio, Emilio Franco, IES Beatriz de Galindo, IES Ramiro de Maeztu. https://www.icmat.es/cultura/graffiti/ideas_basicas.html#:~:text=Las%20ecuaciones%20de%20Navier-Stokes%20describen%20el%20movimiento%20de%20los,corrientes%20oce%C3%A1nicas%20del%20magma%20terrestre%E2%80%A6
12. Luisyp. (s. f.). Las Ecuaciones de Navier-Stokes. Ingeniería Básica. <https://ingenieriabasica.es/las-ecuaciones-de-navier-stokes/>
13. Navier-Stokes Equations. (s. f.). NASA. <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/nseqs.html>
14. Navier-Stokes y la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). (s. f.). HomEducation. www.homeducation.es/blog/2017-05-02-navier-stokes-y-la-dinamica-de-fluidos-computacional-cfd
15. ESSS. (2016, junio). *Dinámica de Fluidos Computacional: ¿Qué es?* ESSS. <https://www.esss.com/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/#:~:text=La%20Din%C3%A1mica%20de%20Fluidos%20Computacional,qu%C3%A1Dmicas%20combusti%C3%B3n%20aeroac%C3%B3stica%20etc.>

16. HK Versteeg & W Malalasekera. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics - the finite volume method* (Segunda Edición). Pearson Education Limited.
17. Fieldpiece Instruments. (s. f.). *STA2 - Anemómetro de hilo caliente para mediciones en conductos - Fieldpiece Instruments*. <https://www.fieldpiece.com/es/producto/sta2-in-duct-hot-wire-anemometer>
18. *Laser Doppler Anemometry (LDA) Optical Technique*. (s. f.). Dantec Dynamics | Precision Measurement Systems & Sensors. <https://www.dantecdynamics.com/solutions/fluid-mechanics/laser-doppler-anemometry-lda>
19. Photron. (s. f.). *Particle Image Velocimetry – Photron*. <https://photron.com/es/particle-image-velocimetry>
20. E. Khalil, E. (2010). CFD History and Applications. En *CFD Letters*.
21. González Mora, A. (2018). Historia de la dinámica de fluidos computacionales (CFD).
22. NASA [NASA]. (2012, 30 octubre). Computational Fluid Dynamics. Past, present and future.
23. HR Motor. (2023, 15 noviembre). *¿Qué es un túnel de viento? | HR Motor*. <https://www.hrmotor.com/que-es/tunel-de-viento>
24. Autocosmos. (2019, 26 agosto). *La F1 inicia las pruebas de túnel de viento para los modelos 2021*. Autocosmos. <https://noticias.autocosmos.com.co/2019/08/26/la-f1-inicia-las-pruebas-de-tunel-de-viento-para-los-modelos-2021>
25. Collin, C., Indinger, T., & Müller, J. (2017). Moving Ground Simulation for High Performance Race Cars in an Automotive Wind Tunnel. *International Journal Of Automotive Engineering*, 8(1), 15-21. https://doi.org/10.20485/jsaeijae.8.1_15
26. AsorCAD. (2023, 2 junio). *Qué Es Y Para Qué Sirve La Ingeniería Inversa | AsorCAD*. <https://www.asorcad.es/blog/que-es-y-para-que-sirve-la-ingenieria-inversa/>
27. Edificación y construcción. (2022, 26 julio). *Ingeniería inversa: concepto y aplicaciones*. Ingenieros Asesores. <https://ingenierosasesores.com/actualidad/ingenieria-inversa-concepto-aplicaciones/>
28. Capnor. (s. f.). *Reverse Engineering – Definition, Types, Benefits and Applications*. <https://www.capnor.com/en/blog/what-is-reverse-engineering-and-why-is-it-important>
29. E-Spin. (2025, 12 febrero). *The Reverse Engineering: Applications, Techniques, and Industry Impact*. E-SPIN Group. <https://www.e-spincorp.com/the-reverse-engineering-techniques-impact/>
30. Robles, I. (2023, 20 octubre). *Implementación del Escáner láser 3D en la planchistería industrial*. R&G Metal Shaping. <https://rgmetalshaping.com/implementacion-del-escaner-laser-3d>
31. Sariki - Soluciones de metrología. (2024, 6 mayo). *Escáner de Luz estructurada - Metrología Sariki - Digitalizado 3D*. Sariki - Metrología Industrial. <https://www.sariki.es/equipos-de-medicion/digitalizado-3d/escaner-luz-estructurada>
32. Hirschfelder, P. (2021, 15 junio). *¿Está utilizando al máximo su escáner CT reacondicionado recién instalado?* Radiology Oncology

- Systems. <https://www.oncologysystems.com/blog/esta-utilizando-al-maximo-su-escaner-ct-reacondicionado-recien-instalado>
33. Rack, S. (2025, 24 julio). *What is Reverse Engineering? (Converting a 3D-Scan to CAD)*. Holocreators. <https://holocreators.com/blog/what-is-reverse-engineering>
34. Shining 3D. (2024). *EinScan Pro HD User Manual* (Versión 4.0.0.9) [Manual en PDF]
35. Amazon.com: Escáner 3D portátil EinScan Pro HD 2024 con paquete industrial y paquete de colores HD, software CAD SolidEdge Shining3D para ingeniería inversa, atención médica, fabricación, investigación, arte y: Industrial y Científico. (s. f.). <https://www.amazon.com/-/es/industrial-SolidEdge-ingenier%C3%ADa-fabricaci%C3%B3n-investigaci%C3%B3n/dp/B08N3R67W1>
36. Telegram web. (s. f.). Telegram Web. <https://web.telegram.org/k/#@VirtualVehicles>
37. Nissan Tsuru Vector Drawing. (s. f.). The-Blueprints.com. https://www.the-blueprints.com/vectordrawings/show/20211/nissan_tsuru/
38. Krishna Pabba, S. (2018, 16 diciembre). *Free CAD designs, files & 3D models | The GrabCAD Community Library*. GrabCAD. <https://grabcad.com/library/rear-spoiler-for-automobiles-1>
39. *Common Airfoils for FSAE front and rear wings*. (2018). Reddit. https://www.reddit.com/r/FSAE/comments/p2vylb/common_airfoils_for_fsae_front_and_rear_wings
40. *S1223 (s1223-il)*. (s. f.). <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1223-il>
41. OfertadeCoches.com. (2023, 28 agosto). *Qué es el Coeficiente Cx y cómo influye en consumo del vehículo*. LinkedIn. <https://www.linkedin.com/pulse/qu%C3%A9-es-el-coeficiente-cx-y-c%C3%B3mo-influye-en-consumo-del>
42. *Lista de instalaciones de túnel de viento*. (2025, 6 abril). Soluciones de Adquisición de Datos (DAQ). <https://dewesoft.com/es/blog/lista-de-instalaciones-para-pruebas-de-tunel-de-viento>
43. *Jetta GLI 2025: el auto deportivo de Volkswagen*. (2024, 15 agosto). <https://www.vw.com.mx/es/autos-suvs/jetta-gli.html>
44. Velázquez, F. (2023, 25 octubre). *Kia K3 2024: lanzamiento y precios en México - Autoanalítica*. Autoanalitica. <https://autoanalitica.com.mx/mejores-autos/kia-k3-2024-lanzamiento-y-precios-en-mexico>
45. Autoría personal

Anexos.

Anexo 1: Resultados de encuestas en Google Forms.

1. ¿Cuántos kilómetros se recorren al día con el vehículo?

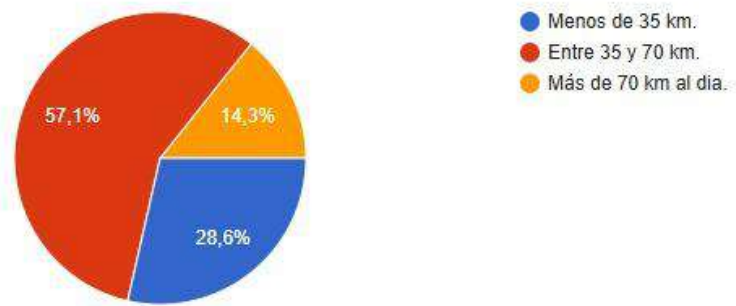


Figura 114: Resultados de la primera pregunta. [45]

2. ¿A qué velocidad promedio suele manejar?

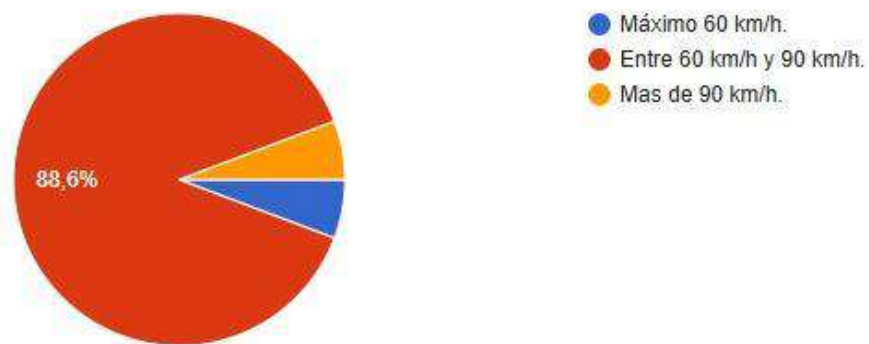


Figura 115: Resultados de la segunda pregunta. [45]

3. ¿Se encuentra mucho tráfico en las distancias recorridas?

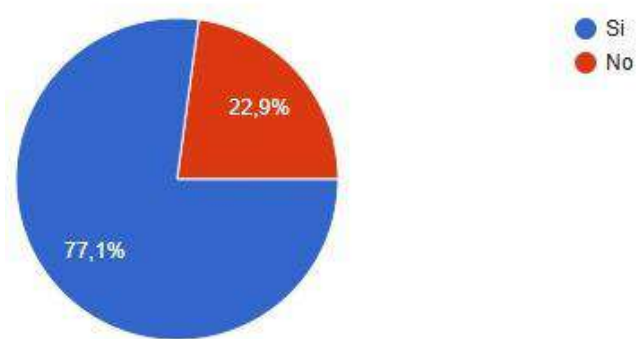


Figura 116: Resultados de la tercera pregunta. [45]

4. ¿Cuánto dinero a la semana se destina en combustible?

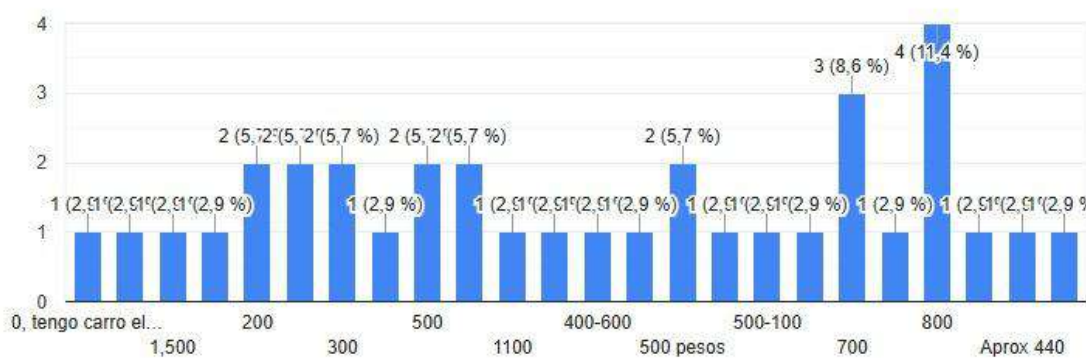


Figura 117: Resultados de la cuarta pregunta. [45]

5. ¿El alerón fue instalado o el vehículo fue comprado con el alerón ya instalado?

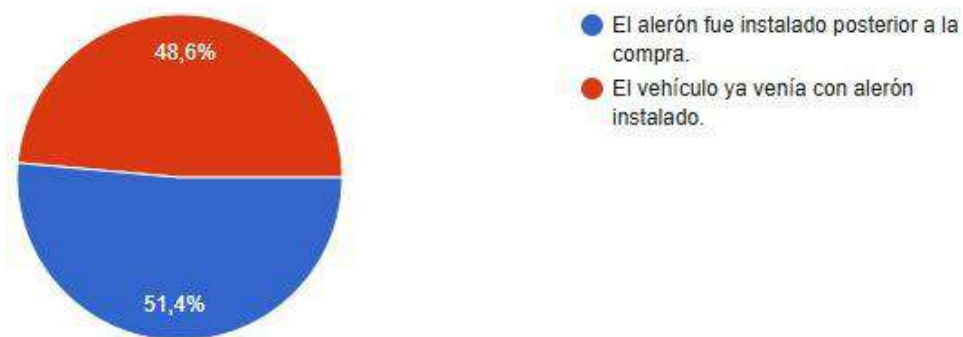


Figura 118: Resultados de la quinta pregunta. [45]

6. ¿Se nota cambio en el consumo de combustible desde la instalación del alerón?

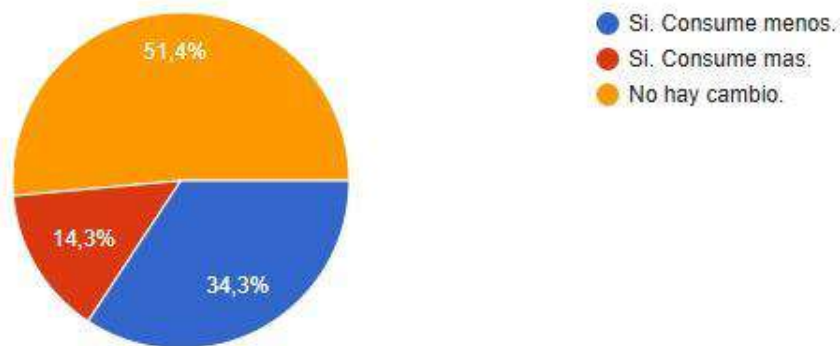


Figura 119: Resultados de la sexta pregunta. [45]

7. ¿Se nota cambio en el control del vehículo al manejar con el alerón?



Figura 120: Resultados de la séptima pregunta. [45]

8. Por último, se realizó la pregunta de porque se instaló el alerón en el vehículo, donde la mayoría de los encuestados instalaron el alerón por estética.

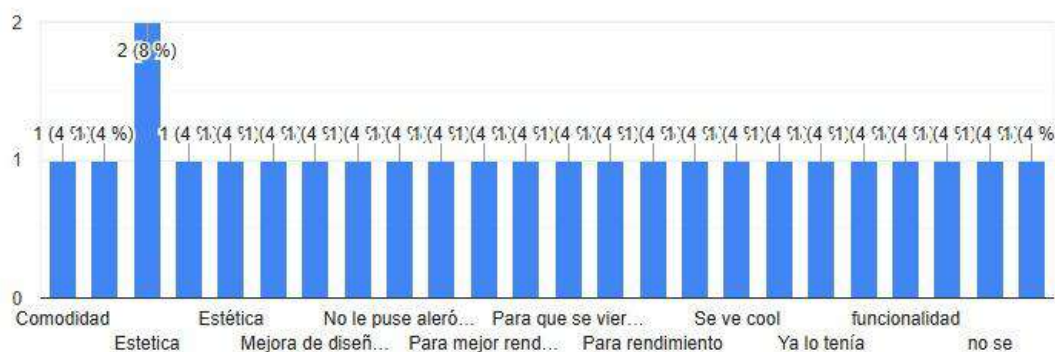


Figura 121: Resultados de encuesta de estética. [45]

Anexo 2: Simplificación de resultados de encuesta online:

#	Pregunta:	Resultados
1	¿Cuántos kilómetros ser recorren al día con el vehículo?	Menos de 35 km – 28.6% Entre 35 y 70 km – 57.1% Mas de 70 km al día – 14.3%
2	¿A que velocidad promedio suele manejar?	Máximo 60 km/h – 5.7% Entre 60 km/h y 90 km/h – 88.6% Mas de 90 km/h – 5.7%
3	¿Se encuentra mucho tráfico en las distancias recorridas?	Si – 77.1% No – 22.9%
4	¿Cuánto dinero a la semana se destina en combustible?	De 35 respuestas, el promedio de dinero gastado es de 650 pesos mexicanos (redondeado hacia arriba) . Las cifras con mayor repetición fueron los valores entre 500 y 800 pesos mexicanos , con un total de 16 personas, donde 500 fue el número más escogido (6 personas).
5	¿El alerón fue instalado o el vehículo fue comprado con el alerón ya instalado?	El alerón fue instalado posterior a la compra – 51.4% El vehículo ya venía con alerón instalado – 48.6%
6	¿Se nota cambio en el consumo de combustible desde la instalación del alerón?	Si. Consume menos. – 34.3% Si. Consume más. – 14.3% No hay cambio – 51.4%
7	¿Se nota cambio en el control del vehículo al manejar con el alerón?	Si. El vehículo se conduce mejor siempre – 22.9% Si, pero solo a altas velocidades – 48.6% No hay cambio – 28.6%
8	¿Por qué razón se instaló el alerón en el vehículo?	De 25 respuestas: 17 – Estética

	6 – Rendimiento 2 – N/A
--	----------------------------

Tabla 3: Simplificación de resultados de encuestas online.

Anexo 3: Notas de entrevistas presenciales.

Entrevista #1:

- El alerón costó \$1000 pesos aproximadamente
- Se puso por el mismo usuario
- No es difícil
- Se gasta \$500 pesos a la semana de gasolina, recorridos de 2 horas diarias
- Se instaló por estética

Entrevista #2:

- Eleazar Gutiérrez
- Alberto Córdova
- Alerón costo \$2000 pesos aproximadamente
- \$2100 de gasolina a la semana
- 10k kilómetros a la semana
- No se nota la cola de pato, solo es un lujo
- Se maneja igual

Entrevista #3:

- Velocidad - 60/70 km/h
- Horario: 9 am a 10/11 pm
- Tráfico moderado/depende la zona
- No hubo cambio en el manejo con alerón/ empeoro, no sirve para nada
- No hubo cambio en clientela con alerón / no les importó
- Mismo consumo de combustible
- Costo e instalación sin costo / instalación propia
- Le incomodaba el alerón
- No quiso dar información personal

Entrevista #4:

- Pérez Sierra Hiram

- Se hizo con hojalatero de fibra de vibro, a base de un alerón de Neón adaptándolo a las medidas de la cajuela
- Diario gasolina \$600 pesos
- Se trabaja de 2 de la tarde a 8 de la noche
- Se anda entre 50 a 60 km/h
- Mucho tráfico, más a las horas pico
- Consumo de combustible no perceptible
- Hasta 140 km/h en carretera
- En carretera se nota mejor balance, en ciudad no se nota
- Lo instalo por estética
- El carro pasó de ser particular a taxi
- Alerón está hueco

Entrevista #5:

- Iván García
- Mauricio García
- Tsuru modificado - motor de GSR 2000
- El vehículo llega a velocidades de 200-240 km/h
- Se siente el vehículo pegado al piso, mejor estabilidad
- Entre \$500 y \$600 pesos en 5 días
- Máximo 60-80 km/h
- 20-25 minutos de recorridos, aproximadamente 40 km

Alerón de BMW M4: es material plástico ABS, 135 dólares americanos con envío, instalado por mano propia, se nota el alerón en altas velocidades, en ciudad no, no se percibe aumento del consumo de combustible, \$800 pesos de combustible a la semana.

Alerón de fibra de carbono: 300 dólares de alerón + 100 de instalación = 400 dólares americanos.

Anexo 4: Tutorial de simulación en Flow Simulation en SolidWorks.

1. Creación del proyecto utilizando la herramienta Wizard en Flow Simulation.

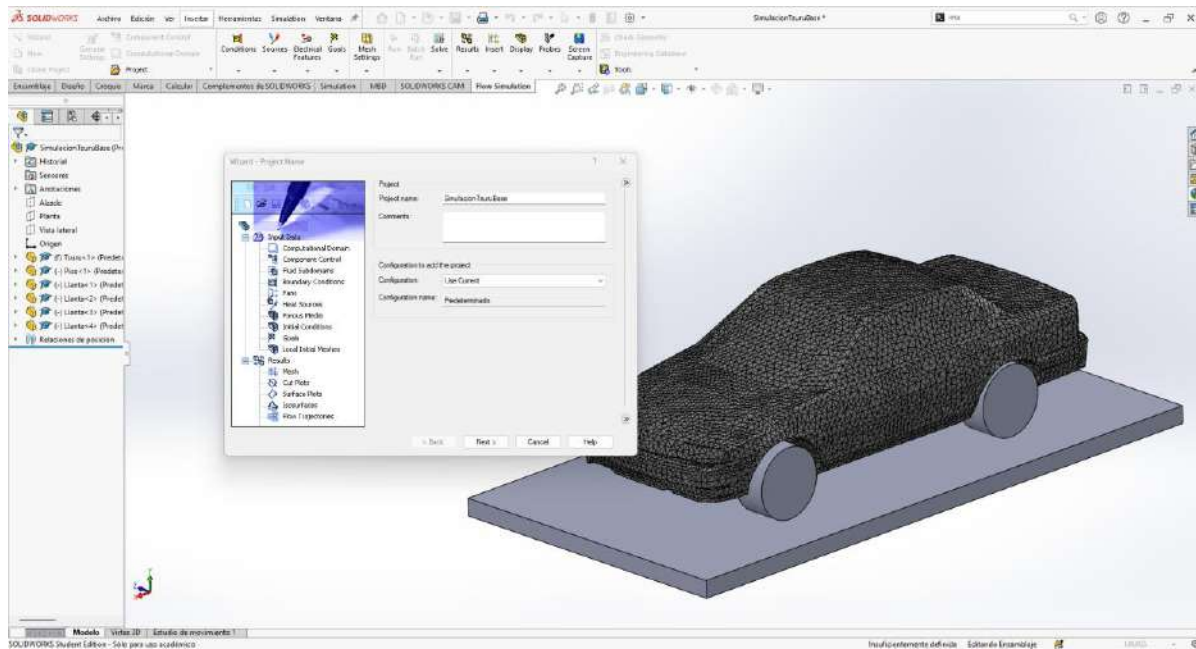


Figura 122: Primer paso de simulación en Flow Simulation. [45]

2. Se selecciona el sistema de unidades (Sistema internacional).

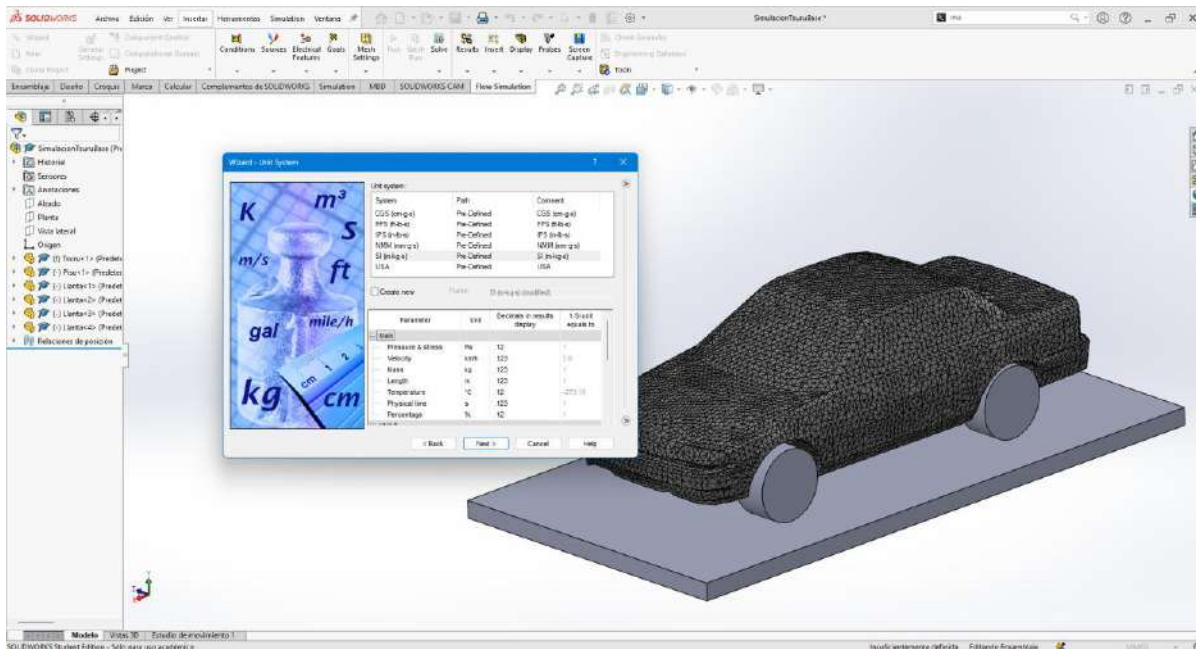


Figura 123: Segundo paso de simulación en Flow Simulation. [45]

3. Se selecciona el tipo de análisis.

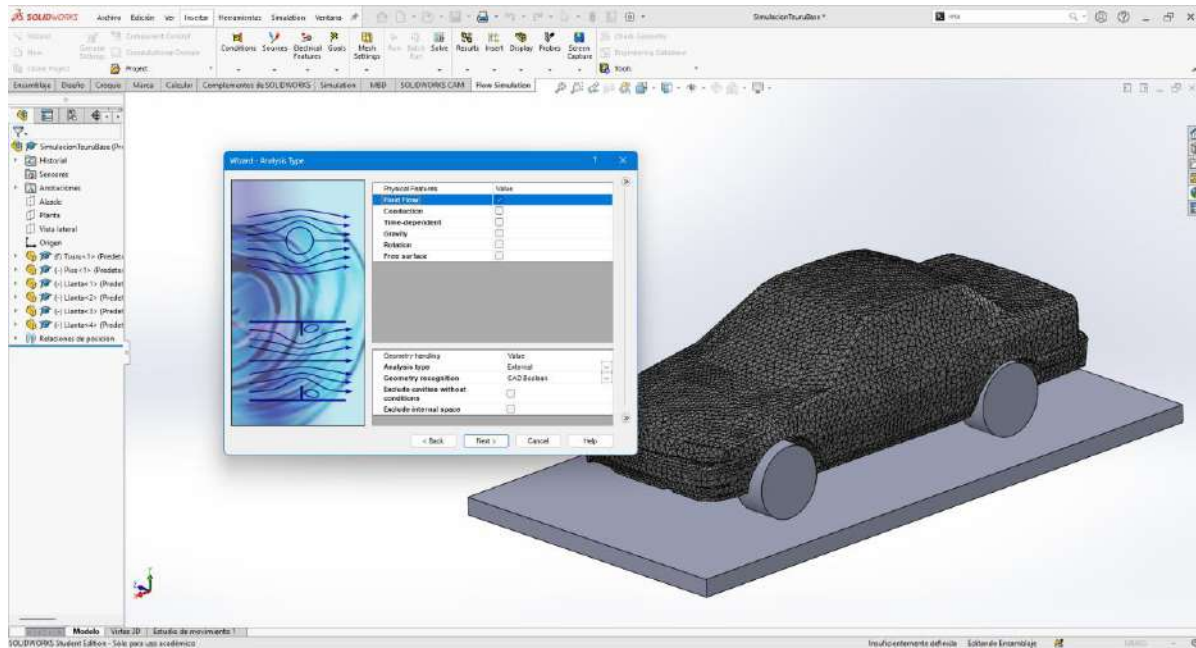


Figura 124: Tercer paso de simulación en Flow Simulation. [45]

4. Se selecciona el fluido que se simulará, en todos los casos fue aire, el flujo fue laminar y turbulento y con condiciones sin humedad.

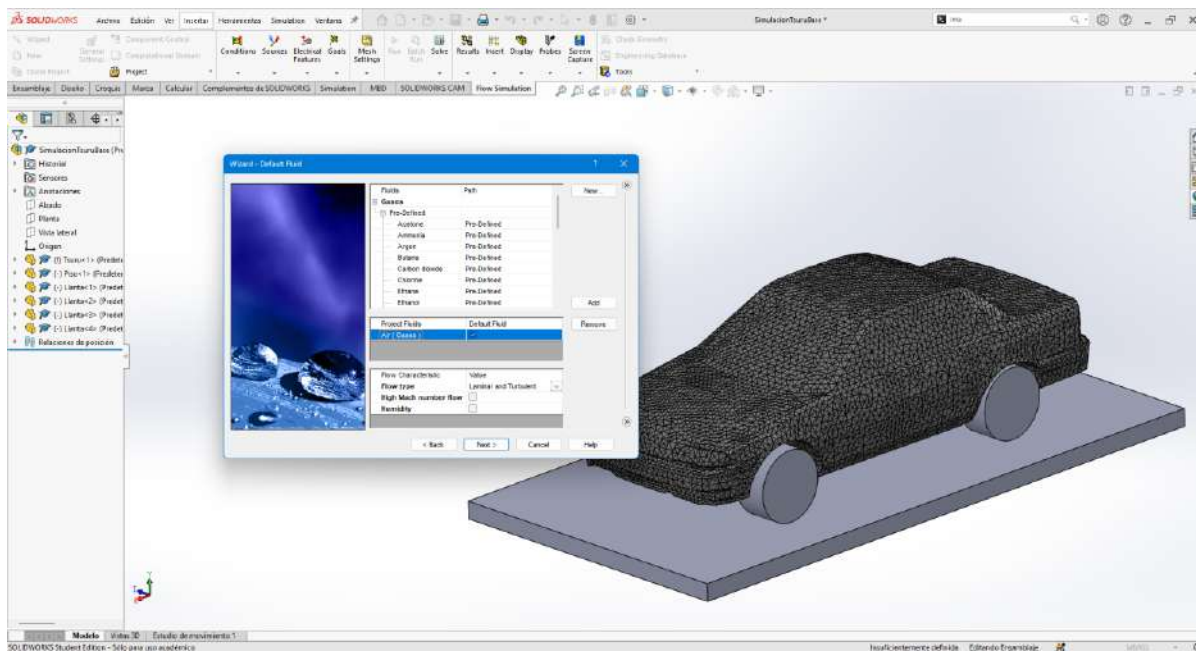


Figura 125: Cuarto paso de simulación en Flow Simulation. [45]

5. Se seleccionan condiciones de frontera, en nuestro caso se mantuvieron por default.

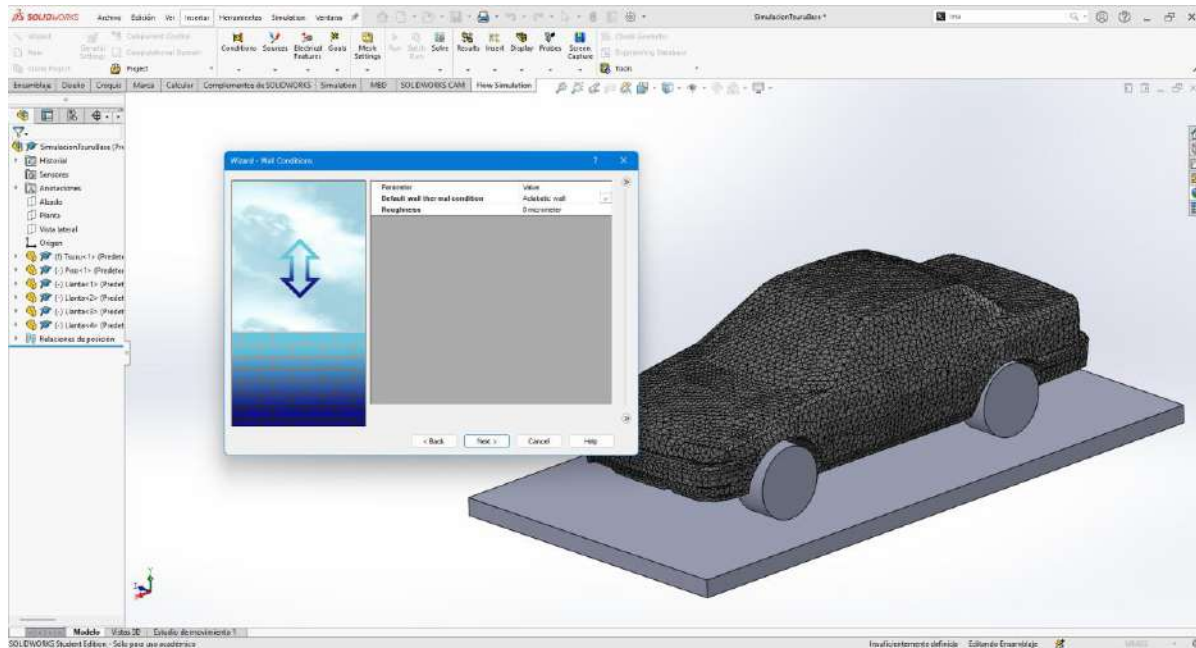


Figura 126: Quinto paso de simulación en Flow Simulation. [45]

6. Se seleccionan las condiciones iniciales y ambientales, presión estándar y temperatura de 25 °C. La velocidad en X se cambió en las diferentes iteraciones, 40, 60 y 100 km/h.

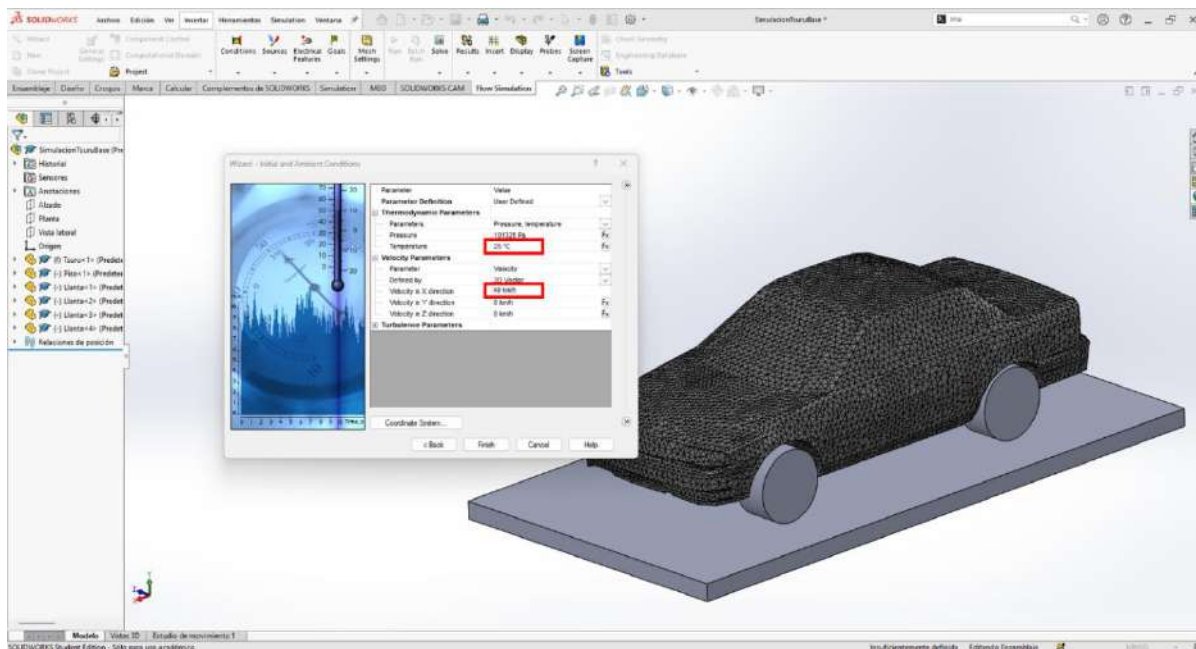


Figura 127: Sexto paso de simulación en Flow Simulation. [45]

7. Se modifica el dominio computacional, en nuestro caso delimitando el suelo simulado y dando espacio suficiente para que el aire que entra al sistema pueda circular tanto al frente del modelo como en la parte trasera.

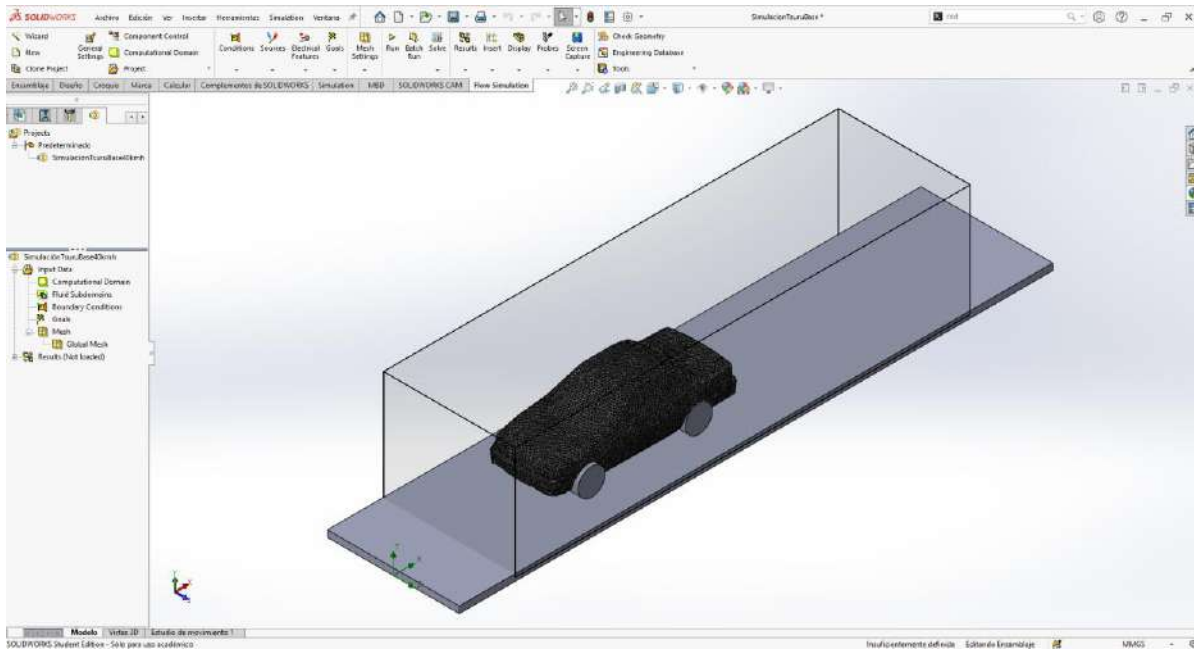


Figura 128: Séptimo paso de simulación en Flow Simulation. [45]

8. Se agregan las metas a buscar junto con las fórmulas de coeficiente de arrastramiento y levantamiento (Siguiendo las fórmulas del capítulo).

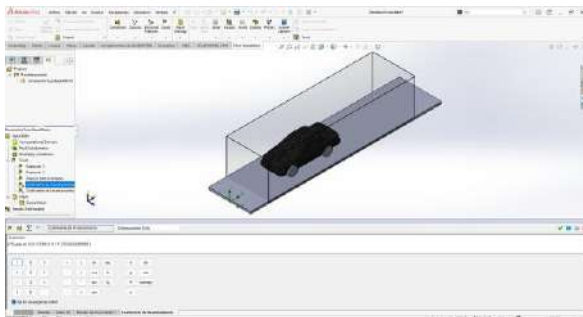


Figura 129: Octavo paso de simulación en Flow Simulation, Formula de Coeficiente de arrastre. [45]

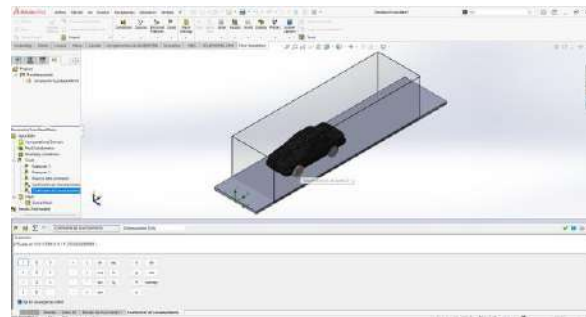


Figura 130: Octavo paso de simulación en Flow Simulation, Formula de Coeficiente de levantamiento. [45]

9. Se define la malla global.

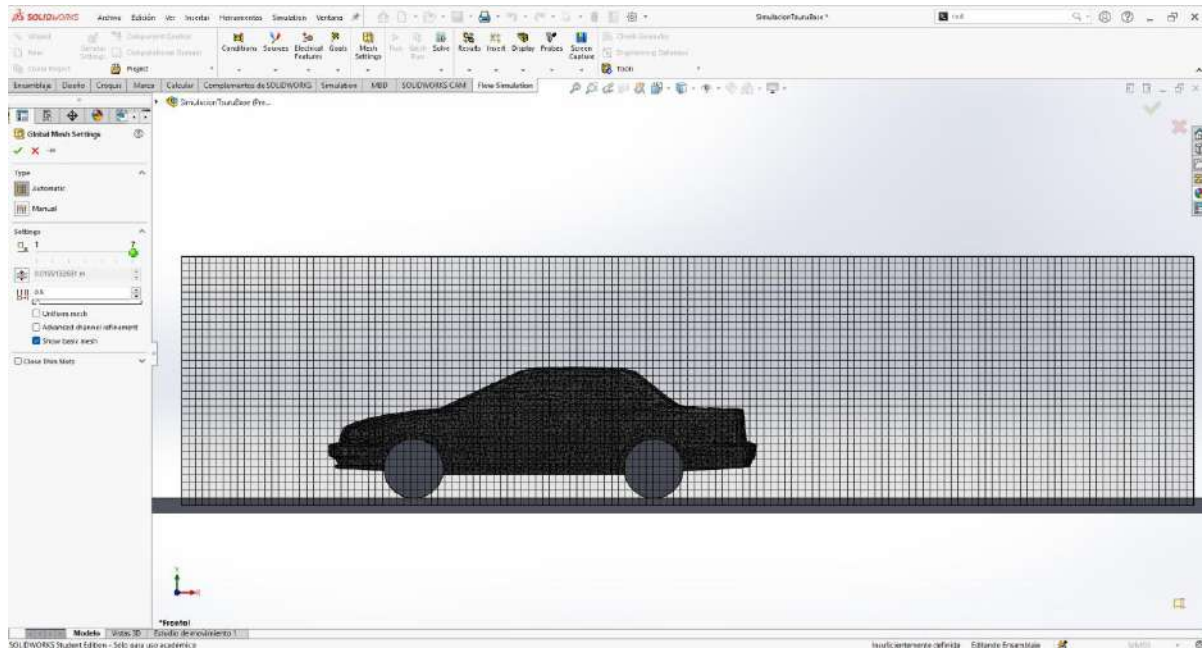


Figura 131: Noveno paso de simulación en Flow Simulation. [45]

10. Se visualiza la malla y se corrigen las áreas en rojo (Áreas peor definidas), se reparan la malla en las zonas donde se sabe que se tendrá mayor contacto el flujo de aire.

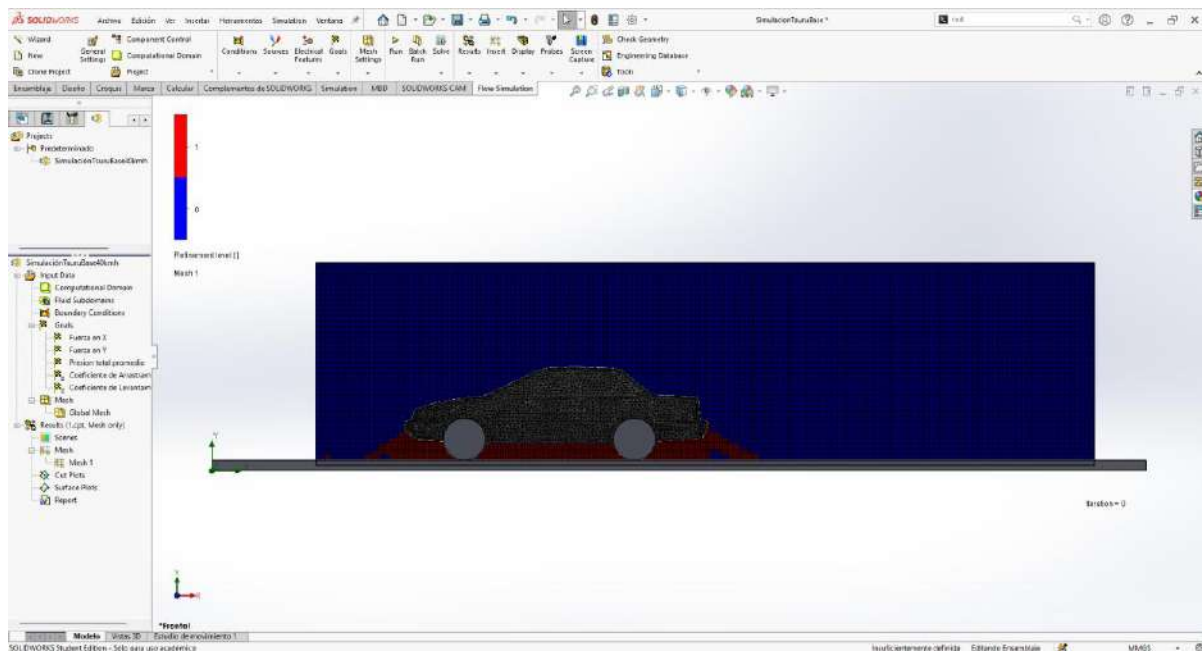


Figura 132: Décimo paso de simulación en Flow Simulation. [45]

11. Se refinan mallas en llantas, faros, defensa, parabrisas, y capó.

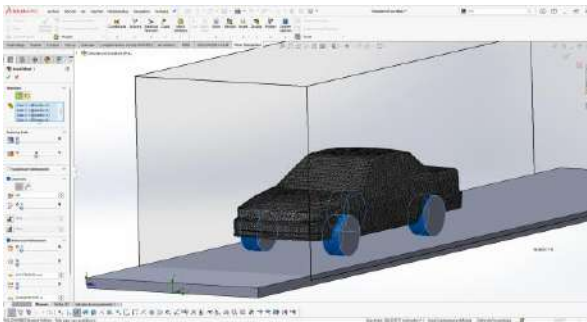


Figura 133: Onceavo paso de simulación en Flow Simulation, Refinamiento de malla de llantas. [45]

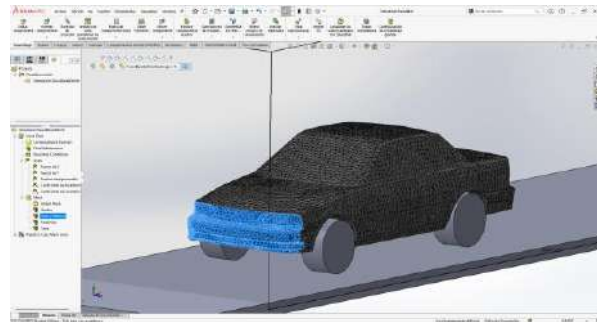


Figura 134: Onceavo paso de simulación en Flow Simulation, Refinamiento de faros y defensa. [45]

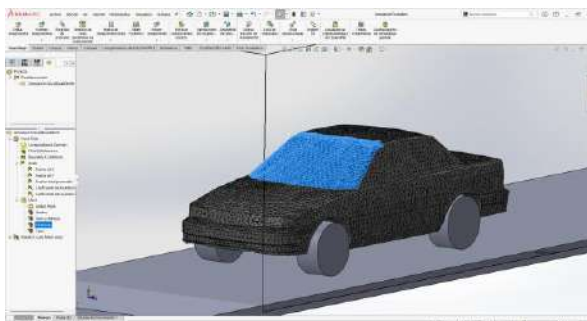


Figura 135: Onceavo paso de simulación en Flow Simulation, Refinamiento de parabrisas. [45]

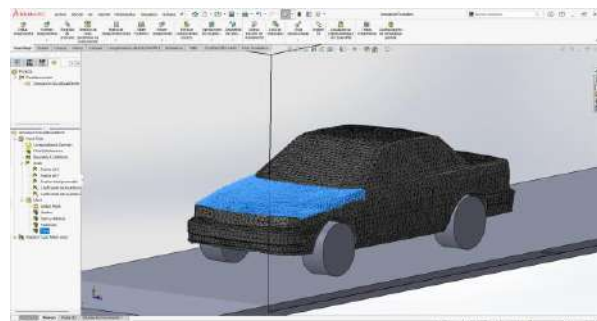


Figura 136: Onceavo paso de simulación en Flow Simulation, Refinamiento de capó. [45]

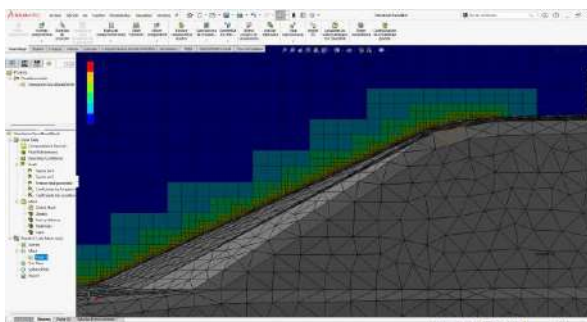


Figura 137: Onceavo paso de simulación en Flow Simulation, Mejora de malla en zona de parabrisas. [45]

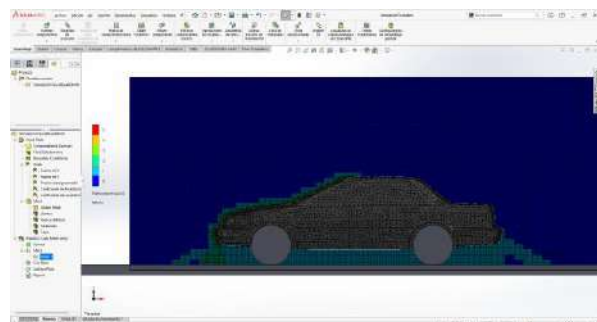


Figura 138: Onceavo paso de simulación en Flow Simulation, Mejora de malla carro en general. [45]

12. Se ejecuta la simulación y se esperan los resultados.

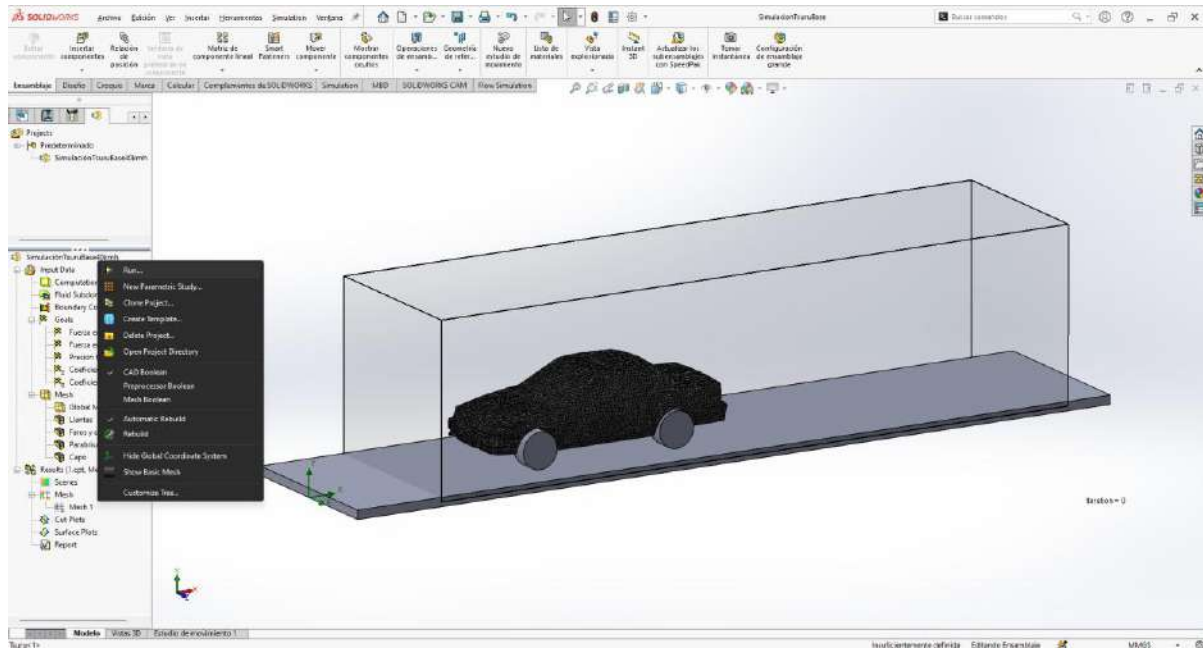


Figura 139: Doceavo paso de simulación en Flow Simulation. [45]

13. En la pantalla se observan los resultados y se recopila la información.

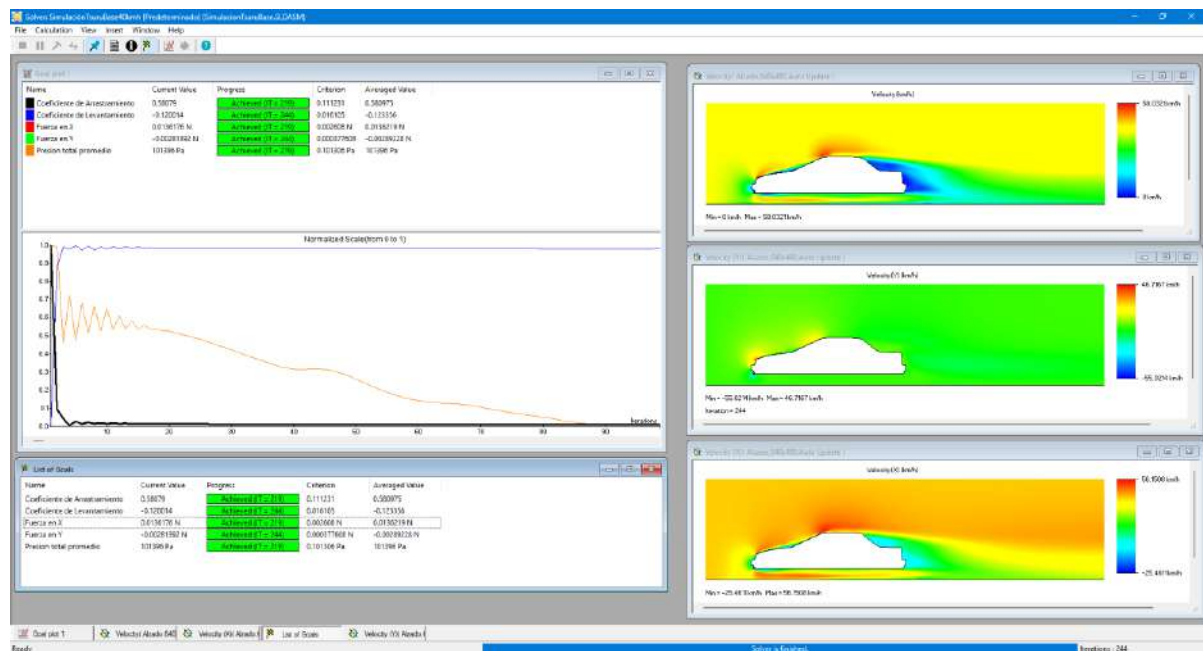


Figura 140: Treceavo paso de simulación en Flow Simulation. [45]

Anexo 5: Resultados de simulaciones en Flow Simulation en SolidWorks.

Resultados de segunda iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones.

- A 40 km/h.

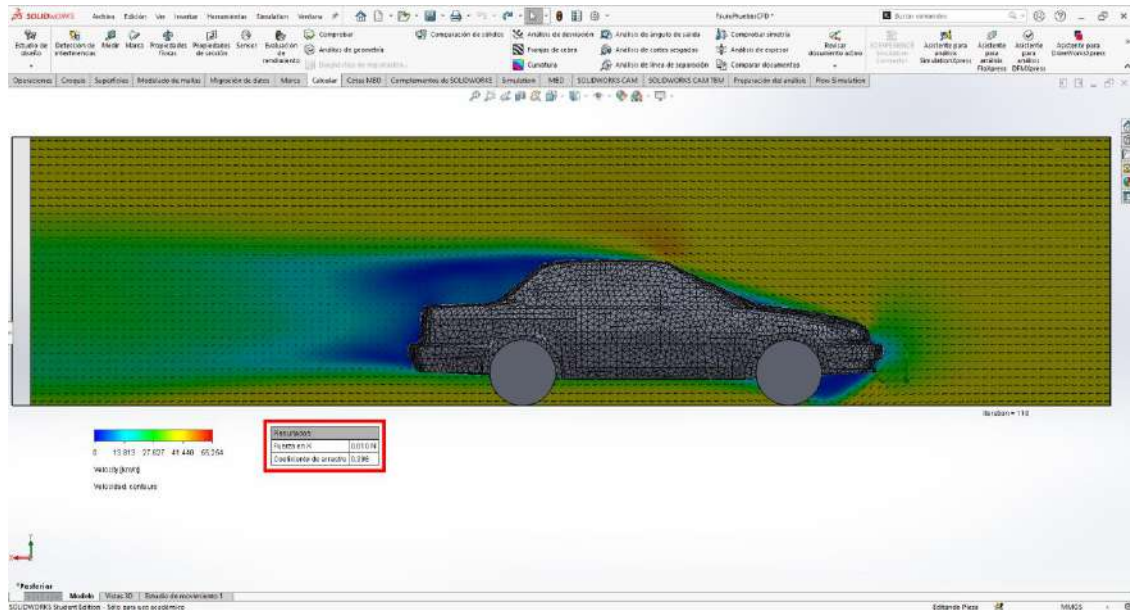


Figura 141: Gráfico de velocidad en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h. [45]

- A 60 km/h.

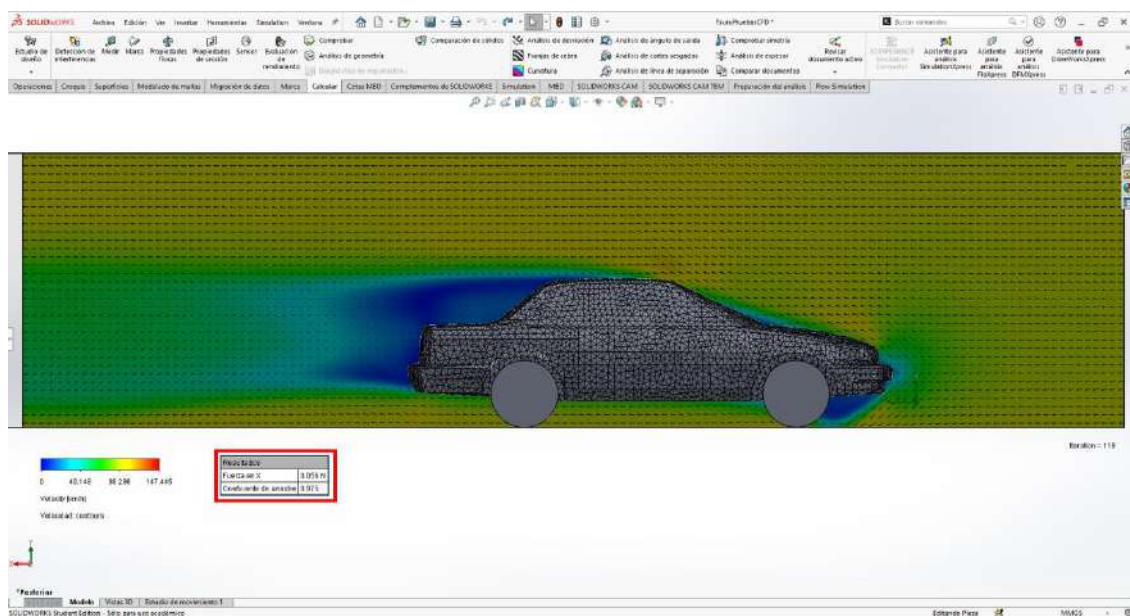


Figura 142: Gráfico de velocidad en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h. [45]

- A 100 km/h.

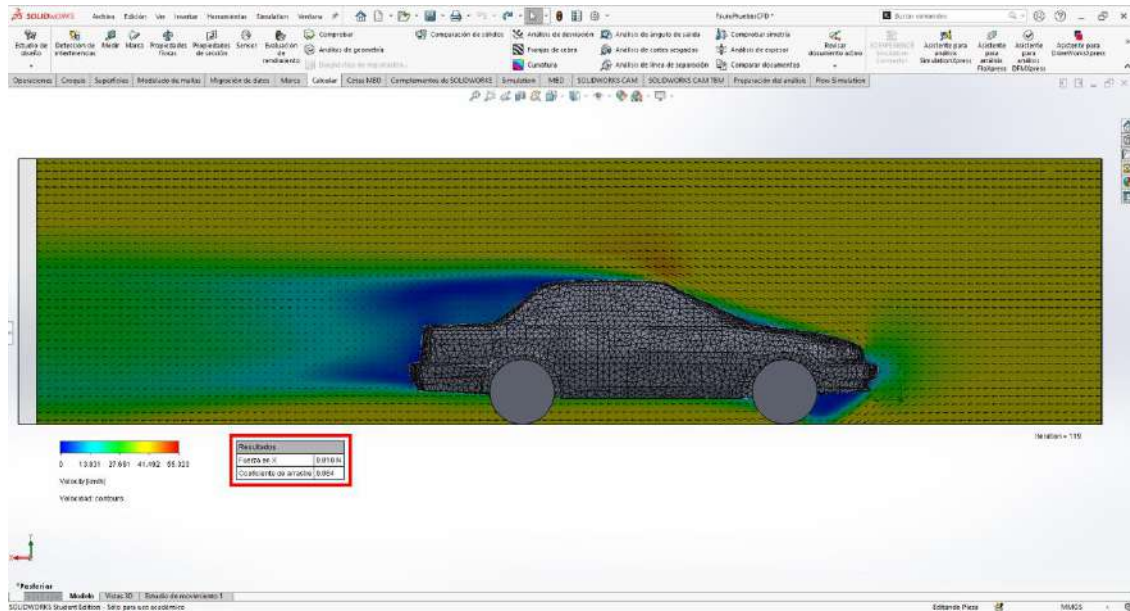


Figura 143: Gráfico de velocidad en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h. [45]

- Gráfico de presión a 40 km/h.

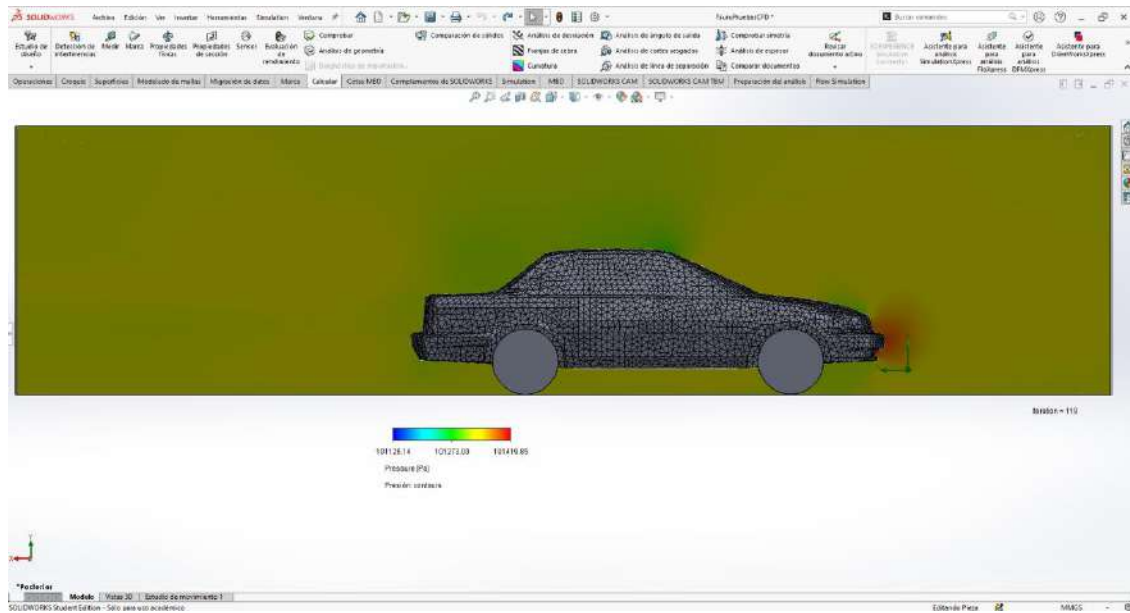


Figura 144: Gráfico de presión en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h. [45]

Resultados de tercera iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones.

- A 40 km/h.

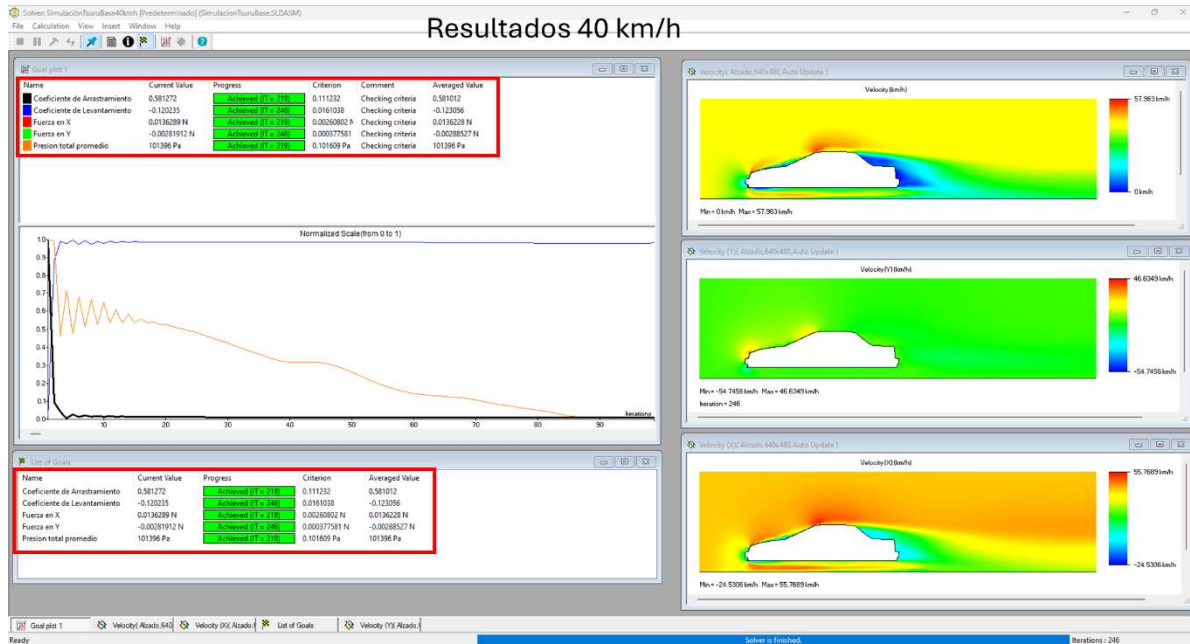


Figura 145: Lista de resultados de metas establecidas en tercera iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

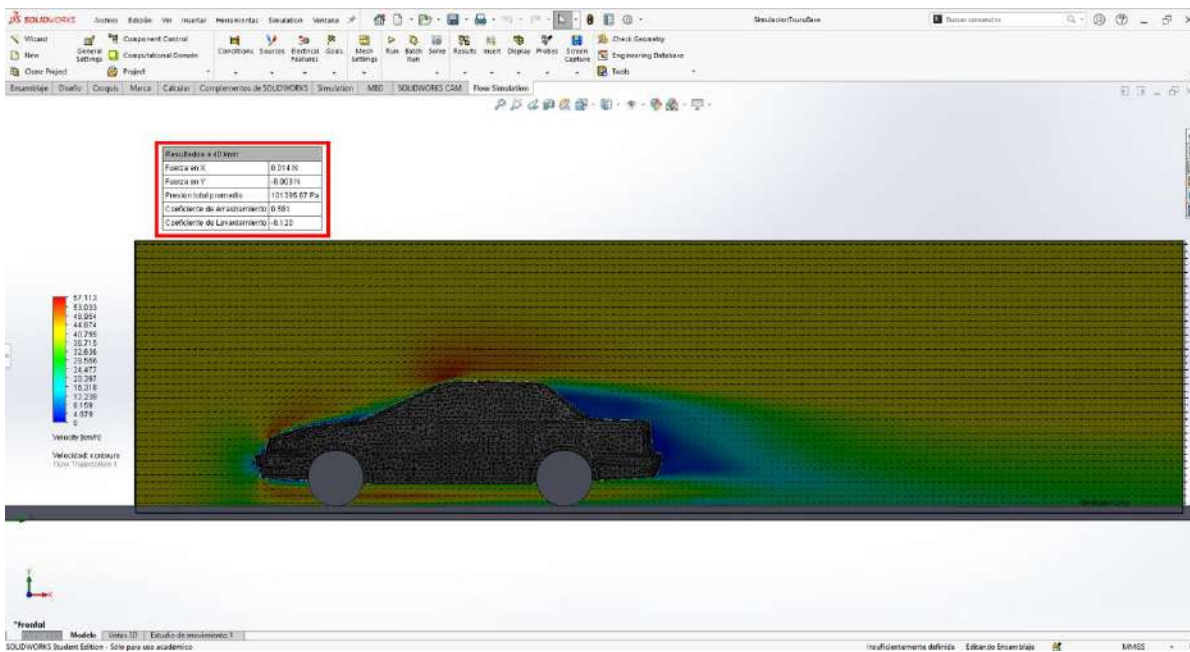


Figura 146: Gráfico de velocidad en tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h. [45]

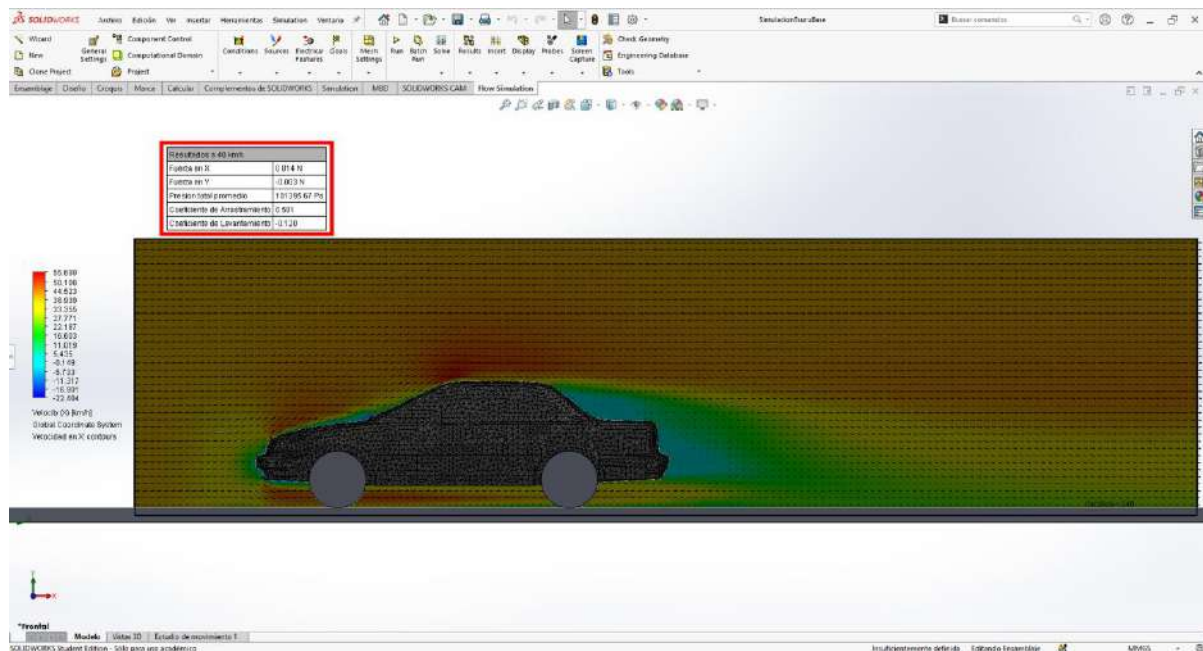


Figura 147: Gráfico de velocidad en X en tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h. [45]

- A 60 km/h.

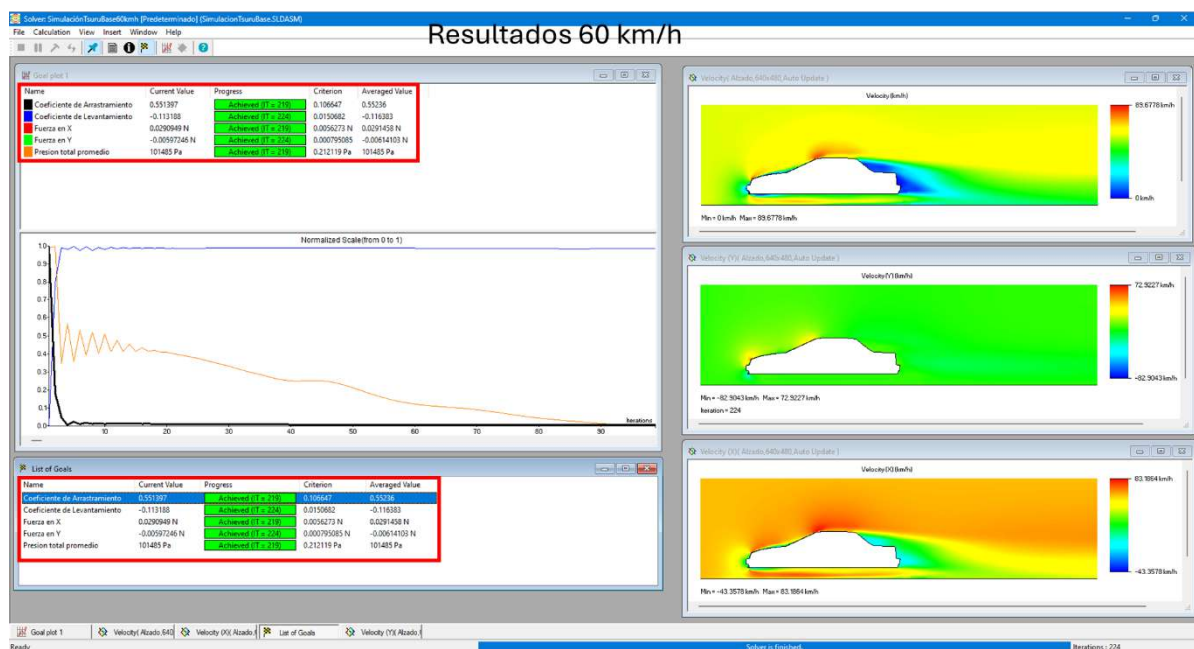


Figura 148: Lista de resultados de metas establecidas en tercera iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

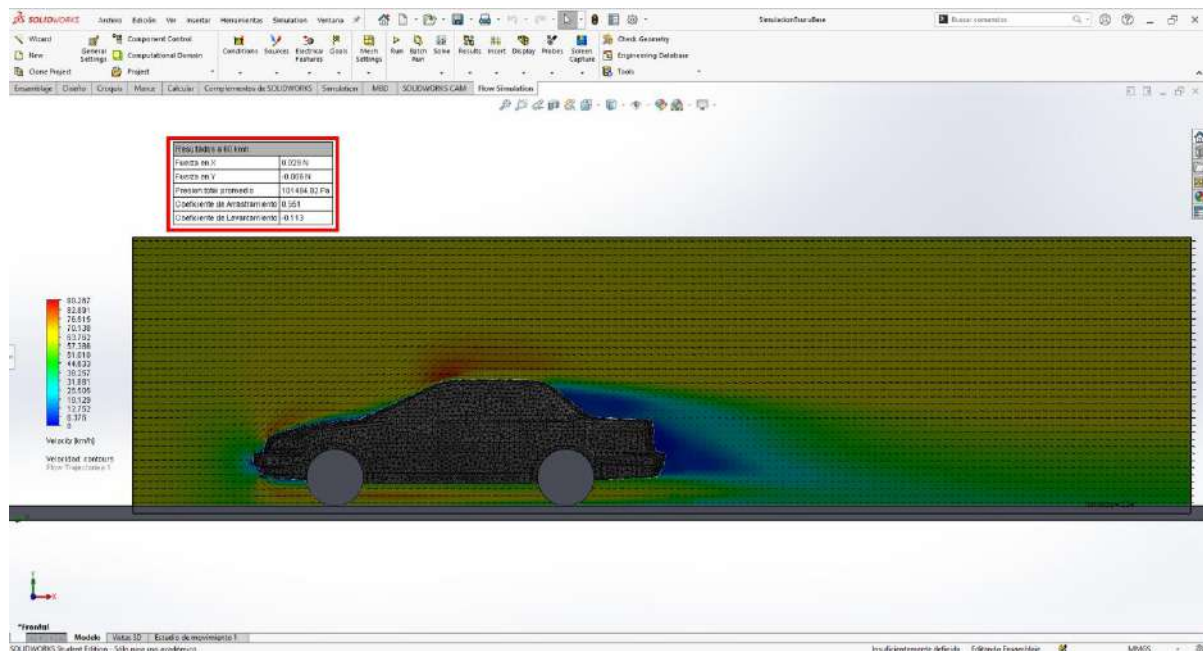


Figura 149: Gráfico de velocidad en tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h. [45]

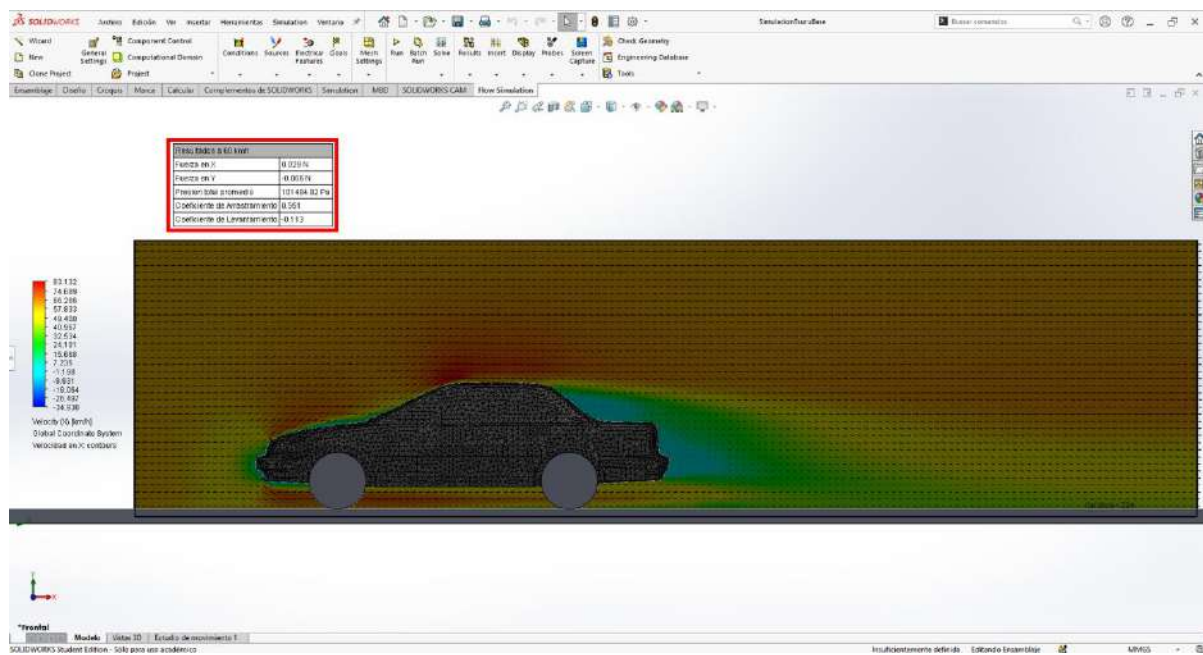


Figura 150: Gráfico de velocidad en X en tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h. [45]

- A 100 km/h.

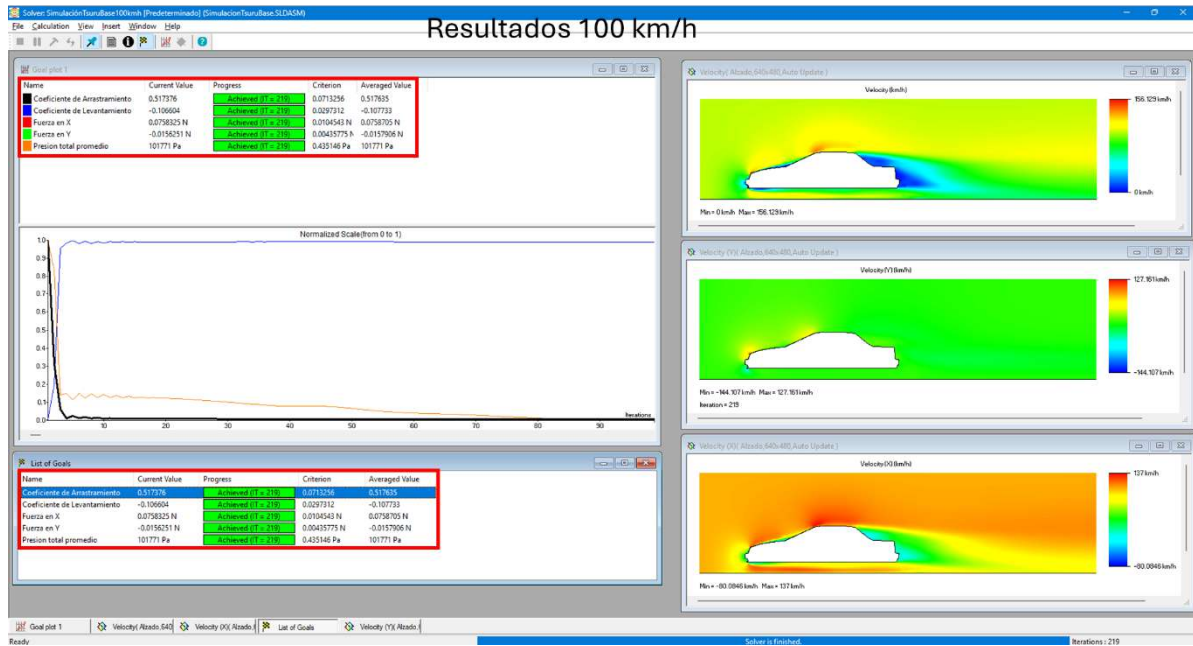


Figura 151: Lista de resultados de metas establecidas en tercera iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

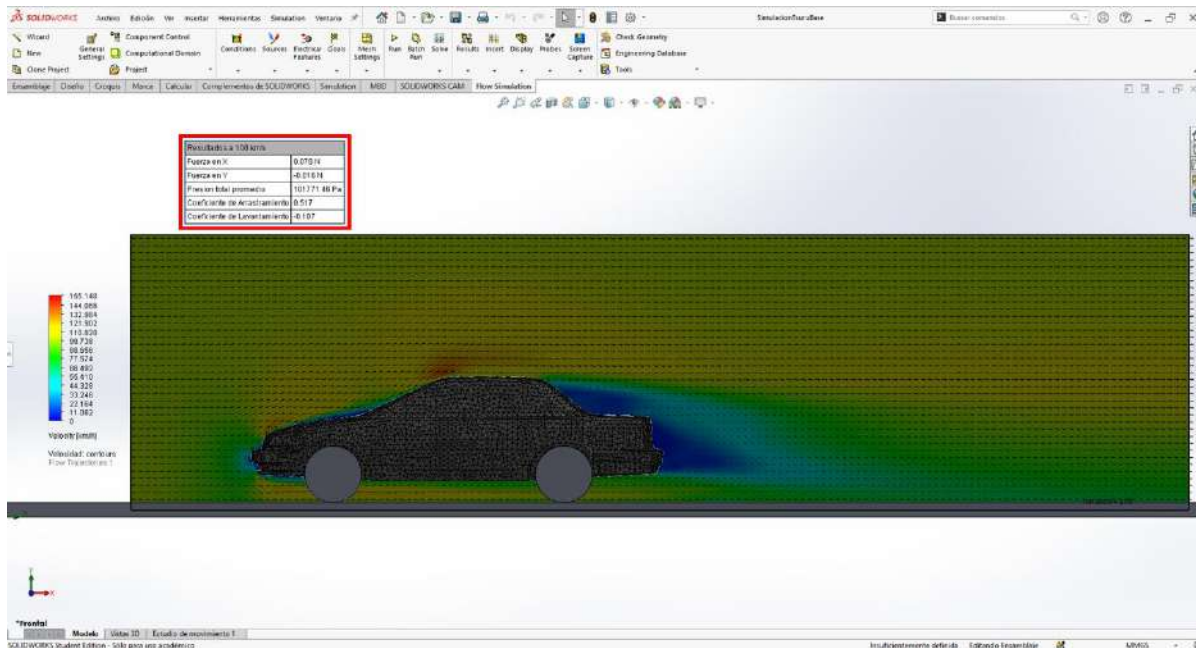


Figura 152: Gráfico de velocidad en tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h. [45]

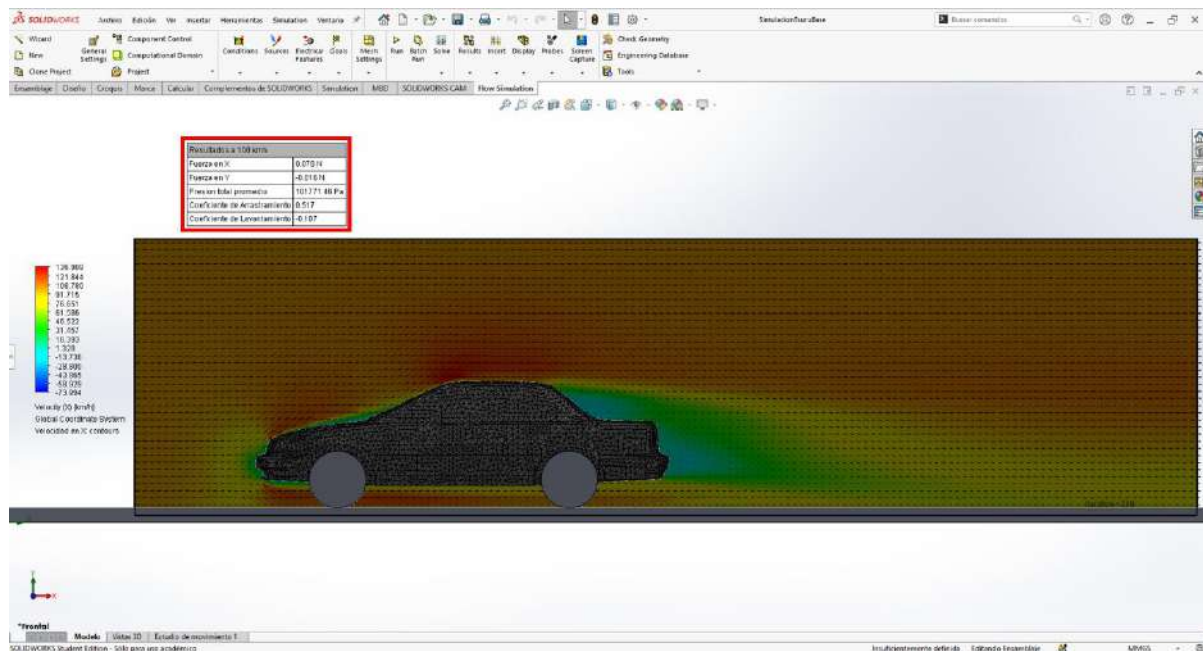


Figura 153: Gráfico de velocidad en X en tercera iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h. [45]

Resultados de cuarta iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones.

- A 40 km/h.

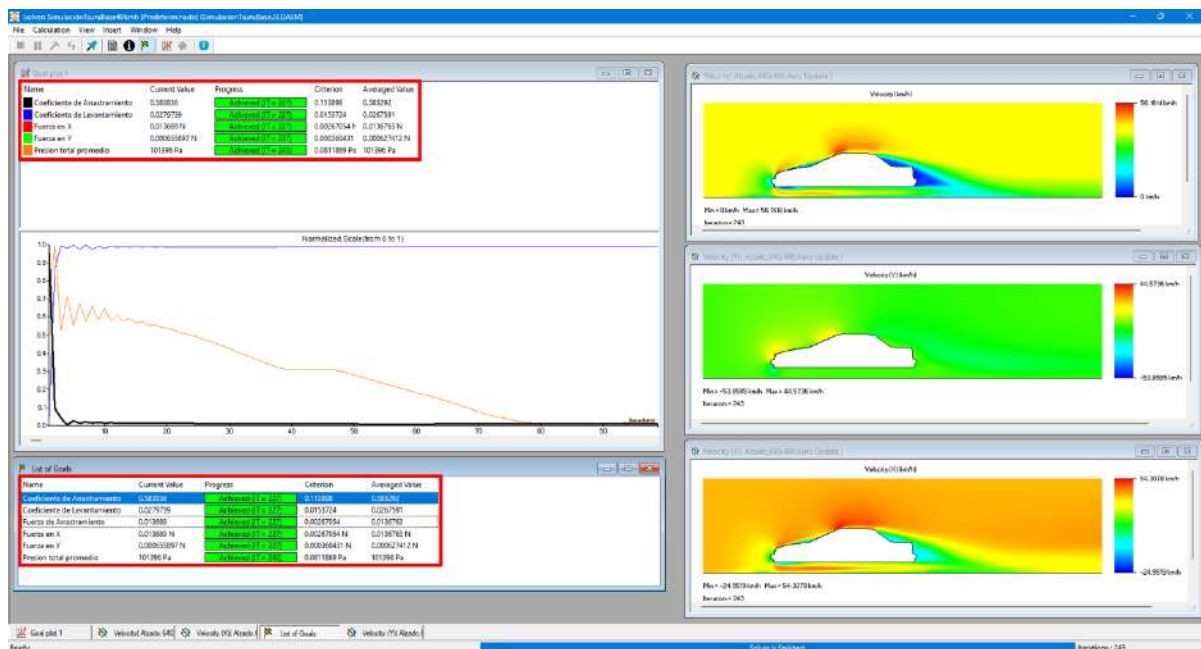


Figura 154: Lista de resultados de metas establecidas en cuarta iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

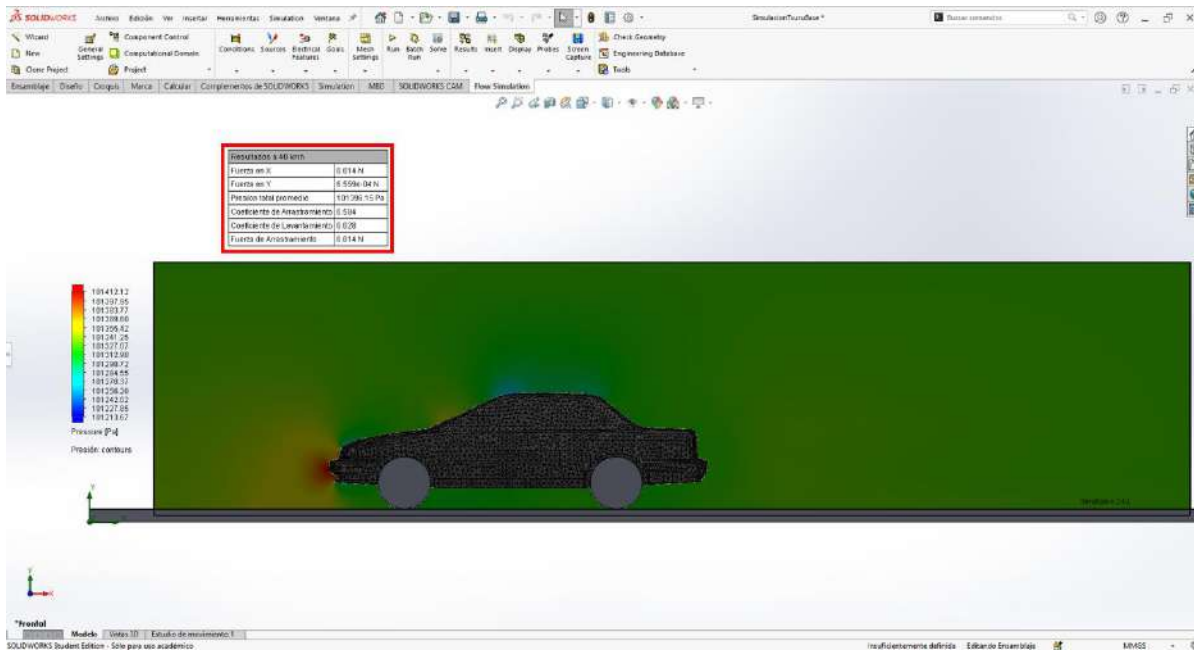


Figura 157: Gráfico de presión en cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 40 km/h. [45]

- A 60 km/h.

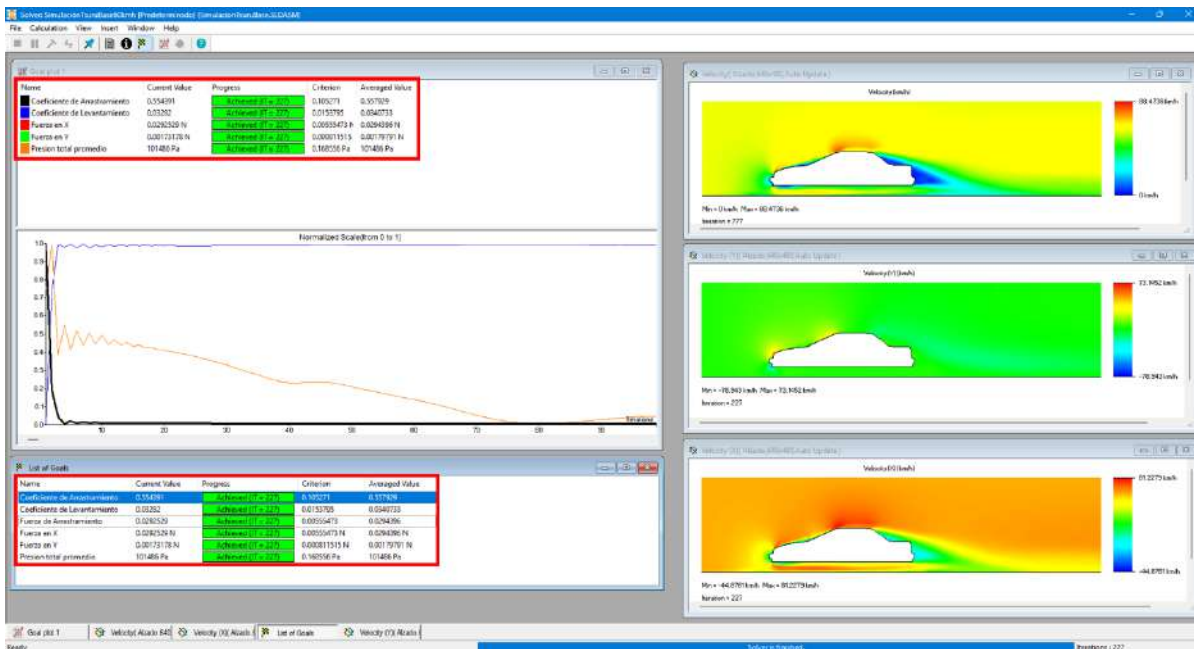


Figura 158: Lista de resultados de metas establecidas en cuarta iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

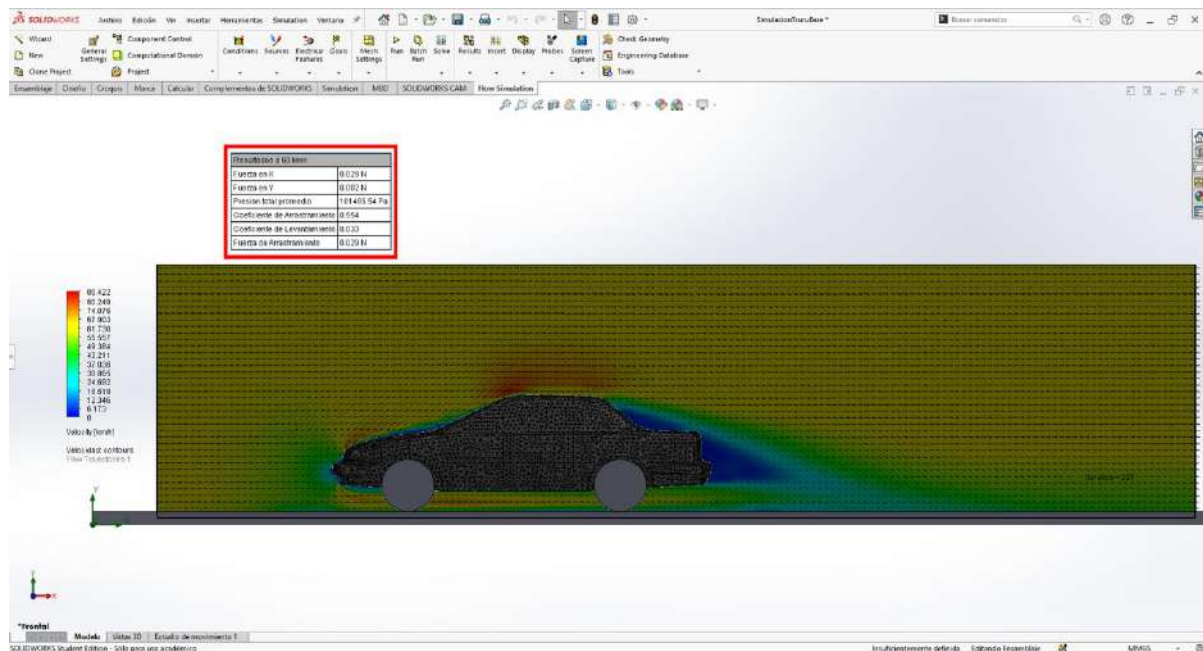


Figura 159: Gráfico de velocidad en cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h. [45]

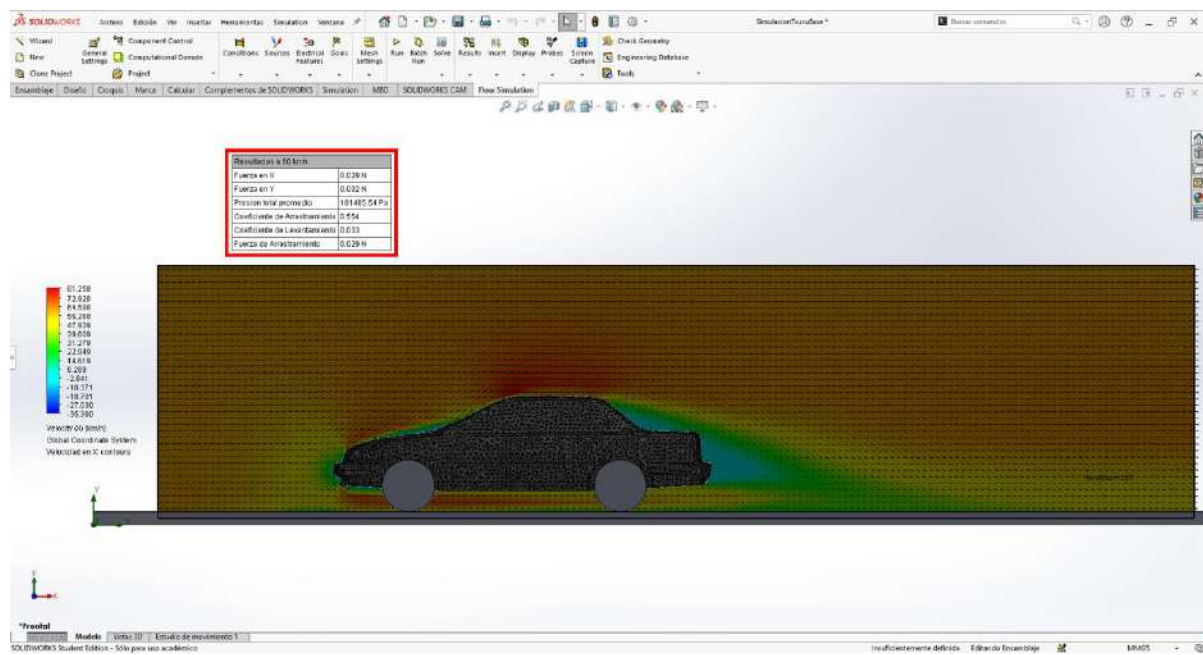


Figura 160: Gráfico de velocidad en X en cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h. [45]

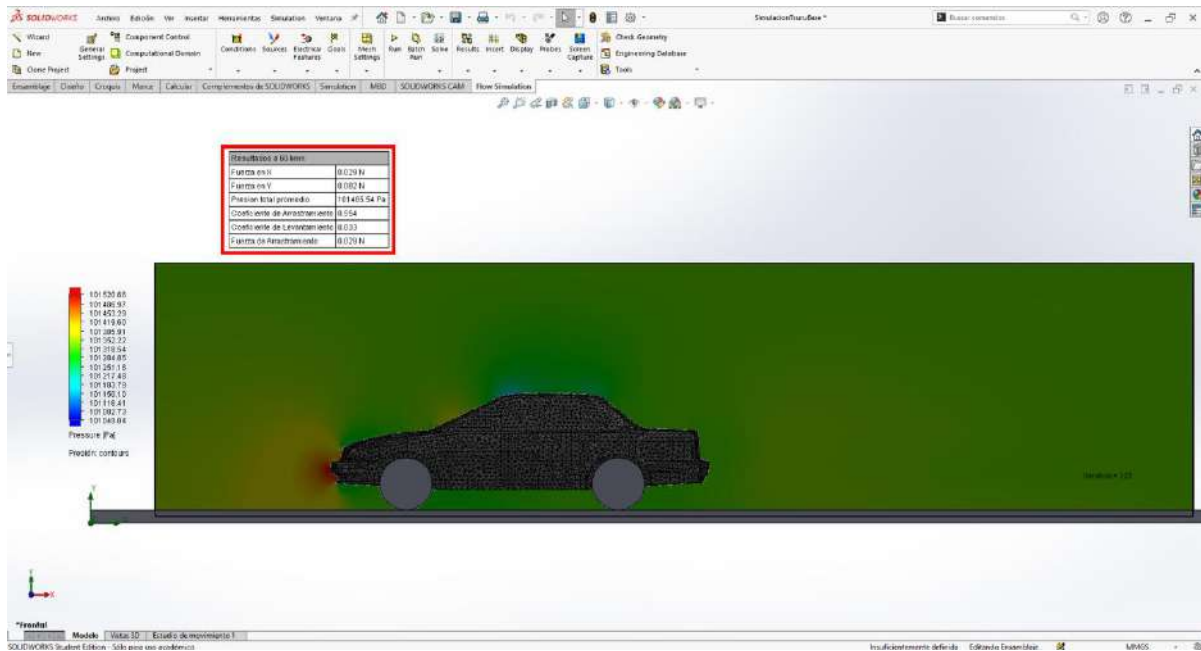


Figura 161: Gráfico de presión en cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 60 km/h. [45]

- A 100 km/h.

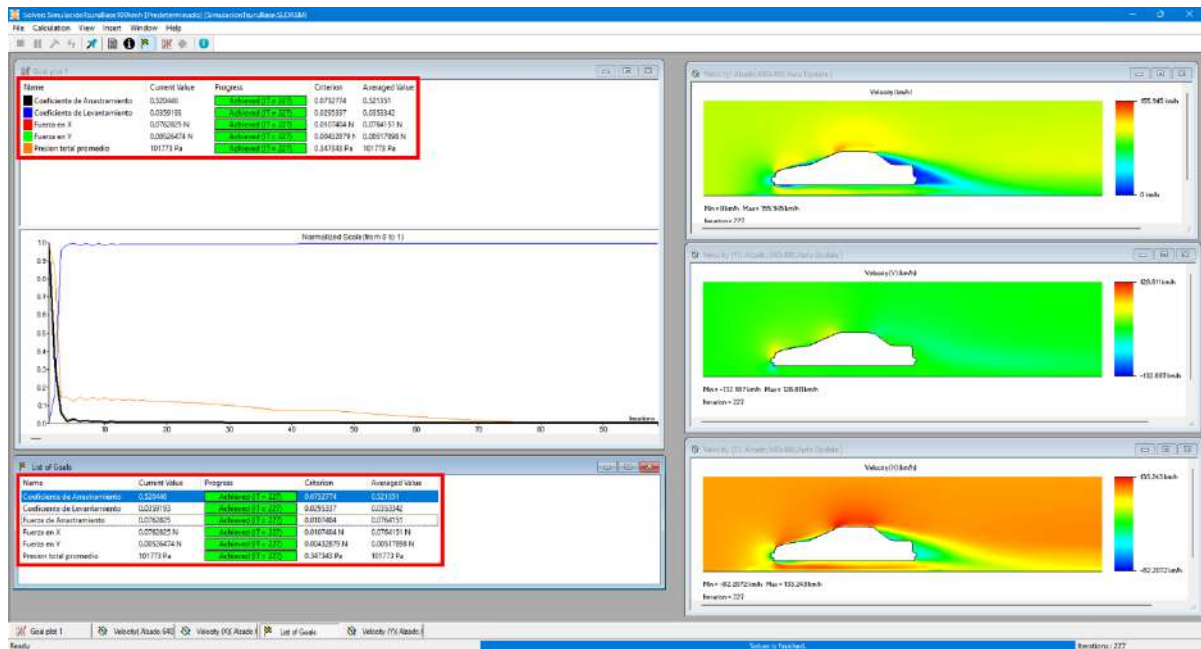


Figura 162: Lista de resultados de metas establecidas en cuarta iteración de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

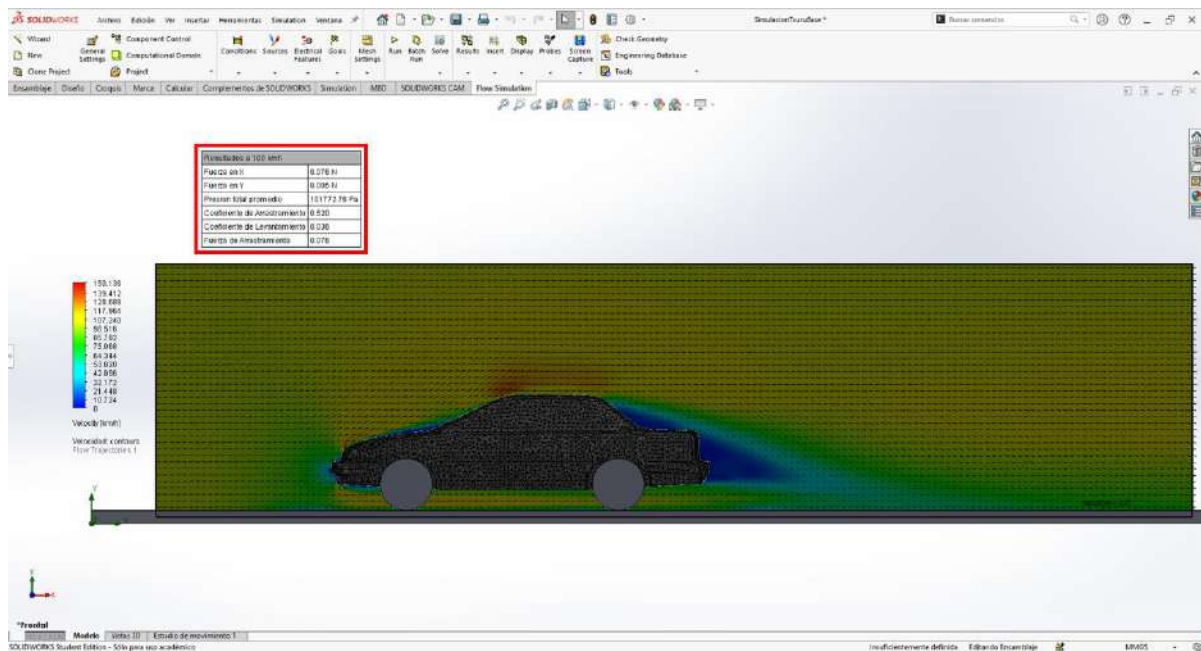


Figura 163: Gráfico de velocidad en cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h. [45]

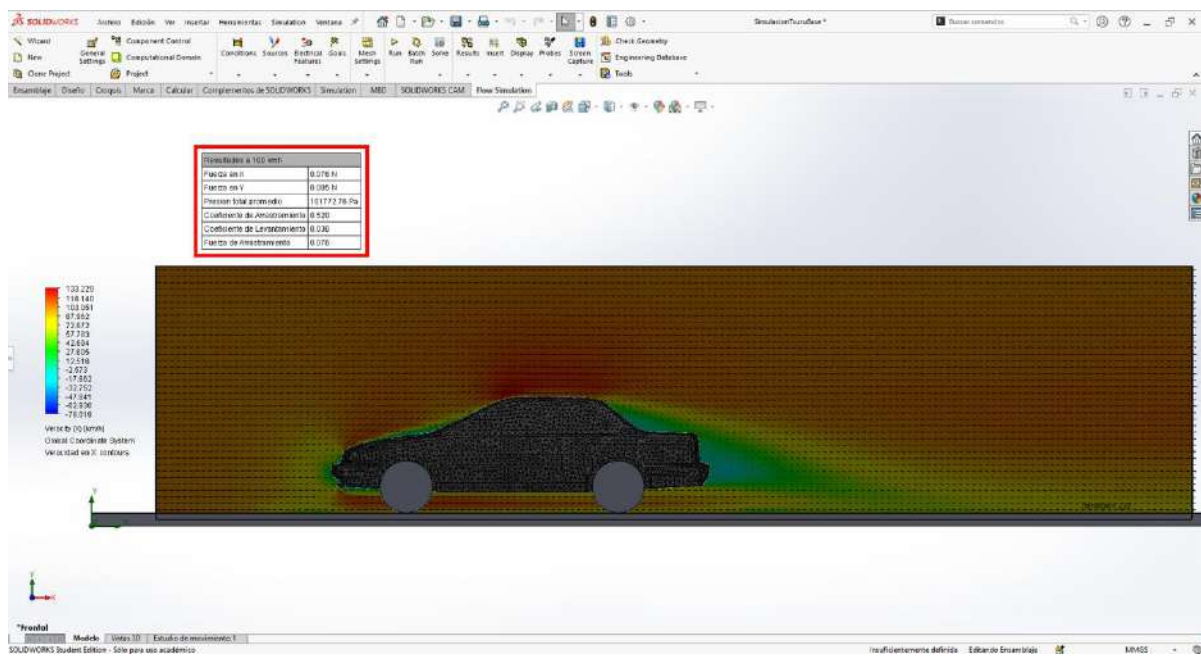
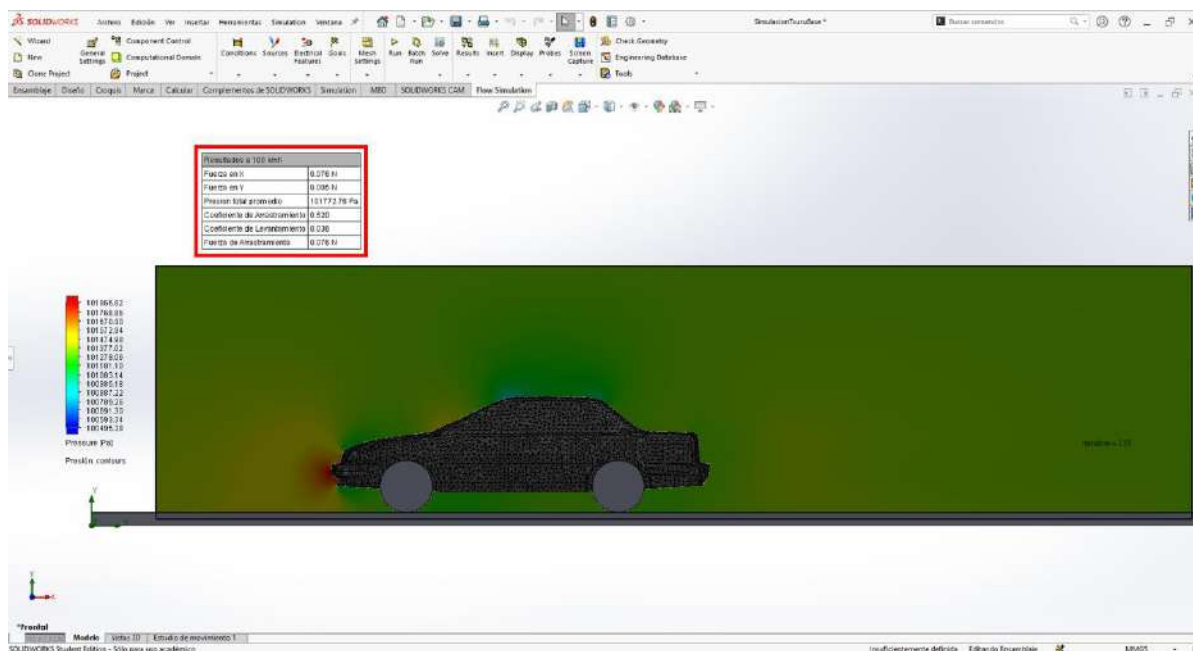
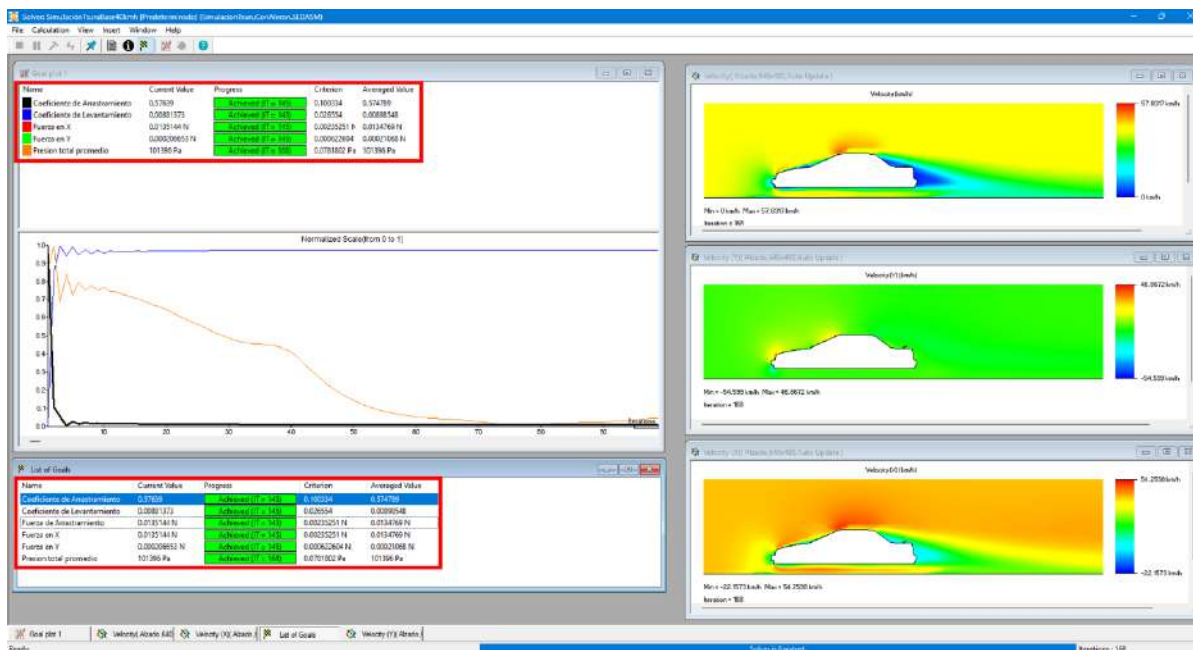


Figura 164: Gráfico de velocidad en X en cuarta iteración de simulación de Nissan Tsuru sin modificaciones a 100 km/h. [45]



Resultados de primera iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado.

- A 40 km/h.



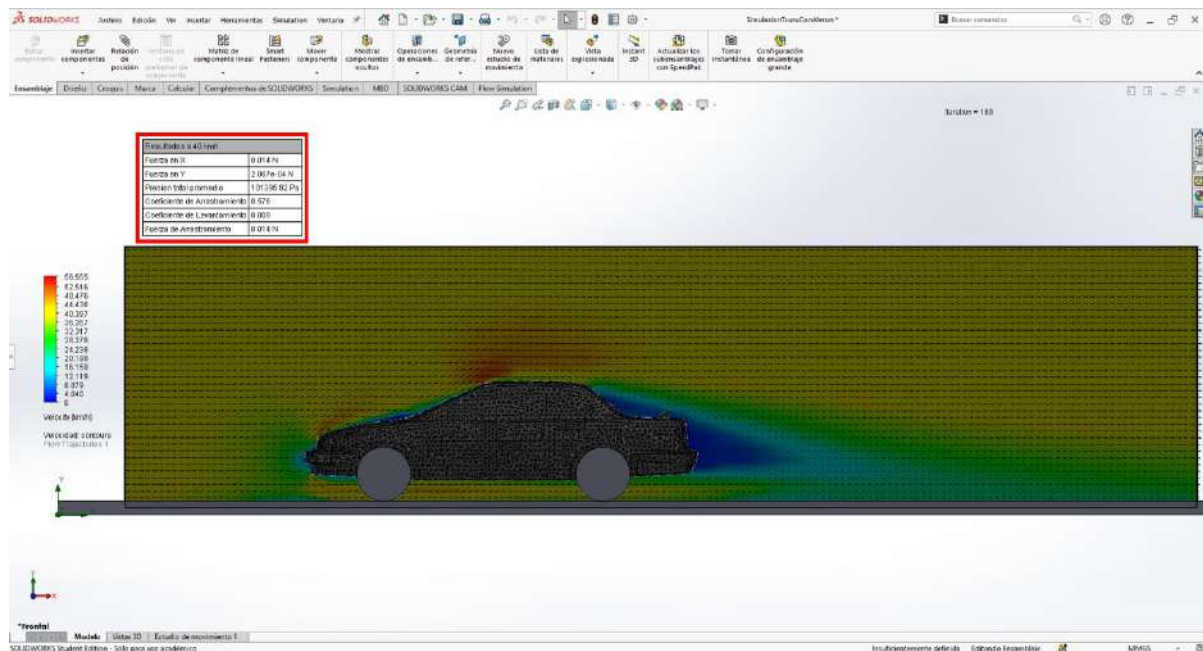


Figura 167: Gráfico de velocidad en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 40 km/h. [45]

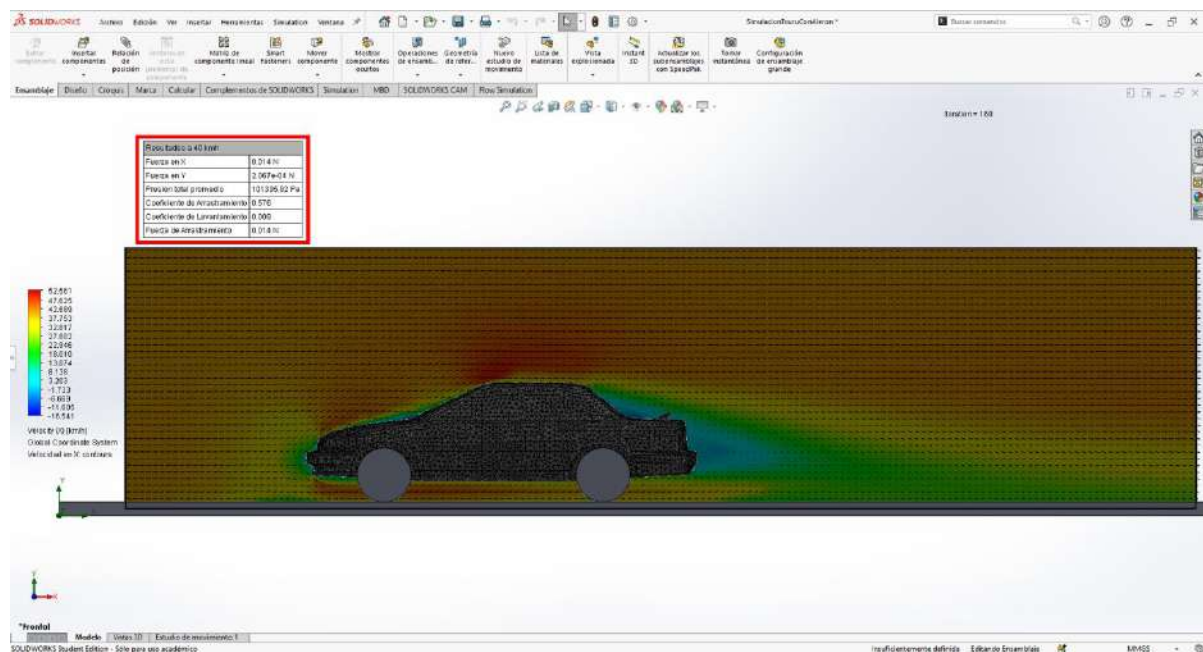


Figura 168: Gráfico de velocidad en X en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 40 km/h. [45]

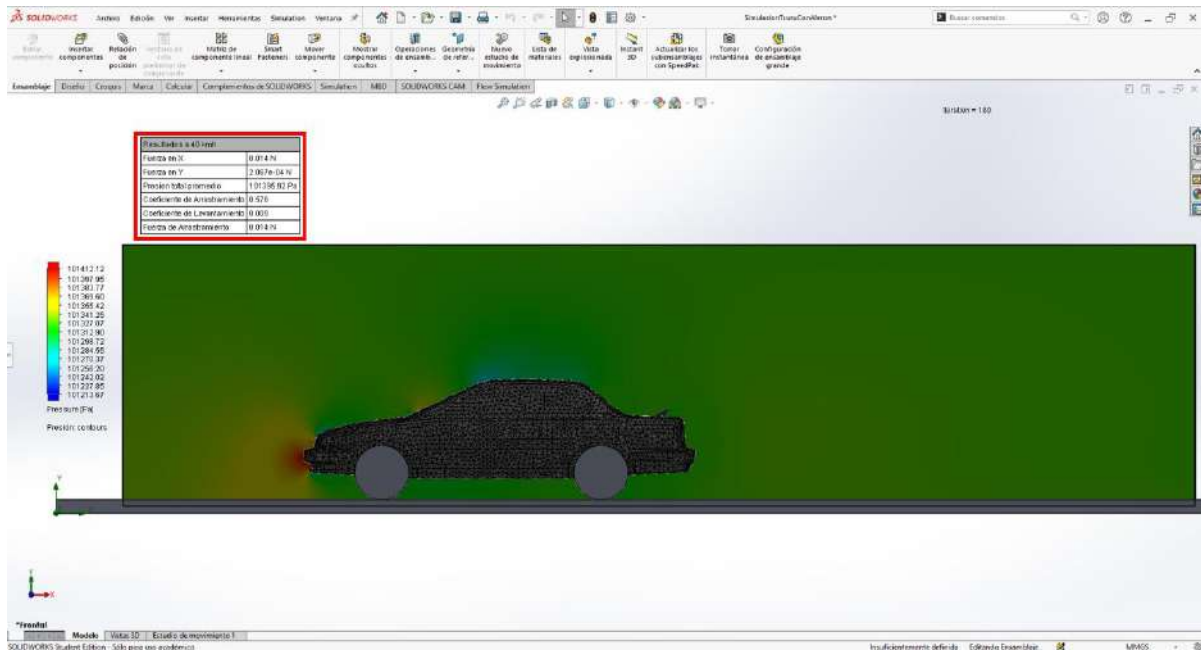


Figura 169: Gráfico de presión en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 40 km/h. [45]

- A 60 km/h.

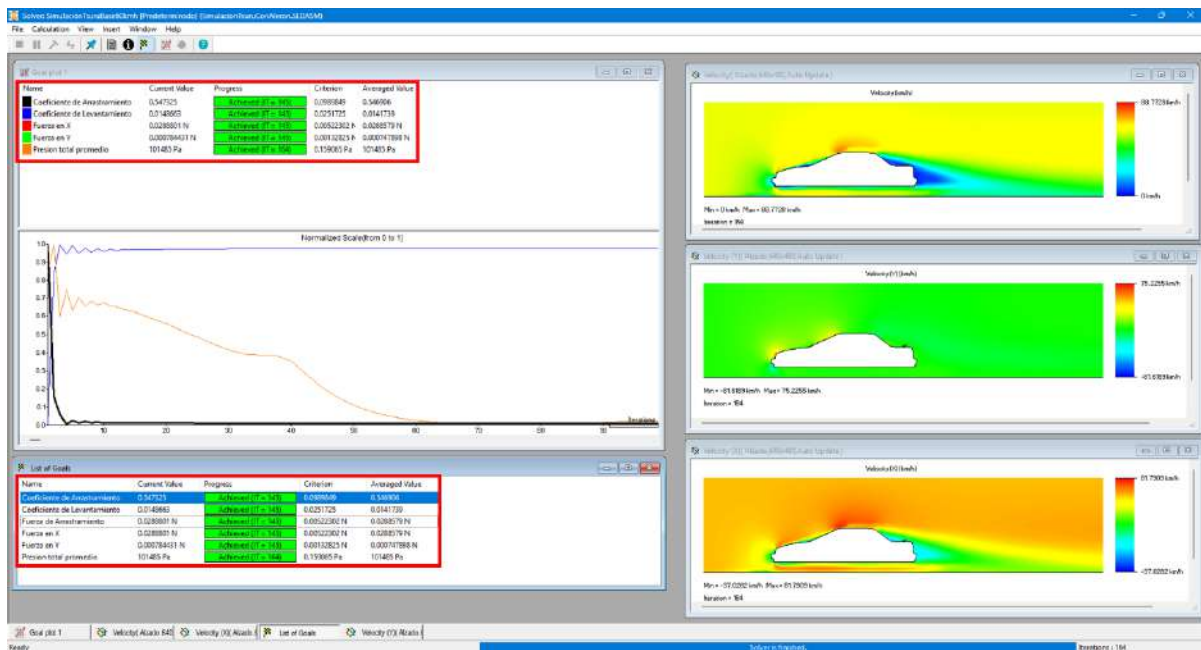


Figura 170: Lista de resultados de metas establecidas en primera iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado a 60 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

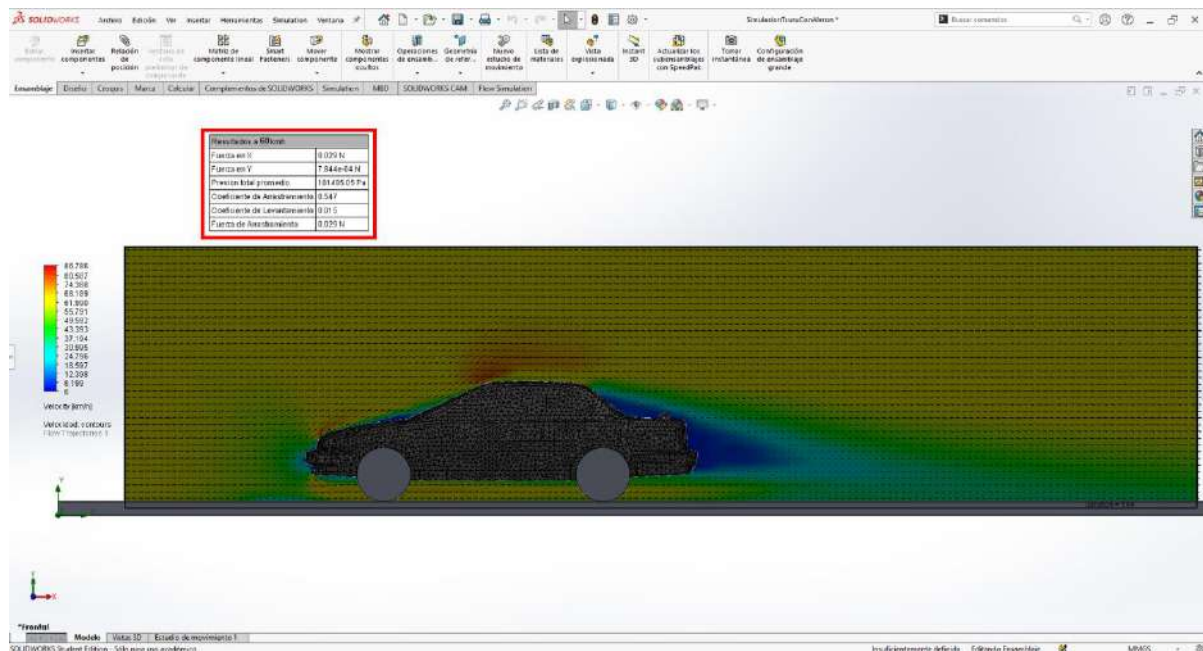


Figura 171: Gráfico de velocidad en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 60 km/h. [45]

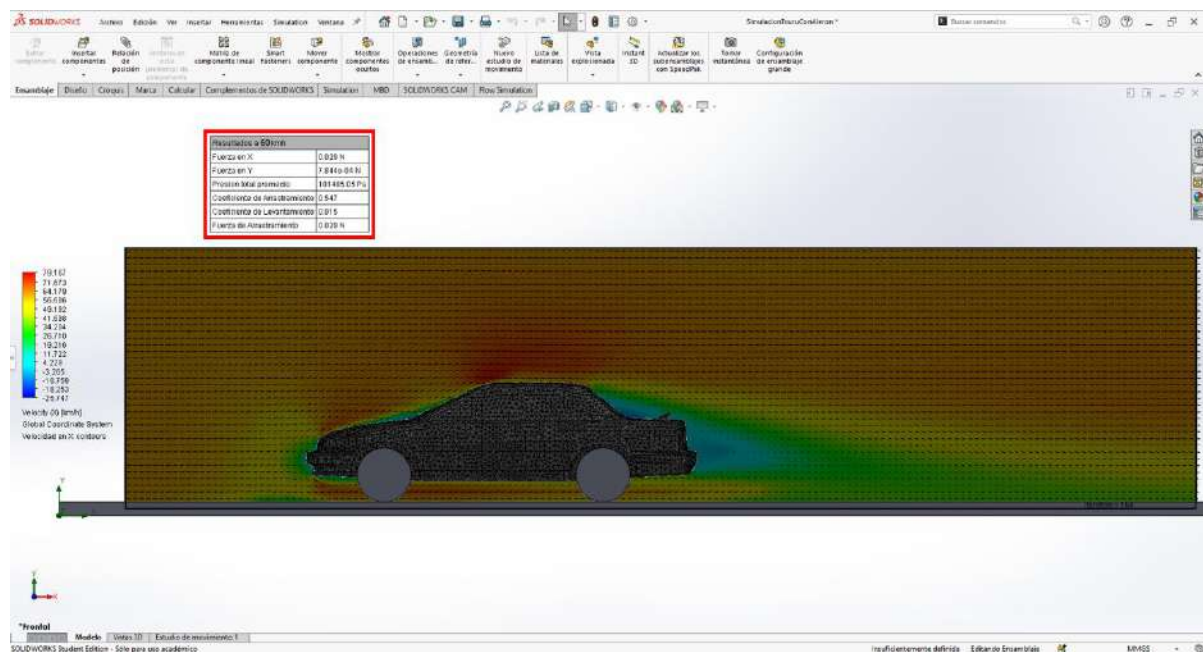


Figura 172: Gráfico de velocidad en X en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 60 km/h. [45]

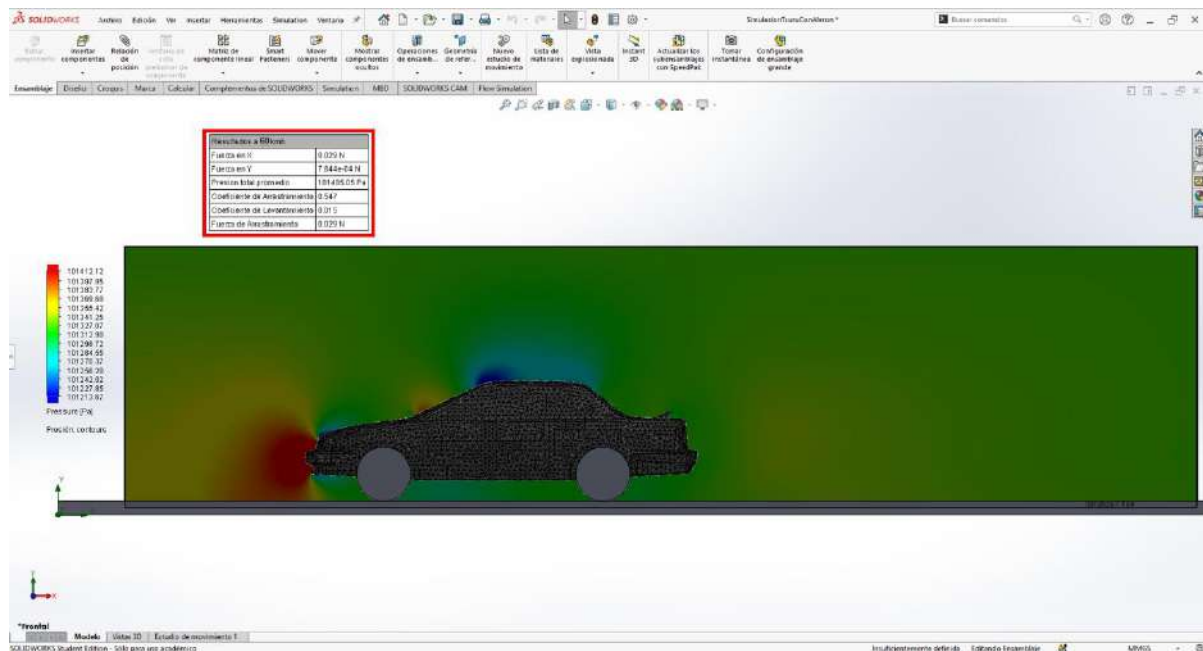


Figura 173: Gráfico de presión en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 60 km/h. [45]

- A 100 km/h.

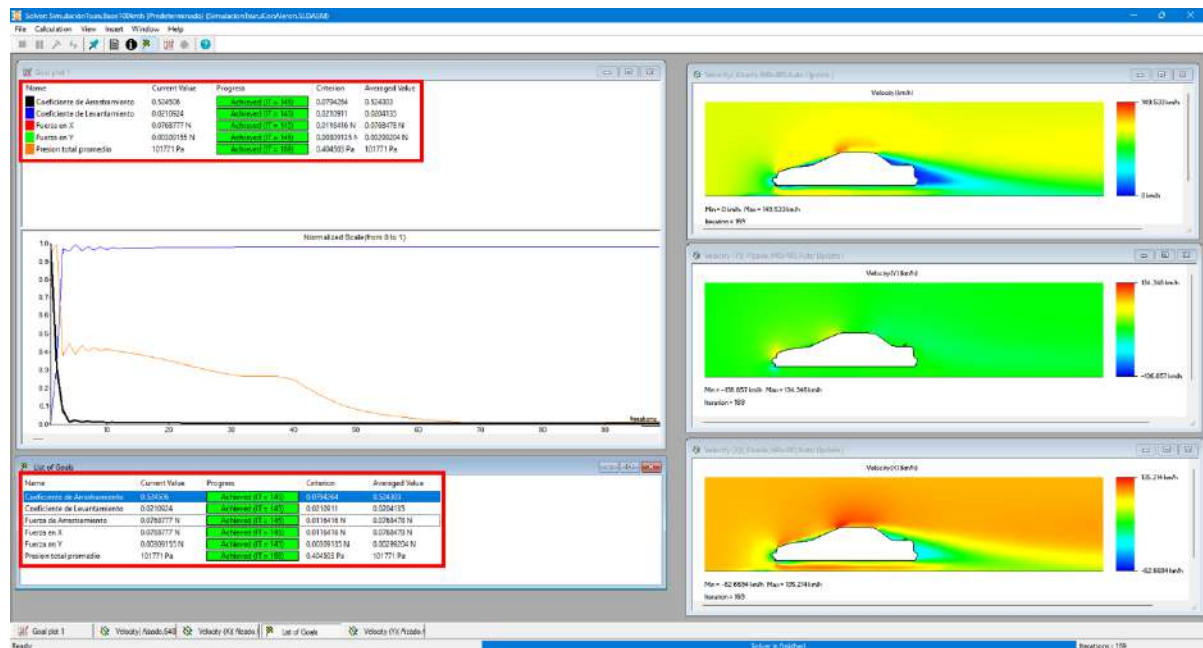


Figura 174: Lista de resultados de metas establecidas en primera iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado a 100 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

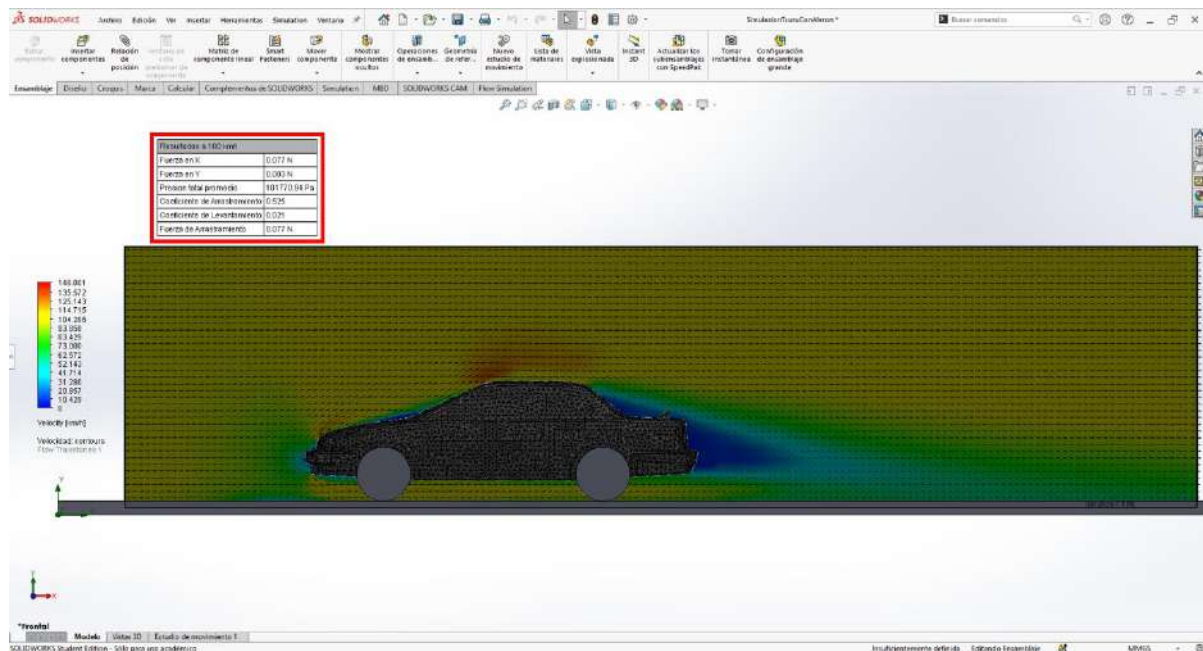


Figura 175: Gráfico de velocidad en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 100 km/h. [45]

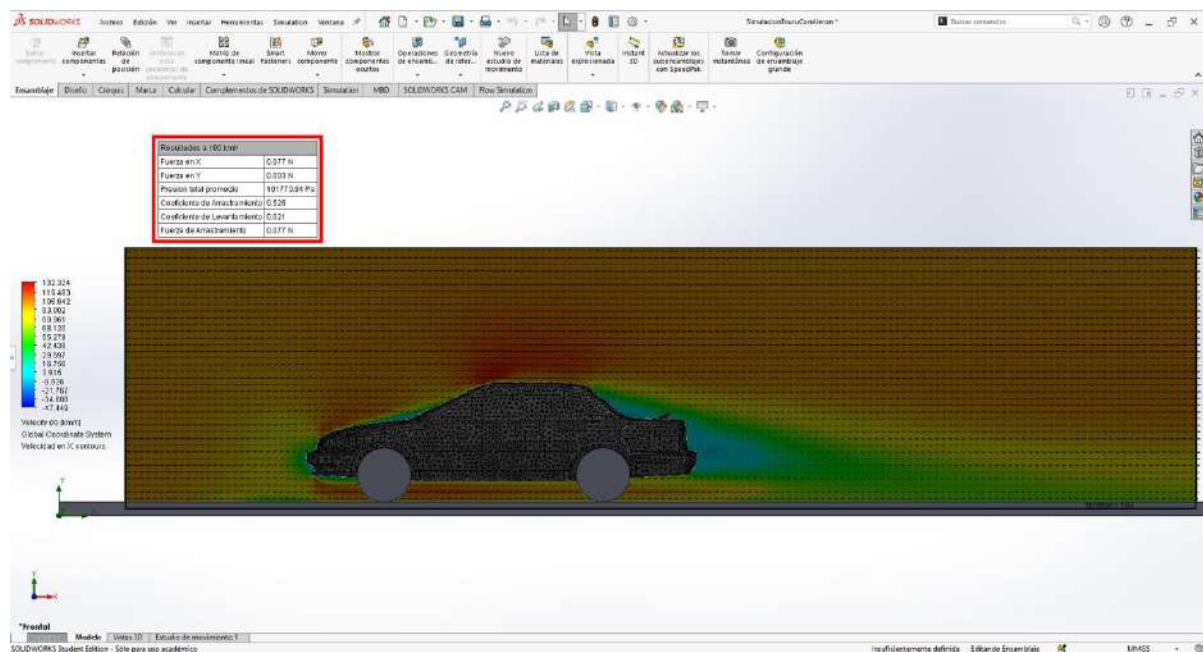


Figura 176: Gráfico de velocidad en X en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 100 km/h. [45]

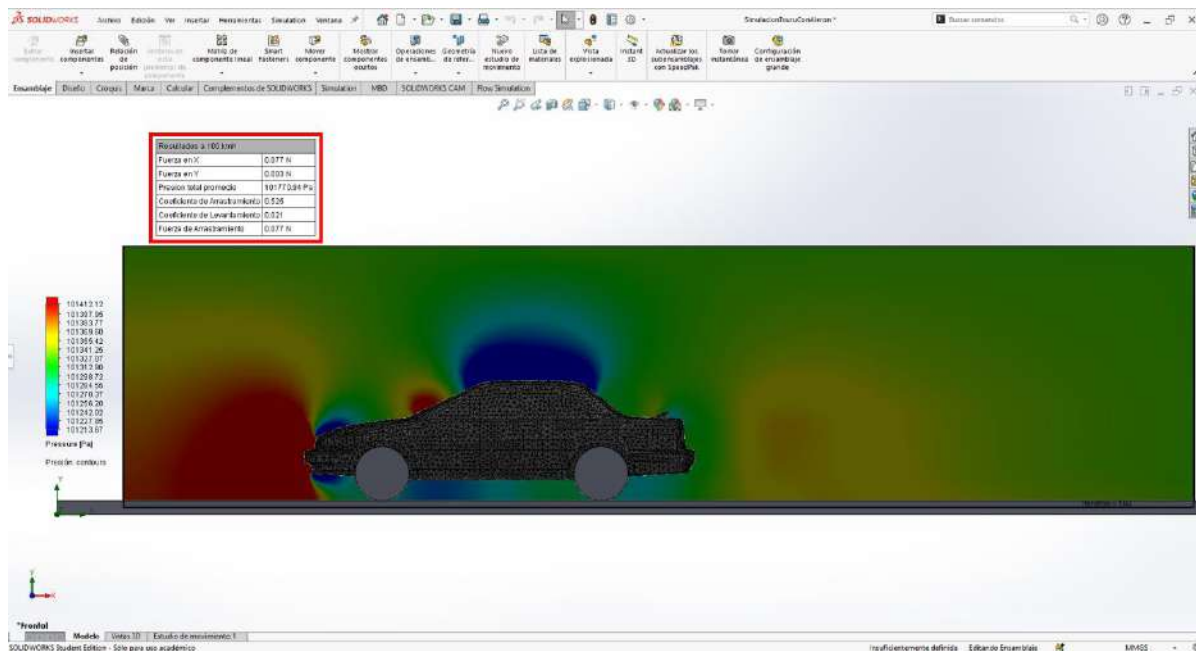


Figura 177: Gráfico de presión en primera iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 100 km/h. [45]

Resultados de segunda iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado.

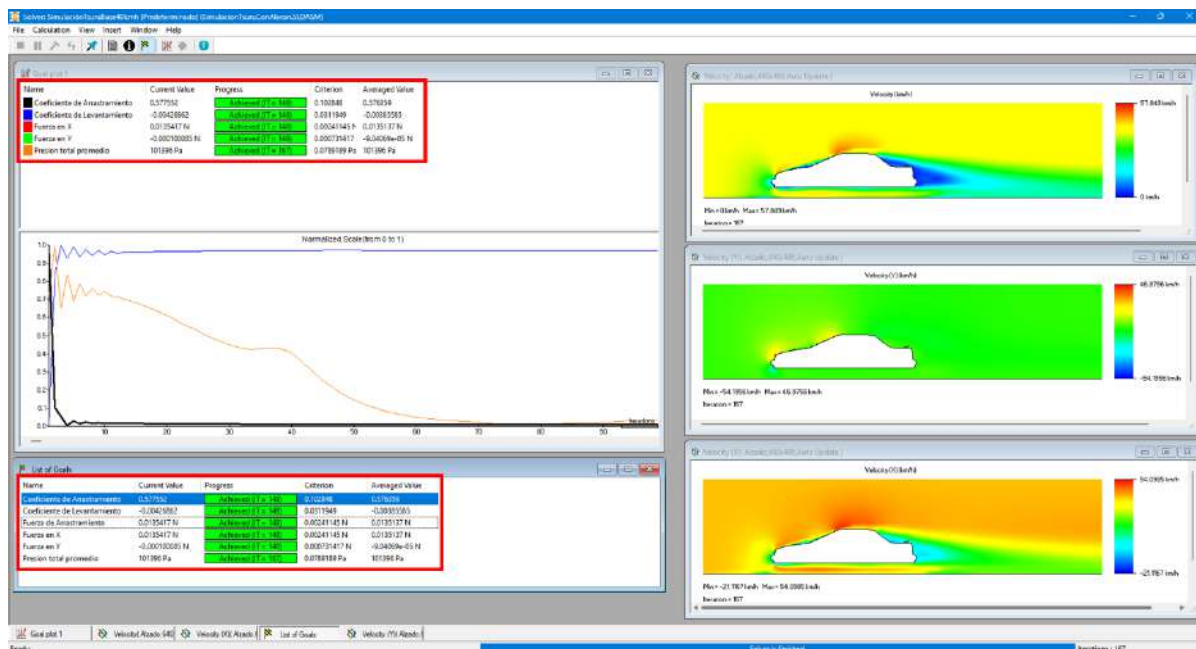


Figura 178: Lista de resultados de metas establecidas en segunda iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado a 40 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

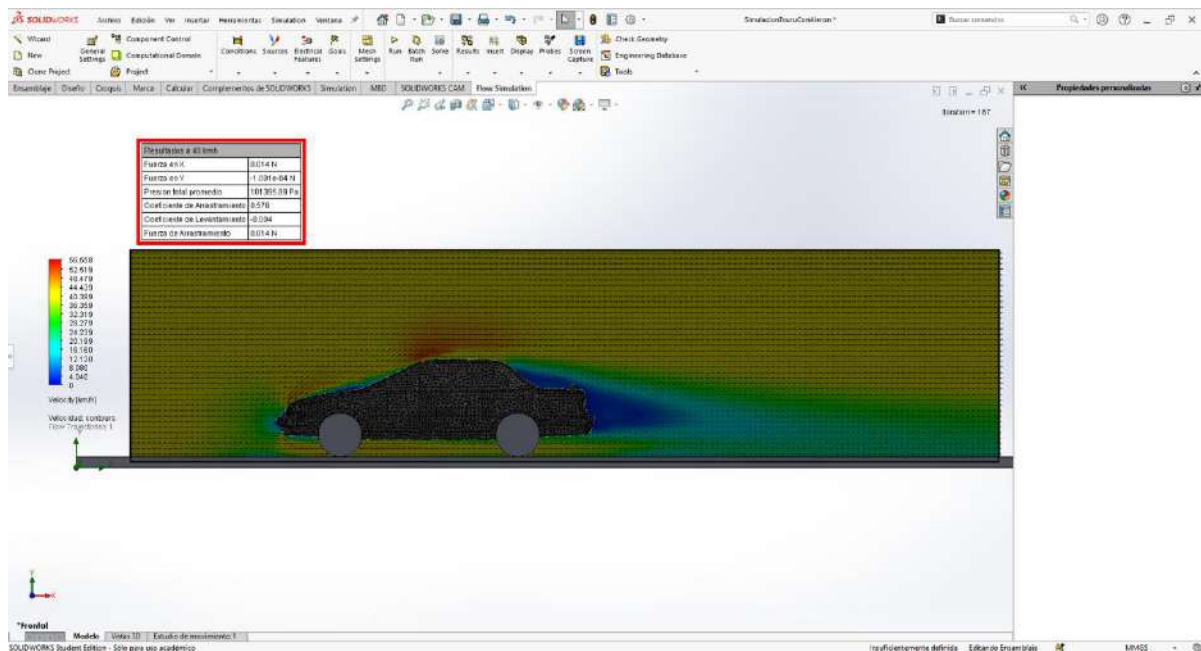


Figura 179: Gráfico de velocidad en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 40 km/h. [45]

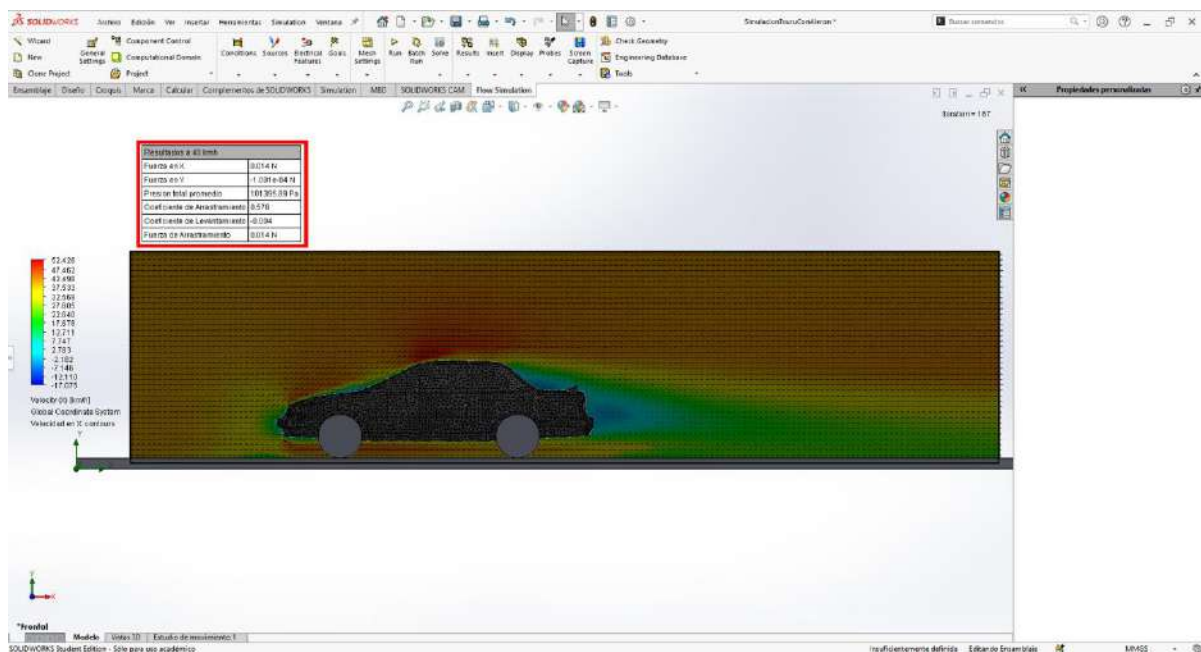


Figura 180: Gráfico de velocidad en X en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 40 km/h. [45]

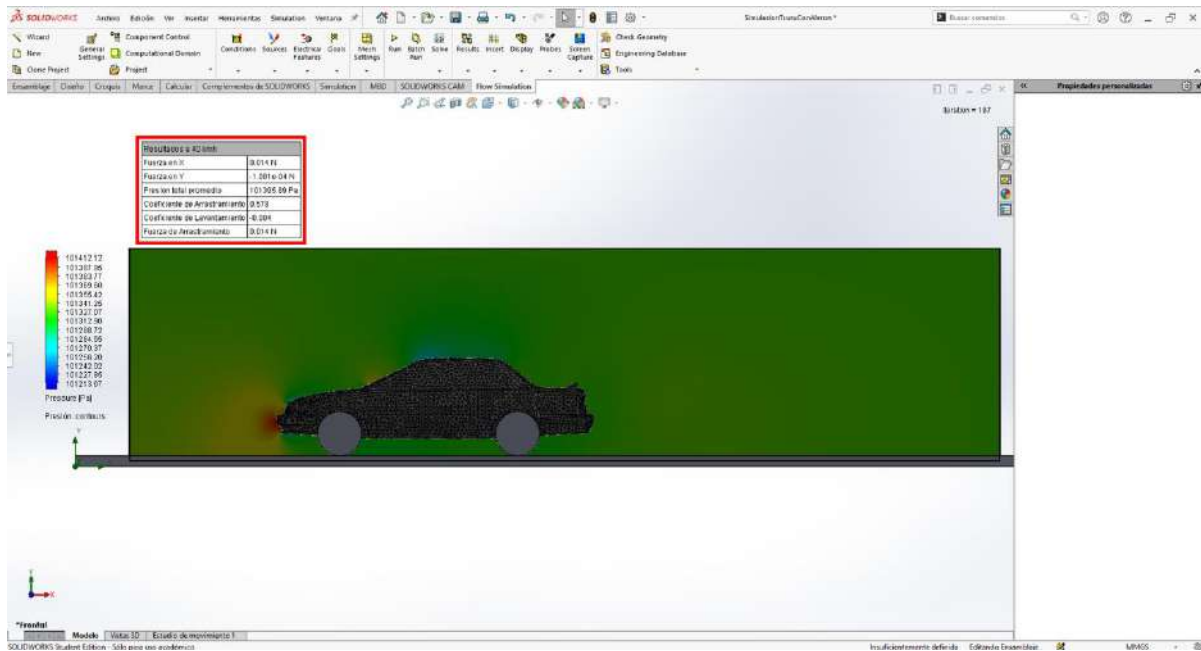


Figura 181: Gráfico de presión en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 40 km/h. [45]

- A 60 km/h.

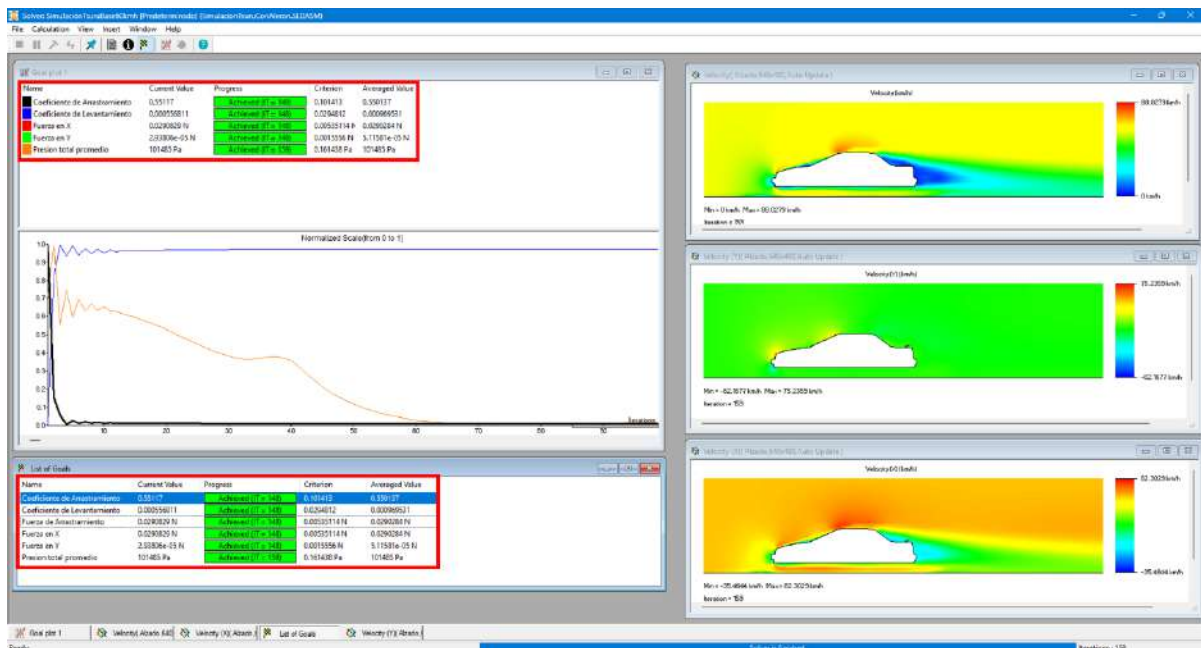


Figura 182: Lista de resultados de metas establecidas en segunda iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado a 60 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

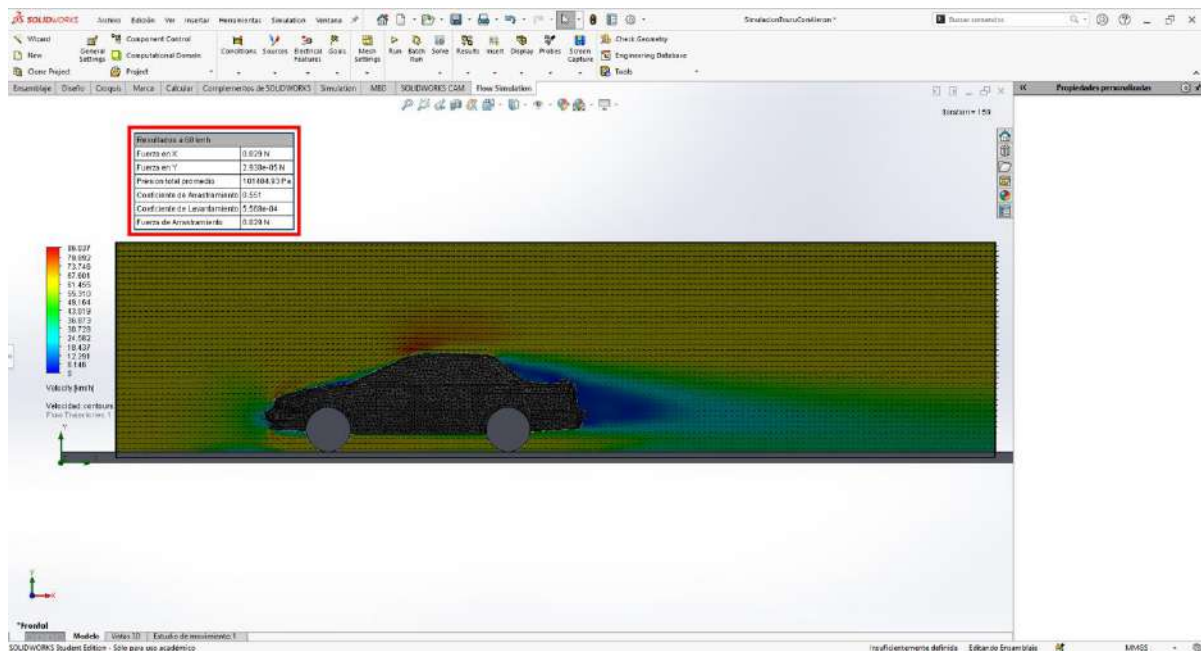


Figura 183: Gráfico de velocidad en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 60 km/h. [45]

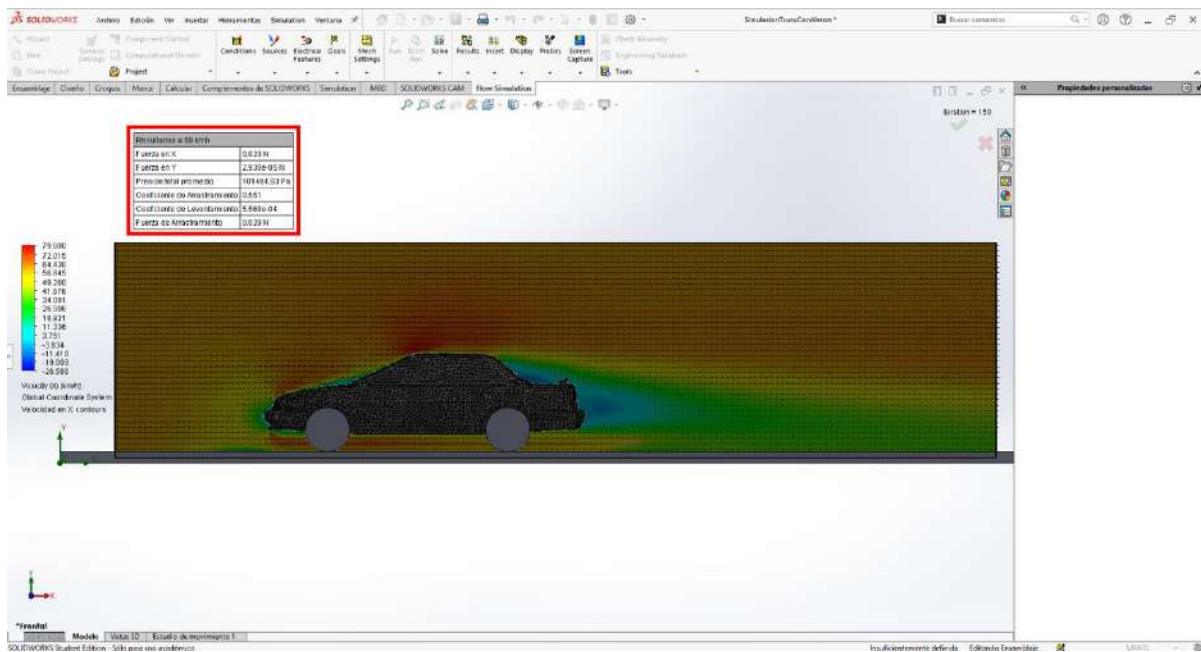


Figura 184: Gráfico de velocidad en X en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 60 km/h. [45]

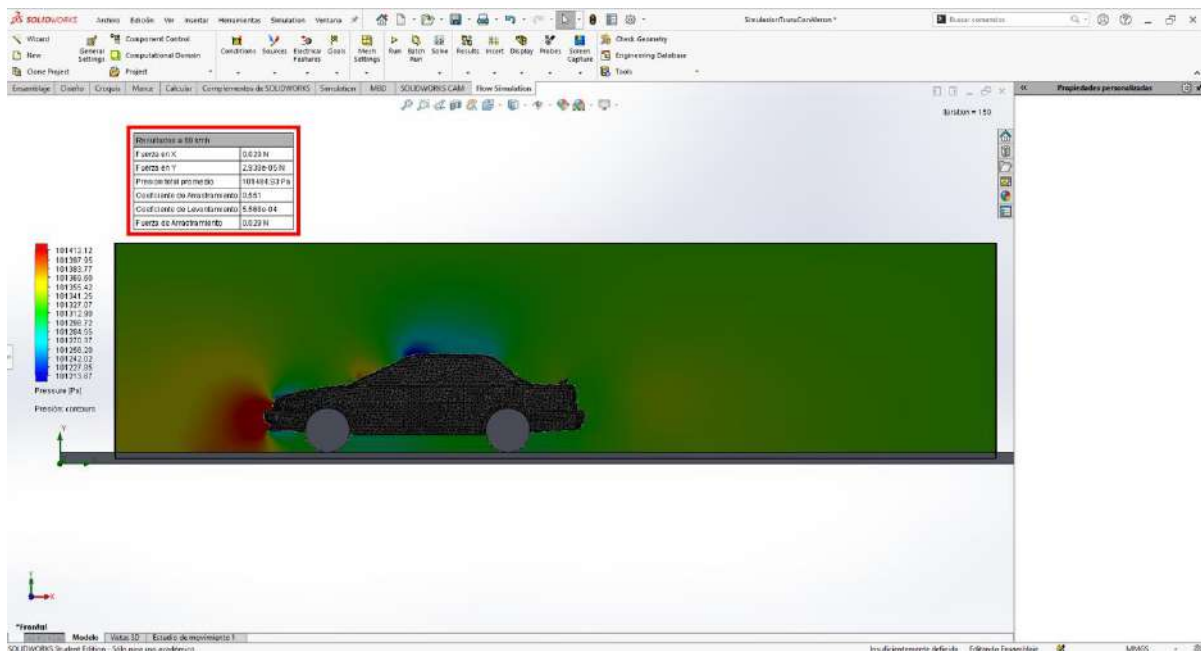


Figura 185: Gráfico de presión en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 60 km/h. [45]

- A 100 km/h.

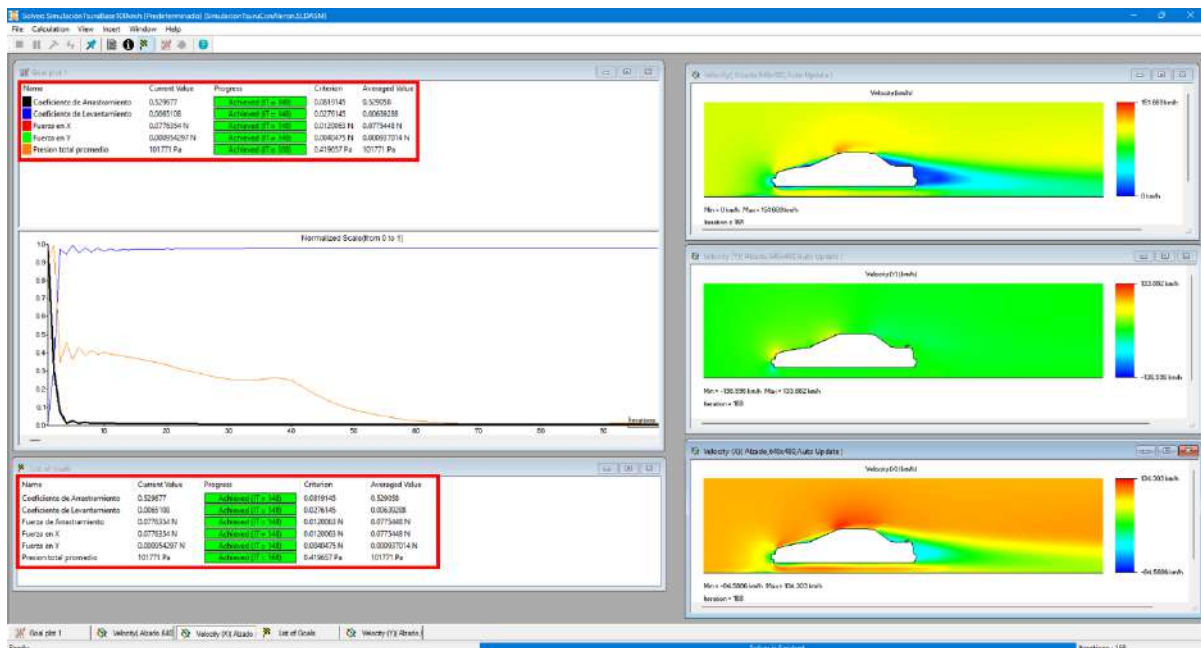


Figura 186: Lista de resultados de metas establecidas en segunda iteración de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón escaneado a 100 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

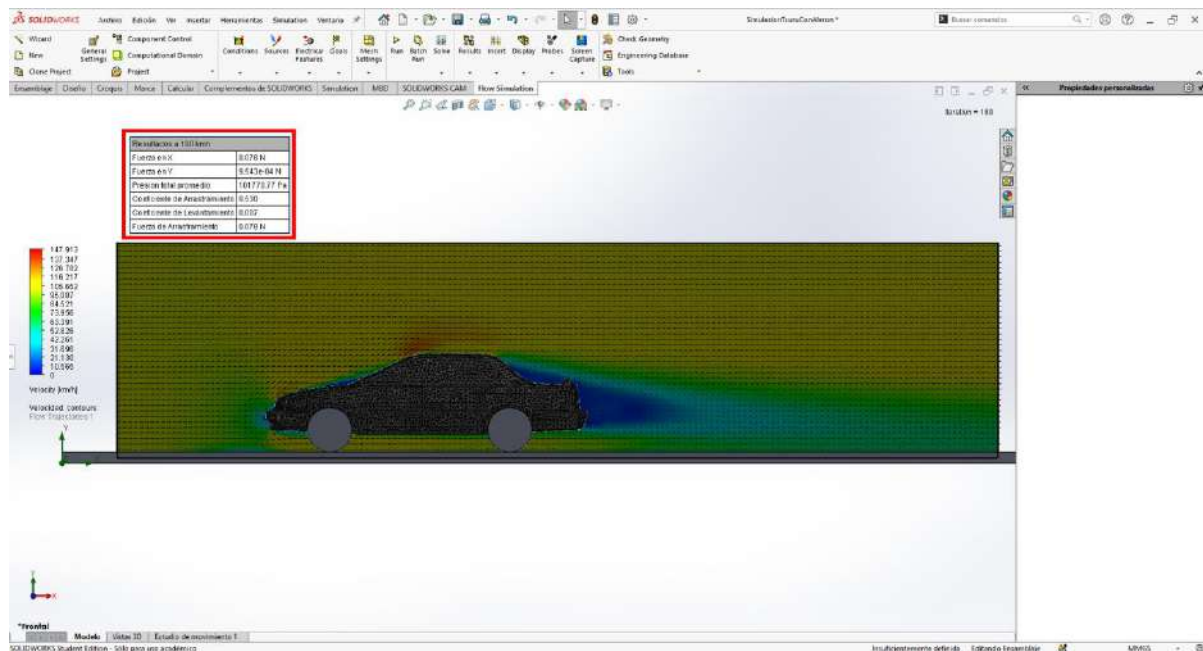


Figura 187: Gráfico de velocidad en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 100 km/h. [45]

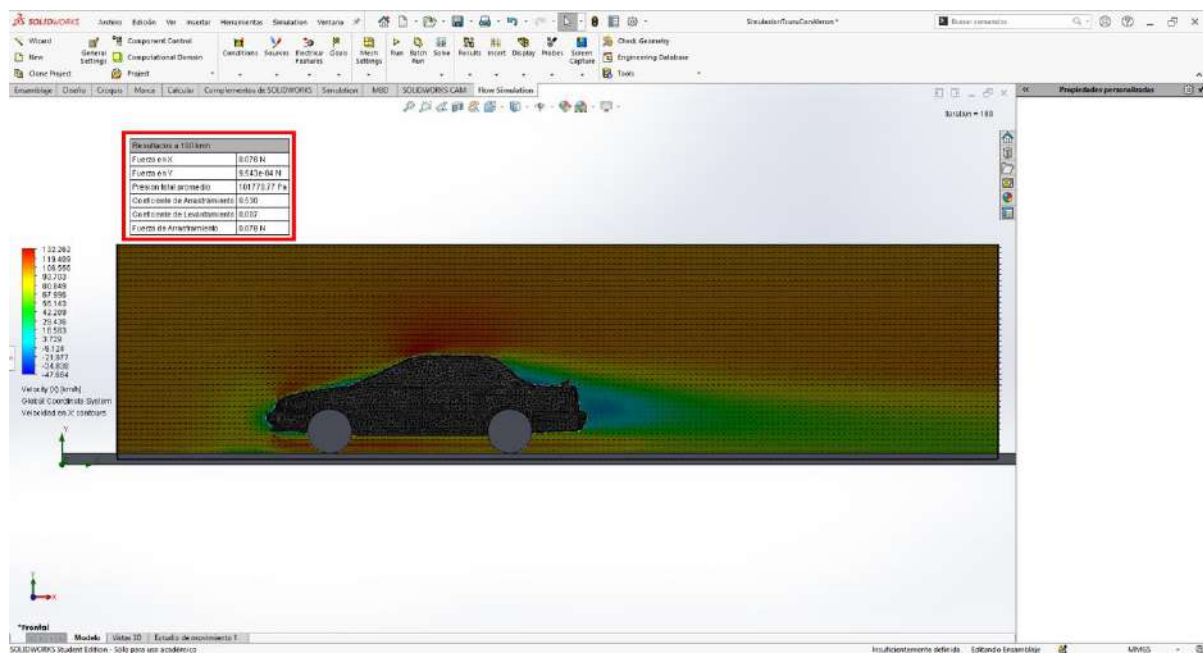


Figura 188: Gráfico de velocidad en X en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 100 km/h. [45]

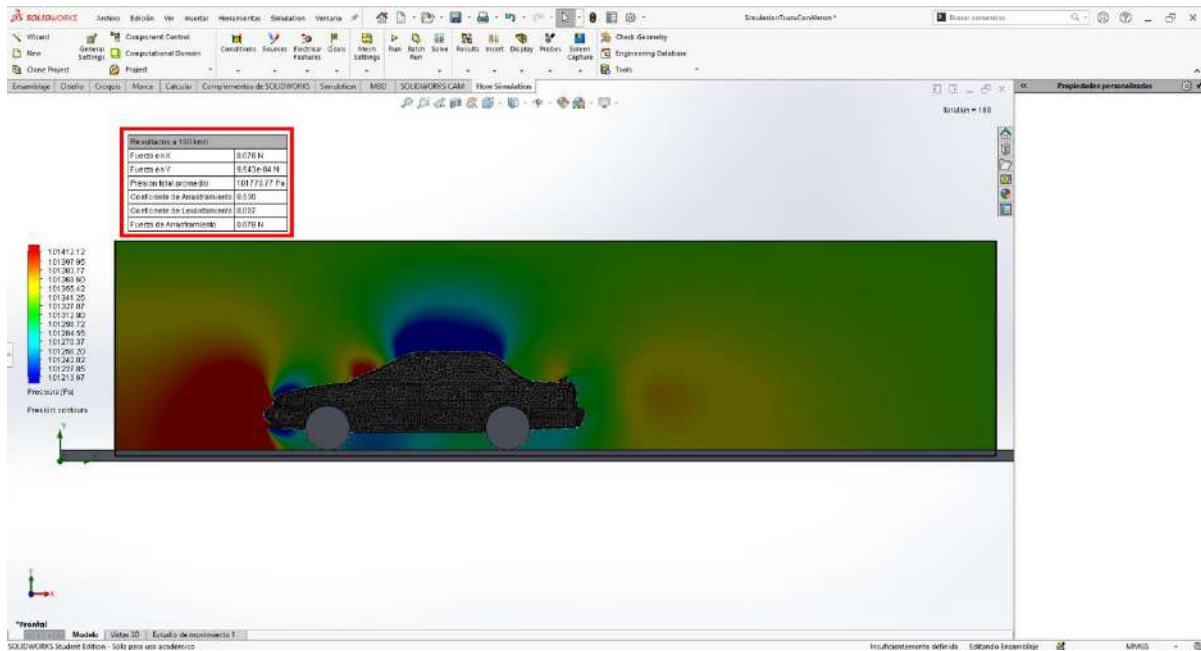


Figura 189: Gráfico de presión en segunda iteración de simulación de Nissan Tsuru con alerón de perfil alar de alerón a 100 km/h. [45]

Resultados de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición.

- A 40 km/h.

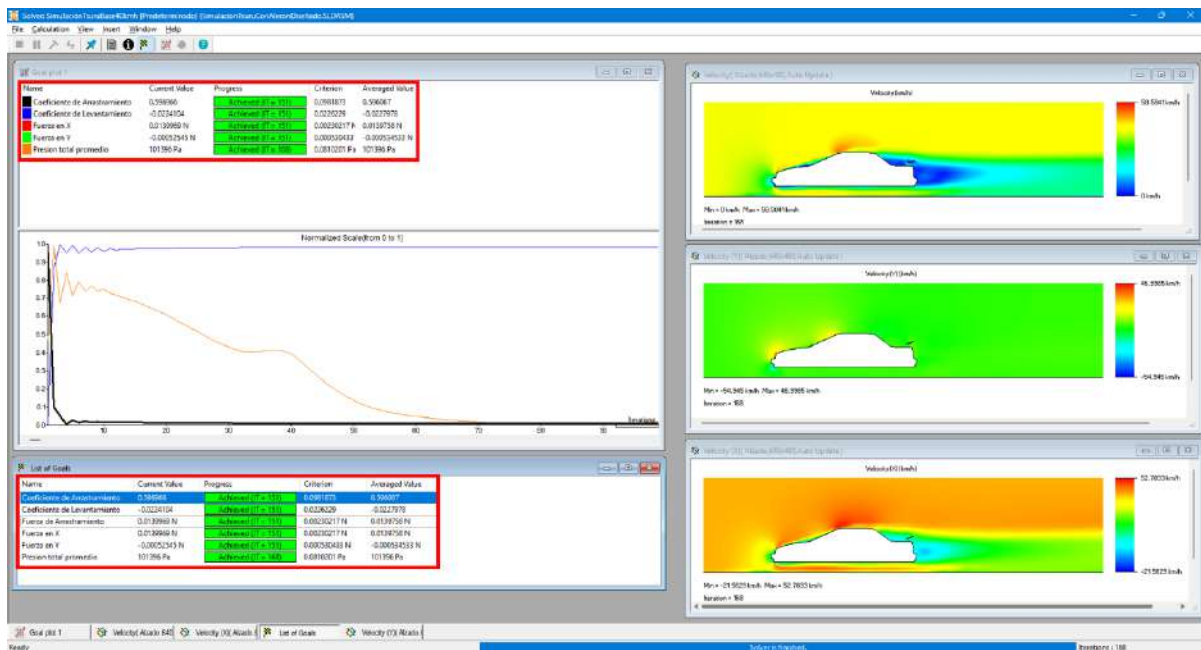


Figura 190: Lista de resultados de metas establecidas en simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 40 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

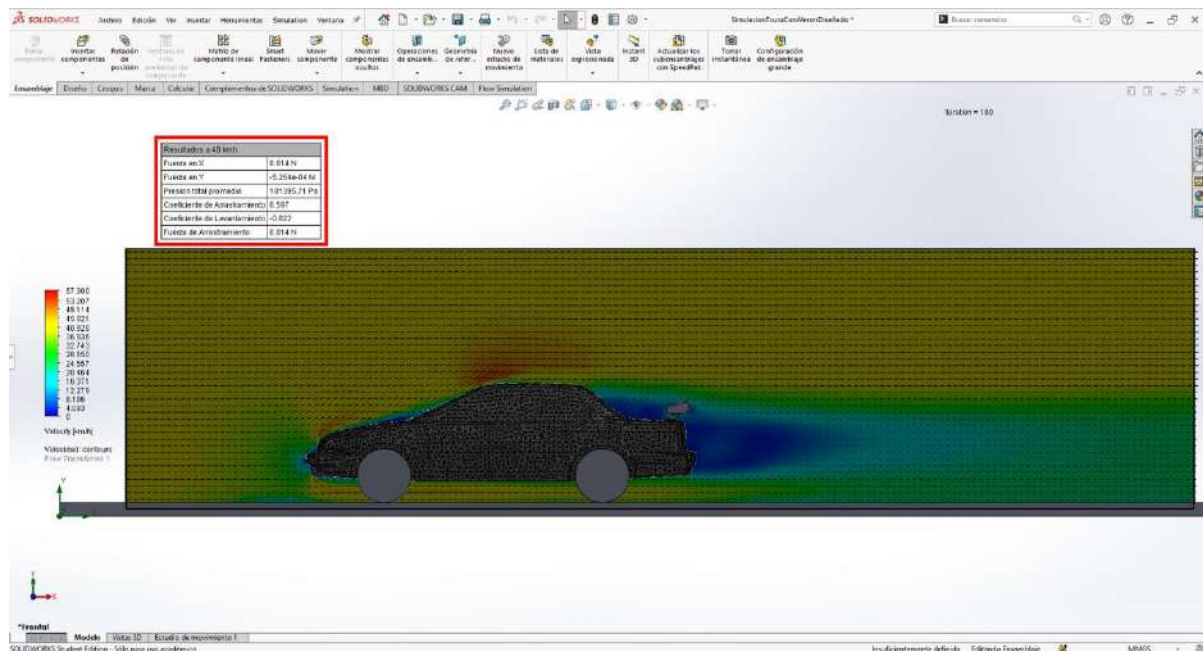


Figura 191: Gráfico de velocidad de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 40 km/h. [45]

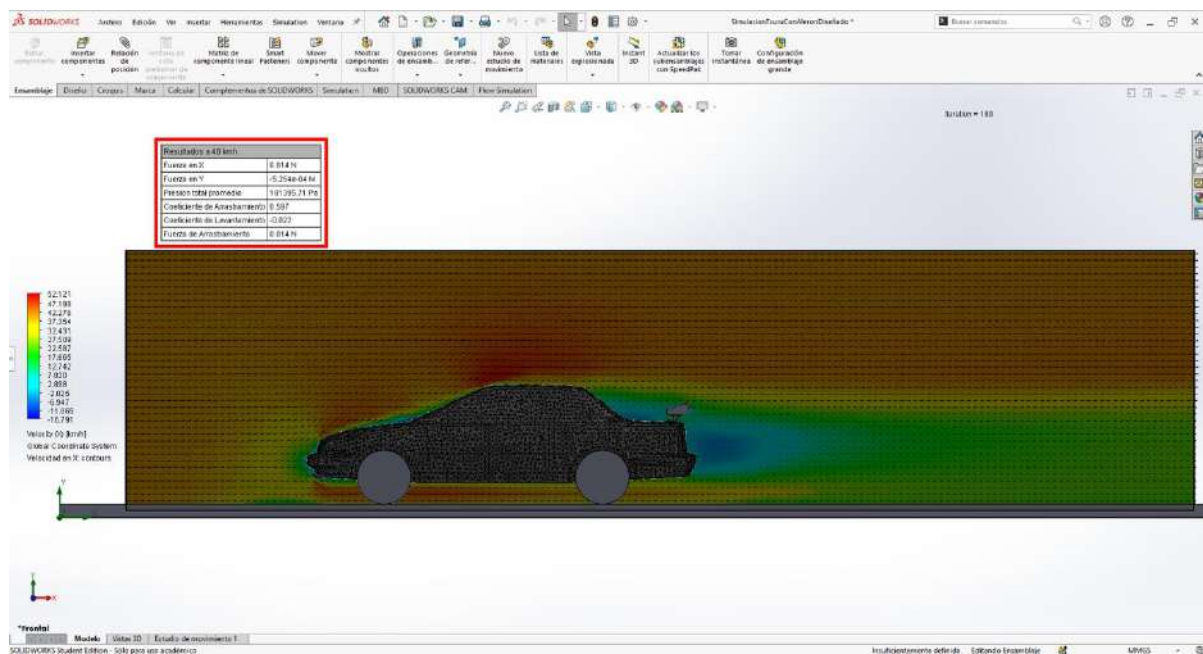


Figura 192: Gráfico de velocidad en X de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 40 km/h. [45]

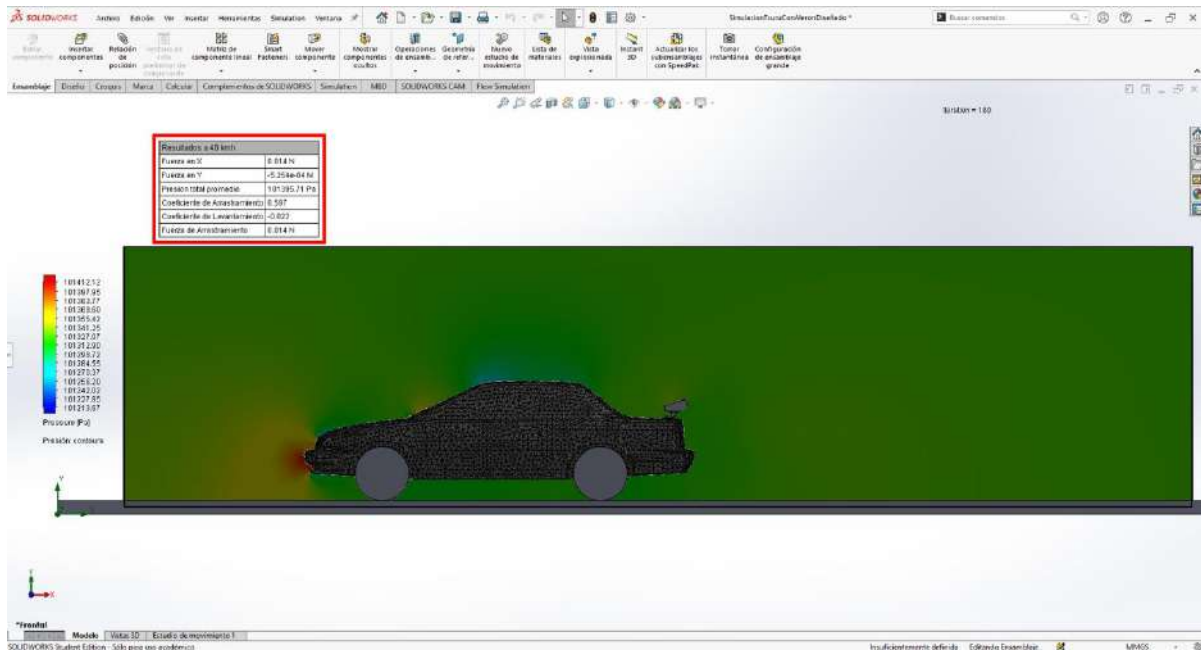


Figura 193: Gráfico de presión de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 40 km/h. [45]

- A 60 km/h.

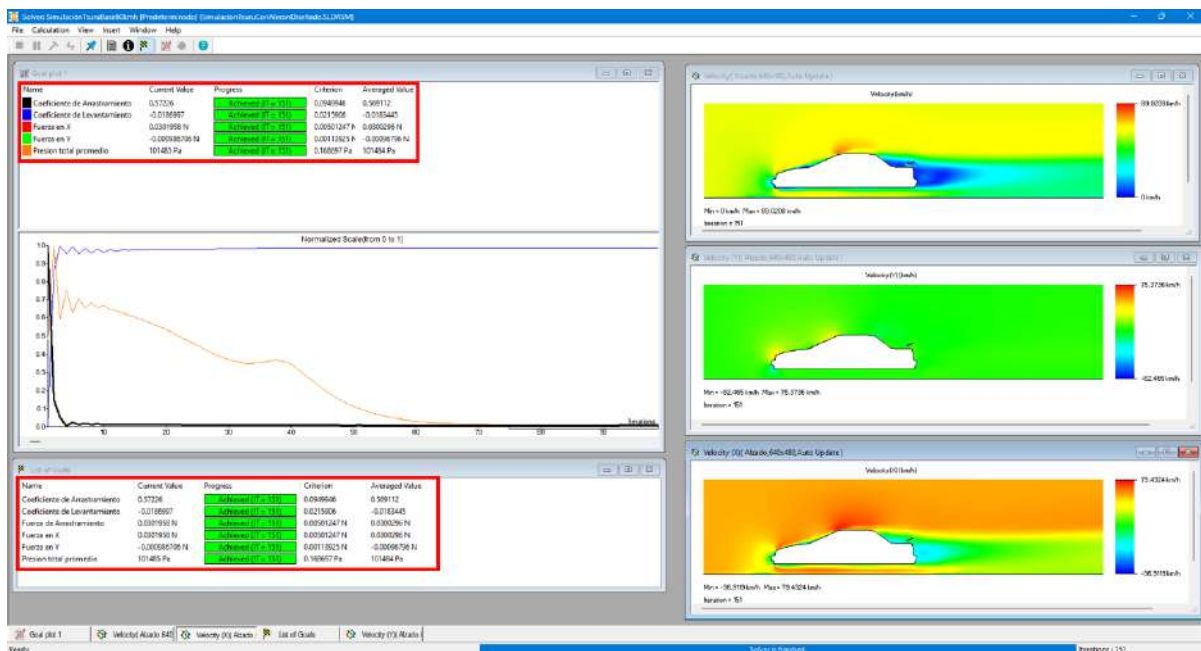


Figura 194: Lista de resultados de metas establecidas en simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 60 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

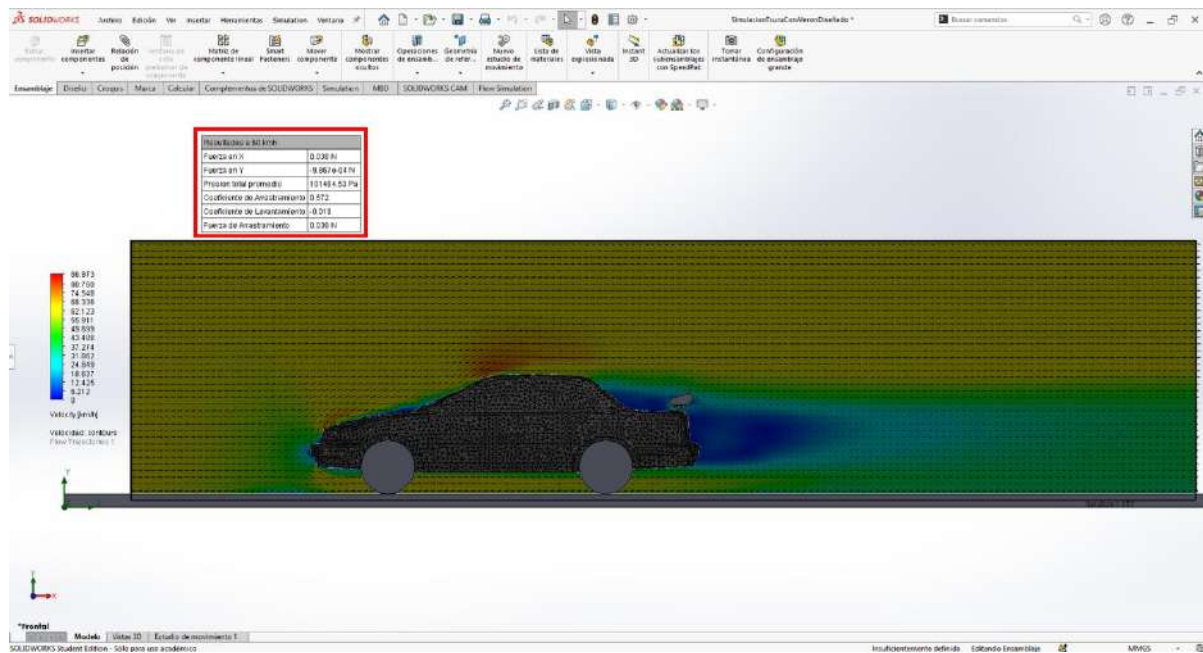


Figura 195: Gráfico de velocidad de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 60 km/h. [45]

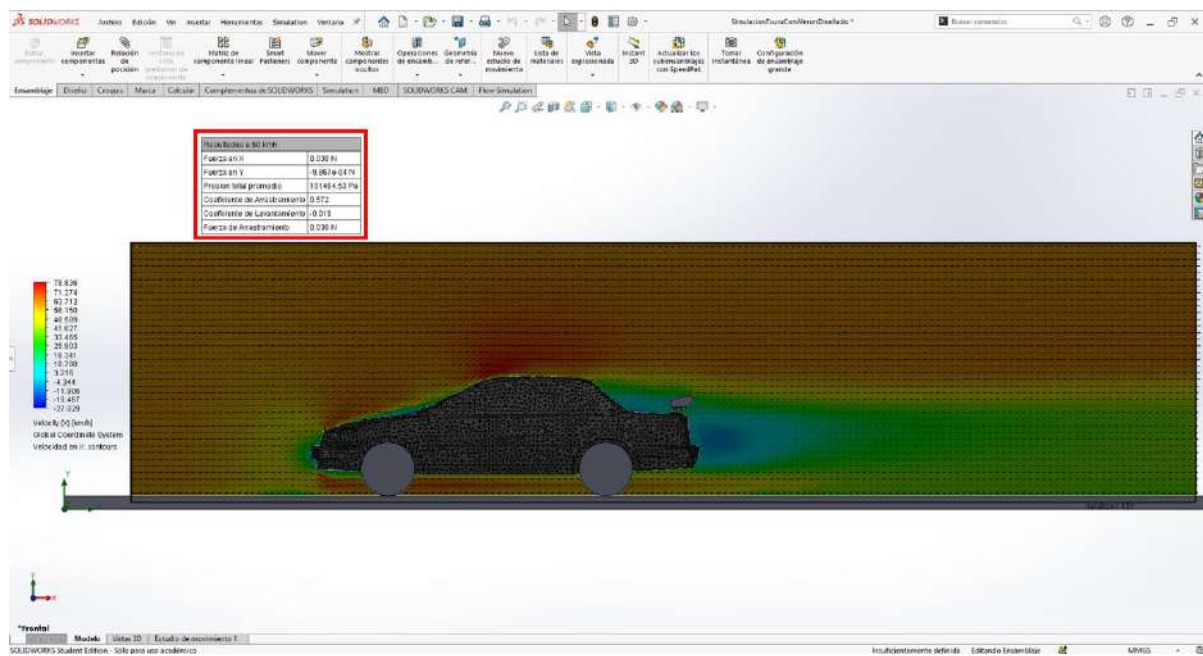


Figura 196: Gráfico de velocidad en X de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 60 km/h. [45]

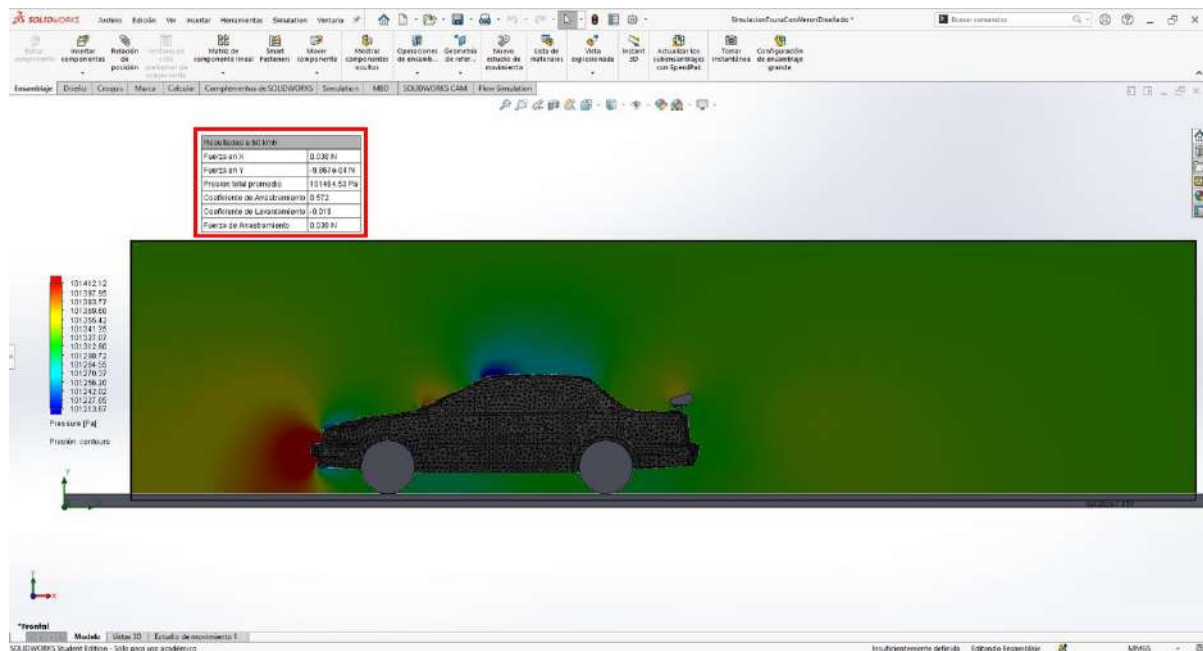


Figura 197: Gráfico de presión de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 60 km/h. [45]

- A 100 km/h.

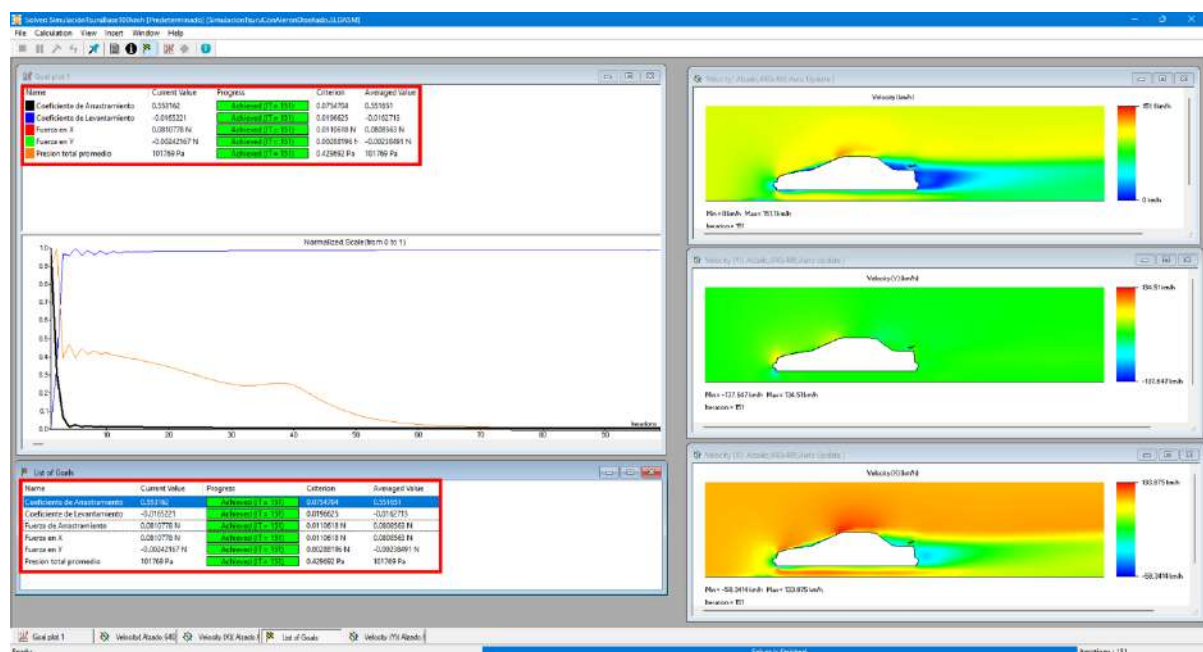


Figura 198: Lista de resultados de metas establecidas en simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 100 km/h (marcadas en recuadros rojos). [45]

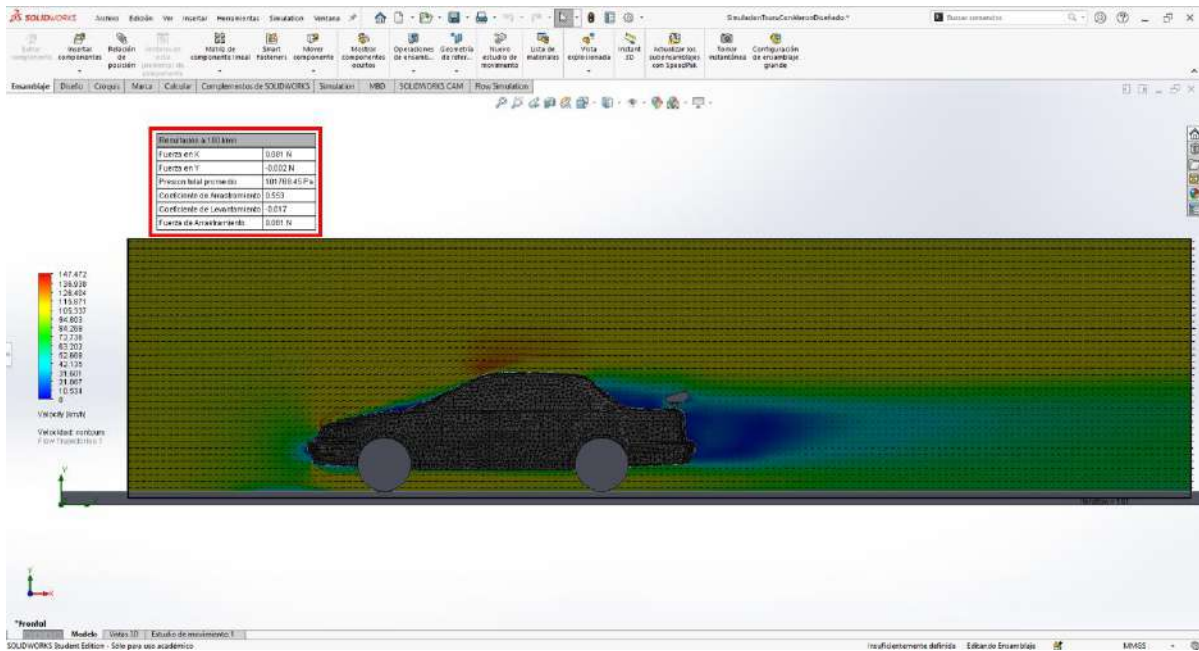


Figura 199: Gráfico de velocidad de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 100 km/h. [45]

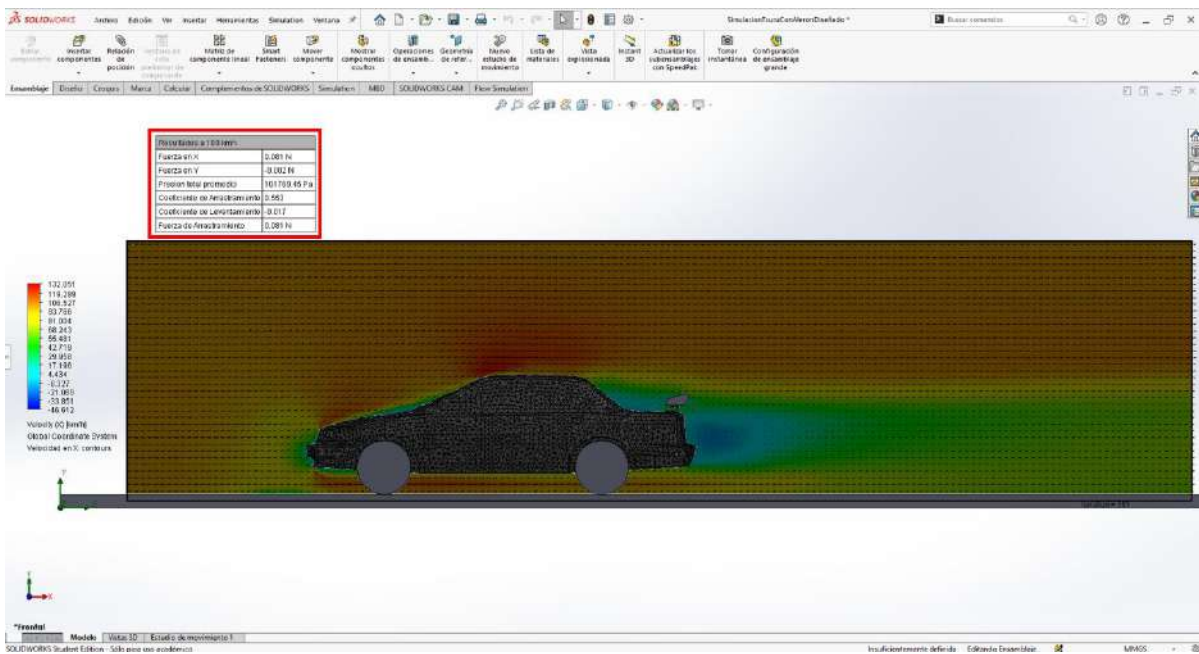


Figura 200: Gráfico de velocidad en X de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 100 km/h. [45]

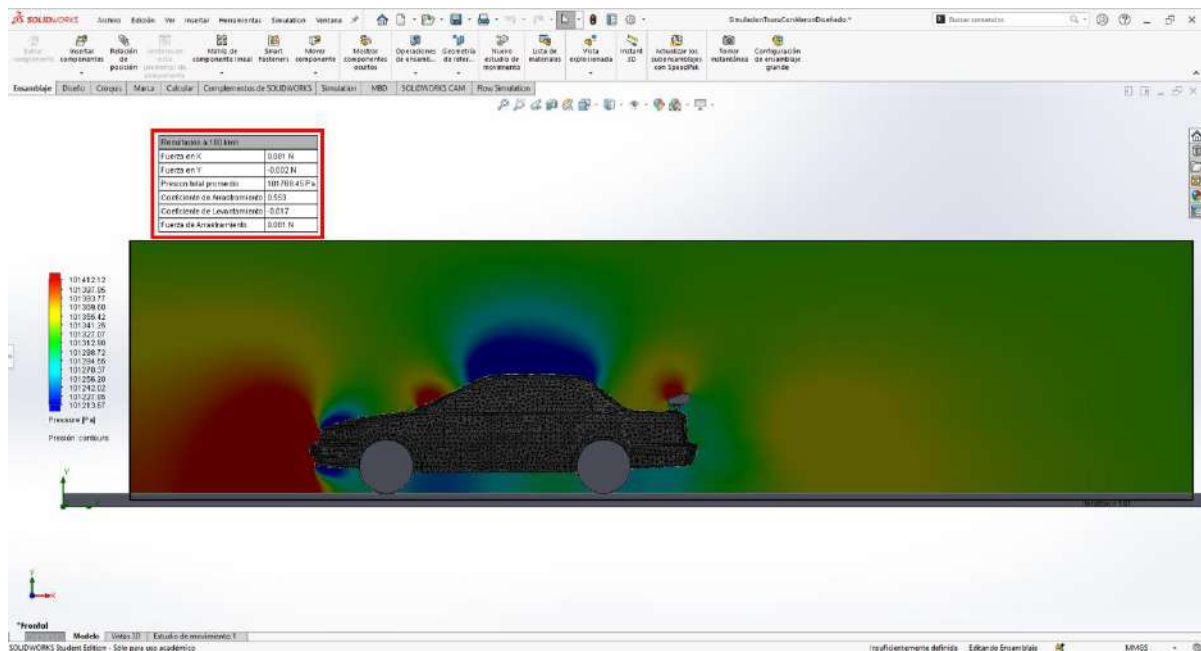


Figura 201: Gráfico de presión de simulación de Nissan Tsuru con alerón diseñado para competición a 100 km/h. [45]