



FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

**Estudio de factibilidad Técnica para la fabricación de carrocerías
Porsche 356 en el Ecuador**

Realizado por:

Fernando Andrés Jara Saavedra

Director del proyecto:

Ing. MSC Jaime Vinicio Molina Osejos

Como requisito para la obtención del título de:

INGENIERO AUTOMOTRIZ

QUITO, 20 de noviembre del 2024

Declaración Juramentada

Yo, Fernando Andrés Jara Saavedra, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N° 1753892684, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.



Fernando Andrés Jara Saavedra

C.I.: 1753892684

Declaración del director de Tesis

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.



Master JAIME MOLINA

Los Profesores Informantes:

DIANA BELÉN PERALTA ZURITA

EDILBERTO ANTONIO LLANES CEDEÑO

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.

Ing. Diana Peralta

Ing. Edilberto Llanes

Quito, 20 de noviembre de 2024

Declaración de Autoría del Estudiante

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



Fernando Andrés Jara Saavedra

C.I.: 1753892684

"Al principio miré a mi alrededor buscando el auto de mis sueños y como no lo encontré decidí construirlo"

Ferdinand Porsche

Dedicatoria

Este proyecto va dedicado a mi abuelito Jorge que desde el cielo me ha guiado a tomar las mejores decisiones posibles en el largo camino que eh llevado hasta hoy.

A mí madre por haberme apoyado en las interminables jornadas de proyectos, trabajos, enfermedades y mil situaciones que se han presentado en estos años de carrera empujándome a no tirar la toalla en la carrera y en la vida, pues estuvo en mis horas más oscuras.

A don Marcelo, usted que ha sido como un padre en estos años de carrera, ha sido mi maestro y mi mentor tanto en la parte técnica como en la vida y a quien le debo mi afición por la marca Porsche y quién me dio la idea de realizar está tesis, sin usted este proyecto no hubiera sido posible.

Agradecimientos

Quiero comenzar agradeciéndole a mi amigo Francisco, por tus consejos y recomendaciones en los momentos más críticos que vivimos juntos, por esas largas conversaciones en las noches y por esos proyectos que sacamos adelante.

A mí amigo Eduardo por haberme ayudado con los números y cuentas en aquellos proyectos que veíamos interminables.

A mí amigo Joshua, por las ocurrencias y situaciones que nos han pasado que ahora serán anécdotas, por haberme ayudado con los autos en el taller y ser parte de la logística de la carrera.

A mí amigo Juan José, por haber estado presente en varios momentos, y siendo ese amigo que está ahí en silencio pendiente de mí.

A mí amigo José Daniel, por ser una persona incondicional y haberme ayudado con su forma tan peculiar de ser.

A mí amigo Sebastián Muñoz, por haber hecho tantos favores y ser ese amigo que llegó en un momento crítico en mi vida y darme una pauta a seguir, en esas tardes interminables con tu tesis y conversaciones tan enriquecedoras.

A mí novia July, por haber estado en momentos duros de la tesis y ser mi compañera de sueños ilusiones y miles de situaciones que se presentaron y se presentarán más adelante.

A mis amigas Mishell y Aytana, por haber estado ahí con su forma de ser se han ganado un pedacito de mi corazón.

A mí amiga Melany por siempre estar pendiente de mí y de cómo estaba mi vida después de los momentos más complejos que eh vivido.

A mí gran amiga Mare, por haber sido esa amiga incondicional durante más de 10 años y haber estado en las buenas, las malas y las peores, gracias por tanto y vamos por más anécdotas e historias.

Al maestro Carlos por ayudarme a plasmar mis sueños en fibra y enseñarnos como hacer obras de arte, equivocándonos y aprendiendo.

A las personas que me han acompañado en este camino y que por a o b circunstancias ya no forman parte de mi vida pero que en su momento fueron actores principales en la misma muchas gracias, por tanto.

A la vida por permitirme ver los colores de esta y que los sueños con trabajo duro y determinación son alcanzables.

Me faltan palabras para agradecer a las personas que han aportado su granito de arena, sin todos ustedes, quienes están y quiénes ya no, esto no hubiera sido posible, nos vemos en la pista.

Resumen

En la investigación actual, se realizó un análisis exhaustivo de la aerodinámica del vehículo *Porsche 356*, mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (*CFD*) y experimentos en un túnel de viento, se analizaron las tres variantes del *Porsche 356*: el modelo convertible, el convertible con techo de tela y el modelo coupé. Las simulaciones *CFD* ofrecieron una perspectiva cuantitativa sobre la distribución de velocidad y presión en torno a cada automóvil, permitiendo identificar zonas con alta turbulencia y resistencia aerodinámica. Las pruebas en el túnel de viento brindaron una validación visual inmediata de estos hallazgos, mostrando el comportamiento del flujo de aire en tiempo real. Los hallazgos indicaron que el modelo coupé presenta la mayor eficiencia aerodinámica, con un flujo de aire uniforme que reduce la resistencia aerodinámica y aumenta la estabilidad. La capota de tela mejoró la aerodinámica del modelo convertible, aunque no alcanzó la eficiencia del techo rígido del modelo coupé y el modelo descapotable se evidenció como el peor en términos aerodinámicos, generando turbulencias directamente tras el parabrisas. La combinación de simulaciones *CFD* y pruebas en el túnel de viento estableció un enfoque integral para evaluar y obtener el mejor vehículo aerodinámicamente hablando. Este análisis concluye que, comparando las 3 variantes, es viable producir carrocerías del *Porsche 356* en Ecuador, dándoles diferentes enfoques y zonas de mercado.

Palabras clave: Aerodinámica, Diseño 3D, Mallado, Porsche 356, Pruebas CFD, Túnel de viento.

Abstract

In the current research, a thorough examination of the aerodynamics of the Porsche 356 was conducted using computational fluid dynamics (CFD) simulations and experiments in a wind tunnel. Three variants of the Porsche 356 were analyzed: the convertible model, the convertible with a fabric roof, and the coupe model. The CFD simulations provided a quantitative perspective on the distribution of speed and pressure around each vehicle, allowing for the identification of areas with high turbulence and aerodynamic resistance.

The wind tunnel tests offered immediate visual validation of these findings, demonstrating the airflow behavior in real-time. The findings indicated that the coupe model exhibits the highest aerodynamic efficiency, with a smooth airflow that reduces aerodynamic drag and enhances stability. The fabric roof improved the aerodynamics of the convertible model, although it did not reach the efficiency level of the rigid roof of the coupe model. The combination of CFD simulations and wind tunnel tests established a comprehensive approach to evaluating and refining the aerodynamic design of vehicles.

This analysis concludes that it is feasible to produce Porsche 356 bodies in Ecuador, as the established objectives were met, and the experimental data were corroborated with the CFD simulations. The implementation of these techniques ensures optimal performance and notable aerodynamic efficiency for the manufactured models.

Keywords: Aerodynamics, 3D Design, Meshing, Porsche 356, CFD Testing, Wind Tunnel

Tabla de Contenidos

Declaración Juramentada	1
Declaración del director de Tesis.....	2
Los Profesores Informantes:	3
Declaración de Autoría del Estudiante	4
Dedicatoria.....	5
Agradecimientos	6
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Tabla de Contenidos	10
Tabla de figuras.....	13
Introducción	15
Antecedentes	17
Planteamiento del Problema	19
Justificación	20
Objetivos.....	21
Objetivos Específicos:	21
Hipótesis	22
Estado del arte.....	23
Fabricación de Carrocerías en Ecuador.	23
Ingeniería tras la fabricación de carrocerías	26
Diseño y fabricación de carrocerías	27
Replica de vehículos	31
Datos y especificaciones Porsche 356	33
Tecnologías en la Fabricación de Carrocerías	35
Aerodinámica en Vehículos.....	41
Ecuación de Bernoulli.....	41
Efecto Capa Limite	46
Fluidodinámica en Cuerpos	47
Flujos Presentes en Vehículos	48
Simulación CFD.....	49
Programas de simulación CFD	51
Altair Hypermesh:.....	53
Mallado	54
Mallas Estructuradas	55
Malla no Estructurada.....	56
Malla Mixta:.....	57
Metodología	57
Diagrama de procesos.....	57
Aplicación del Proceso a Modelos Porsche	59
Modelado Carrocerias Porsche	60
Preparación y Recolección de Datos.....	60
Importación y Configuración de Imágenes de Calca.....	61
Creación de Bocetos Iniciales.....	63

Construcción del Modelo 3D	64
Refinamiento y Detalle Final	65
Preparación para Simulación	65
Proceso de Mallado:.....	66
Proceso de Mallado del Modelo Descapotable Porsche 356	67
Importación del Modelo.....	67
Revisión del Modelo y Validación de Superficies.....	68
División del Modelo	70
Asignación de Materiales y Parámetros.....	71
Colocación de límites en el modelo	72
Creación de la Malla	73
Configuración del Mallado	74
Post Procesado con AcuSolve.....	83
Preparación de los Modelos para Impresión 3D	84
Diseño y Escalado.....	84
Configuración de la Impresión en Cura	85
Proceso de Impresión 3D	86
Impresión del Modelo	88
Pruebas en el Túnel de Viento	89
Calibración del túnel de viento	91
Selección del modo del túnel de viento	91
Configuración máquina de humo.....	92
Resultados	94
Obtención de prototipos virtuales	94
Visualización de Parámetros.....	94
Coeficiente de fricción aerodinámico	95
Prototipos 3D	100
Comparación de Datos	101
Discusión de resultados.....	103
Justificación del vehículo a replicar.....	103
Comparación del Tipo de malla.....	105
Interpretación de Resultados de Simulación CFD del Porsche 356	105
Visualización de Parámetros.....	105
Escala de Colores y Rango de Leyendas	105
Identificación de Áreas Críticas.....	106
Presión.....	107
Velocidad	108
Comparación de Modelos Porsche 356 en Diferentes Configuraciones Aerodinámicas	109
Porsche 356 Descapotable	109
Porsche 356 Descapotable con Capota de Tela	111
Porsche 356 Coupe	112
Análisis de Streamlines.....	113
Análisis de Líneas de Vector	114
Comparación con Datos Experimentales	115
Comparación de Datos	116
Validación del Modelo.....	116

Conclusiones	117
Validación de Datos Experimentales con Simulaciones CFD	117
Optimización del Diseño Aerodinámico.....	117
Impacto de las Tecnologías CFD en el Desarrollo Automotriz.....	118
Cumplimiento de los Objetivos del Estudio	118
Recomendaciones	119
Optimización de Procesos de Mallado.....	119
Optimización de Recursos en el Túnel de Viento.....	120
Mejora de la Experiencia de Diseño Digital	120
Referencia bibliográfica.....	120

Tabla de figuras

Figura 1. Empresa Aymesa 1973 con la primera flota de vehículos “Andino”.....	24
Figura 2. Fabricación de carrocerías en Ambato-Ecuador	25
Figura 3. Planta de fabricación Ciauto-Ambacar.....	26
Figura 4. Aerodinámica en vehículos	28
Figura 5. Porsche 356 Pre A	30
Figura 6. Vehículos de réplica en reino unido	33
Figura 7 Planos Porsche 356 A.....	34
Figura 8. Czinger 21c.....	38
Figura 9. Subchasis manufacturado con impresión aditiva	39
Figura 10. Impresión aditiva a escala	40
Figura 11. Efecto Venturi	42
Figura 12. Similitud ala de un avión con un vehículo	43
Figura 13. Ala de un avión.....	43
Figura 14. Diferencia de presiones en un ala.....	44
Figura 15. Interpretación grafica de presiones aerodinámicas	45
Figura 16. Diagrama de procesos para el proyecto.....	58
Figura 17. Esquema de variantes del modelo Porsche 356.....	59
Figura 18. Porsche 356 libro de reparación Porsche AG.....	60
Figura 19. Fotografías Porsche 356 presentes en Ecuador	61
Figura 20. Escalado de imágenes en inventor 2023.....	62
Figura 21. Se muestra la colocación del plano lateral	63
Figura 22. Dibujo lateral del vehículo limitado con líneas.....	63
Figura 23. Plano frontal Porsche 356.....	64
Figura 24. Creación de elementos para la caracterización del vehículo	64
Figura 25. Exportación de archivos a formato STEP	65
Figura 26. Importación de carrocería.....	68
Figura 27. Revisión de vértices abiertos.....	69
Figura 28. Refinamiento de imagen.....	69
Figura 29. Vehículo cortado y revisado.....	70
Figura 30. Datos para emplear en la biblioteca de materiales, en este caso aire	71
Figura 31. Selección de aire como material de prueba	72
Figura 32. Delimitación de límites en el modelo.....	73
Figura 33. Selección de superficie de control.....	74
Figura 34. Boundary layer	76
Figura 35. Configuración final de la capa limite	79
Figura 36. Especificación de la computadora a emplear	82
Figura 37. Mallado de las superficies como lo son el vehículo y el túnel de viento	83
Figura 38. Gráfico completo junto a streamlines.....	83
Figura 39. Demostración de gráficos de temperatura para visualizar flujos de presión y velocidad.....	84
Figura 40. Configuración y previsualización Cura ultimaker.....	86
Figura 41. Proceso de impresión.....	87
Figura 42. Modelos a escala 1:18 impresos para su validación en el túnel de viento	88
Figura 43. Prototipo post procesado	89

Figura 44. Prueba de túnel de viento con un modelo a escala 1:18 Chevrolet Corvette	89
Figura 45. Prototipo escala1:18 en túnel de viento.....	90
Figura 46. Anemómetro colocado en posición	91
Figura 47. Pruebas previas del túnel de viento	92
Figura 48. Máquina de humo a utilizar.....	92
Figura 49. Pruebas de humo, túnel y asistencia en el funcionamiento de esta.	93
Figura 50. Prototipos virtuales realizados en Autodesk Inventor	94
Figura 51. Leyenda de colores empleadas en el proyecto	95
Figura 52. Resultados de presión obtenidos en Altair Hyperworks	96
Figura 53. Resultados de velocidad obtenidos en Altair Hyperworks.....	97
Figura 54. Diseño aerodinámico con streamlines	99
Figura 55. Vectores de velocidad del viento.....	100
Figura 56. Pruebas del túnel de viento.....	102
Figura 57. Caracterización de puntos de alta presión	106
Figura 58. Diagramas de presión y velocidad obtenidos en Hyperworks CFD.....	108
Figura 59. Superposición de imágenes tanto virtuales como reales	109
Figura 60. Comparación prototipo a escala con simulación virtual	110
Figura 61. Comparación prototipo a escala con simulación virtual	112
Figura 62. Comparación prototipo a escala con simulación virtual	113
Figura 63. Análisis de streamlines creadas.....	113
Figura 64. Identificación de vacío en la parte de la cabina.....	114

Introducción

La historia industrial de Ecuador ha estado marcada por un enfoque predominante en la exportación de materias primas, como el petróleo, banano, cacao, camarones, flores, entre otros productos poco procesados, siendo esto gran parte de los ingresos totales del país, en lugar de la manufactura y diseño de vehículos como potencias automotrices como Alemania o Japón. Sin embargo, este modelo económico presenta riesgos a largo plazo, ya que la dependencia excesiva de un sector puede dejar al país vulnerable a fluctuaciones del mercado o desastres naturales, mismos que se evidencian en la actualidad, con crisis energéticas, escasez de productos, que afecten la producción o exportación de estos recursos. Es por ello surge la necesidad de diversificar la economía ecuatoriana, explorando nuevas oportunidades en sectores como diseño y fabricación de vehículos con perspectiva de poder exportar vehículos (Alcívar, 2022).

El presente proyecto se centra en el estudio aerodinámico tanto virtual como físico a escala de carrocerías de vehículos clásicos como lo es el *Porsche 356*. Este icónico automóvil no solo representa un hito en la historia de la marca *Porsche*, sino que también encarna el diseño distintivo y la excelencia técnica que lo convierten en objeto de interés y estudio en la industria automotriz.

El objetivo es aplicar tecnologías avanzadas de diseño, para poder recrear así un prototipo del vehículo mismo que será probado en un túnel de viento CFD proporcionado por el software Altair Hypermesh para posteriormente validar los resultados en un túnel de viento a escala 1:18, para replicar de manera precisa las variantes de la carrocería del *Porsche 356*.

Los programas CAD ha revolucionado la forma en que se diseñan los vehículos, al permitir a los ingenieros y diseñadores crear modelos digitales detallados con una precisión sin precedentes. Esta herramienta no solo agiliza el proceso de diseño, sino que también reduce los costos de producción y los tiempos de desarrollo al eliminar la necesidad de prototipos físicos costosos. Además, ofrece la flexibilidad de experimentar con diferentes diseños y configuraciones, lo que facilita la optimización de la aerodinámica de la carrocería (*Autodesk*, 2022).

La optimización aerodinámica es un aspecto crucial en el diseño de vehículos, ya que afecta directamente la eficiencia, el rendimiento y la estabilidad del automóvil. El *Porsche 356*, con sus formas redondeadas y elegantes, ofrece una base ideal para mejorar sus aspectos aerodinámicos. Mediante el uso del túnel de viento virtual proporcionado por *Altair*, es posible realizar análisis del flujo de aire alrededor del vehículo y realizar ajustes precisos en el diseño para reducir la resistencia aerodinámica y mejorar la eficiencia en la carretera. Esto no solo puede mejorar el rendimiento del vehículo, sino también su economía de combustible y su capacidad de respuesta en diferentes condiciones de conducción.

Por otro lado, la fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, se presenta como una tecnología prometedora para la producción de carrocerías de vehículos. Esta técnica permite la creación de piezas complejas con una libertad de diseño, lo que facilita la integración de características aerodinámicas avanzadas en la carrocería. La fabricación aditiva también ofrece ventajas en términos de costos y tiempos de producción, al reducir la cantidad de material desperdiciado y eliminar la necesidad de herramientas o moldes costosos.

Antecedentes

En Ecuador, la industria de diseño y fabricación de carrocerías para vehículos livianos enfrenta desafíos significativos y una escasez notable en comparación con otros sectores de la industria carrocera. Según Alcívar (2022), la mayoría de los fabricantes de carrocerías en el país se centran en la producción de furgones, con más del 60% de ellos ubicados en la provincia del Tungurahua. Esta concentración en un tipo específico de vehículo deja a un lado la fabricación de carrocerías para vehículos livianos, lo que representa una oportunidad desaprovechada para la industria automotriz ecuatoriana. Es esencial promover y fortalecer este segmento de la industria para diversificar la oferta de vehículos en el país y reducir la dependencia de importaciones extranjeras.

Por otra parte, la fabricación de carrocerías de vehículos artesanales ha sido una práctica arraigada en Ecuador durante muchos años. Sin embargo, esta tradición artesanal se caracteriza por procesos laboriosos y una resistencia al cambio y la modernización. Los artesanos, aunque hábiles en la reproducción de diseños existentes, a menudo carecen de la capacidad o la disposición para buscar mejoras u optimizaciones en los diseños de las carrocerías. Como señala Báez (2023), esta resistencia al cambio puede obstaculizar la capacidad de los artesanos para producir carrocerías de manera más precisa y eficiente, lo que resulta en tiempos de entrega prolongados y costos elevados.

Ante estos desafíos, es fundamental explorar la viabilidad del diseño y la fabricación de carrocerías de vehículos livianos en Ecuador. Al hacerlo, se pueden obtener múltiples beneficios para la industria automotriz y la economía del país en su conjunto. En primer lugar, la fabricación local de carrocerías para vehículos livianos podría contribuir a reducir los costos del

parque automotor nacional, lo que permitiría a un mayor número de personas acceder a vehículos de fabricación nacional a precios más asequibles. Esta reducción en los costos también podría fomentar la renovación del parque automotor, con vehículos más modernos y eficientes que contribuyan a la seguridad vial y a la reducción de la contaminación ambiental.

Además de menorar estos costes para vehículos, se pueden volver a producir modelos históricos de vehículos como se está realizando en este caso de estudio, teniendo en cuenta que la reproducción de estos es un mercado de nicho, y por dichas replicas existe un gran mercado de venta y reproducción de estos tanto en Estados Unidos como en Europa.

La promoción de la fabricación de carrocerías de vehículos livianos podría impulsar el desarrollo de la industria automotriz ecuatoriana en su conjunto. Al diversificar la oferta de vehículos y fomentar la competencia en el mercado nacional, se puede estimular la innovación y la inversión en tecnología y capacitación. Esto, a su vez, generará empleo y oportunidades de negocio en toda la cadena de valor, desde el diseño y la ingeniería hasta la fabricación y la comercialización de vehículos. En última instancia, una industria automotriz más robusta y diversificada podría contribuir al crecimiento económico y al desarrollo sostenible del país.

Para lograr estos objetivos, es necesario adoptar un enfoque integral que aborde tanto los aspectos técnicos como los económicos y sociales de la fabricación de carrocerías de vehículos livianos en Ecuador. Esto incluye la identificación de tecnologías y procesos de fabricación adecuados, la promoción de la formación y capacitación en habilidades técnicas y de diseño, y el establecimiento de políticas y regulaciones que fomenten la inversión y la innovación en el sector automotriz. Con un compromiso firme y una visión a largo plazo, Ecuador tiene el

potencial de convertirse en un actor importante en la industria automotriz regional, creando empleo, generando riqueza y mejorando la calidad de vida de sus ciudadanos.

Planteamiento del Problema

La introducción de un área de diseño y fabricación de carrocerías para vehículos livianos en Ecuador ha sido una actividad muy desafiante. La escasa presencia de esta industria en el país, enfocada principalmente en la fabricación de furgones, deja un vacío significativo en el mercado de vehículos livianos. Este vacío ha sido históricamente llenado por algunas empresas como lo son Aymesa en la fabricación del “Andino” y del Chevrolet “Condor” y dejando esto posteriormente a la práctica artesanal, con artesanos que se dedican a copiar diseños existentes sin buscar mejoras significativas en el proceso. Esto ha resultado en tiempos de entrega prolongados y costos elevados, lo que a su vez ha limitado la accesibilidad de los vehículos de manufactura nacional para muchos ecuatorianos.

Ante esta situación, se hace necesario explorar la viabilidad del diseño y la fabricación de carrocerías de vehículos livianos en Ecuador, enfocándonos en la reproducción de vehículos clásicos como lo es el *Porsche 356* que se empleará como caso de estudio, modelos que originales en el mercado mundial tienen precios exorbitantes.

Es importante tener en cuenta que la adopción de tecnologías avanzadas, como el diseño asistido por computadora (CAD) y la fabricación aditiva, en la actualidad ayudan a agilizar el proceso de diseño y producción, reduciendo así los tiempos de entrega y los costos asociados. Además, la automatización de ciertos procesos puede ayudar a aumentar la productividad y

reducir la dependencia de la mano de obra manual, lo que a su vez pueden contribuir a la reducción de costos (Alonso, J. M. 2001).

Justificación

Resolver la problemática mencionada permitirá no solo abordar los desafíos actuales en la industria automotriz ecuatoriana, sino también abrir nuevas oportunidades de crecimiento y desarrollo. La aplicación de tecnologías avanzadas en el diseño de carrocerías de vehículos livianos representa un cambio fundamental en la forma en que se produce y comercializa en el sector. Al incorporar métodos modernos y eficientes de diseño, se estima reducir significativamente los tiempos de espera y costos para la posible fabricación de carrocerías, una vez analizada la factibilidad de reproducción de estas, en este caso de estudio específico el *Porsche 356*.

Actualmente, los largos periodos de espera para la fabricación de una carrocería representan un obstáculo importante en la industria automotriz ecuatoriana. La fabricación artesanal, caracterizada por métodos tradicionales y la falta de tecnología moderna, como menciona Báez (2023), conduce a tiempos de entrega prolongados que desalientan a los consumidores y limitan el crecimiento del sector. Sin embargo, al tecnificar la producción de carrocerías mediante la implementación de tecnologías avanzadas, como el diseño asistido por computadora (CAD) y la fabricación aditiva del prototipo a escala 1:18, se pueden lograr importantes mejoras en los tiempos de producción (Nisbett, R. G. 2012).

Teniendo en cuenta que lo más óptimo para poder realizar este tipo de estudios parte desde el análisis aerodinámico, puesto que es necesario poder comprender como fluye el aire en la carrocería del vehículo, entendiéndose así como el mismo influye directamente en el comportamiento del vehículo tanto en temas de rendimiento deportivo y ahorro de combustible, mediante el túnel de viento virtual de Altair Hypermesh, donde se colocaran las variables de la velocidad del aire, las formas específicas del vehículo y las dimensiones de la incidencia del viento contra la carrocería.

La fabricación de carrocerías *Porsche 356* en Ecuador representa una oportunidad para mejorar la eficiencia y competitividad en la industria automotriz ecuatoriana. Al tecnificar la producción y optimizar los procesos de fabricación, se pueden lograr importantes mejoras en los tiempos de entrega y la calidad de las carrocerías, lo que beneficiaría tanto a los fabricantes como a los consumidores (Altamirano Torres & Suárez Cordero, 2018).

Objetivos

Evaluar el diseño y comportamiento aerodinámico del *Porsche 356*, mediante la fabricación de un prototipo a escala 1:18, analizado aerodinámicamente en el túnel de viento virtual de *Altair Hypermesh* y validando este diseño en el túnel de viento real, enfocados en la reproducción de este a escala 1:1 y la posterior reproducción de más modelos en el país.

Objetivos Específicos:

- Analizar el contexto actual de la industria carrocera en Ecuador, identificando las principales limitaciones y oportunidades para la fabricación de carrocerías de vehículos livianos, como lo es en nuestro caso de estudio el modelo Porsche 356.

- Determinar los requerimientos técnicos y recursos necesarios mediante el análisis de bibliografía y visita a empresas carroceras, para la fabricación de carrocerías *Porsche 356* en Ecuador, enfocándonos en: tecnología, personal y materias primas.
- Evaluar la eficiencia aerodinámica de los diseños propuestos para las carrocerías *Porsche 356* mediante la realización de pruebas en el túnel de viento del software *Altair Hypermesh*, con el fin de comprender la resistencia aerodinámica del vehículo a estudiar.
- Realizar una validación de los datos obtenidos en el programa de simulación 3D mediante la simulación en túnel de viento físico, para así tener un contraste en el prototipo.

Hipótesis

Se espera que la implementación de tecnologías avanzadas de diseño y prototipado, como el diseño asistido por computador, la impresión aditiva y el análisis aerodinámico computacional, en la creación de carrocerías de vehículos, como el *Porsche 356*, mejore significativamente la manera en la que se comprende el funcionamiento aerodinámico del vehículo.

Se hipotetiza que, la aplicación de impresión aditiva permita una mayor precisión en la fabricación de las carrocerías a analizar.

Se espera que los análisis realizados en el túnel de viento virtual de *Altair Hypermesh*, sea coherente con las simulaciones de las maquetas a escala 1:18 a realizar.

En última instancia, se anticipa que al comparar las 3 carrocerías a simular, se obtenga que el comportamiento aerodinámico del modelo coupe sea superior a los modelos descapotable y capotado con un techo de lona.

Estado del arte

Fabricación de Carrocerías en Ecuador.

Históricamente el Ecuador ha tenido la propuesta de fabricar carrocerías y vehículos, priorizando los costes de producción y tiempos de entrega, como se recuerda, en 1973, Aymesa irrumpió en la escena automotriz ecuatoriana con el innovador proyecto “*BTV*” (Vehículo de Transporte Básico) originario de “*General Motors Company*”, convirtiéndose en la pionera de la industria en el país. Este ambicioso proyecto, que había fracasado en otros lugares, encontró su éxito en Ecuador con el lanzamiento del “*ANDINO*”, el primer automóvil de producción nacional. El “*ANDINO*” era un modelo de sencillez y funcionalidad, con una plataforma *Bedford* y un motor “*Vauxhall*” de 1.4 litros, que representaba un logro significativo para la industria local (Aymesa, 2013).

Para 1975, Aymesa amplió su catálogo con vehículos que tenían carrocerías de fibra de vidrio, una innovación en aquel tiempo. La empresa adaptó el conocido “*Opel Cadet*” al mercado ecuatoriano, rebautizándolo como *Cóndor*. Este modelo se destacó por su ligereza y potencia, características que lo llevaron a sobresalir en competencias automovilísticas y a ganarse el reconocimiento en el país. El *Cóndor* no solo simbolizaba la capacidad de Aymesa para producir vehículos de calidad, sino que también reflejaba el creciente talento y la ingeniería ecuatoriana en el ámbito automotriz. Con cada vehículo, Aymesa no solo construía un medio de transporte, sino que tejía la historia de una nación en movimiento, impulsando la economía y demostrando que la innovación y la excelencia podían florecer en Ecuador (Aymesa, 2013).

Figura 1.

Empresa Aymesa 1973 con la primera flota de vehículos “Andino”.



Nota: Primera flota de vehículos “Andino” de la producción de Ayesa, tomado de: Aymesa. (2013).

Historia de Aymesa. Recuperado de:

<https://web.archive.org/web/20140414094629/http://www.aymesa.ec/index.php/storia>

En la actualidad, Ecuador cuenta con alrededor de cien fabricantes de carrocerías, con más del 60% localizados en la provincia de Tungurahua. El resto se distribuye en Pichincha, Guayas, Manabí, Imbabura, Azuay, Cotopaxi y El Oro. Tungurahua es responsable del 70% de la producción total de carrocerías en el país. La industria de fabricación de carrocerías en Ecuador se enfrenta constantemente al desafío de cumplir con las normativas locales. Este sector busca adaptarse continuamente a las regulaciones actuales del país para asegurar la calidad y la seguridad de sus productos, mientras sigue siendo una contribución importante a la economía nacional (Alcívar, 2022).

Figura 2.
Fabricación de carrocerías en Ambato-Ecuador



Nota: Fabricación de carrocerías para buses y transporte pesado, tomado de: Alcívar, A. (2022,).

Fabricantes carroceros. Scribd. Recuperado de: <https://www.scribd.com/document/644139659/Fabricantes-carroceros>

La inauguración de la planta ensambladora de vehículos más novedosa en Ambato marca un hito en la historia automotriz local. Esta planta, bautizada como Ciudad del Automóvil “*Ciauto*”, posee la tecnología para ensamblar un vehículo cada hora. La inversión inicial para su establecimiento fue de 25 millones de dólares, con la expectativa de duplicar esta cifra en cinco años. En sus instalaciones se producen el “*Haval H5*” y la camioneta “*Wingle*” de “*Great Wall*”, ambos equipados con motores con tecnología “*Mitsubishi*”. Además, Tungurahua se destaca por contar con compañías especializadas en la construcción de carrocerías, como “*Varma*”, contribuyendo con el 70% de la producción nacional, lo que se traduce en 24 millones de dólares al año y 1,400 puestos de trabajo para la población ecuatoriana (Alcívar, 2022).

Figura 3.
Planta de fabricación Ciauto-Ambacar



Nota: Ensamblaje de carrocerías en Ciauto-Ambacar, obtenido d: Salida técnica planta Ciauto

Ingeniería tras la fabricación de carrocerías

La producción de carrocerías es una actividad que abarca una amplia gama de disciplinas dentro de la ingeniería y la industria automotriz, mismas que por ejemplo se destacan: la colocación espacial de los componentes del vehículo, los estudios estéticos tanto de luces como de sombras presentes en un vehículo para que el mismo transmita sensaciones al posible cliente, el marketing del mismo para poder comercializarlos y lo que importa en este estudio el cual es de flujos aerodinámicos del vehículo enfocados ya sea en comportamiento dinámico.

Es innegable que alterar la aerodinámica de un automóvil implica modificaciones en su concepto de diseño. No obstante, se puede sostener que el desarrollo y ajuste de ciertos elementos aerodinámicos podrían incidir en la eficiencia del motor y el consumo de combustible. Asimismo, mejorar la aerodinámica puede tener un impacto significativo en aspectos de gran

relevancia como las competiciones automovilísticas, como la reducción del tiempo en pista, lo que añade valor al rendimiento general del vehículo y su competitividad en el mercado.

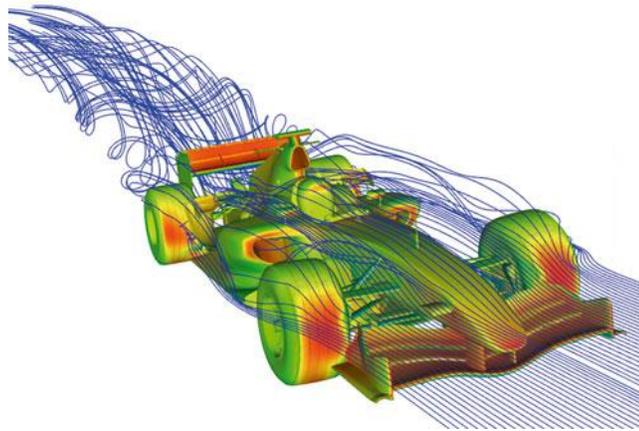
Cuando un objeto se desplaza en una dirección y velocidad determinadas respecto a un fluido, se produce una distribución de fuerzas estáticas en él como resultado de las interacciones fluidodinámicas generadas durante su movimiento dinámico. Este fenómeno es común en objetos que se desplazan a velocidades elevadas, como vehículos terrestres y aeronaves, donde estas distribuciones pueden influir positiva o negativamente en el movimiento del objeto, por ejemplo, facilitando la adherencia a la pista o el despegue. Estas interacciones entre el cuerpo y el fluido son fundamentales para comprender el comportamiento y la eficiencia de los sistemas de transporte modernos. (Meseguer, 2010)

Diseño y fabricación de carrocerías

Inicialmente, la construcción de automóviles en el desarrollo de vehículos fue principalmente enfocado en la estética. Sin embargo, no fue hasta 1914 que se produjo un cambio significativo en el sector del diseño automotriz con el desarrollo de vehículos como el *Rumpler Trofenwagen* y el *Alfa Ricotti*, que fueron pioneros en estudios de aerodinámica. Estos estudios mostraron la estrecha relación entre la aerodinámica del vehículo y su rendimiento. De hecho, en competiciones de motor como la Fórmula 1, carreras de resistencia y las competencias de turismos, la aerodinámica se ha convertido en un factor crítico para mejorar el rendimiento del vehículo y se ha demostrado que es uno de los elementos más influyentes en la tecnología de los automóviles de carreras.

La creciente comprensión de cómo la aerodinámica afecta al rendimiento de los vehículos ha generado un aumento en la investigación y el desarrollo de técnicas de optimización aerodinámica en la industria automotriz. Esta tendencia es especialmente notable en el ámbito de los vehículos de competición, donde cada pequeña mejora en la aerodinámica puede marcar la diferencia entre la victoria y la derrota. Los fabricantes y equipos de carreras invierten recursos significativos en la exploración de diseños innovadores y la aplicación de tecnologías avanzadas para maximizar la eficiencia aerodinámica y mejorar el rendimiento general del vehículo en pista (McBeath, 2005).

Figura 4.
Aerodinámica en vehículos



Nota: Análisis aerodinámico de un vehículo formula 1. Tomado de: Autodesk. (14 de 07 de 2015).

Autodesk. Obtenido de: <http://www.autodesk.es/products/inventor/overview>

A través del uso del diseño asistido por computadora (CAD), se lleva a cabo un análisis detallado de cada aspecto del proceso, desde el diseño inicial hasta la fabricación y el ensamblaje final de las piezas del automóvil. Esta sección explorará las tecnologías existentes, las mejores

prácticas y la investigación previa relevante para comprender completamente el contexto y los métodos que se utilizarán en el proyecto (Altamirano Torres & Suárez Cordero, 2018).

El diseño asistido por computadora, o CAD, es una herramienta fundamental en el proceso de producción de carrocerías. Software especializado, como *AutoCAD*, *Inventor* o *Hypermesh*, permite a los ingenieros y diseñadores crear modelos tridimensionales precisos de los componentes del automóvil, incluyendo la carrocería, el chasis, el sistema de suspensión y otros elementos. Estos programas ofrecen una amplia gama de herramientas para el modelado, análisis y simulación, lo que facilita la optimización del diseño y la evaluación del rendimiento del vehículo (Alonso, 2001).

Una vez completado el diseño en CAD, se procede a la etapa de producción, que implica una serie de pasos complejos y críticos. Uno de los primeros pasos es la preparación del prototipo virtual para al mismo probarlo en el túnel de viento proporcionado por *Altair*, y así obtener su a escala 1:18, para realizar la fabricación aditiva o comúnmente conocida como impresión 3D, en el cual se validarán los datos arrojados por el software mismo que requiere seleccionar el método más adecuado en función de factores como costos, tiempo y calidad (Nisbett, 2012).

La selección de materiales y técnicas de fabricación también es de suma importancia en el proceso de producción de carrocerías. El uso de materiales compuestos, como la fibra de carbono, puede ofrecer beneficios significativos en términos de peso, resistencia y durabilidad, pero también puede ser más costoso y requiere equipos y procesos de fabricación especializados.

Por otro lado, el estampado de chapa metálica es una técnica más tradicional y económica, pero puede limitar la libertad de diseño y requerir un mayor trabajo de acabado (Vera-Ramos & Adum-Ordoñez, 2019).

En el contexto específico del *Porsche 356*, es fundamental realizar un análisis detallado de las características estéticas y funcionales del vehículo original. El 356 es conocido por su diseño distintivo y su excelente rendimiento, por lo que es crucial capturar la esencia y el carácter de este icónico automóvil en la réplica producida. Esto requiere un estudio cuidadoso de sus dimensiones, proporciones, líneas de diseño y características de rendimiento para garantizar que la réplica cumpla con los estándares de calidad y autenticidad esperados por los entusiastas y coleccionistas de automóviles clásicos (Vera-Ramos & Adum-Ordoñez, 2019).

Figura 5.
Porsche 356 Pre A



Nota: Fotografía referencial del Porsche 356. Tomado del manual de reparación Porsche AG

Además del análisis de las tecnologías y métodos de diseño y fabricación, es importante revisar la literatura existente relacionada con la fabricación de réplicas de automóviles clásicos y

la aplicación de tecnologías modernas en este campo. Existen numerosos estudios y proyectos que han explorado diferentes enfoques para la fabricación de réplicas de automóviles clásicos, desde técnicas artesanales tradicionales hasta métodos avanzados de fabricación digital. Estos recursos proporcionarán información valiosa y perspectivas útiles que pueden informar y enriquecer el desarrollo del proyecto (Galarza & Rodríguez, 2018).

Replica de vehículos

El arte de replicar vehículos históricos y de carreras es una pasión que ha cautivado a entusiastas y coleccionistas de todo el mundo. Las réplicas, meticulosamente elaboradas para capturar la esencia y el encanto de los modelos originales, ofrecen una oportunidad única de revivir la nostalgia de épocas pasadas y experimentar la emoción de los legendarios autos de competición.

Según Báez (2023), las réplicas de vehículos se realizan utilizando métodos artesanales, desde la fabricación de piezas a medida hasta la restauración de componentes originales, cada paso del proceso requiere un cuidado meticuloso y una atención al detalle inigualable. Los artesanos expertos se esfuerzan por recrear cada aspecto del vehículo original, desde su diseño exterior hasta su motor y sistema de suspensión.

La mayoría de las réplicas de vehículos se fabrican en talleres especializados y garajes privados, donde se cuenta con el equipo y la experiencia necesarios para llevar a cabo proyectos de esta envergadura. Estos talleres suelen estar ubicados en áreas con una rica tradición en la industria automotriz, como Alemania, Italia, Reino Unido y Estados Unidos,

Mismos proyectos que se desarrollan, con una duración de fabricación considerablemente variada, dependiendo del modelo, la complejidad y los recursos disponibles. Según Báez (2023), la construcción de una réplica puede tomar desde varios meses hasta varios años, dependiendo del alcance del proyecto y la disponibilidad de piezas y materiales. Los modelos más simples y comunes pueden completarse en un período relativamente corto, mientras que las réplicas de vehículos de carreras de alta gama pueden requerir un tiempo considerable debido a su mayor complejidad y exigencias técnicas.

Existen una amplia variedad de modelos de vehículos que se replican con frecuencia, abarcando desde clásicos icónicos hasta autos de competición. Algunos de los modelos más populares incluyen:

- *Porsche 356 Speedster*
- *Shelby Cobra*
- *Ford GT40*
- *Lancia Stratos*
- *Porsche 917*
- *Lotus super seven*
- *Mercedes Benz 300SL*

Estos vehículos son admirados por su diseño atemporal, su rendimiento excepcional y su relevancia histórica, lo que los convierte en opciones populares para aquellos que buscan poseer una réplica de un automóvil histórico.

En cuanto a los precios, las réplicas de vehículos pueden variar significativamente dependiendo del modelo, la calidad de la construcción y los componentes utilizados. Los precios de las réplicas pueden oscilar desde unos pocos miles de dólares hasta cifras de seis o incluso

siete cifras para modelos de alta gama y exclusividad. El costo final también puede verse afectado por factores como la personalización adicional, el estado del mercado y la reputación del taller o fabricante.

Figura 6.
Vehículos de réplica en reino unido



Nota: Reunión de vehículos clásicos y replicas. Obtenido de: Excelencias del motor. (s. f.).

<https://www.excelenciasdelmotor.com/actividades-y-eventos/reunion-mensual-del-club-de-autos-clasicos-britanicos>

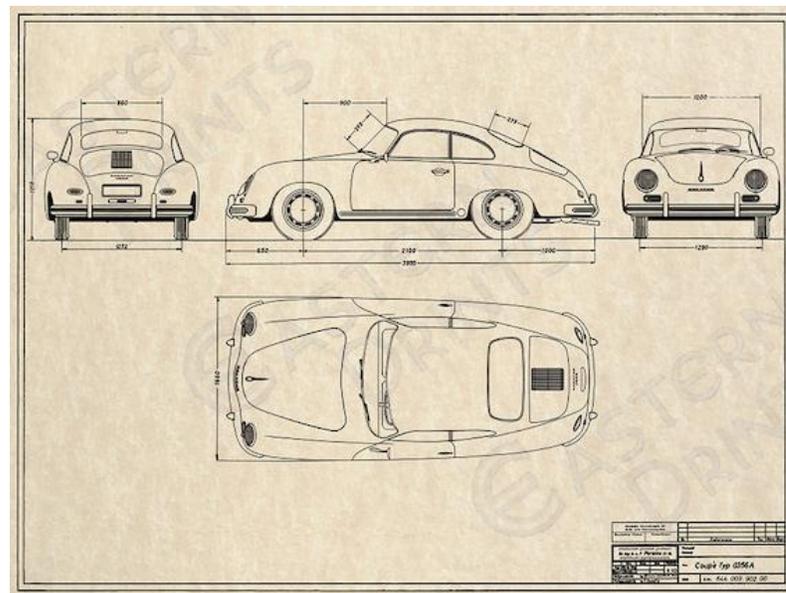
Datos y especificaciones Porsche 356

El *Porsche 356 A* es un automóvil deportivo clásico que representa la evolución temprana de la ingeniería automotriz de Porsche. Lanzado en 1955, el 356 A fue una mejora significativa respecto a su predecesor, el 356 pre-A. Este modelo se distingue por su construcción ligera y su diseño aerodinámico, que incorporaba materiales avanzados para su época, como el aluminio y el acero de alta resistencia. La carrocería del 356 A fue diseñada para

maximizar el rendimiento y la eficiencia, con una forma aerodinámica que reducía la resistencia al aire y mejoraba la estabilidad a altas velocidades, este modelo se fabricó hasta 1959.

De igual manera, se construyó utilizando una estructura monocasco, una técnica que proporcionaba una mayor rigidez y menor peso en comparación con los métodos de construcción de carrocerías separadas. Esta estructura no solo mejoraba el rendimiento del vehículo, sino que también ofrecía una mejor seguridad y durabilidad. El chasis estaba hecho de acero, mientras que las puertas, el capó y el maletero estaban fabricados en aluminio para reducir el peso. Este enfoque innovador en la construcción fue uno de los factores clave que contribuyeron al éxito del 356 A en las carreras y entre los entusiastas de los automóviles.

Figura 7
Planos Porsche 356 A



Nota: Planos del Porsche 356 originales. Obtenido de: *Workshop Manual for 356* (1.^a ed., Vol. 1). (1960).

[Versión digitalizada]. <https://www.scribd.com/document/527876195/Porsche-356-Workshop-Manual>

De la manera en la que se detalla en la tabla 1 las especificaciones técnicas del vehículo a replicar para así poder tener contexto de la época y de las prestaciones del vehículo al momento de generar una posibilidad de réplica, poniendo en valor relaciones como peso vs potencia, estabilidad enfocándonos en dimensiones y además de esto en la figura de la carrocería.

Tabla 1

Tabla de medidas originales Porsche 356

Especificación	Medida
Longitud	3,950 mm
Ancho	1,670 mm
Altura	1,320 mm
Distancia entre ejes	2,100 mm
Diámetro de rueda	15 pulgadas
Peso en vacío	800 kg

Nota: Planos del Porsche 356 originales. Obtenido de: *Workshop Manual for 356* (1.^a ed., Vol. 1). (1960).

[Versión digitalizada]. <https://www.scribd.com/document/527876195/Porsche-356-Workshop-Manual>

Tecnologías en la Fabricación de Carrocerías

Para profundizar en el análisis de la producción de carrocerías y la aplicación de tecnologías modernas en este campo, es importante considerar el papel de los análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés). Esta técnica computacional permite simular y analizar el comportamiento de los fluidos, como el aire, alrededor de objetos complejos, como las carrocerías de los automóviles. En el contexto del diseño y fabricación de

carrocerías, los análisis CFD son especialmente útiles para evaluar y mejorar el rendimiento aerodinámico de los vehículos.

Los análisis CFD proporcionan información detallada sobre la distribución de presiones, velocidades y flujos de aire alrededor de la carrocería del automóvil. Esto permite a los ingenieros identificar áreas de alta resistencia aerodinámica, como las esquinas afiladas o los bordes abruptos, y optimizar el diseño para minimizar la resistencia al aire y mejorar la eficiencia del vehículo. Además, los análisis CFD también pueden ayudar a predecir y mitigar problemas de flujo, como la separación del flujo y la generación de turbulencias, que pueden afectar negativamente el rendimiento aerodinámico y la estabilidad del vehículo.

La aplicación de análisis CFD en el diseño de carrocerías permite a los ingenieros explorar una amplia gama de diseños y configuraciones antes de realizar pruebas físicas en modelos a escala o prototipos. Esto no solo acelera el proceso de diseño y desarrollo, sino que también reduce los costos asociados con las pruebas físicas y los prototipos. Además, al permitir una evaluación más exhaustiva de múltiples diseños y configuraciones, los análisis CFD pueden ayudar a identificar soluciones óptimas que de otro modo podrían pasar desapercibidas (Autodesk, 2015; Cascajosa, 2005).

La eficiencia aerodinámica de un vehículo proporciona diversas ventajas que inciden directamente en la reducción del tiempo en pista o reducción de consumo de combustible en carretera. En el proceso de diseño, se persigue la disminución del coeficiente de arrastre aerodinámico (CX), el cual tiene un impacto significativo en la cantidad de potencia requerida

por el motor para superar la resistencia del aire, lo que resulta en minimizar el uso de combustible. Además de esto, la geometría del vehículo debe permitir un flujo de aire adicional para el sistema de refrigeración sin comprometer la eficiencia aerodinámica general. La optimización de la aerodinámica no solo busca reducir la resistencia al avance del vehículo, sino también garantizar una adecuada refrigeración del motor y otros componentes críticos, manteniendo un equilibrio óptimo entre eficiencia energética y rendimiento en pista. En última instancia, una aerodinámica bien diseñada contribuye a mejorar el desempeño global del vehículo, aumentando su velocidad, estabilidad y eficiencia energética.

Otro aspecto importante para considerar en la producción de carrocerías es el uso de tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D. La impresión 3D ofrece numerosas ventajas en términos de velocidad, flexibilidad y personalización en comparación con los métodos de fabricación tradicionales. En el contexto del diseño y fabricación de carrocerías de automóviles, la impresión 3D puede utilizarse para crear prototipos de alta calidad y modelos a escala con una precisión excepcional (Autodesk, 2015; Cascajosa, 2005).

Existen por ejemplo vehículos de producción como el Zcinger 21C, mismo que está concebido directamente con inteligencia artificial y fabricado mediante una completa impresión 3D siendo así un vehículo revolucionario diseñado con tecnología de impresión 3D e inteligencia artificial. Esta obra maestra de la ingeniería automotriz combina la precisión de la impresión 3D con la capacidad de adaptación de la inteligencia artificial para ofrecer un rendimiento excepcional y una experiencia de conducción incomparable. Cada detalle del Zcinger 21C, desde su chasis hasta su carrocería, se ha creado utilizando técnicas de impresión 3D avanzadas, lo que

permite una reducción importante en el tiempo de fabricación y una construcción precisa. Con el Czinger 21C, la innovación se encuentra en cada curva y en cada componente, ofreciendo una visión del futuro de la industria automotriz.

Figura 8.
Czinger 21c



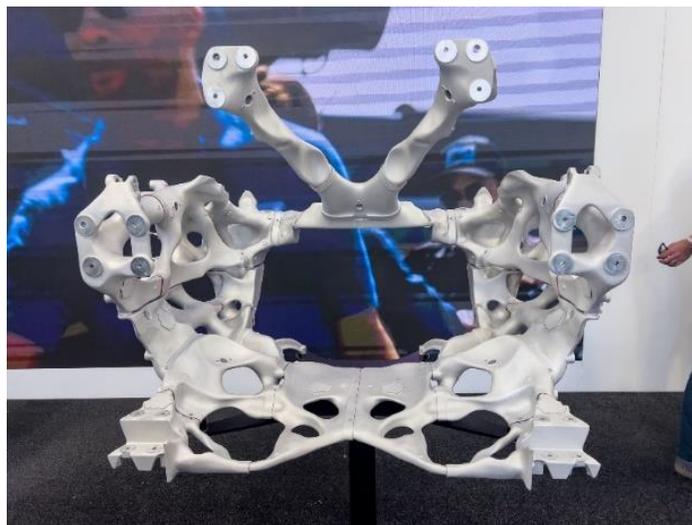
Nota: Czinger 21c vehículo fabricado enteramente con impresión 3D. Obtenido de: *Czinger, K. (s. f.).*

Czinger. <https://www.czinger.com/>

El modelo 21c se constituye principalmente de una combinación de aluminio, titanio y fibra de carbono. *Czinger* emplea un proceso de fabricación aditiva que integra polvos metálicos atomizados en un láser de alta potencia, el cual funde los granos individuales del material y construye los productos capa por capa. Una vez que se crea la primera capa de material, la impresora avanza para agregar una nueva capa de material metálico atomizado y el láser repite el proceso para formar la siguiente capa. La impresión tridimensional se convierte en el único método factible para este tipo de manufactura debido a la complejidad de los diseños computarizados, los cuales no pueden ser realizados manualmente con la misma precisión y resistencia estructural

requeridas para su óptimo funcionamiento. Por lo tanto, *Czinger* opta por no emplear mano de obra humana y desarrolla el método de ensamblaje vertical. (Donut, 2020).

Figura 9.
Subchasis manufacturado con impresión aditiva



Nota: Czinger 21c vehículo fabricado enteramente con impresión 3D. Obtenido de: *Czinger, K. (s.f.)*.

Czinger. <https://www.czinger.com/>

Una de las principales aplicaciones de la impresión 3D en la producción de carrocerías es la fabricación de moldes y herramientas para la producción de piezas. Los moldes impresos en 3D pueden diseñarse con una geometría compleja y detalles finos, lo que permite la producción de piezas de carrocería altamente detalladas y precisas como se presencia en el ejemplo de *Czinger*. Además, la impresión 3D también puede utilizarse para fabricar componentes específicos del automóvil, como conductos de aire, rejillas y deflectores, que pueden integrarse directamente en la carrocería (Galarza & Rodríguez, 2018).

La tecnología de impresión 3D también ofrece la posibilidad de personalizar y optimizar la geometría de las piezas de la carrocería para satisfacer requisitos específicos de rendimiento

aerodinámico, resistencia estructural y peso. Los diseñadores pueden iterar rápidamente a través de diferentes diseños y configuraciones, evaluando el impacto de cada cambio en el rendimiento general del vehículo mediante análisis CFD y pruebas físicas. Esto permite un enfoque más iterativo y colaborativo en el diseño y desarrollo de la carrocería, lo que puede conducir a mejoras significativas en el rendimiento y la eficiencia del vehículo (Galarza & Rodríguez, 2018).

Figura 10.
Impresión aditiva a escala



Nota: Czinger 21c vehículo fabricado enteramente con impresión 3D. Obtenido de: Czinger, K. (s. f.).

Czinger. <https://www.czinger.com/>

Aerodinámica en Vehículos

Ecuación de Bernoulli

El principio de Bernoulli evalúa la energía de un fluido en dos puntos específicos de su trayectoria. Suponiendo que estos puntos estén a la misma altura z , es decir, compartan la misma energía potencial. Esta ecuación es fundamental para comprender el comportamiento de los fluidos en diferentes situaciones y aplicaciones ingenieriles.

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho * g} + \frac{U_1^2 - U_2^2}{2 * g} = cte$$

La fórmula relaciona la presión (P), la velocidad (U), la densidad (ρ) y la gravedad (g) de un fluido. Según esta ecuación, un aumento en la presión del fluido resulta en una disminución en su velocidad, y viceversa. Este principio es crucial para entender cómo se comporta el fluido alrededor de la superficie de un vehículo.

Por otro lado, la ecuación de continuidad y conservación de la masa describe el flujo del fluido dentro de un conducto. Indica que el flujo de entrada será igual al de salida, siempre que no haya fuentes externas que agreguen o resten flujo. En condiciones de flujo incompresible y densidad constante, si el área del conducto aumenta, la velocidad de flujo disminuye, y viceversa.

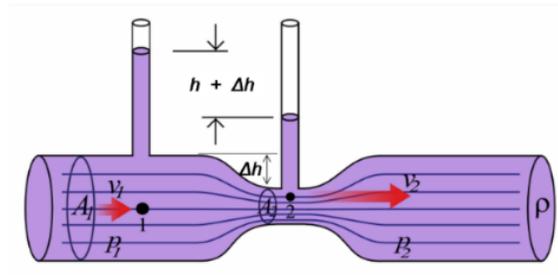
$$m_1 = m_2$$

$$A_1 * V_1 = A_2 * V_2$$

Las ecuaciones de Bernoulli y de continuidad nos proporcionan una comprensión fundamental del fenómeno conocido como efecto Venturi. Este efecto se manifiesta cuando un fluido atraviesa un conducto en el que la sección transversal se estrecha, lo que resulta en un aumento de la velocidad del fluido en ese punto y una disminución de la presión, y viceversa cuando la sección se ensancha.

Ahora, al aplicar este principio al diseño del chasis de un vehículo convencional, podemos entender cómo afecta a las fuerzas verticales. La forma del chasis, que presenta similitudes con el perfil de ala de un avión, aprovecha el efecto Venturi para generar fuerzas aerodinámicas.

Figura 11.
Efecto Venturi

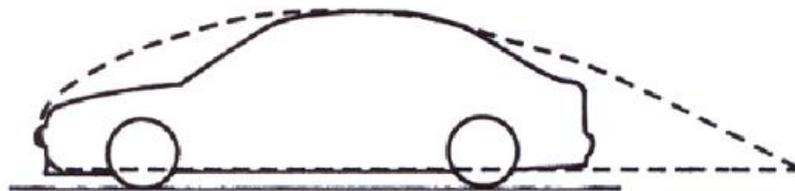


Nota: Evento físico denominado tubo de Venturi Obtenido de: Nisbett, R. G. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F.: McGrawHill. www.maquinariaszeziola.com. (19 de 05 de 2015). DMZ

Maquinaria Zeziola SRL. Obtenido de <http://www.maquinariaszeziola.com/manual-de-curvado/tecnica-de-curvado-decanos.html>

Al reducir la sección transversal en ciertas áreas del chasis, como el alerón trasero, podemos aumentar la velocidad del aire y reducir la presión, lo que genera una fuerza descendente que mejora la estabilidad del vehículo en curvas y a altas velocidades. Esto es fundamental en el diseño de autos de competición, donde el control aerodinámico es crucial para un rendimiento óptimo en pista.

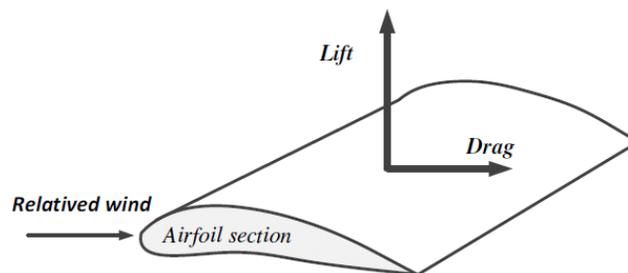
Figura 12.
Similitud ala de un avión con un vehículo



Nota: Similitud entre la forma del ala de un avión y un vehículo, teniendo en cuenta que se busca en la automoción que la misma sea un ala invertida. Obtenido de: Cascajosa, M. (2005). Ingeniería de Vehículos. México D. F.: Alfaomega.

Cuando analizamos el flujo de aire alrededor del vehículo, desde el frente hasta la parte trasera, se espera que la cantidad de aire que entra sea igual a la que sale, de acuerdo con el principio de conservación de la masa. Sin embargo, debido a la forma aerodinámica del vehículo, el flujo de aire sobre la parte superior recorre una distancia mayor que sobre la parte inferior. Esto se debe a que la parte superior tiene una curvatura más pronunciada que la inferior, lo que implica que el aire debe moverse a una velocidad más alta para cubrir la misma distancia.

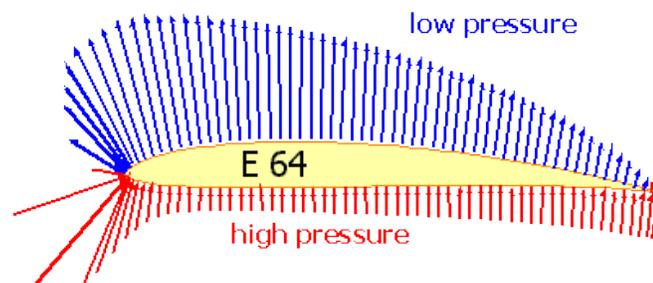
Figura 13.
Ala de un avión



Nota: Fuerzas aplicadas en el ala de un avión. Obtenido de: Cascajosa, M. (2005). Ingeniería de Vehículos. México D. F.: Alfaomega.

Como consecuencia, se establece un gradiente de presiones, siendo mayor la presión en la parte inferior y menor en la parte superior. Esta disparidad de presión da lugar a la generación de sustentación, similar al principio que permite que un ala de avión genere sustentación. Aunque pueda parecer sorprendente, este fenómeno es crucial tenerlo en cuenta en el diseño aerodinámico del vehículo, ya que puede influir en su comportamiento en la pista.

Figura 14.
Diferencia de presiones en un ala

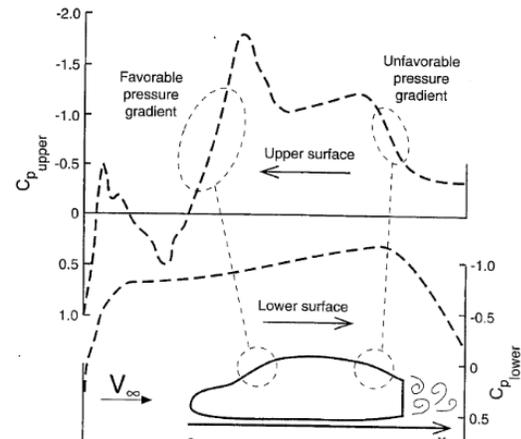


Nota: Evento físico denominado tubo de Venturi Obtenido de: Nisbett, R. G. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F.: McGrawHill. www.maquinariaszeziola.com. (19 de 05 de 2015). DMZ Maquinaria Zeziola SRL. Obtenido de <http://www.maquinariaszeziola.com/manual-de-curvado/tecnica-de-curvado-decanos.html>

Cabe resaltar que, en la parte inferior del vehículo, el coeficiente de presión siempre es negativo, lo que implica un aumento en la velocidad del aire, lo cual ya se sabía debido a la reducción de la sección en esta zona. La presión disminuye, pero en comparación con la presión atmosférica de entrada, ya que, si se compara con la presión superior, donde esta presenta cambios más pronunciados dependiendo del punto donde se encuentre, en la mayoría de los casos la presión más baja se encuentra en la parte superior del vehículo. Por tanto, se puede

afirmar que, en promedio, en la parte superior resalta la zona de menor presión, dando lugar a esta diferencia de presiones y a la fuerza de sustentación.

Figura 15.
Interpretación gráfica de presiones aerodinámicas



Nota: Gráfico de presión en la carrocería de un vehículo graficada. Obtenido de: Cascajosa, M. (2005). Ingeniería de Vehículos. México D. F.: Alfaomega.

Para crear *downforce* o reducir la sustentación creada por el cuerpo del vehículo, a menudo se busca minimizar la distancia del chasis al suelo, reduciendo así la sección de paso para que el aire pase más rápidamente, lo que provocará una reducción de la presión, aplicando directamente el efecto *Venturi* en la parte inferior del vehículo.

La fuerza de sustentación producida por la forma del vehículo es considerablemente menor que la fuerza ejercida por su propio peso. Esto implica que la suma total de fuerzas en la dirección vertical siempre actuará hacia abajo, evitando que el vehículo se eleve en el aire. Este fenómeno es crucial en el diseño aerodinámico de vehículos para garantizar su estabilidad y seguridad en el suelo, ya que asegura que el automóvil permanezca en contacto con la carretera

en todo momento y no experimente levantamientos no deseados que pudieran resultar en situaciones peligrosas.

Efecto Capa Limite

Cuando el flujo de aire toca una superficie, como la de un automóvil o teóricamente una placa plana, la condición de no deslizamiento en los puntos de contacto causa una distribución de velocidades que varía dependiendo de si el flujo es laminar o turbulento.

En el caso de un flujo laminar, el perfil de velocidades tiene una forma parabólica: los puntos de aire en contacto con la superficie tienen velocidad cero (suponiendo que la superficie está estacionaria, como en los modelos de automóviles) y la velocidad aumenta al alejarse de la superficie hasta alcanzar la velocidad del flujo no perturbado, es decir, el flujo libre. Esta zona se llama capa límite. En el caso de un flujo turbulento, la capa límite se ve alterada por la turbulencia, lo que lleva a la formación de una capa límite turbulenta, donde la distribución de velocidades es menos predecible, aunque tiende a tener una forma parabólica.

Para modelar adecuadamente los fenómenos que ocurren en la capa límite, se emplean las denominadas funciones de pared "*Wall Functions*". Estas funciones se utilizan para resolver el campo de velocidades en la zona cercana a la superficie en lugar de las ecuaciones de gobierno. En cambio, para la región fuera de la capa límite, donde el flujo es libre, se aplican las ecuaciones RANS "*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*". Si se intentaran utilizar las ecuaciones de gobierno en la capa límite, se necesitaría una alta precisión en los elementos de la malla cercanos a la superficie para capturar correctamente el gradiente de velocidades. Esto se debe a que el grosor de la capa límite es muy pequeño y la variación de velocidad puede ser

extremadamente pronunciada, como pasar de 0 a 200 km/h en una distancia muy corta, lo cual es inviable con un mallado estándar.

El propósito, por tanto, es desarrollar funciones que reemplacen las ecuaciones de gobierno en esta zona, evitando así la necesidad de un mallado extremadamente preciso. Las funciones de pared simplifican la representación de los fenómenos en la capa límite al modelar el perfil de velocidades cerca de la superficie. En la subcapa viscosa, las tensiones viscosas predominan sobre las turbulentas, lo que es un aspecto crucial para una representación precisa del comportamiento del flujo. La ley de pared describe cómo varía la velocidad en función de la distancia a la pared, proporcionando una herramienta esencial para simplificar los cálculos en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD).

Además, estas funciones permiten una mayor eficiencia computacional al reducir la necesidad de un mallado fino en la capa límite, lo cual es fundamental para simular flujos de alta velocidad y complejidad. Sin estas funciones, los modelos requerirían una cantidad de recursos computacionales prohibitivamente alta, haciendo inviable la simulación precisa de muchos problemas prácticos en la ingeniería aerodinámica y otros campos relacionados.

Fluidodinámica en Cuerpos

La resistencia fluidodinámica debido a la presión, que es la fuerza resultante de las presiones que actúan sobre un objeto, y la resistencia fluidodinámica por fricción, que es la resultante de las tensiones de corte en la superficie del objeto en contacto con el flujo del fluido, son ambas fuerzas superficiales. Una de estas fuerzas será predominante sobre la otra

dependiendo, principalmente, de la forma del objeto en cuestión. Por ejemplo, en cuerpos delgados con poca área frontal, como una placa plana, la resistencia por fricción “*skin friction*” será significativa, mientras que, en objetos de forma redonda, como una pelota de tenis, la resistencia debida a la presión “*form drag*” será más relevante.

La resistencia de presión surge debido a la diferencia de presiones entre la parte frontal y trasera de un objeto. Por ejemplo, en un automóvil, el flujo de aire impacta contra la parte delantera, creando una zona de alta presión. Al separarse la capa límite en la parte trasera, se forma una zona de baja presión. Esta diferencia de presiones genera una fuerza que se mueve de la zona de alta presión a la de baja presión, es decir, desde la parte delantera hacia la trasera, resultando en la resistencia de presión.

La resistencia por fricción se origina por el flujo de aire que rodea el objeto, generando esfuerzos cortantes en la capa límite. Este tipo de resistencia es causado por la fricción entre el aire y la superficie del objeto. La resistencia fluidodinámica, por lo tanto, se puede descomponer en dos componentes: resistencia de presión y resistencia por fricción. La magnitud y dirección de estas fuerzas varían según la forma y orientación del objeto en el flujo. Por ejemplo, en un avión, estas resistencias influyen en el diseño aerodinámico para minimizar la fricción y la presión, mejorando la eficiencia del vuelo

Flujos Presentes en Vehículos

Aunque el movimiento del flujo de aire alrededor de un vehículo en movimiento es complejo, existen patrones específicos que generalmente sigue la corriente de aire para cualquier

tipo de vehículo. Cuando el aire golpea la trayectoria del vehículo, se crea un punto de estancamiento en la parte delantera del mismo, lo que genera una zona de alta presión. El aire continúa sobre el capó del vehículo a alta velocidad, creando una separación en la corriente que provoca turbulencias. La corriente se vuelve a unir al vehículo en la parte superior, antes de despegarse nuevamente en la parte trasera, siguiendo la inclinación del vehículo. Finalmente, el aire se separa del vehículo, creando un rastro de flujo turbulento. Estos fenómenos son de gran interés para el estudio de la aerodinámica de los vehículos.

Simulación CFD

La dinámica computacional de fluidos CFD, una rama crucial de la mecánica de los fluidos emplea métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar fenómenos relacionados con el movimiento de fluidos. A través de la utilización de recursos computacionales, se realizan cálculos necesarios para simular la interacción de líquidos y gases con superficies definidas por condiciones específicas.

El núcleo de prácticamente todos los problemas de CFD son las ecuaciones de *Navier-Stokes*, fundamentales para describir diversos flujos de fluidos. Al simplificar estas ecuaciones y eliminar términos relacionados con la viscosidad, se llega a las ecuaciones de *Euler*. A su vez, una mayor simplificación, al desechar términos vinculados con la vorticidad, da como resultado las ecuaciones potenciales completas. Asimismo, para flujos subsónicos y supersónicos con perturbaciones mínimas, se pueden linealizar estas ecuaciones para obtener las ecuaciones potenciales linealizadas.

La aplicación de la CFD abarca un amplio espectro de industrias, desde la optimización de la aerodinámica de aviones hasta la mejora del diseño automotriz y el análisis de procesos industriales. Esta capacidad para prever y visualizar el comportamiento de los fluidos mediante simulaciones computacionales ha transformado radicalmente el enfoque y la resolución de problemas en la ingeniería y ciencias de materiales, permitiendo un diseño más eficiente y seguro en una variedad de campos de aplicación.

A finales del siglo XIX, Claude-Louis Navier y George Stokes formularon teorías sobre la fricción interna de los fluidos en movimiento, lo que llevó a la conocida ecuación de Navier-Stokes. Se trata de un conjunto de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido. Resolviendo estas ecuaciones es posible conocer el valor de variables tales como la velocidad, presión o temperatura del fluido (Navier & Stokes, 1822).

Actualmente, la resolución de estas ecuaciones no es trivial, excepto para casos muy concretos con soluciones analíticas (Smith, 2008). Por lo tanto, se recurre al análisis numérico para obtener una solución aproximada, empleando supercomputadoras que realizan millones de cálculos. El CFD, como rama de la mecánica de fluidos, se encarga de obtener estos resultados. En otras palabras, el CFD transforma las ecuaciones en derivadas parciales en un sistema algebraico de ecuaciones que los computadores pueden resolver con relativa facilidad (Thompson, 2016).

La estabilidad de la discretización seleccionada se establece generalmente numéricamente, en lugar de analíticamente como con problemas lineales simples. También se

debe tener especial cuidado en que la discretización maneje soluciones discontinuas con gracia. Las ecuaciones de *Euler* y las ecuaciones de *Navier-Stokes* permiten colisiones y superficies de contacto (Johnson, 1999). La resolución de las ecuaciones de *Navier-Stokes* mediante CFD es fundamental para entender y predecir el comportamiento de los fluidos en diversos campos de la ingeniería, desde la aerodinámica de aviones hasta la simulación de flujos en procesos industriales (Anderson, 2015).

Durante este proyecto, se empleará el Método de Elementos Finitos (FEM), comúnmente utilizado en el análisis estructural de sólidos, pero también aplicable a fluidos. La formulación del FEM se ha adaptado para incorporar las ecuaciones de la dinámica de fluidos (Reddy, 2010). A pesar de que el FEM requiere una formulación cuidadosa para garantizar la conservación, es más estable que el enfoque del Método de Volumen Finito (FVM) (Karniadakis & Sherwin, 2005). Es importante destacar que el FEM puede requerir más memoria y tener tiempos de resolución más lentos que el FVM.

Programas de simulación CFD

La Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una disciplina de la ingeniería que se centra en el análisis numérico de los flujos de fluidos y los fenómenos relacionados. La simulación CFD se ha convertido en una herramienta invaluable en el diseño y la optimización de una amplia variedad de sistemas y productos en industrias como la automotriz, aeroespacial, energética, naval y muchas otras.

Entre los programas de simulación CFD más comúnmente utilizados se encuentran: *ANSYS Fluent*, *COMSOL Multiphysics*, *OpenFOAM*, *Autodesk CFD*, *Siemens Star-CCM+*, *Altair Hypermesh* y *NUMECA Fine/Marine*, entre otros. Estos programas ofrecen una variedad de características y capacidades para adaptarse a las necesidades específicas de diferentes aplicaciones y sectores industriales.

Las simulaciones CFD implican la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales que gobiernan el flujo de fluidos, como las ecuaciones de *Navier-Stokes*. Para ello, se discretiza el dominio de simulación en una malla computacional, que puede ser estructurada o no estructurada, dependiendo de la geometría del problema y las preferencias del usuario.

La elección de la malla y su refinamiento juegan un papel crucial en la precisión y eficiencia de la simulación. Las mallas estructuradas, que consisten en elementos regulares como tetraedros o hexaedros, son más adecuadas para geometrías simples y flujos laminares, mientras que las mallas no estructuradas, que pueden adaptarse fácilmente a geometrías complejas, son más apropiadas para flujos turbulentos y problemas con geometrías irregulares.

Los parámetros que se pueden analizar en una simulación CFD son diversos e incluyen la velocidad del flujo, la presión, la temperatura, la distribución de velocidades y presiones, la turbulencia, la transferencia de calor, entre otros. La elección de los parámetros a analizar depende de los objetivos específicos de la simulación y las condiciones del problema en cuestión, en este apartado se describirá de manera breve el software a emplear.

Altair Hypermesh:

Altair HyperMesh es una suite completa de simulación multifísica y análisis de datos que ofrece herramientas avanzadas para el diseño y la optimización de productos en una variedad de industrias. Esta plataforma se destaca por su capacidad para integrar diversas disciplinas de ingeniería, proporcionando una solución unificada para análisis estructural, dinámica de fluidos computacional (CFD), simulación electromagnética y más.

HyperMesh permite la simulación de múltiples fenómenos físicos en una sola plataforma, incluyendo análisis estructural, térmico, fluido y electromagnético. Esto facilita el estudio de la interacción entre diferentes tipos de cargas y condiciones operativas. Con herramientas avanzadas de optimización, *HyperMesh* ayuda a diseñar productos más ligeros, eficientes y robustos. La optimización topológica permite encontrar las mejores formas y configuraciones para componentes mecánicos, la suite incluye herramientas de generación de mallas de alta calidad para modelos 2D y 3D. Estas herramientas son cruciales para asegurar resultados precisos en simulaciones CFD y análisis estructurales, ofrece capacidades avanzadas de postprocesamiento, permitiendo a los usuarios visualizar y analizar resultados de simulaciones de manera detallada. Las herramientas de visualización incluyen gráficos 3D, animaciones y mapas de contornos. Esta combinación de enfoques proporciona una flexibilidad adicional en la representación de geometrías complejas y en la resolución eficiente de una amplia variedad de problemas de ingeniería y física. Sin embargo, la implementación efectiva de una malla híbrida requiere un cuidadoso diseño y una gestión adecuada de la conectividad entre las diferentes secciones de la malla para garantizar la precisión y la estabilidad del solucionador utilizado.

En el presente proyecto de tesis, se ha decidido utilizar el programa de simulación CFD *HyperMesh* debido a sus capacidades avanzadas de mallado y porque es el software disponible en la universidad, de esta manera, se asegura que el proyecto de tesis se pueda llevar a cabo con las mejores herramientas disponibles, optimizando tanto el proceso de investigación como la calidad de los resultados obtenidos.

Mallado

Las mallas 3D, también conocidas como mallas poligonales, son representaciones tridimensionales de superficies que se basan en la interconexión de vértices mediante aristas. Un vértice se define como un punto en el espacio tridimensional, capaz de almacenar información específica. Por otro lado, una arista conecta dos vértices, siendo un punto de unión entre dos triángulos. Además, tres vértices diferentes unidos por aristas forman una faceta o triángulo, que constituye la unidad básica de representación de los polígonos tridimensionales. Aunque algunos sistemas emplean polígonos definidos por cuatro vértices, internamente se representan como dos triángulos. (Smith, 2018; Johnson, 2016; García, 2014; Brown, 2020).

La creación manual de una malla mediante la especificación de vértices y caras puede resultar laboriosa y propensa a errores. Por ello, es mucho más eficiente utilizar herramientas de software especializadas en gráficos 3D. Estos programas aprovechan técnicas como la subdivisión y la extrusión. La subdivisión fragmenta los triángulos en unidades más pequeñas añadiendo vértices y aristas, mientras que la extrusión genera nuevas caras siguiendo el contorno de las facetas existentes, creando así volúmenes adicionales. Por ejemplo, la extrusión de un cuadrado produce un prisma. (Lee, 2017; Martínez, 2019; White, 2015; Thomas, 2021).

Las mallas poligonales se pueden clasificar según el método de almacenamiento de su información. Las tablas vértice-vértice indican para cada vértice su coordenada en el espacio y la lista de otros vértices con los que está conectado. Este enfoque es simple de implementar, pero dificulta los cálculos y operaciones al requerir la inferencia de la información de aristas y caras. En contraste, las tablas cara-vértice son más utilizadas, ya que contienen dos tablas: una para las caras con los vértices que las componen y otra para los vértices con las caras que los incluyen. Aunque este método facilita las actualizaciones en la geometría del objeto, las operaciones de división o unión de mallas pueden ser más complejas. Por último, la representación arista-alada ofrece una gran flexibilidad al proporcionar información explícita sobre vértices, aristas y caras del modelo, lo que agiliza las operaciones de unión y división de mallas. (Smith, 2018; Johnson, 2016; García, 2014; Brown, 2020).

La generación de mallas es el primer paso de toda simulación y su calidad es muy importante, ya que determinará la posibilidad de resolver el caso y la velocidad computacional para hacerlo. La complejidad de este proceso dependerá en gran medida del tipo de simulación y de las características del modelo. En nuestro caso, partimos de una geometría muy compleja debido a los múltiples apéndices aerodinámicos utilizados para mejorar el rendimiento en las curvas. Además, existe la dificultad de generar una malla aerodinámica lo suficientemente fina cerca de la pared para capturar el efecto de la capa límite.

Mallas Estructuradas

En el contexto de la simulación numérica, las mallas estructuradas se distinguen por su organización regular, la cual puede representarse de manera sistemática en forma de

matriz bidimensional o tridimensional. Esta disposición restringe las opciones de elementos a cuadriláteros en dos dimensiones o hexaedros en tres dimensiones. La regularidad en la conectividad facilita la gestión del espacio, dado que las relaciones de vecindad se establecen en función de la disposición de almacenamiento (Smith, 2018).

Este enfoque ofrece ventajas en términos de eficiencia computacional y precisión en ciertos tipos de problemas de ingeniería, como la dinámica de fluidos o el análisis estructural (Jones, 2015), sin embargo, es importante considerar que las mallas estructuradas pueden presentar limitaciones en la representación de geometrías complejas y en la adaptabilidad a cambios en las condiciones del problema.

Malla no Estructurada

En el ámbito de la simulación numérica, las mallas no estructuradas se definen por su conectividad irregular, que no puede representarse de manera sistemática como una matriz bidimensional o tridimensional en la memoria del ordenador. Esta característica permite la utilización de cualquier tipo de elemento compatible con el solucionador utilizado (Smith, 2019). En contraste con las mallas estructuradas, las mallas no estructuradas requieren un mayor espacio de almacenamiento, ya que la conectividad entre nodos vecinos debe ser explícitamente definida y almacenada (Jones, 2016).

Esta flexibilidad en la conectividad ofrece ventajas significativas en la representación de geometrías complejas y en la adaptabilidad a cambios en las condiciones del problema. Sin embargo, también puede resultar en un aumento en los requisitos computacionales y en una

menor eficiencia en la resolución de ciertos problemas. Por lo tanto, la elección entre mallas estructuradas y no estructuradas dependerá de las características específicas de la aplicación y de los objetivos de la simulación.

Malla Mixta:

En el ámbito de la simulación computacional, una malla híbrida se compone tanto de secciones estructuradas como de secciones no estructuradas (Smith, 2017). Es importante destacar que esta definición implica comprender cómo se almacena y se utiliza la malla en el contexto de la simulación. Existe cierto debate en cuanto a la aplicación precisa de los términos "híbrido" y "mixto". El término "mixto" se utiliza generalmente para describir mallas que contienen elementos asociados tanto con mallas estructuradas como con mallas no estructuradas, presumiblemente almacenadas de manera no estructurada (Jones, 2018).

Metodología

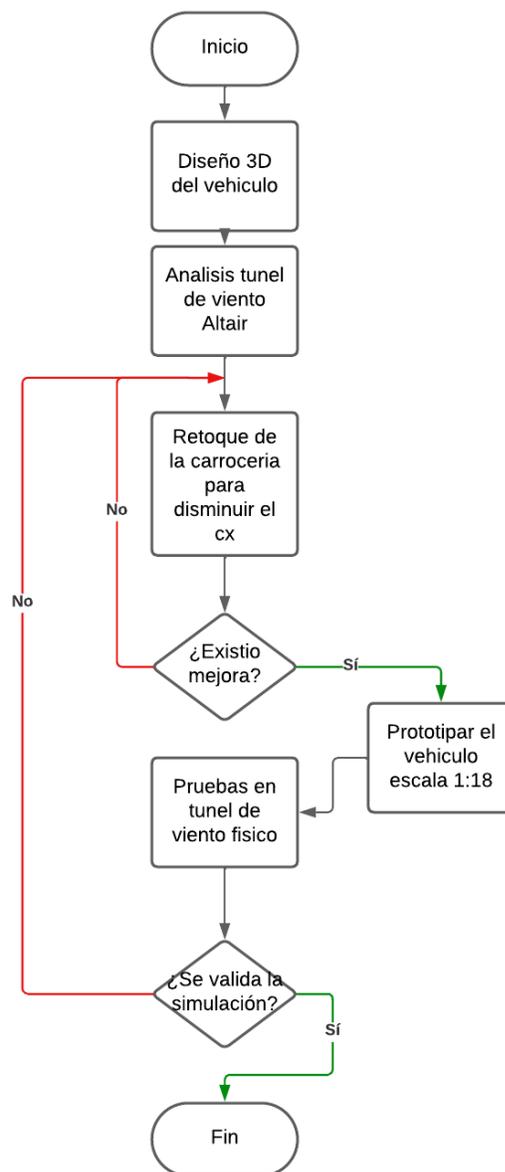
La metodología para emplear en este estudio será tanto cuantitativa como cualitativa, teniendo en cuenta que se empleará el método experimental, con el objetivo de obtener una comprensión integral de los procesos de diseño, fabricación de prototipos a escala y validación del modelo *Porsche 356*.

Diagrama de procesos

En el siguiente apartado, se presenta el diagrama de procesos a seguir para llevar a cabo el proyecto. Este diagrama detallará cada paso necesario, desde la preparación inicial y la generación de la geometría del modelo, pasando por la creación y refinamiento de la malla, hasta

la configuración de las condiciones de simulación y la ejecución de las pruebas en *Altair HyperMesh* y *AcuSolve*. Además, se incluirán las etapas de análisis de resultados y validación comparativa con datos experimentales para asegurar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos en el estudio aerodinámico del *Porsche 356*.

Figura 16.
Diagrama de procesos para el proyecto

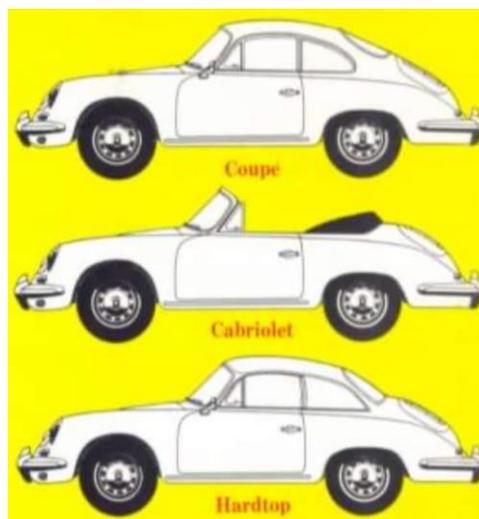


Aplicación del Proceso a Modelos Porsche

Cada variante del modelo a ensayar presentaba cualidades características que presentan rasgos característicos de cada uno, mismos que se comportan de maneras diferentes, teniendo en cuenta esto y para evitar expresiones, procesos y detalles redundantes del proceso, se ha expresado el proceso completo del modelo descapotable, pues es el modelo que presenta una mayor complejidad de construcción y de modelado por las aristas abiertas que se generan en partes como puertas y cristales.

Teniendo en cuenta esto, los siguientes modelos a ensayar se realizaron de manera sólida para si menorar las aristas abiertas y superposición de partes de la carrocería.

Figura 17.
Esquema de variantes del modelo Porsche 356



Nota: Diferencia de la carrocería de vehículos. Obtenido de: *Workshop Manual for 356* (1.^a ed., Vol. 1). (1960). [Versión digitalizada]. <https://www.scribd.com/document/527876195/Porsche-356-Workshop-Manual>.

Modelado Carrocerias Porsche

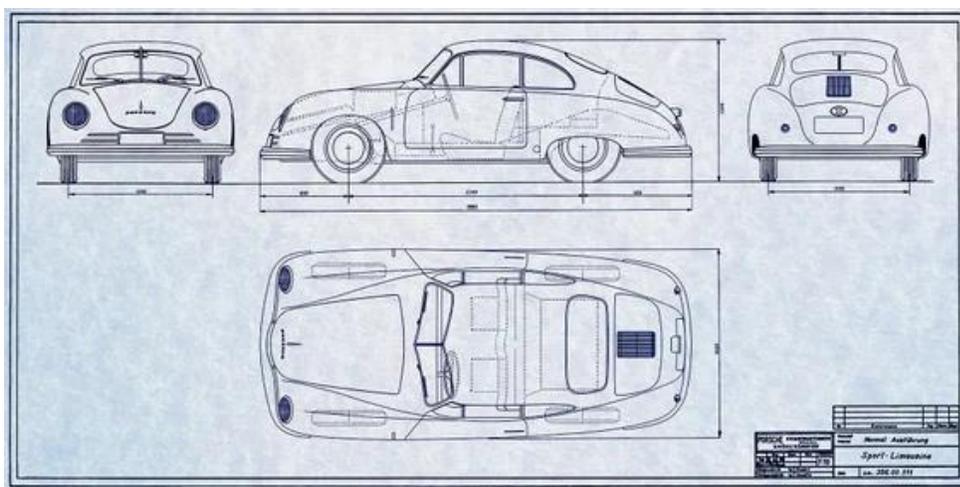
Para iniciar la creación de los prototipos virtuales se procedió a emplear el *software Inventor* de la suite *Autodesk*, empleando herramientas del programa como lo son: extrusión, revolución y suavizado, para la validación y optimización final como se lo realizo y en el siguiente apartado se detalla, asegura que el modelo 3D no solo sea visualmente exacto, sino también funcional y listo para su posterior uso en simulaciones *CFD*.

Preparación y Recolección de Datos

Planos y Esquemas: En este apartado se incluyen las vistas laterales, frontales, traseras y superiores del vehículo, mismas que fueron recopiladas en las figuras 7, 19 y 20 para así tener tanto medidas como figuras reales para resaltar los detalles del vehículo. Se necesitó que los planos estén escalados correctamente para asegurar así la precisión, en este caso se obtuvieron los planos directamente de los libros de reparación de *Porsche AG* de la época.

Figura 18.

Porsche 356 libro de reparación Porsche AG



Nota: Planos con medidas específicas del vehículo a diseñar. Obtenido de: *Workshop Manual for 356* (1.^a ed., Vol. 1). (1960). [Versión digitalizada]. <https://www.scribd.com/document/527876195/Porsche-356-Workshop-Manual>.

En esta sección, poseer fotografías tanto en línea como físicas era de gran utilidad, las mismas aportaban con la fidelidad al diseño, como se observa en la figura siguiente, en la cual se presentan fotografías de modelos existentes en Ecuador, que se consiguieron en la búsqueda de información anteriormente mencionada. Mismas que fueron facilitadas de vehículos presentes en el taller especializado en Porsche de la época del Sr. Marcelo Báez.

Figura 19.
Fotografías Porsche 356 presentes en Ecuador



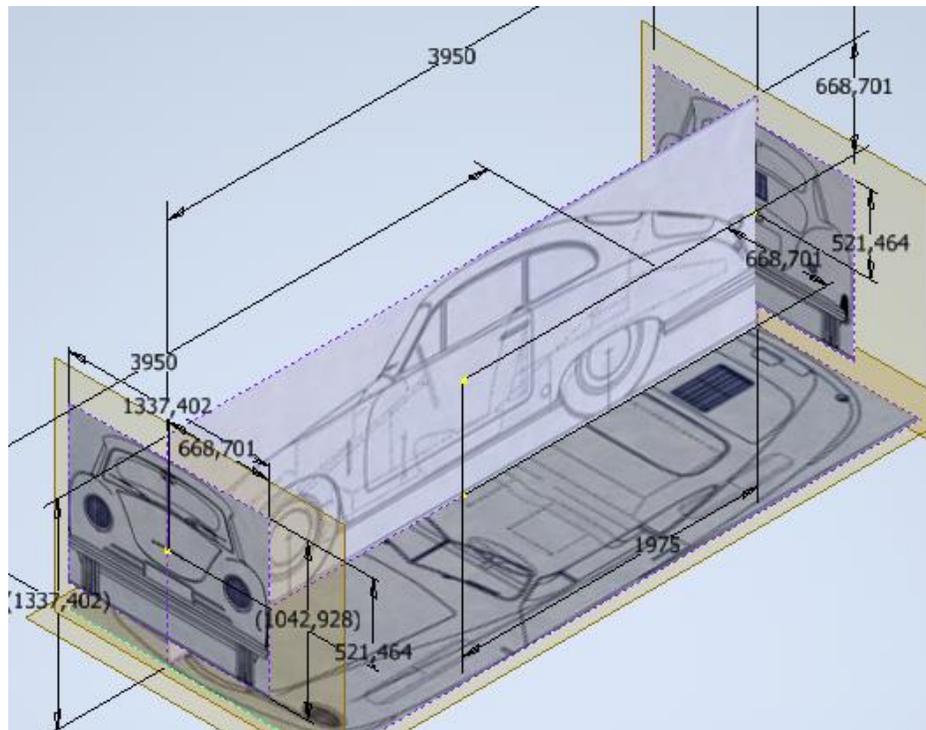
Importación y Configuración de Imágenes de Calca

Importar Planos 2D: Se procedió a la importación de los planos y esquemas del vehículo como imágenes en Inventor. Colocándolos en cada vista (lateral, frontal, superior, trasera) en un plano adecuado dentro del espacio de trabajo, colocando cada uno en la vista lateral, superior, frontal y trasera, teniendo en cuenta que todas las anteriormente mencionadas deben estar centradas en el mismo espacio, en este caso con las medidas en el punto cero de los planos XY, XZ, YZ, como se observa en la figura 19, donde están ubicadas y escaladas de forma precisa.

Ajuste de Escala: Una vez colocadas las imágenes se procedió a escalarlas adecuadamente, en este caso se empleó la escala real o 1:1 para posteriormente reducirlas para el proceso de

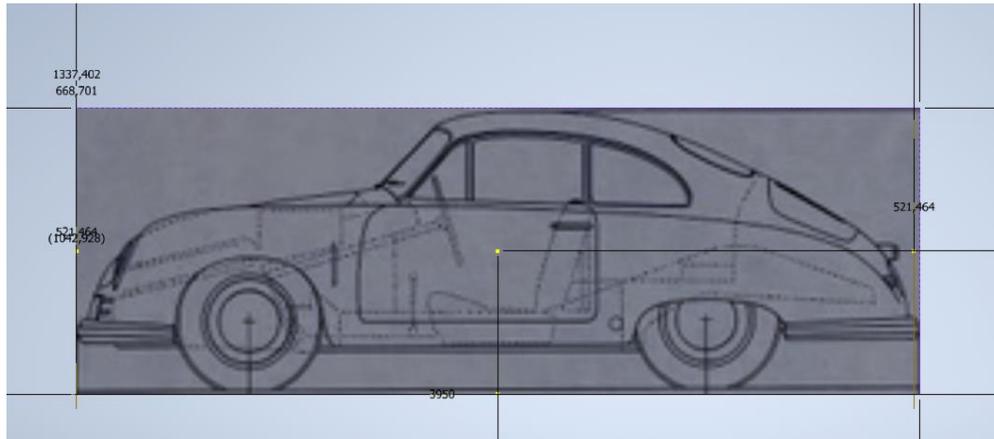
impresión 3D, en este punto se emplean las medidas extraídas del libro de reparación de Porsche AG, mismo que nos precisa las medidas exactas como se muestra en las figuras 7 y 19.

Figura 20.
Escalado de imágenes en inventor 2023



Alineación de Vistas: Se alinearon las vistas importadas para que coincidan correctamente. utilizando herramientas de cota de Inventor para asegurar que todas las vistas estén perfectamente alineadas, teniendo siempre en cuenta que para facilitar el trabajo de modelado se partió desde el punto cero del plano o centro de cada uno de ellos para generar una geometría 3D.

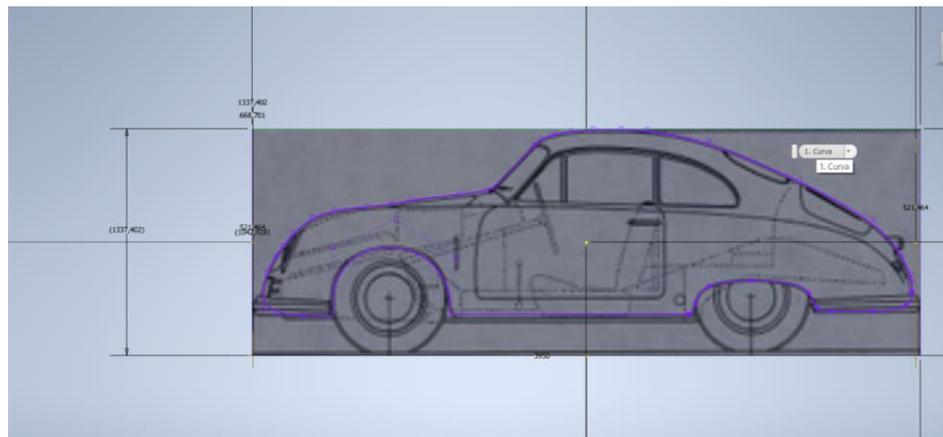
Figura 21.
Se muestra la colocación del plano lateral



Creación de Bocetos Iniciales

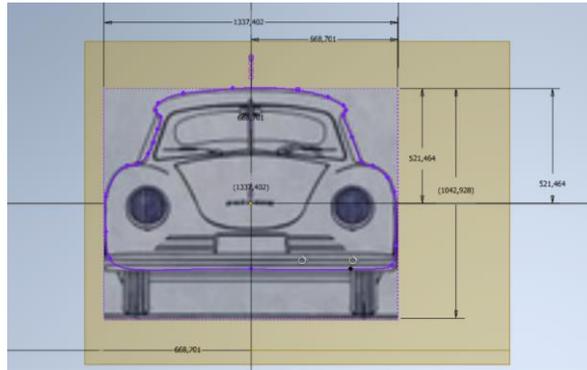
Boceto Lateral: Se comenzó con un boceto lateral en el plano XY fue más sencillo, se dibujó el contorno de la carrocería del Porsche 356 teniendo las imágenes de calca como punto de referencia, utilizando las herramientas líneas y splines para poder adaptarse a las curvas del vehículo tal como se visualiza en la figura 23, respetando la silueta del vehículo, como si se tratase de un trazo en papel.

Figura 22.
Dibujo lateral del vehículo limitado con líneas



Boceto Frontal y Trasero: Se repitió el proceso para las vistas frontal y trasera en los planos YZ y XZ respectivamente, para así poder generar una extrusión y generación de sólidos.

Figura 23.
Plano frontal Porsche 356

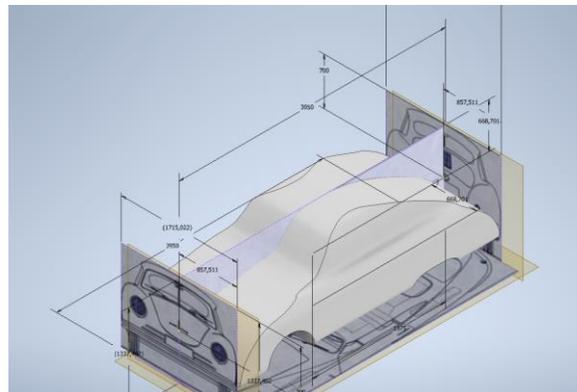


Ajustes Finos: Se realizó una serie de ajustes finos en los bocetos para asegurar que todas las curvas y líneas coincidan perfectamente con las imágenes de calca.

Construcción del Modelo 3D

Extrusión de Superficies: Utilizando la herramienta de extrusión para se crearon superficies básicas a partir de los bocetos 2D. Extruyendo las secciones laterales, frontales y traseras para formar la base de la carrocería.

Figura 24.
Creación de elementos para la caracterización del vehículo



Refinamiento y Detalle Final

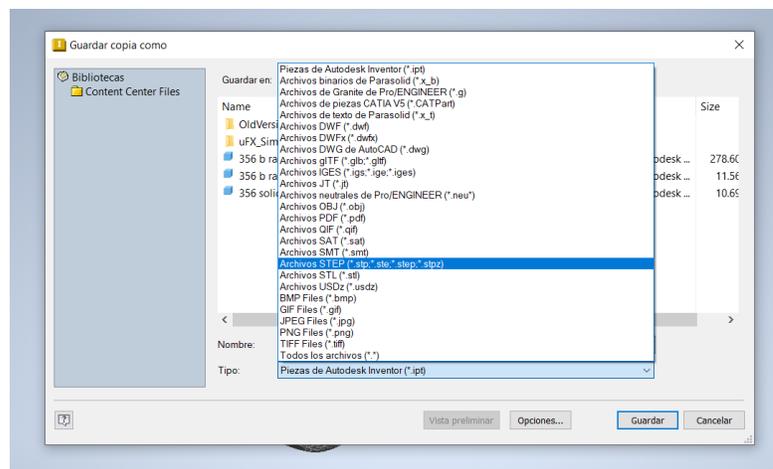
Análisis de Superficies: Para finalizar se realizó un análisis visual de superficies para identificar y corregir cualquier irregularidad en el modelo, es decir se achafanaron los bordes que estén fuera de la geometría, se eliminaron los vértices abiertos, para posteriormente ajustar las dimensiones.

Ajuste de Proporciones: Se procedió a contrastar el modelo 3D con las imágenes de referencia obtenidas en las figuras 18, 19, 20, entre otras, para ajustar cualquier discrepancia en las proporciones, asegurando una fidelidad optima del modelo y simularlo de la forma más exacta posible.

Preparación para Simulación

Se exportó el modelo para simulaciones *CFD*, en este punto se guarda el modelo en archivo tipo *STEP* para así poder abrirlo en *Hyperworks CFD*, tal como se muestra en la figura 24, para que así se logran una maleabilidad y edición más precisa del diseño que se realizó anteriormente y así tener la seguridad que los modelos fueran completamente editables y demostrables.

Figura 25.
Exportación de archivos a formato STEP



Proceso de Mallado:

Una vez exportado el diseño a formato *STEP* como se observó anteriormente se procedió con la etapa de mallado mismo que en esta aplicación implicó los siguientes pasos:

- **Preparación de Geometría:**

Antes de mallar, es necesario importar o crear la geometría del dominio de simulación en *Altair Hyperworks CFD*, para poder minimizar los procesos de mallado y solución, pues *Hyperworks* facilita herramientas enfocadas directamente en aerodinámica, la cual se encarga de procesar la malla, calcularla y resolverla directamente, teniendo en cuenta que en este punto se requirió realizar el diseño del modelo del vehículo y del túnel de viento, ya que esta herramienta se emplea en la generación de malla para el modelo y el túnel mismo. Esto puede incluir modelos *CAD* o archivos de geometría específicos del *software* de simulación.

- **Selección de Tipo de Malla:**

Se seleccionó el tipo de malla más adecuado para el problema de simulación. En este caso se enfrentaron 2 tipos de mallado, siendo estos los métodos de *Advance front* y *Octree*, puesto que son las opciones de mallas que presenta *Altair Hyperworks CFD*, por otro lado, se tiene presente que la figura geométrica para el mallado será triangular, ya que esta es la forma que se emplea cuando se va a realizar estudios de contenidos no compresibles, en este caso la carrocería, teniendo en cuenta que se buscó simular la incidencia del viento contra el vehículo, por lo cual se decidió utilizar el mallado denominado *Advance Front*.

- ***Generación de Malla:***

Con la geometría preparada y las regiones definidas, se procede a generar la malla. Esto implica dividir el dominio en elementos más pequeños según la discretización seleccionada. En esta etapa, es crucial asegurar que la malla capture adecuadamente las características del flujo o la estructura que se están simulando.

Proceso de Mallado del Modelo Descapotable Porsche 356

El proceso de mallado es una etapa importante en la simulación *CFD* (Dinámica de Fluidos Computacional), ya que define la calidad de los resultados obtenidos, se realizaron en este caso todos los procesos que se detallan a continuación para así poder realizar la simulación.

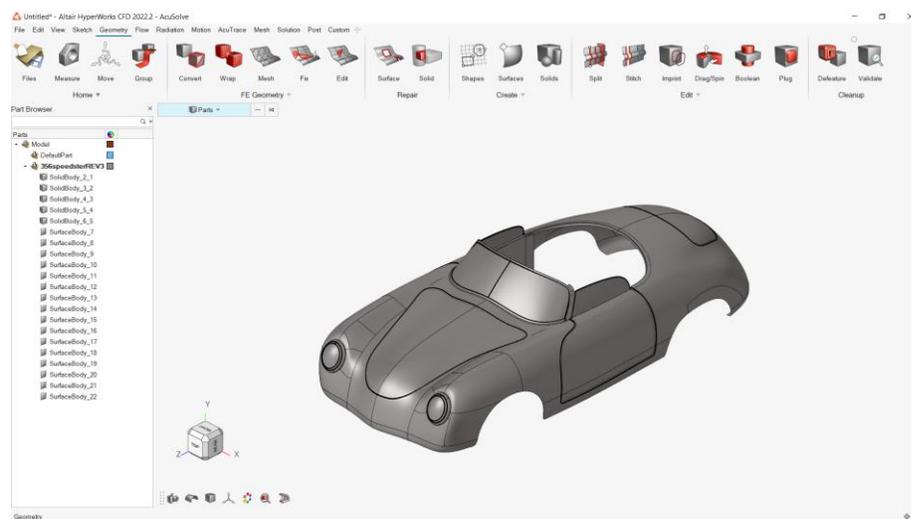
En el caso del modelo descapotable del *Porsche 356*, el proceso se ha llevado a cabo con meticulosidad para garantizar la precisión y la efectividad de las simulaciones. Este procedimiento se aplicará de manera similar a otros modelos a simular, asegurando la consistencia en los resultados y la comparabilidad entre diferentes variantes del vehículo y siguiendo los siguientes pasos.

Importación del Modelo

El primer paso en el proceso de mallado es la importación del modelo geométrico del *Porsche 356* en un formato compatible con el *software Altair HyperMesh*. Para este caso, se ha utilizado el formato STEP como se visualiza en la figura 24, que es ampliamente aceptado por diversas plataformas de simulación debido a su capacidad para manejar geometrías complejas sin pérdida de información.

El uso del formato STEP permite una transición desde los programas de diseño CAD hacia los entornos de simulación. Este formato retiene los detalles críticos del diseño original, asegurando que todas las características geométricas esenciales se preserven para la simulación.

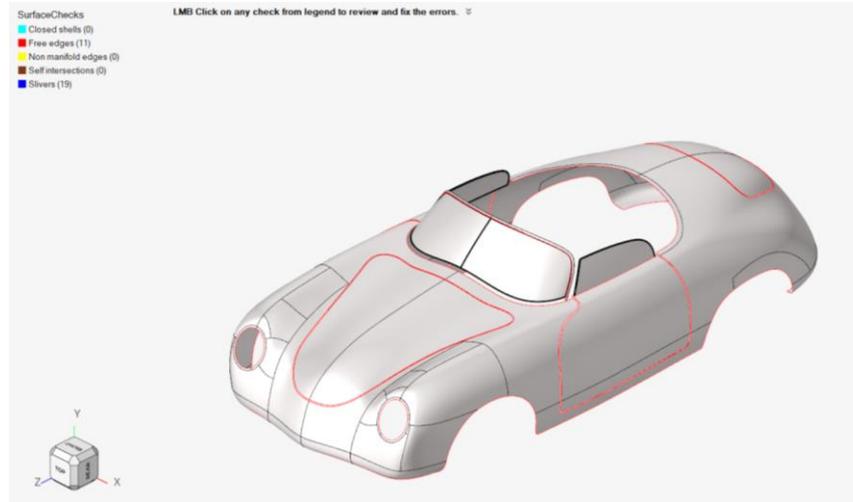
Figura 26.
Importación de carrocería



Revisión del Modelo y Validación de Superficies

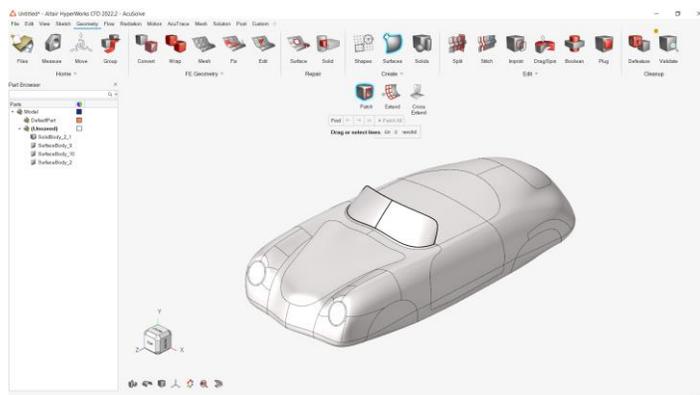
Una vez importado el modelo, se procedió a la revisión y validación de las superficies, en esta etapa, se revisaron y corrigieron problemas comunes como vértices abiertos, geometrías redundantes y otras inconsistencias, mismas que se presentan debido a que las empresas no tienen el mismo proveedor, estos defectos que podrían afectar negativamente la calidad del mallado y la precisión de la simulación, mediante el proceso de parchado y extensión de geometrías y superficies se llegó a cerrar cualquier vértice abierto, como mencionamos anteriormente se presentó el problema directo del parabrisas y el filo completo de la carrocería, mismo que se presentaba como error de vértices abiertos.

Figura 27.
Revisión de vértices abiertos



Este proceso de revisión implicaba una inspección detallada del modelo geométrico para identificar y corregir cualquier discontinuidad o error que pudiera existir. La corrección de vértices abiertos aseguraba que no existieran interrupciones en la malla, lo cual era esencial para mantener la continuidad del flujo de aire en las simulaciones. Además, se eliminaban geometrías redundantes que podrían aumentar innecesariamente la carga computacional y afectar la eficiencia del proceso.

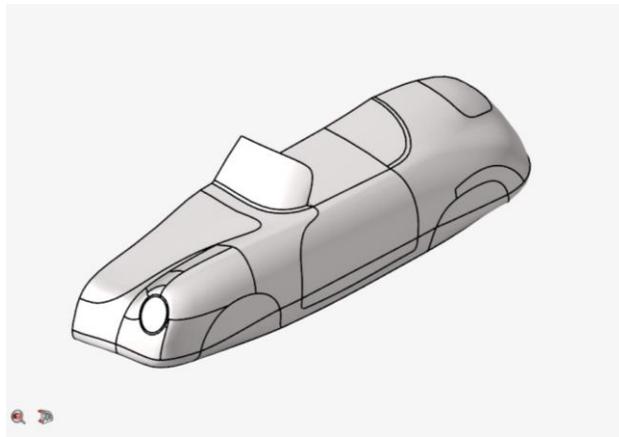
Figura 28.
Refinamiento de imagen



División del Modelo

Para facilitar la creación de la malla y reducir la carga computacional, el modelo se dividió en dos secciones. Esta división estratégica permitió manejar el complejo modelo del Porsche 356 de manera más eficiente, asegurando que cada sección pudiera ser mallada con la densidad adecuada sin comprometer el rendimiento computacional.

Figura 29.
Vehículo cortado y revisado



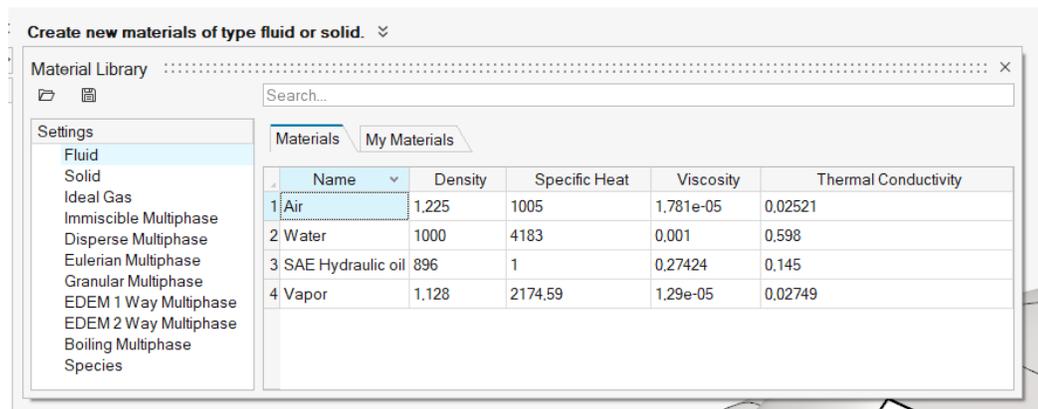
La división del modelo también permitía un control más preciso sobre la calidad del mallado en áreas críticas. Puesto que se tenía en cuenta que al dividir el vehículo entero se podía minimizar el número de superficies donde se iba a realizar el mallado y por ende mejorar el aprovechamiento de recursos de la computadora donde se iba a realizar el mallado, puesto que al ser un vehículo simétrico era completamente factible realizar este proceso. Además de esto, en el programa existía una herramienta llamada simetría en la cual posteriormente se mostrarían los resultados y la misma que era la mitad exacta del vehículo.

Asignación de Materiales y Parámetros

En esta simulación, el aire se seleccionó como el material de prueba en el túnel de viento, era fundamental definir las propiedades del aire, como la densidad y la viscosidad, para asegurar que los resultados de la simulación fueran representativos de las condiciones reales, además, se establecieron parámetros de simulación, como la velocidad del aire, que en este caso se fijaba en 20 m/s. Esta velocidad se eligió para cotejar los resultados de la simulación con los datos obtenidos de pruebas en el túnel de viento real.

Figura 30.

Datos para emplear en la biblioteca de materiales, en este caso aire

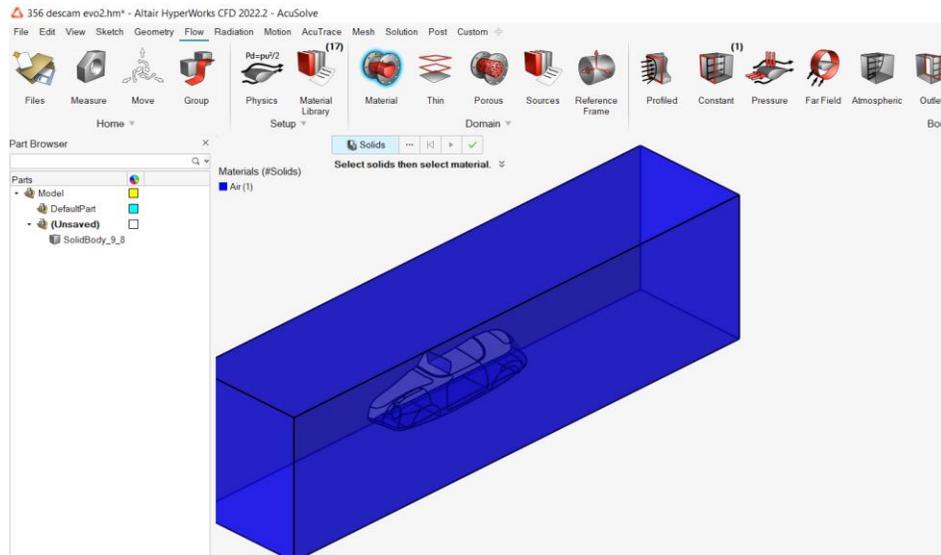


The screenshot shows a 'Material Library' window with a search bar and a list of material types on the left. The main area displays a table of materials with the following data:

Name	Density	Specific Heat	Viscosity	Thermal Conductivity
1 Air	1.225	1005	1.781e-05	0.02521
2 Water	1000	4183	0.001	0.598
3 SAE Hydraulic oil	896	1	0.27424	0.145
4 Vapor	1.128	2174.59	1.29e-05	0.02749

Definir estos parámetros con precisión fue crucial para la validez de la simulación, la velocidad del aire y otras condiciones de frontera deben replicar fielmente las condiciones del entorno de prueba real para garantizar que los resultados sean aplicables y comparables.

Figura 31.
Selección de aire como material de prueba

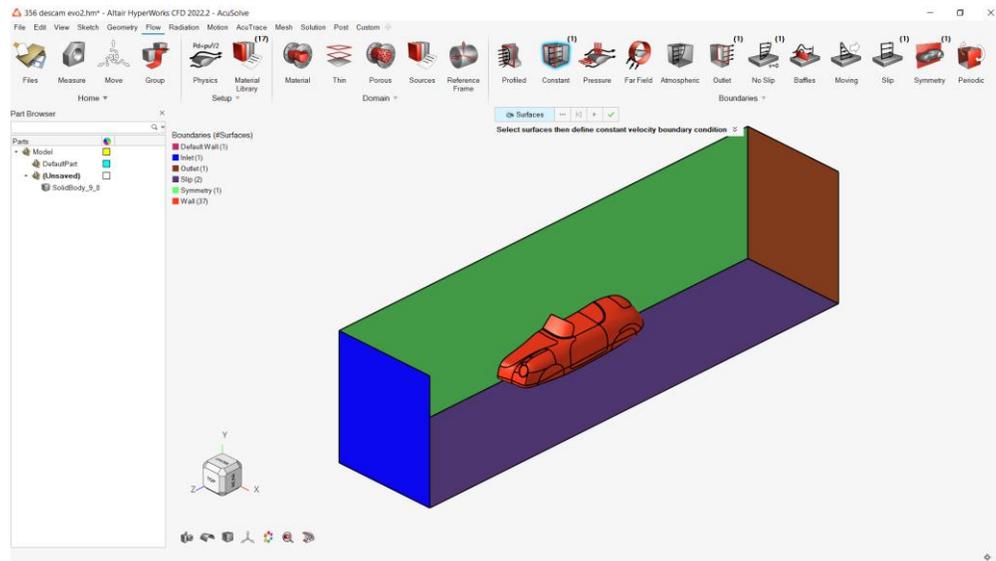


Para poder elegir el aire como material se crea un bloque donde se colocará el modelo, teniendo en cuenta que el mismo bloque funciona tanto como túnel de viento como modelo, pues el mismo quedo compactado con el bloque, tal como se muestra en la anterior figura.

Colocación de límites en el modelo

En este punto el flujo de trabajo del programa se visualizó claramente al demostrar que se tiene que seleccionar las superficies de frontera como se observa en la figura 33 y es precisamente donde se colocó la velocidad del aire a la cual se probó el vehículo, para poder cotejar los datos y validarlos con la misma a 20 m/s.

Figura 32.
Delimitación de límites en el modelo



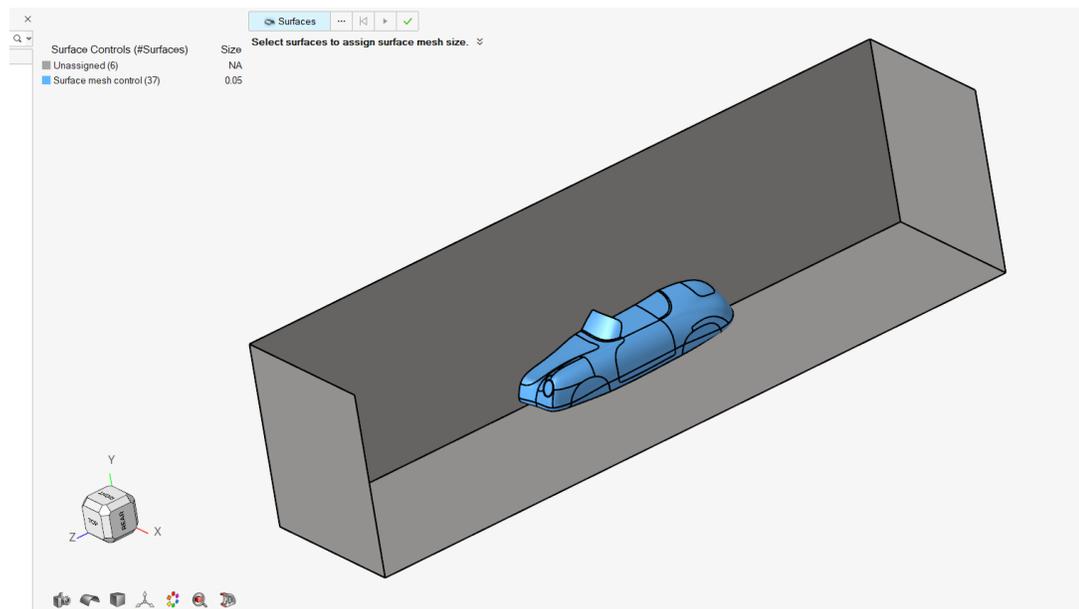
Como se observa en la figura 33 se presencia los factores limite, como lo son la entrada del fluido en color azul, las paredes móviles en color morado, la salida de color café y la condición denominada pared en color naranja, en este caso se tuvo en cuenta que se define cada uno aparte en el mismo apartado de movimiento, donde se establecen las limitaciones, la entrada en 20 m/s, se tiene la salida en 0 m/s, las mismas paredes se señalan en color azul y café

Creación de la Malla

La creación de la malla fue un paso esencial donde se definía la resolución y el tipo de malla a utilizar. Para este proyecto, se optaba por una malla de tipo *advance front*. Este tipo de mallado era adecuado para geometrías complejas y se caracterizaba por su capacidad para adaptarse a las superficies del modelo de manera efectiva, proporcionando una mayor precisión en las simulaciones.

Se empleó la forma triangular para el uso de la malla, misma que les ayudaba a definir las superficies no compresibles como lo era el vehículo y las paredes del túnel de viento. Esta malla se realizó en varios pasos, comenzando por la selección de la superficie de control, misma que era la carrocería del vehículo.

Figura 33.
Selección de superficie de control



Posteriormente se procedió a editar la malla empleando parámetros como el ángulo de desviación para cada triángulo, empleando 15° en el mismo, el *average element size* colocado en 0.05, el valor mínimo de geometrías en 0.01, el *mesh growth rate* en 1.3

Configuración del Mallado

Mesh Growth Rate (Tasa de Crecimiento de la Malla)

El *Mesh Growth Rate* controla la velocidad a la que el tamaño de los elementos de la malla aumenta a medida que se aleja de las áreas de alta resolución. Un valor de 1.3 significa que cada elemento sucesivo sería un 30% más grande que el anterior. Esta configuración era esencial

para mantener una transición suave y controlada en el tamaño de los elementos, evitando saltos bruscos que podrían introducir errores en la simulación. En el proyecto, esta tasa aseguraba que las regiones críticas, como los bordes del vehículo donde se esperaban mayores gradientes de velocidad y presión, estuvieran bien resueltas sin generar un número excesivo de elementos en todo el dominio.

Minimum Size Factor (Factor de Tamaño Mínimo)

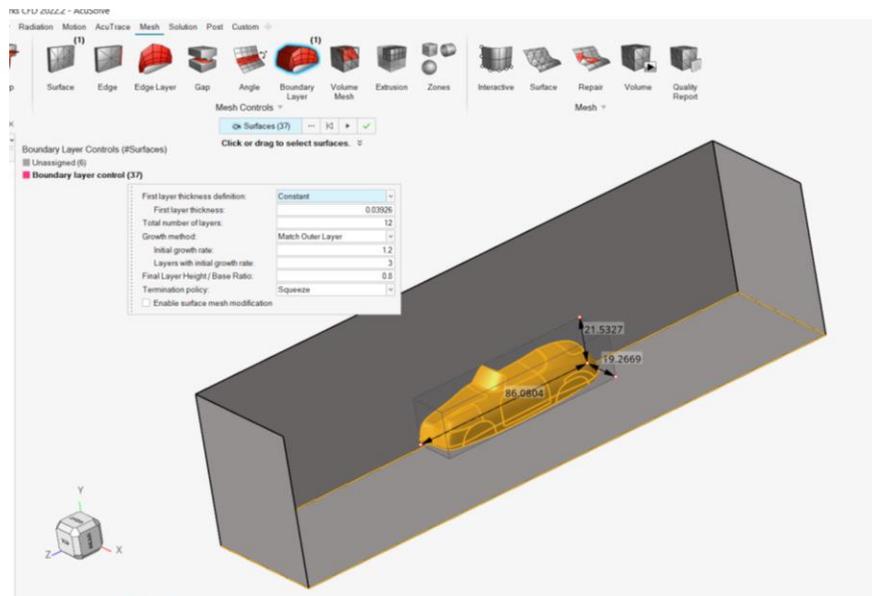
El *Minimum Size Factor* determina el tamaño mínimo permitido para los elementos de la malla en relación con el tamaño promedio configurado. Un valor de 0.01 implica que el elemento más pequeño será el 1% del tamaño promedio del elemento. Esta configuración es útil para capturar detalles finos y características geométricas complejas del modelo del *Porsche 356*. Al establecer un tamaño mínimo tan pequeño, garantizamos que las áreas críticas, como los bordes afilados y las curvas pronunciadas, se mallen con suficiente detalle para obtener resultados precisos.

Average Element Size (Tamaño Promedio del Elemento)

El *Average Element Size* especifica el tamaño medio de los elementos de la malla. Configurado en 0.05, este valor define un balance entre la resolución de la malla y la carga computacional. Un tamaño promedio adecuado asegura que la malla sea suficientemente fina para capturar los detalles necesarios del flujo sin hacer que el problema sea computacionalmente prohibitivo. Este tamaño ha sido elegido para proporcionar una buena resolución en las áreas clave del flujo alrededor del modelo del *Porsche 356*.

El análisis *CFD* detallado del *Porsche 356* requirió una atención especial en la configuración de la capa límite o *boundary layer*. Esta capa es fundamental para capturar los efectos de la viscosidad cerca de las superficies del vehículo, donde los gradientes de velocidad son más pronunciados. A continuación, se explica la configuración específica de la capa límite utilizando los parámetros proporcionados.

Figura 34.
Boundary layer



First Layer Thickness (Espesor de la Primera Capa)

El espesor de la primera capa se ha configurado en 0.0396. Este parámetro define el espesor de la primera capa de elementos en la malla cerca de la superficie del vehículo. Un espesor adecuado de la primera capa es crucial para capturar los gradientes de velocidad y las características del flujo laminar cercano a la superficie del vehículo. La precisión en este valor asegura que los efectos de la viscosidad se modelen correctamente, proporcionando datos precisos sobre la interacción del flujo de aire con la superficie del *Porsche 356*.

Número Total de Capas

Se ha configurado un número total de 12 capas para la malla en la región de la capa límite. Un mayor número de capas permite una mejor resolución de los gradientes de velocidad y presión en la proximidad de las superficies del vehículo. Esto es esencial para un análisis preciso del flujo, ya que más capas proporcionan un detallado perfil del comportamiento del aire, especialmente en zonas críticas como los bordes y curvas del vehículo.

Método de Crecimiento

El método de crecimiento seleccionado es el "*Match Out Layer*". Este método asegura que el crecimiento de las capas interiores coincida con las capas exteriores, manteniendo una transición suave entre las diferentes regiones de la malla. Esto es importante para evitar discontinuidades y asegurar una buena calidad de la malla. El método "*Match Out Layer*" permite una integración más fluida de la capa límite con el volumen principal de la malla, mejorando la consistencia de los datos simulados.

Tasa de Crecimiento Inicial

La tasa de crecimiento inicial se ha establecido en 1.2, misma que determina cómo aumenta el espesor de las capas sucesivas. Un valor de 1.2 indica que cada capa será un 20% más gruesa que la anterior, permitiendo una transición suave en el tamaño de las capas. Este ajuste asegura que la malla se expanda gradualmente, lo que es vital para mantener la estabilidad y precisión de la simulación, especialmente en las primeras capas cercanas a la superficie del vehículo.

Capas con Tasa de Crecimiento Inicial

En cuanto al número de capas que utilizaron la tasa de crecimiento inicial, se configuró en 3 capas. Este parámetro especifica el número de capas que utilizaron, la tasa de crecimiento inicial antes de que se aplique un cambio en el patrón de crecimiento. En este caso, las primeras tres capas seguirán la tasa de crecimiento inicial de 1.2, permitiendo una expansión gradual y controlada de la malla en las zonas más críticas del flujo.

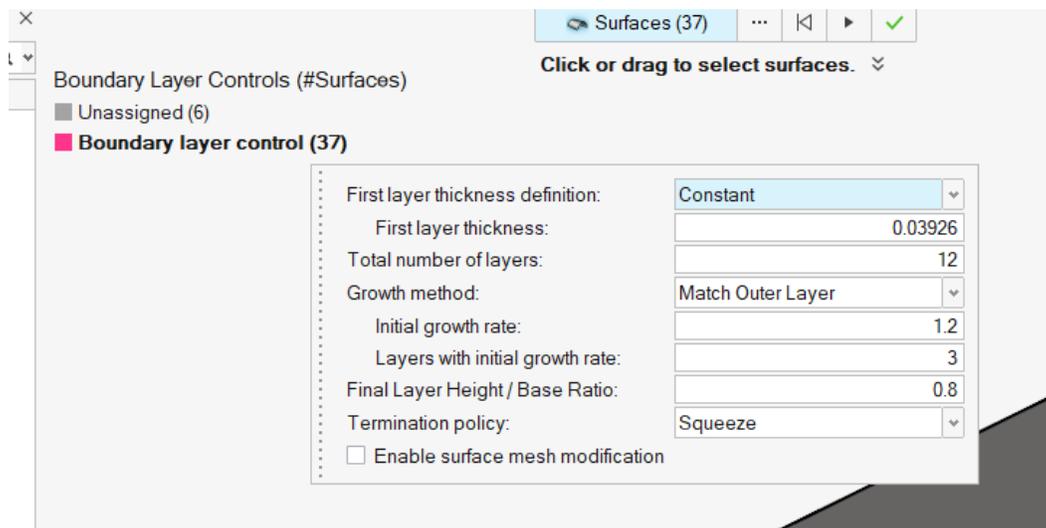
Altura de la Capa Final o Relación de Base

La relación de base o altura de la capa final se ha configurado en 0.8. Este parámetro controla la relación entre el espesor de la última capa y la capa base. Una relación de 0.8 asegura que el crecimiento no sea abrupto y que las capas se expandan gradualmente, mejorando la resolución y la calidad de la malla en la capa límite. Esta configuración es crucial para evitar saltos bruscos en el tamaño de los elementos, lo que podría introducir errores en la simulación.

Política Terminal

La política terminal seleccionada es "*squeeze*". La política terminal "*squeeze*" asegura que las capas se ajusten y acomoden adecuadamente en la región de transición entre la malla de la capa límite y el volumen de la malla principal. Esto fue crucial para mantener la calidad de la malla y evitar elementos distorsionados que pudieran afectar los resultados. Mismo que permite una integración más eficiente y precisa, garantizando que no haya discontinuidades que puedan afectar negativamente el análisis del flujo.

Figura 35.
Configuración final de la capa limite



Una vez terminada esta configuración se pasó al apartado de comienzo de mallado, en este caso denominado volumen donde se configuraron los siguientes parámetros.

Mesh Size en Modo Average Size

El parámetro *mesh size* en modo *average size* se configura para definir el tamaño promedio de los elementos de la malla. Este parámetro es crucial para equilibrar la resolución de la malla y la carga computacional. Un tamaño promedio de malla adecuado garantiza que se capturen los detalles importantes de la geometría del modelo del *Porsche 356* sin generar un número excesivo de elementos, lo que pudo aumentar significativamente el tiempo de cálculo y los recursos necesarios.

Curvature Surface Refinement Minimum Size Factor

El *curvature surface refinement minimum size factor* se ha establecido en 0.1. Este parámetro controla el tamaño mínimo de los elementos en las regiones donde la superficie tiene curvaturas pronunciadas.

Un valor de 0.1 asegura que las áreas con curvas agudas o detalles finos en la geometría se mallan con elementos más pequeños para capturar con precisión las variaciones en la curvatura. Este refinamiento es esencial para representar fielmente las características aerodinámicas del *Porsche 356*, especialmente en zonas como los bordes y curvas del vehículo.

Geometric Feature Angle

El *geometric feature angle* se ha configurado en 15 grados. Este parámetro define el ángulo por debajo del cual se realiza un refinamiento adicional de la malla para capturar características geométricas importantes, como bordes y esquinas. Un ángulo de 15 grados asegura que incluso las características geométricas más sutiles sean adecuadamente representadas en la malla, mejorando la precisión del análisis CFD al capturar todos los detalles críticos de la superficie del modelo.

Mesh Growth Rate

El *mesh growth rate* se ha establecido en 1.3. Este parámetro determina la tasa a la que aumenta el tamaño de los elementos de la malla desde las áreas refinadas hacia las áreas menos críticas. Un crecimiento de 1.3 significa que cada elemento sucesivo será un 30% más grande que el anterior. Este ajuste permite un equilibrio entre la resolución detallada en áreas críticas y

una malla más gruesa en áreas menos importantes, optimizando tanto la precisión de los resultados como la eficiencia computacional.

Mesh Element Order

El “*mesh element order*” se ha configurado en “*first order triangles*”. Los elementos de primer orden, como los triángulos de primer orden, son más simples y menos costosos computacionalmente que los elementos de segundo orden. Aunque los elementos de primer orden pueden ser menos precisos en algunos casos, son suficientes para muchas aplicaciones y permiten un cálculo más rápido. En el contexto de la simulación del *Porsche 356*, los triángulos de primer orden proporcionan un buen compromiso entre precisión y eficiencia.

Volume Mesh Optimization: Quality

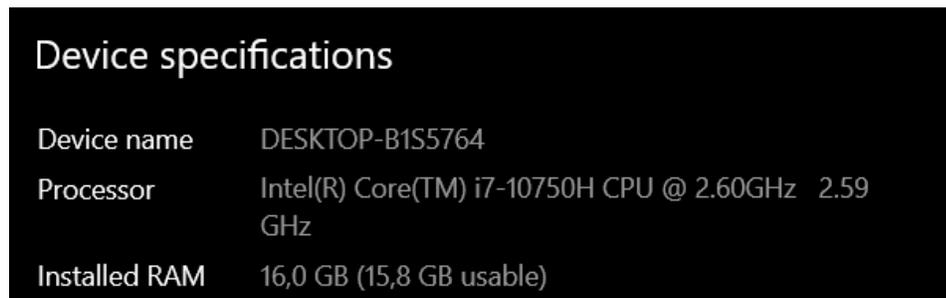
El “*volume mesh optimization*” se ha configurado en “*quality*”, esto significa que el enfoque principal durante la optimización de la malla volumétrica es maximizar la calidad de los elementos. Una malla de alta calidad tiene elementos bien formados que mejoran la precisión y estabilidad de las simulaciones CFD. Para el análisis aerodinámico del *Porsche 356*, la optimización de calidad asegura que la malla no tenga elementos distorsionados, lo que podría comprometer los resultados de la simulación.

Number of Threads to Use

El “*number of threads to use*” se ha establecido en 11 puesto que el máximo de la computadora es de 12, teniendo en cuenta que se empleó un *Intel “Core i7-10750H”* como CPU y una tarjeta gráfica “*NVIDIA RTX 2070 Super*”. Este parámetro configura la cantidad de hilos de procesamiento que se utilizarán durante el proceso de mallado y simulación. Utilizar 11 hilos

permite aprovechar al máximo las capacidades de un procesador *multicore*, reduciendo significativamente el tiempo de cálculo. Este ajuste fue crucial para manejar simulaciones complejas y detalladas de manera eficiente, especialmente en el análisis aerodinámico de un vehículo como lo es en este caso el *Porsche 356*.

Figura 36.
Especificación de la computadora a emplear

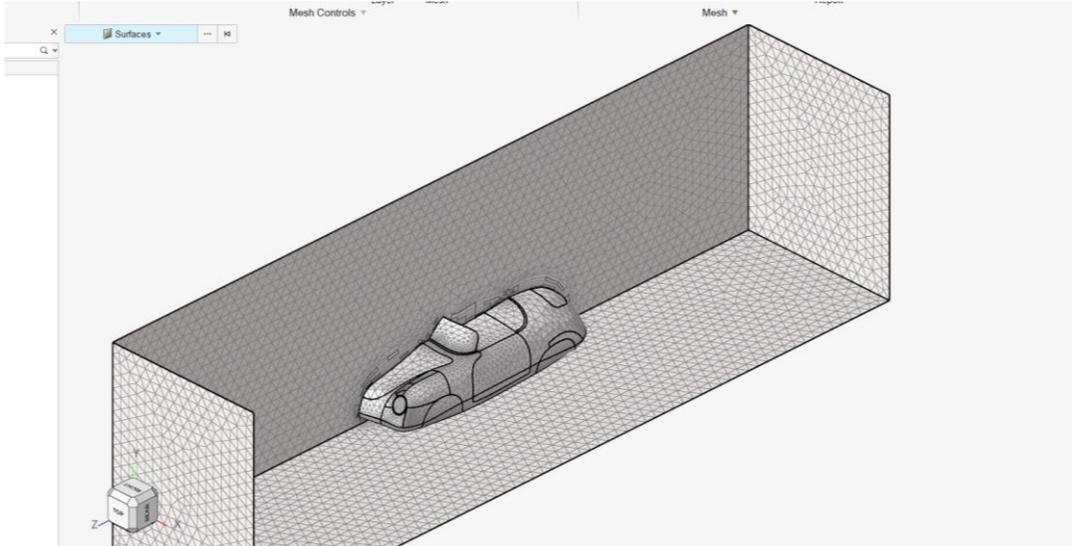


Device specifications	
Device name	DESKTOP-B1S5764
Processor	Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz 2.59 GHz
Installed RAM	16,0 GB (15,8 GB usable)

Método de Mallado: Advance Front

El método de mallado elegido es “*advance front*”. Este método genera la malla progresivamente desde las fronteras hacia el interior del dominio, lo que es útil para manejar geometrías complejas como la del *Porsche 356*. El método de fronteo avanzado garantiza que la malla se adapte correctamente a la forma del modelo, proporcionando una malla de alta calidad con buena representación de los detalles geométricos, teniendo en cuenta y recalcando que se va a emplear una forma triangular para poder adaptar la malla de avance frontal al vehículo directamente, recordando que este tipo de geometría.

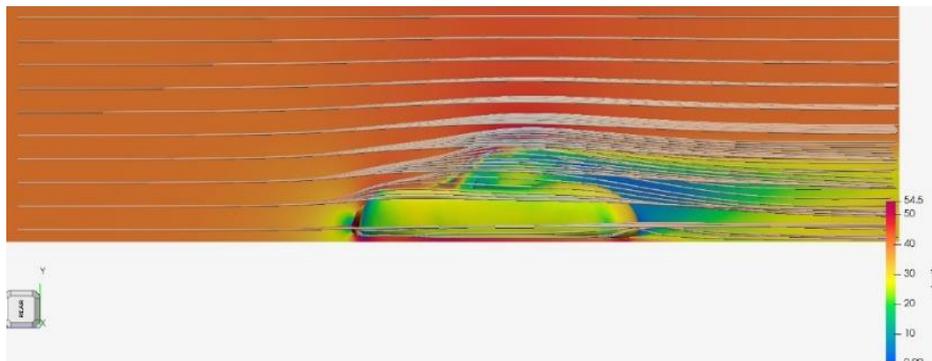
Figura 37.
Mallado de las superficies como lo son el vehículo y el túnel de viento



Post Procesado con AcuSolve

Una vez creada la malla, se procede al post procesado utilizando el *solver* *AcuSolve*. Este *solver* es conocido por su capacidad para resolver problemas complejos de dinámica de fluidos con alta precisión. Durante el post procesado, se generan gráficos de presión y diagramas de flujo que proporcionan una visualización detallada de los resultados de la simulación.

Figura 38.
Gráfico completo junto a streamlines

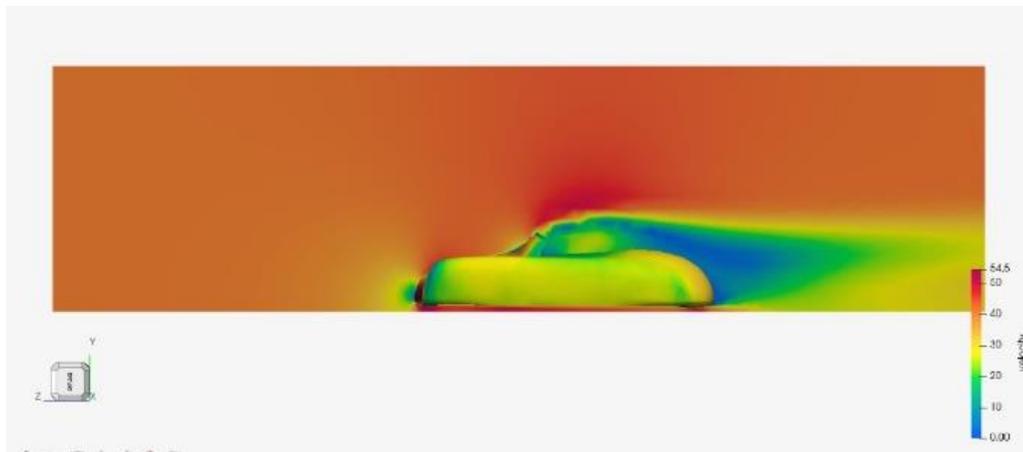


AcuSolve ofrece herramientas avanzadas para analizar los resultados, permitiendo una comprensión profunda del comportamiento del flujo de aire alrededor del vehículo. Esta etapa es

crucial para interpretar los datos obtenidos y hacer ajustes necesarios para optimizar el diseño del *Porsche 356*. Las visualizaciones de presión y flujo ayudan a identificar áreas de alta resistencia o turbulencia, proporcionando información valiosa para mejorar las características aerodinámicas del vehículo.

Figura 39.

Demostración de gráficos de temperatura para visualizar flujos de presión y velocidad



Preparación de los Modelos para Impresión 3D

Diseño y Escalado

El primer paso en el proceso fue obtener los modelos *CAD* del *Porsche 356*. Estos modelos se escalaron a una proporción de 1:18 para que fueran adecuados para las pruebas en el túnel de viento. El escalado preciso es crucial para asegurar que las características aerodinámicas del modelo a escala sean representativas del vehículo a tamaño real.

Exportación a Formato STL

Una vez que los modelos se escalaron adecuadamente, se exportaron en formato *STL*. Este formato es ampliamente utilizado en la impresión 3D debido a su capacidad para representar superficies trianguladas y su compatibilidad con la mayoría de los programas de impresión 3D, como se observa en la figura.

Importación a Cura Ultimaker

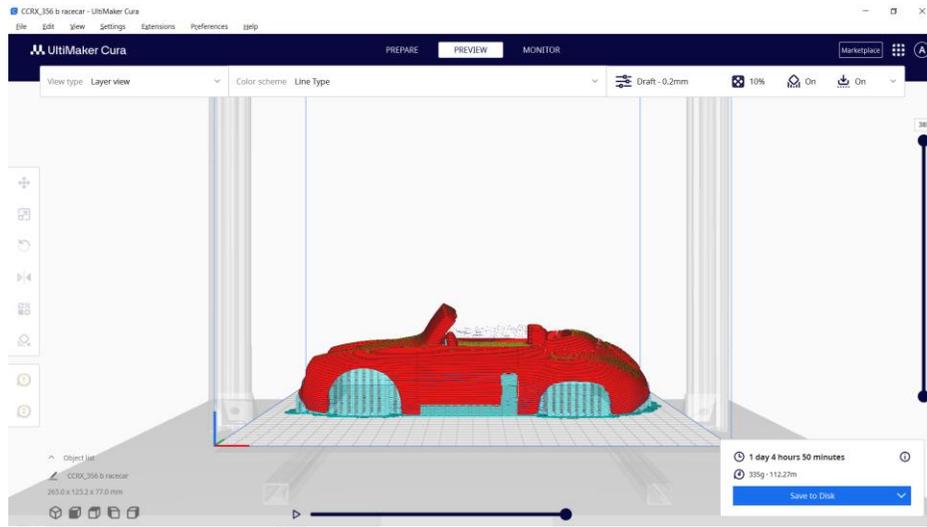
Con los archivos *STL* listos, el siguiente paso fue importarlos a *Cura Ultimaker*. Cura es un programa de preparación de impresiones 3D que permite convertir modelos digitales en instrucciones de impresión específicas para impresoras 3D como se observa en la figura 41.

Configuración de la Impresión en Cura

Ajuste de Parámetros de Impresión

En Cura, se configuraron varios parámetros de impresión para asegurar la calidad y precisión de los modelos impresos. Estos parámetros incluyeron la resolución de la capa, la densidad de relleno y la velocidad de impresión. Para este proyecto, se utilizó una resolución de capa de 0.1 mm para obtener una alta definición en los detalles del modelo, una densidad de relleno del 10% y además de esto se empleó un tipo de impresión lineal para el primer modelo pero posteriormente se pasó a impresiones de tipo triangular, puesto que el mismo nos brindaba más solidez para los modelos a probar, teniendo en cuenta que el peso máximo de cada modelo rodea los 400 gramos cabe la posibilidad que en el momento de encender el ventilador a alta velocidad el prototipo no se desprenda del piso del túnel y sea arrastrado por el aire acelerado.

Figura 40.
Configuración y previsualización Cura ultimaker



Material de Impresión

Se seleccionó *PLA* (ácido poli láctico) como material de impresión debido a su facilidad de uso, precisión y estabilidad dimensional. Cada modelo requería aproximadamente 400 gramos de *PLA*, asegurando que se mantuviera una consistencia en el material utilizado para cada impresión.

Proceso de Impresión 3D

Preparación de la Impresora

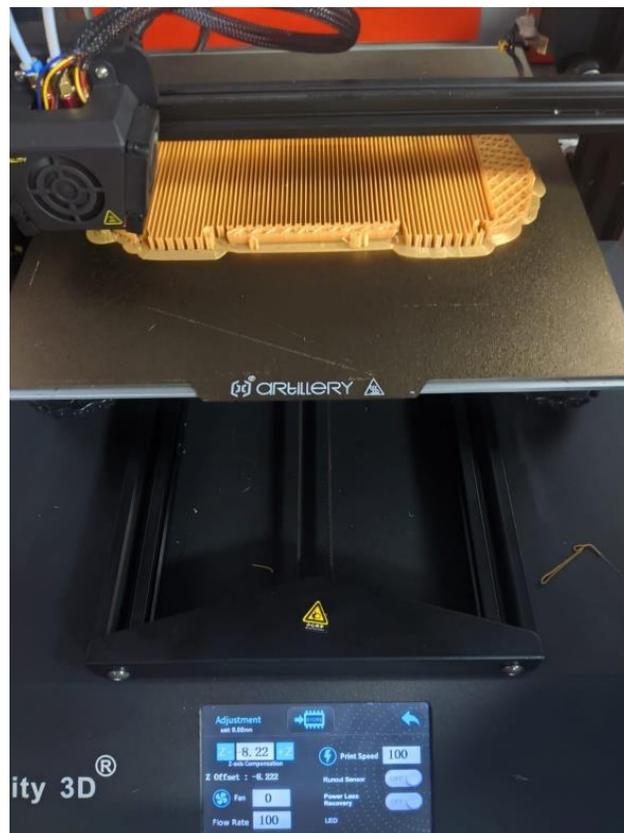
Antes de comenzar la impresión, se verificó que la impresora 3D en este caso a utilizar la impresora *Creality CR-X* estuviera calibrada correctamente, misma que hubo que colocar manualmente puesto que presenta algunos detalles en la regulación de la altura de la mesa, además de esto se tiene en cuenta que la temperatura optima del extrusor es de 200°C y de la

mesa de 50°C, condiciones preestablecidas por el equipo y sin las cuales no se puede realizar la impresión.

Monitoreo del Proceso de Impresión

Supervisar el proceso de impresión 3D en todo momento fue esencial para evitar problemas comunes, como la deformación o la falta de adhesión entre capas, teniendo en cuenta que en esta altura del proyecto cada impresión iba a tomar aproximadamente 1 día. Este monitoreo aseguró la consistencia y calidad de los tres modelos impresos, lo cual es crucial para obtener datos comparables en las pruebas del túnel de viento.

Figura 41.
Proceso de impresión



Impresión del Modelo

Cada modelo tomó aproximadamente un día para imprimirse completamente. Durante la impresión, se supervisó el proceso para asegurarse de que no existan problemas como la deformación del modelo o la falta de adhesión de las capas. La consistencia en el proceso de impresión fue esencial para garantizar que los tres modelos fueran idénticos en términos de dimensiones y calidad.

Figura 42.

Modelos a escala 1:18 impresos para su validación en el túnel de viento



Post-Procesamiento

Después de la impresión, los modelos pasaron por un proceso de post-procesamiento que incluyó la eliminación de soportes y el lijado ligero para eliminar cualquier imperfección en la superficie. Este paso fue crucial para asegurar que la superficie de los modelos fuera suave y representativa de la carrocería real del Porsche 356.

Figura 43.
Prototipo post procesado



Pruebas en el Túnel de Viento

Preparación del Túnel de Viento

El túnel de viento de la universidad se configuró para simular condiciones de flujo de aire similares a las utilizadas en las simulaciones *CFD*. La velocidad del aire se ajustó a 20 m/s, y se verificaron todos los equipos de medición para asegurar su precisión como lo es el anemómetro para medir la velocidad del viento, la máquina de humo para poder visualizar el flujo de este.

Figura 44.
Prueba de túnel de viento con un modelo a escala 1:18 Chevrolet Corvette



Montaje de los Modelos

Los modelos impresos se montaron en una plataforma dentro del túnel de viento, asegurando que estuvieran orientados de manera consistente para cada prueba. Se los colocó con una contrapesa para que la velocidad del túnel no los arrastre ni se los lleve volando debido al bajo peso y alta velocidad en relación que tenían presente los modelos.

Figura 45.

Prototipo escala 1:18 en túnel de viento



Medición de Datos

Durante las pruebas, se midieron varios parámetros aerodinámicos, incluyendo la distribución de presión en la superficie del modelo (Mediante el humo presente), la resistencia aerodinámica y las características de flujo alrededor del vehículo (mediante humo). Los datos obtenidos se registraron para su posterior análisis y comparación con los resultados de la simulación *CFD*.

Calibración del túnel de viento

Para tener la medición correcta del viento empleado se empleó un anemómetro, mismo que se colocó en la parte frontal del túnel de viento para medir la velocidad directa del aire en movimiento.

Figura 46.
Anemómetro colocado en posición



Selección del modo del túnel de viento

El diseño del túnel de viento presenta dos posiciones, en la cual se determinará la dirección del flujo del aire, denominadas “inyección” y “extracción”, siendo la posición útil para nuestra aplicación la extracción del aire, misma que hace que el flujo vaya desde la izquierda a la derecha, haciendo girar a ventilador en el sentido de las manecillas del reloj.

Una vez configurado correctamente se procedió a realizar las pruebas del túnel de viento antes de conseguir la máquina de humo para así cerciorarnos de no perder tiempo si algo en el mismo túnel presentaba una falla que sea necesario reparar.

Figura 47.
Pruebas previas del túnel de viento



Configuración máquina de humo

Una vez comprobado que el túnel de viento funcionaba correctamente se procedió a conseguir la máquina de humo que funciona mediante una resistencia, misma que se calienta a una temperatura aproximada de 320° para permitir que el aceite de agua glicerina glicol etileno propileno glicol estabilizado llegue estado gaseoso y así generando humo, en este caso tenemos una máquina de 400w para realizar las pruebas

Figura 48.
Máquina de humo a utilizar



Misma máquina que de igual manera será probada antes de realizar las mediciones finales de los prototipos, teniendo en cuenta que se tenía un tiempo precalentamiento de la misma y un tiempo específico de funcionamiento, donde se llegaba a la temperatura optima y la producción de humo era sustancioso para poder visualizar de manera correcta el flujo del aire, esta máquina para probarla y utilizarla fue indispensable colocarla en la parte frontal del túnel para poder focalizar el humo de manera efectiva hacia el modelo, por lo cual se necesitó asistencia para activar la maquina y el túnel mientras se colocaba la máquina de humo en la posición correcta como se observa en la figura.

Figura 49.

Pruebas de humo, túnel y asistencia en el funcionamiento de esta.

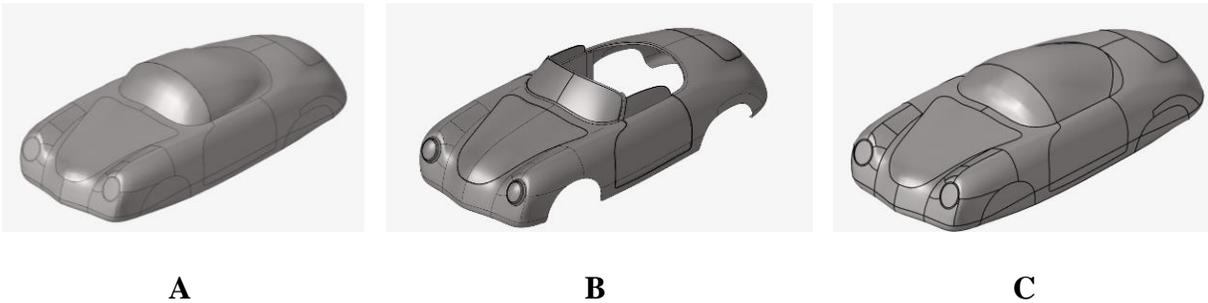


Resultados

Obtención de prototipos virtuales

Concluido el proceso de diseño y extrusión del vehículo, como se observó anteriormente se logró llegar a prototipos virtuales 3D que fueron utilizados en el proceso de simulación CFD de aerodinámica, los 3 modelos se los llevó a cabo de maneras similares, es decir empleando directamente el diseño en inventor y exportándolo en STEP, archivo que lee Hyperworks CFD, como se puede observar en la siguiente figura.

Figura 50.
Prototipos virtuales realizados en Autodesk Inventor



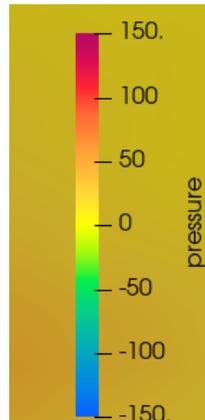
Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable con techo de loba, B vehículo descapotado, C vehículo coupe

Visualización de Parámetros

Escala de Colores y Rango de Leyendas

Para facilitar la interpretación de los resultados, se utiliza una escala de colores uniforme de tipo arcoíris. Esta escala es efectiva para diferenciar visualmente los distintos niveles de presión y velocidad en el modelo. Los parámetros se ajustan en las leyendas con un rango de -150 Pa a 150 Pa, lo que proporciona un contraste adecuado para observar las variaciones en los valores de presión a lo largo del modelo del *Porsche 356*.

Figura 51.
Leyenda de colores empleadas en el proyecto



Presión

La visualización de la presión es un aspecto crítico en la simulación *CFD*, ya que permite identificar las áreas de alta y baja presión alrededor del vehículo. Para ello, se configura la leyenda de presión con un rango de -150 Pa a 150 Pa. Este rango es adecuado para capturar las variaciones de presión típicas que se esperan en un túnel de viento a una velocidad de 20 m/s.

En la visualización, las áreas de alta presión se representan con colores cálidos (rojos y amarillos), mientras que las áreas de baja presión se muestran con colores fríos (azules y verdes) tal como se muestra en la figura donde se representan los resultados de presión de los 3 modelos ensayados. Esta representación permite identificar rápidamente las zonas donde el aire ejerce una mayor fuerza sobre la superficie del vehículo, lo cual es crucial para analizar el rendimiento aerodinámico y hacer ajustes necesarios en el diseño.

Coefficiente de fricción aerodinámico

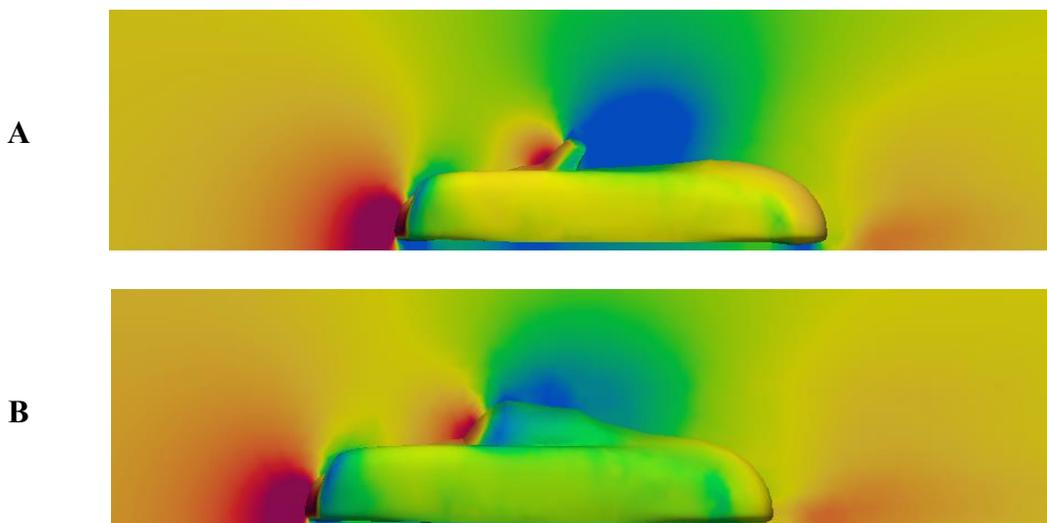
El coeficiente de fricción aerodinámica (C_f) representa la resistencia del aire contra un objeto en movimiento debido a la fricción entre ambos. A diferencia del coeficiente de arrastre

total (C_d), el C_f se enfoca únicamente en la fricción superficial. Este coeficiente, afectado por factores como la velocidad, las características del aire y la textura de la superficie, es fundamental en el diseño de vehículos. Disminuir el C_f conlleva un menor consumo de combustible y una mayor eficiencia aerodinámica, tanto en automóviles como en aviones.

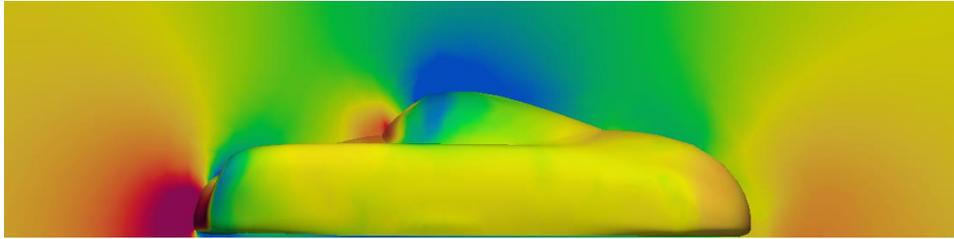
Los resultados de la simulación aerodinámica de las 3 variantes de Porsche 356 revelaron diferencias significativas entre las variantes. El coupé exhibió el coeficiente de arrastre más bajo (0.36), indicando una optimización de su forma para minimizar la resistencia aerodinámica. El descapotable, al carecer de techo rígido, presentó un coeficiente de arrastre superior (0.45). El modelo con techo de tela mostró un valor intermedio (0.398), lo cual se atribuye a la menor rigidez estructural del techo de lona, que afecta negativamente la eficiencia aerodinámica.

Como se presenta en la figura 52 donde se representan el modelo descapotable, el modelo descapotable con techo y el modelo *coupe*, en ese orden.

Figura 52.
Resultados de presión obtenidos en Altair Hyperworks



C



Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable, B vehículo descapotable con techo de lona y C vehículo coupe.

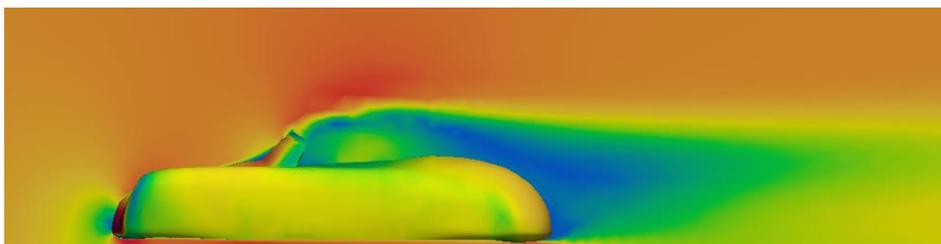
Velocidad

La visualización de la velocidad del aire alrededor del vehículo también es fundamental para comprender cómo el flujo se comporta en diferentes regiones del modelo. Se utiliza un rango de leyenda de velocidad de 0 m/s a 20 m/s, aplicando la misma escala de colores de tipo arcoíris uniforme para facilitar la interpretación tal como se presenta en la figura 54, donde se visualiza el modelo descapotable, el modelo descapotable con techo y el modelo coupe, en ese orden.

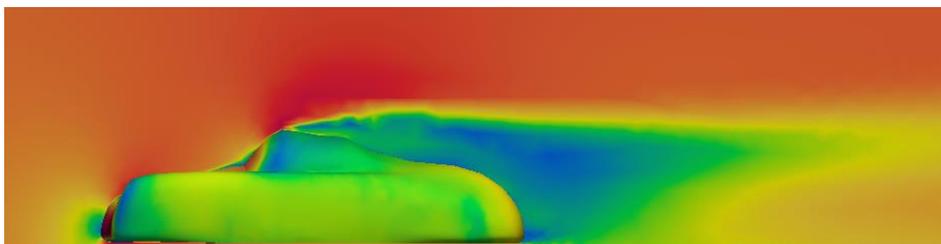
Figura 53.

Resultados de velocidad obtenidos en Altair Hyperworks

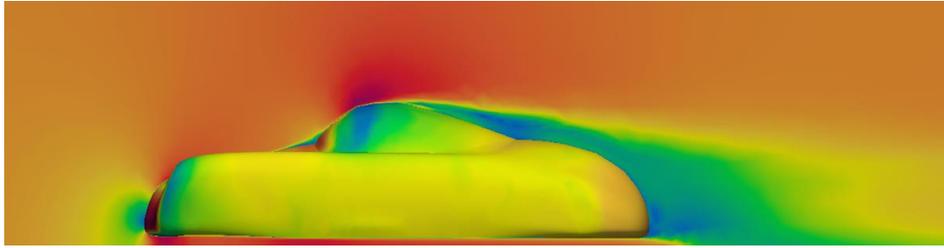
A



B



C



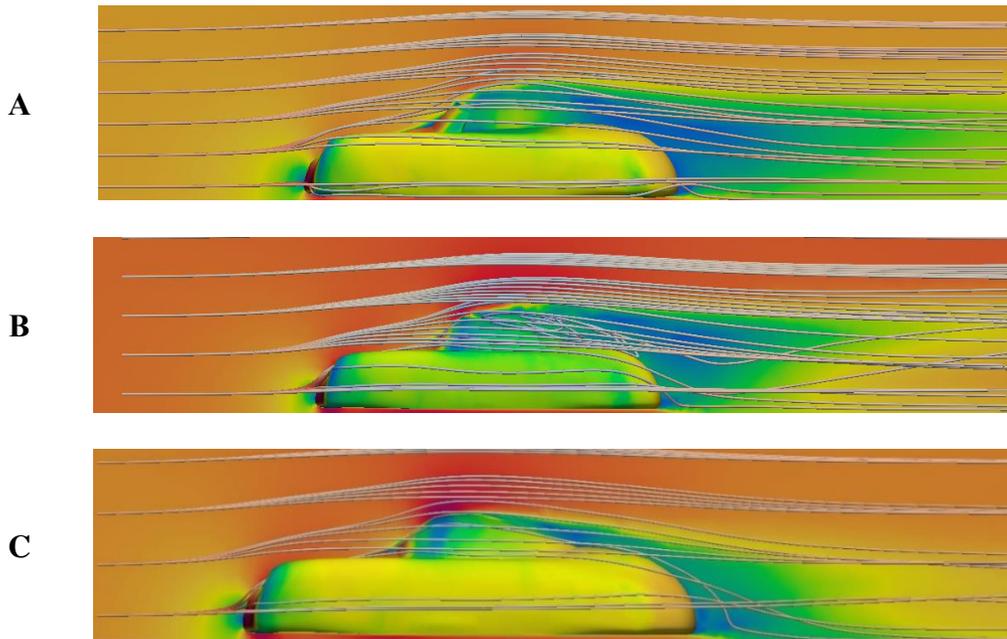
Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable, B vehículo descapotable con techo de lona y C vehículo coupe.

Los colores cálidos indican áreas de alta velocidad del aire, mientras que los colores fríos representan zonas de menor velocidad. Esta información es esencial para detectar patrones de flujo, como la formación de turbulencias y la separación del flujo, que pueden afectar significativamente la estabilidad y el rendimiento del Porsche 356.

Streamlines

Los *streamlines* son una herramienta útil para visualizar el flujo de aire alrededor del vehículo. Estas líneas muestran la trayectoria que sigue una partícula de fluido en el campo de velocidad, permitiendo observar de manera clara cómo el aire interactúa con la superficie del automóvil, los mismos *streamlines* permiten identificar rápidamente las áreas donde el flujo se adhiere a la superficie del vehículo y las regiones donde se produce la separación del flujo. La separación del flujo puede generar turbulencias y aumentar la resistencia aerodinámica, por lo que su identificación es esencial para optimizar el diseño, como puede observarse, el modelo descapotable, el modelo descapotable con techo y el modelo coupe, en ese orden.

Figura 54.
Diseño aerodinámico con streamlines

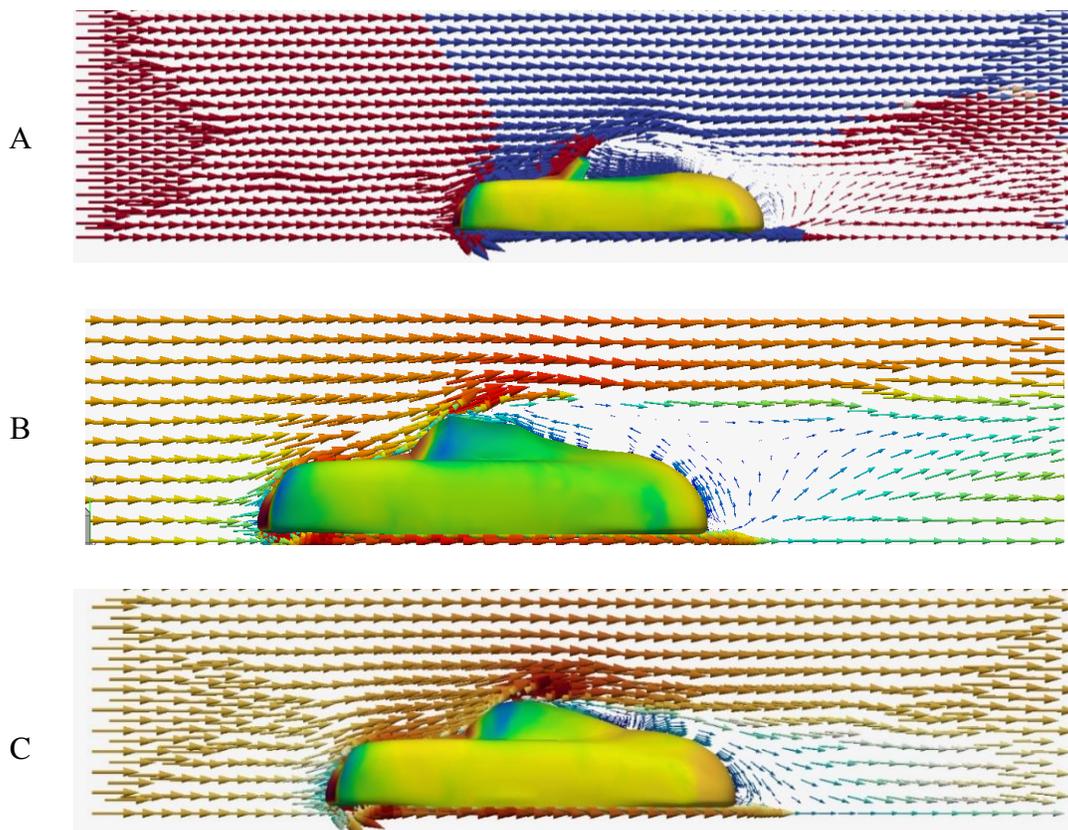


Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable, B vehículo descapotable con techo de lona y C vehículo coupe.

Líneas de Vector

Además de los *streamlines*, las líneas de vector es una técnica eficaz para analizar el flujo de aire alrededor del vehículo. Las líneas de vector representan la dirección y la magnitud del flujo en puntos específicos del dominio, proporcionando una visualización detallada del comportamiento del aire en el modelo descapotable, el modelo descapotable con techo y el modelo coupe, como se observa en la figura 56 en ese orden.

Figura 55.
Vectores de velocidad del viento



Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable, B vehículo descapotable con techo de lona y C vehículo coupe.

Prototipos 3D

Datos Experimentales

La simulación CFD (*Computational Fluid Dynamics*) proporciona una herramienta poderosa para el análisis aerodinámico de vehículos. Sin embargo, la validación experimental sigue siendo un paso crucial para confirmar la precisión de los resultados simulados. En este proyecto, se ha impreso tres modelos a escala 1:18 del Porsche 356 para validarlos en el túnel de

viento de la universidad. Este proceso incluyó la importación de los diseños al programa Cura Multimaker y la impresión 3D de cada modelo, utilizando aproximadamente 350 gramos de material y un tiempo de impresión de un día por modelo.

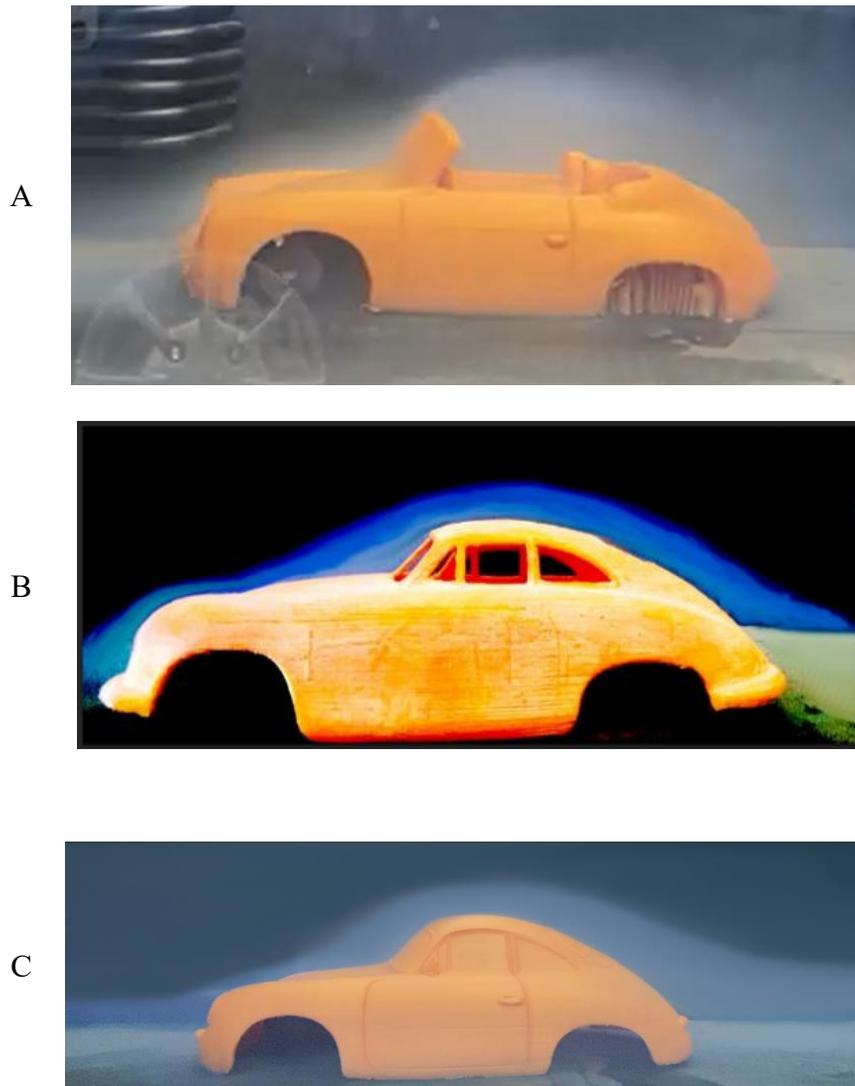
Para validar los resultados de la simulación, se comparan con datos experimentales obtenidos de pruebas en el túnel de viento a escala presente en la universidad. Esta comparación es esencial para asegurar que la simulación refleja con precisión el comportamiento real del flujo de aire alrededor del vehículo.

En el caso del Porsche 356, se utiliza una velocidad de aire de 20 m/s en las simulaciones para cotejar los resultados con los datos experimentales. Esta comparación permite ajustar y calibrar el modelo de simulación para mejorar su precisión y confiabilidad.

Comparación de Datos

Los datos experimentales obtenidos del túnel de viento se compararon con los resultados de la simulación CFD. Esta comparación incluyó la evaluación de los perfiles de presión y velocidad, así como el análisis de la resistencia aerodinámica total. Se buscaron concordancias y discrepancias entre los datos simulados y experimentales para validar la precisión del modelo CFD tal como se muestra en la figura 58 teniendo en cuenta las pruebas de los 3 prototipos anteriormente mencionados, el modelo descapotable, descapotable con techo y el coupe, en ese orden.

Figura 56.
Pruebas del túnel de viento



*Nota: En la figura se aprecian los ítems **A** vehículo descapotable, **B** vehículo descapotable con techo de lona y **C** vehículo coupe.*

Discusión de resultados

Justificación del vehículo a replicar

El *Porsche 356* fue seleccionado como modelo para replicar en este proyecto debido a varias razones clave que hacen de este automóvil una opción ideal para estudios de replicación y simulación CFD. La primera razón es la facilidad de replicación, el *Porsche 356*, con su diseño clásico y aerodinámico, presenta una estructura relativamente simple en comparación con vehículos más modernos y complejos. Su carrocería, aunque icónica, está compuesta por líneas suaves y curvas continuas que no sólo son estéticamente agradables sino también técnicamente menos desafiantes para procesos de modelado y simulación, como se puede contrastar con la información obtenida de la tesis de Gómez (2017), donde se presenta el modelo de un *Koenigsegg Regera*, mismo que presenta una gran variedad de curvas, perfiles salientes y cortes afilados mismos que al momento de simular van a requerir de una mayor capacidad computacional, como en el caso de Gómez (2017) que empleo el centro computacional de Barcelona, tecnología con la que aún no cuenta el país.

La simplicidad de las curvas del *Porsche 356* facilita enormemente el proceso de creación de modelos digitales y físicos. En términos de diseño asistido por computadora (CAD) y simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), las formas suaves del vehículo a diseñar permiten una malla más uniforme y menos propensa a errores durante la generación y refinamiento. Esto se traduce en resultados de simulación más precisos y confiables, ya que se minimizan las discontinuidades y artefactos que pueden afectar la calidad del análisis aerodinámico. Además, esta simplicidad estructural se extiende al proceso de fabricación de réplicas físicas, donde las curvas suaves permiten un moldeado más sencillo y menos costoso.

Otro factor determinante en la elección del *Porsche 356* fue la existencia de algunos modelos similares y de moldes preexistentes. En este proyecto, se tuvo acceso a moldes de réplicas del *Porsche 356*, lo cual proporcionó una ventaja significativa en términos de precisión y tiempo de desarrollo. Estos moldes permitieron tomar medidas exactas y obtener inspiración directa para el diseño y fabricación de las réplicas. La disponibilidad de estos recursos no sólo redujo el tiempo necesario para la fase de diseño, sino que también mejoró la exactitud del modelo replicado, asegurando que las dimensiones y formas fueran fieles al original.

Por otro lado, los estudios de Collette (2021) abren nuevas vías de investigación en el campo de la aerodinámica vehicular. Sería interesante analizar en detalle los mecanismos físicos que subyacen al desarrollo de flujo laminar y turbulento en diferentes tipos de vehículos. Además, se podrían explorar estrategias para modificar las formas de los vehículos con el objetivo de inducir un flujo laminar y reducir así la resistencia aerodinámica. Estos conocimientos podrían contribuir al diseño de vehículos más eficientes y sostenibles.

Los resultados de Collette (2021) concuerdan con investigaciones previas que sugieren una relación directa entre la geometría del vehículo y el desarrollo de flujo laminar o turbulento. Vehículos con formas aerodinámicas, como el Nissan 370 Z, tienden a favorecer el flujo laminar, mientras que aquellos con diseños más angulosos, como el Fiat 131 Abarth, son más propensos a experimentar turbulencia. Estos hallazgos resaltan la importancia de la optimización aerodinámica en el diseño automotriz, ya que pueden tener un impacto significativo en el consumo de combustible, la estabilidad y el ruido.

Comparación del Tipo de malla

Interpretación de Resultados de Simulación CFD del Porsche 356

Una vez completada la fase de mallado y resuelto el modelo en *Altair HyperMesh* utilizando el *solver AcuSolve*, se procede a la etapa de interpretación de resultados. Esta fase es fundamental para comprender el comportamiento aerodinámico del *Porsche 356* y extraer conclusiones valiosas para optimizar su diseño. A continuación, se describe detalladamente el proceso de interpretación de resultados, incluyendo la visualización de parámetros clave como la presión y la velocidad, así como la creación de *streamlines* y líneas de vector para su respectivo análisis.

Para poder tener una referencia en la cual se basó esta discusión, se emplearon varias tesis y artículos científicos en los cuales se presencian resultados y procedimientos similares, en los que podamos se contrastan los resultados obtenidos en este estudio mismos que serán citados en el mismo escrito y desarrollo.

Visualización de Parámetros

Escala de Colores y Rango de Leyendas

Para facilitar la interpretación de los resultados, se utiliza una escala de colores uniforme de tipo arcoíris, misma que se contrasta con la tesis denominada “Mallado y Simulación CFD de Automóvil”, misma que difiere con la tesis de Gómez (2017) quien empleo un esquema de colores denominado “*Hot to cold*” misma que permite visualizar los resultados de igual manera, pero es menos didáctica que la que se empleó en este proyecto.

La escala de colores denominada “Arcoíris” es más efectiva para diferenciar visualmente los distintos niveles de presión y velocidad en el modelo. Los parámetros se ajustan en las leyendas con un rango de -150 Pa a 150 Pa, lo que proporciona un contraste adecuado para observar las variaciones en los valores de presión y velocidad a lo largo del modelo del *Porsche 356*, mismos rangos que se seleccionaron teniendo en cuenta el estudio de Gómez (2017).

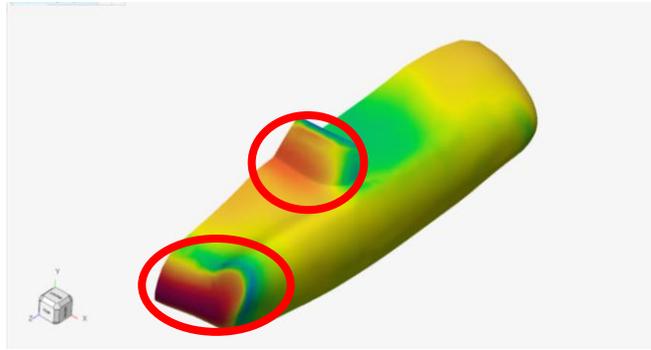
Como se observa directamente en los resultados, se tiene la incidencia directa en puntos como el parabrisas y la punta de la carrocería, puntos críticos donde se evidencia la presencia directa del aire, de la velocidad y presión del aire a 20 m/s, como se estipulo para poder llegar a la validación de pruebas en el túnel de viento físico.

Identificación de Áreas Críticas

El primer paso en el análisis es identificar las áreas críticas donde se observan altas variaciones de presión y velocidad. Estas áreas son fundamentales para entender cómo el diseño del vehículo afecta el flujo de aire y para detectar posibles problemas que puedan requerir ajustes. Por ejemplo, en el capó y el parabrisas del Porsche 356, se puede observar una alta presión que indica una fuerte interacción del flujo de aire con la superficie además de esto, en la parte trasera del vehículo, se pueden identificar zonas de baja presión y separación del flujo.

Como se observa en la figura 58, se ve los puntos de alta presión del vehículo, como lo son la punta del capó y la unión de la carrocería con el parabrisas, mismo que son puntos críticos característicos del vehículo.

Figura 57.
Caracterización de puntos de alta presión



En la parte trasera del vehículo, se pueden identificar zonas de baja presión y separación del flujo, que son áreas críticas para la optimización aerodinámica. Como se observa en la figura 57, se ven los puntos de alta presión del vehículo, como lo son la punta del capó y la unión de la carrocería con el parabrisas, puntos críticos que deberían afilarse de mejor manera para mejorar el arrastre del vehículo.

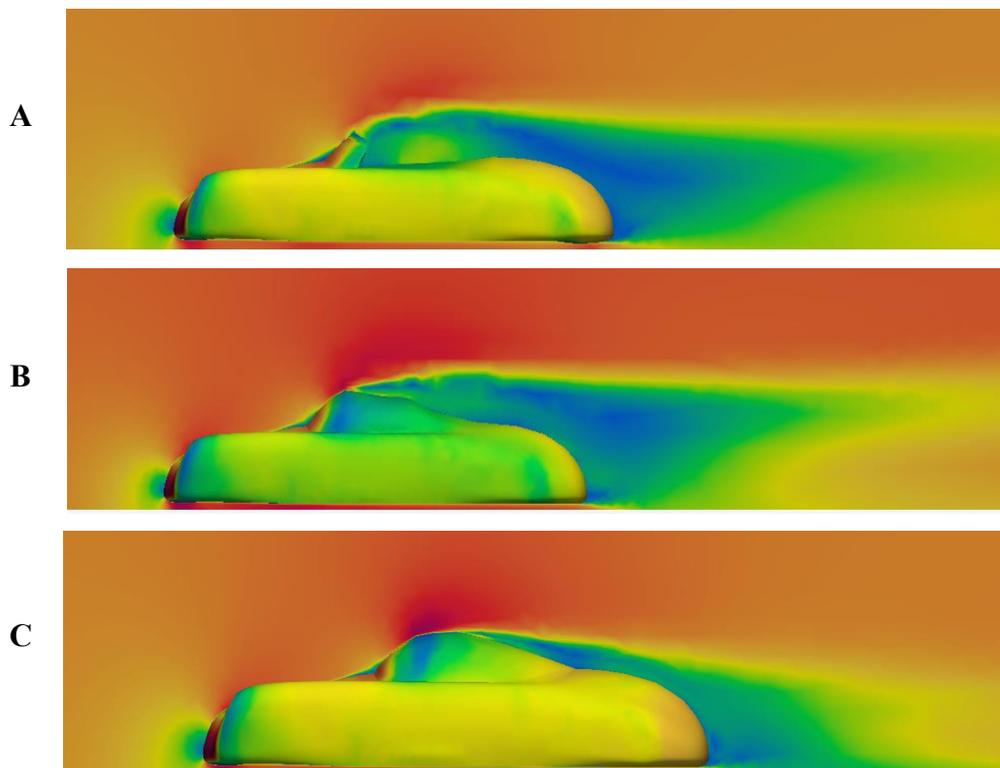
Presión

La visualización de la presión es un aspecto crítico en la simulación CFD, ya que permite identificar las áreas de alta y baja presión alrededor del vehículo. Para ello, se configuró la leyenda de presión con un rango de -150 Pa a 150 Pa. Este rango es adecuado para capturar las variaciones de presión típicas que se esperan en un túnel de viento a una velocidad de 20 m/s. En la visualización, las áreas de alta presión se representan con colores cálidos (rojos y amarillos), mientras que las áreas de baja presión se muestran con colores fríos (azules y verdes). Esta representación permite identificar rápidamente las zonas donde el aire ejerce una mayor fuerza sobre la superficie del vehículo, lo cual es crucial para analizar el rendimiento aerodinámico y hacer ajustes necesarios en el diseño.

Velocidad

La visualización de la velocidad del aire alrededor del vehículo también es fundamental para comprender cómo el flujo se comporta en diferentes regiones del modelo. Se utiliza un rango de leyenda de velocidad de 0 m/s a 20 m/s, aplicando la misma escala de colores de tipo arcoíris uniforme para facilitar la interpretación. Los colores cálidos indican áreas de alta velocidad del aire, mientras que los colores fríos representan zonas de menor velocidad. Esta información es esencial para detectar patrones de flujo, como la formación de turbulencias y la separación del flujo, que pueden afectar significativamente la estabilidad y el rendimiento del Porsche 356.

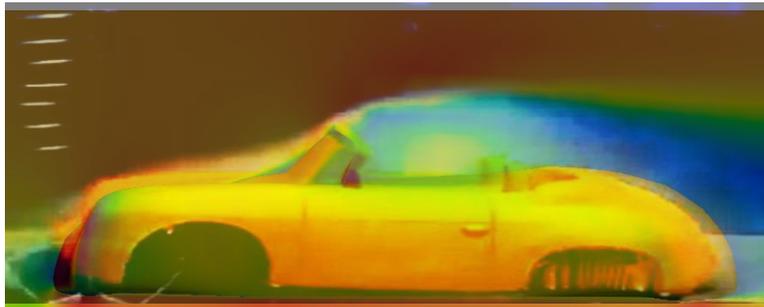
Figura 58.
Diagramas de presión y velocidad obtenidos en Hyperworks CFD



Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable, B vehículo descapotable con techo de lona y C vehículo coupe.

Como se observa en las figuras anteriormente expuestas, en el modelo descapotable de los vehículos es donde más se evidencia la turbulencia presente en el modelo por la falta de techo de este, generando un espacio vacío de flujo dentro de la cabina justo tras el parabrisas, misma situación que se puede evidenciar colocando las dos imágenes montadas una con la otra y evidenciando que el modelo virtual como el físico reaccionan de la misma manera tanto en situaciones virtuales como físicas.

Figura 59.
Superposición de imágenes virtuales y reales



Comparación de Modelos Porsche 356 en Diferentes Configuraciones Aerodinámicas

Porsche 356 Descapotable

En la figura 61 se muestra el modelo Porsche 356 en su configuración descapotable. En esta configuración, la ausencia de un techo rígido resulta en una mayor turbulencia y una

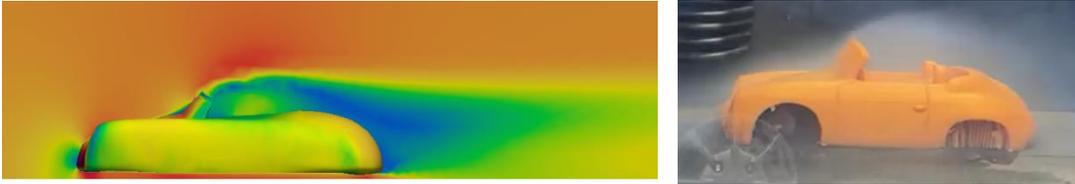
significativa recirculación del flujo de aire detrás de la cabina. Este fenómeno es causado por la falta de una superficie continua que guíe el aire de manera suave sobre el vehículo y hacia la parte trasera. La imagen revela una región de baja velocidad del aire justo detrás del parabrisas, extendiéndose hacia la zona donde estaría el techo.

Esta región de baja velocidad es indicativa de una gran cantidad de aire que se está recirculando en lugar de fluir de manera eficiente sobre el vehículo. En términos de aerodinámica, esto crea una mayor resistencia al avance, conocida como "drag". El aumento del drag tiene varias implicaciones negativas en el rendimiento del vehículo. Primero, incrementa el consumo de combustible, ya que el motor necesita trabajar más para superar la resistencia del aire. Segundo, afecta la estabilidad del vehículo a altas velocidades, ya que las fuerzas aerodinámicas no son distribuidas de manera uniforme.

Para mejorar este aspecto, algunos vehículos modernos utilizan deflectores de viento o pequeñas aletas que ayudan a guiar el flujo de aire, reduciendo la turbulencia y mejorando la eficiencia aerodinámica. Sin embargo, estos dispositivos no están presentes en el diseño clásico del Porsche 356, lo que resalta las limitaciones de esta configuración en términos de aerodinámica.

Figura 60.

Comparación prototipo a escala con simulación virtual



Porsche 356 Descapotable con Capota de Tela

Por otro lado, la figura 61 representa el modelo Porsche 356 descapotable con una capota de tela. Esta configuración introduce una superficie adicional que ayuda a redirigir el flujo de aire, aunque no de manera tan eficiente como un techo rígido. La capota de tela proporciona una cierta continuidad en la superficie del vehículo, lo que reduce la recirculación del aire y la turbulencia en comparación con el modelo totalmente descapotable.

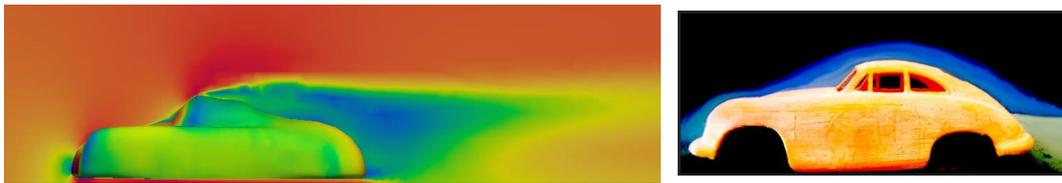
En la imagen, se observa una transición más suave del flujo de aire desde el parabrisas hacia la parte trasera del vehículo. La presencia de la capota de tela disminuye la zona de baja velocidad detrás de la cabina, aunque no la elimina por completo. La forma más irregular y menos rígida de la capota en comparación con un techo rígido implica que aún existen áreas de flujo de aire perturbado y recirculación, aunque en menor medida que en el modelo sin capota.

El uso de una capota de tela en un vehículo descapotable es una solución común para mejorar la aerodinámica sin comprometer la capacidad de conducción al aire libre. Sin embargo, estas capotas a menudo no se ajustan tan firmemente como un techo rígido, lo que limita su efectividad. Además, la tela puede vibrar y deformarse bajo la presión del aire a altas velocidades, creando turbulencias adicionales.

En términos de rendimiento del vehículo, la capota de tela ofrece una mejora notable respecto al modelo completamente descapotable. La reducción de la turbulencia y la recirculación del aire resulta en una menor resistencia al avance, lo que a su vez mejora la eficiencia del combustible y la estabilidad a velocidades elevadas. Sin embargo, el drag aerodinámico sigue siendo mayor en comparación con el modelo coupe, lo que limita el rendimiento general.

Figura 61.

Comparación prototipo a escala con simulación virtual



Porsche 356 Coupe

La figura 62 muestra el modelo Porsche 356 coupe, con un techo rígido. Este diseño ofrece la mejor eficiencia aerodinámica entre las tres configuraciones analizadas. El flujo de aire sobre el coche es mucho más uniforme y continuo gracias a la superficie rígida y continua del techo, lo que minimiza las turbulencias y las regiones de recirculación del aire.

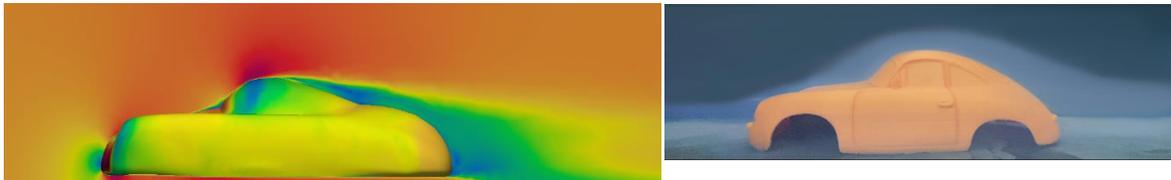
En la imagen, se puede observar que el flujo de aire se mantiene adherido al techo y se desvía suavemente hacia la parte trasera del vehículo. Esto reduce la resistencia al avance (drag) de manera significativa. Las superficies aerodinámicas bien diseñadas, como el techo del coupe, permiten que el aire fluya de manera eficiente, reduciendo la presión negativa y la formación de vórtices detrás del vehículo. Este comportamiento aerodinámico eficiente se traduce en varios beneficios para el rendimiento del vehículo.

Primero, la reducción del drag mejora la eficiencia del combustible. Al tener que superar menos resistencia del aire, el motor del vehículo puede operar de manera más eficiente, lo que se traduce en un menor consumo de combustible. Segundo, el flujo de aire más uniforme mejora la estabilidad del vehículo a altas velocidades. Las fuerzas aerodinámicas se distribuyen de manera más equilibrada, lo que reduce el riesgo de levantamiento y mejora la maniobrabilidad.

El diseño aerodinámico del Porsche 356 coupe puede compararse con los de otros vehículos deportivos que priorizan la eficiencia del flujo de aire. Los principios de aerodinámica aplicados en el diseño del coupe también se utilizan en la industria automotriz moderna para maximizar el rendimiento y la eficiencia energética.

Figura 62.

Comparación prototipo a escala con simulación virtual

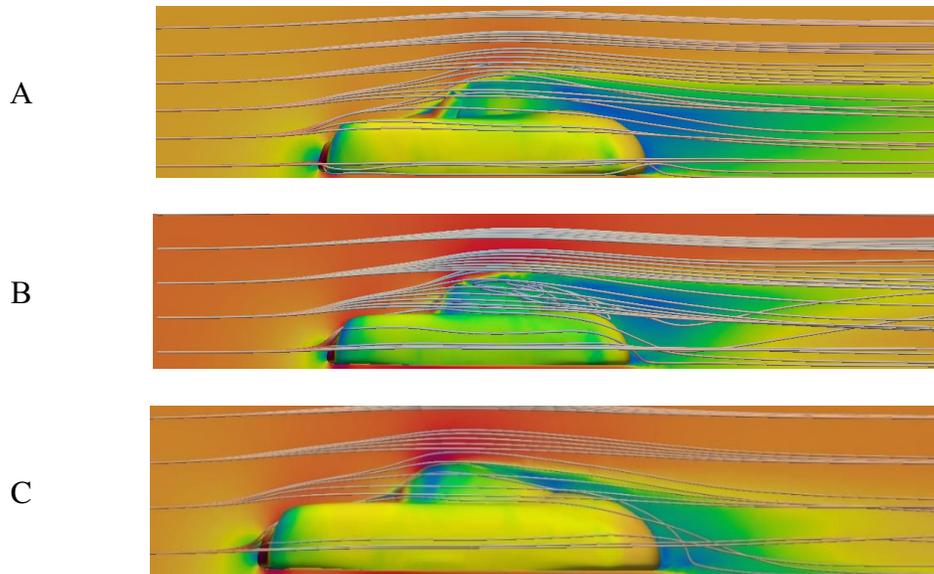


Análisis de Streamlines

Los *streamlines* permiten identificar rápidamente las áreas donde el flujo se adhiere a la superficie del vehículo y las regiones donde se produce la separación del flujo. La separación del flujo puede generar turbulencias y aumentar la resistencia aerodinámica, por lo que su identificación es esencial para optimizar el diseño. En el caso del *Porsche 356*, los *streamlines* muestran cómo el aire fluye suavemente sobre la superficie aerodinámica del capó y el parabrisas, mientras se revela en zonas de separación del flujo como la parte trasera del vehículo.

Figura 63.

Análisis de streamlines creadas



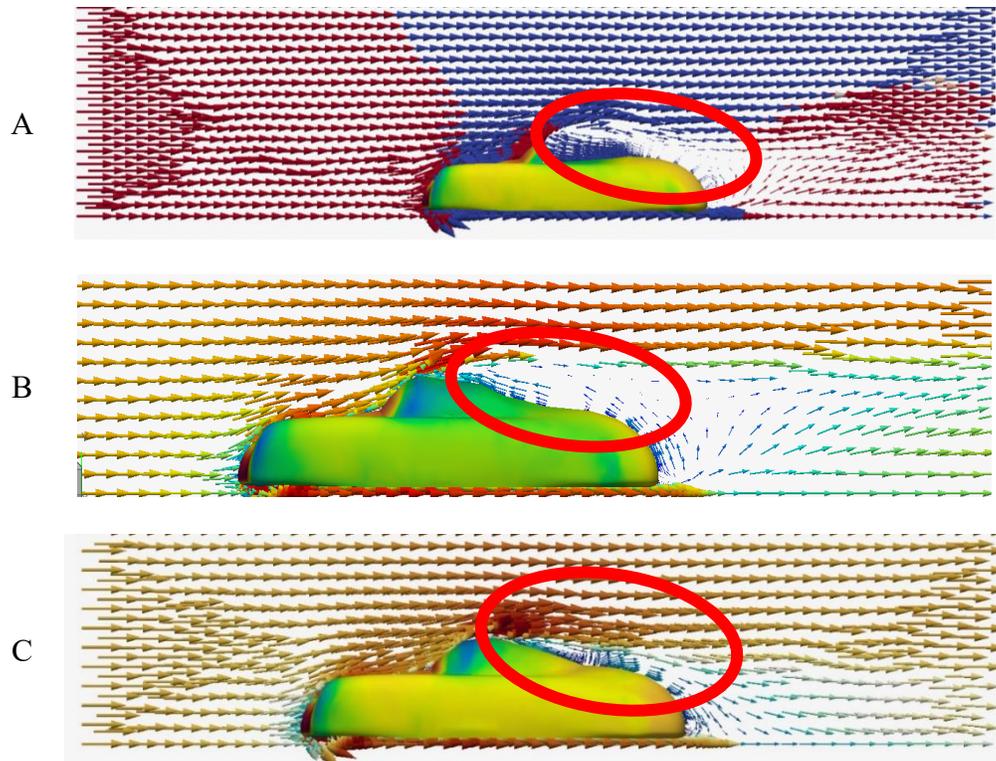
*Nota: En la figura se aprecian los ítems **A** vehículo descapotable, **B** vehículo descapotable con techo de lona y **C** vehículo coupe.*

Análisis de Líneas de Vector

Las líneas de vector permiten observar con precisión cómo el flujo de aire se comporta en diferentes regiones del vehículo. En el *Porsche 356*, las líneas de vector pueden mostrar cómo el aire se dirige hacia la parte trasera del vehículo, indicando áreas de aceleración y desaceleración del flujo.

Estas visualizaciones son cruciales para identificar patrones de flujo que pueden afectar la estabilidad y el rendimiento del vehículo. Por ejemplo, las líneas de vector pueden revelar la formación de vórtices y zonas de recirculación del aire, que pueden contribuir a aumentar la resistencia aerodinámica y reducir la eficiencia del vehículo.

Figura 64.
Identificación de vacío en la parte de la cabina



Nota: En la figura se aprecian los ítems A vehículo descapotable, B vehículo descapotable con techo de lona y C vehículo coupe.

Comparación con Datos Experimentales

La simulación CFD proporciona una herramienta poderosa para el análisis aerodinámico de vehículos. Sin embargo, la validación experimental sigue siendo un paso crucial para confirmar la precisión de los resultados simulados. En este proyecto, hemos impreso tres modelos a escala 1:18 del Porsche 356 para validarlos en el túnel de viento de la universidad.

Este proceso incluyó la importación de los diseños al programa Cura Ultimaker y la impresión 3D de cada modelo, utilizando aproximadamente 350 gramos de material y un tiempo de impresión de un día por modelo. Para validar los resultados de la simulación, se comparan con datos experimentales obtenidos de pruebas en el túnel de viento a escala presente en la

universidad. Esta comparación es esencial para asegurar que la simulación refleja con precisión el comportamiento real del flujo de aire alrededor del vehículo. En el caso del Porsche 356, se utiliza una velocidad de aire de 20 m/s en las simulaciones para cotejar los resultados con los datos experimentales. Esta comparación permite ajustar y calibrar el modelo de simulación para mejorar su precisión y confiabilidad.

Comparación de Datos

Los datos experimentales obtenidos del túnel de viento se compararon con los resultados de la simulación CFD. Esta comparación incluyó la evaluación de los perfiles de presión y velocidad, así como el análisis de la resistencia aerodinámica total. Se buscaron concordancias y discrepancias entre los datos simulados y experimentales para validar la precisión del modelo CFD. Como se puede observar en las figuras anteriormente expuestas, en el modelo descapotable de los vehículos es donde más se evidencia la turbulencia presente en el modelo por la falta de techo del mismo, generando un espacio vacío de flujo dentro de la cabina justo tras el parabrisas, misma situación que se puede evidenciar colocando las dos imágenes montadas una con la otra y evidenciando que el modelo virtual como el físico reaccionan de la misma manera tanto en situaciones virtuales como físicas.

Validación del Modelo

Una vez realizadas las dos pruebas, se logró observar que las zonas críticas de aire en el modelo virtual y físico son las mismas y mediante la vectorización de estos se observa el vacío presente en el habitáculo tal como se prevé en un vehículo descapotable. Este proceso de validación es esencial para confirmar la precisión de la simulación CFD, cabe destacar que

debido al diseño del túnel de viento a emplear se requieren configuraciones muy exactas para poder enviar el humo en las partes cruciales

Conclusiones

Validación de Datos Experimentales con Simulaciones CFD

La combinación de simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y pruebas en túnel de viento permitió validar de manera precisa los datos experimentales obtenidos en el análisis aerodinámico del Porsche 356. Las simulaciones CFD proporcionaron una visión cuantitativa de la distribución de velocidad y presión alrededor del vehículo, identificando áreas de alta turbulencia y resistencia aerodinámica como lo son la punta del capot, la unión del parabrisas y una leve turbulencia en la parte posterior del vehículo. Estas simulaciones fueron corroboradas por las pruebas en el túnel de viento, que mostraron un comportamiento del flujo de aire consistente con los resultados simulados. Esta validación dual garantiza la fiabilidad de los datos y confirma que las metodologías empleadas son adecuadas para el estudio aerodinámico de carrocerías automotrices. La correlación entre los datos simulados y experimentales refuerza la credibilidad de los resultados obtenidos, demostrando que el enfoque utilizado puede ser replicado en futuros estudios de diseño y optimización aerodinámica .

Optimización del Diseño Aerodinámico

El análisis detallado de las diferentes configuraciones del Porsche 356 permitió identificar las características clave que influyen en su rendimiento aerodinámico. Los resultados mostraron que el modelo coupe tiene un flujo de aire más suave y continuo, lo que minimiza la resistencia aerodinámica y maximiza la estabilidad del vehículo. En contraste, el modelo

descapotable, aunque mejora con la capota de tela, no alcanza el mismo nivel de eficiencia que el coupe. Estos hallazgos resaltan la importancia de un diseño optimizado del techo para mejorar la aerodinámica. La utilización de herramientas avanzadas de CFD y pruebas en túnel de viento permite iterar y refinar continuamente el diseño, asegurando que el producto final no solo cumpla con los requisitos estéticos y funcionales, sino que también ofrezca un rendimiento superior en términos de eficiencia energética y estabilidad en carretera.

Impacto de las Tecnologías CFD en el Desarrollo Automotriz

El uso de tecnologías de simulación CFD ha revolucionado el proceso de diseño y desarrollo automotriz, permitiendo un análisis detallado y preciso de los flujos de aire alrededor de vehículos. En el caso del Porsche 356, las simulaciones CFD no solo permitieron identificar y corregir problemas aerodinámicos, sino que también proporcionaron datos críticos para la validación experimental en túnel de viento. Esta integración de simulaciones digitales y pruebas físicas mejora la calidad y el rendimiento del producto final. La capacidad de realizar múltiples iteraciones de diseño de manera rápida y eficiente permite a los ingenieros optimizar cada aspecto del vehículo, desde la forma de la carrocería hasta los detalles más finos, asegurando que cada modelo sea aerodinámicamente eficiente y competitivo en el mercado.

Cumplimiento de los Objetivos del Estudio

Los objetivos planteados al inicio del estudio fueron cumplidos con éxito, demostrando la viabilidad técnica y económica de la fabricación de carrocerías del Porsche 356 en Ecuador. Las metodologías empleadas, que incluyen simulaciones CFD y pruebas en túnel de viento, se mostraron efectivas para evaluar y optimizar el diseño aerodinámico de los vehículos. Los

resultados obtenidos no solo validan la hipótesis de que es posible mejorar la eficiencia aerodinámica del Porsche 356, sino que también proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y desarrollos en el campo de la aerodinámica automotriz. El estudio concluye que, con las herramientas y conocimientos adecuados, es posible llevar a cabo proyectos de alta complejidad técnica en Ecuador, contribuyendo al desarrollo industrial y tecnológico del país.

Recomendaciones

Optimización de Procesos de Mallado

Para mejorar la precisión y eficiencia de las simulaciones CFD, se recomienda la implementación de técnicas avanzadas de mallado. Esto incluye el uso de algoritmos de refinamiento adaptativo que ajusten la densidad del mallado en áreas críticas de alta variabilidad de flujo. Además, se debe considerar la utilización de herramientas de preprocesamiento que permitan la generación automática de mallados de alta calidad, minimizando el tiempo y esfuerzo manual requerido. La optimización del proceso de mallado es crucial para obtener resultados más precisos y fiables en las simulaciones, lo que a su vez mejora la capacidad de predecir y optimizar el rendimiento aerodinámico del Porsche 356, teniendo en cuenta que se presentaron problemas de mallado en instancias iniciales debidas al desconocimiento y la poca experiencia con el software empleado, teniendo en cuenta además que la calidad de resultados se basa en la capacidad computacional a emplear, teniendo en cuenta que no se cuenta con un centro computacional como se ve en Europa, donde se pudo haber llevado a cabo una malla mucho más fina y resultados mucho más detallados a los obtenidos en este proyecto.

Optimización de Recursos en el Túnel de Viento

Ante la limitación de recursos en el túnel de viento, es crucial optimizar su uso mediante la planificación estratégica y mejoramiento de este. Se recomienda desarrollar una metodología de prueba que maximice la cantidad de datos útiles obtenidos por cada sesión, utilizando técnicas de medición avanzadas como la anemometría de hilo caliente, balanzas para análisis de carga aerodinámica y presencia de tubos de direccionamiento de aire para la colocación exacta del flujo de aire. Además, la colaboración con instituciones académicas y centros de investigación que dispongan de túneles de viento más avanzados puede proporcionar acceso a recursos adicionales y complementar las capacidades locales, asegurando un análisis aerodinámico exhaustivo y preciso.

Mejora de la Experiencia de Diseño Digital

Para optimizar el proceso de diseño del Porsche 356, se recomienda la mayor experiencia en programas como Altair o Inventor, puesto que la falta de experiencia en estos programas presenta una barrera para poder desarrollar con facilidad las mediciones y simulaciones de las carrocerías.

Referencia bibliográfica

1. Anderson, J. D. (1995). Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill.
2. Alonso, J. M. (2001). Técnicas del Automóvil. Madrid: Magallanes.
3. Arias, J. M. (2009). Soldadura eléctrica y Sistemas TIG y MIG. Madrid: Paraninfo, S.A.

4. Altamirano Torres, L. A., & Suárez Cordero, E. A. (2018). Análisis de la industria automotriz en Ecuador: un enfoque en la producción y comercialización de vehículos. *Revista ESPACIOS*, 39(52).
5. Alcívar, A. (2022,). Fabricantes carroceros. Scribd. Recuperado de:
<https://www.scribd.com/document/644139659/Fabricantes-carroceros>
6. Autodesk. (14 de 07 de 2015). Autodesk. Obtenido de
<http://www.autodesk.es/products/inventor/overview>
7. Aymesa. (2013). Historia de Aymesa. Recuperado de:
<https://web.archive.org/web/20140414094629/http://www.aymesa.ec/index.php/storia>
8. Blazek, J. (2015). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*. Butterworth-Heinemann.
9. Báez, M. (2023). *The Art of Vehicle Replication*
10. Brown, A. (2020). *Introduction to Computer Graphics [Introducción a la Gráfica por Computadora]*. Editorial Pearson.
11. Cascajosa, M. (2005). *Ingeniería de Vehículos*. México D. F.: Alfaomega.
12. **Colette, P.** (2021). *Estudio experimental del flujo alrededor de modelos de automóvil en un túnel de viento* [Trabajo de fin de grado, Escola Técnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona].
13. Donut, (2020). A.I. Designed this Car [Vídeo]. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=VdG4gUTowXc>
14. Ferro, R. H. (2019). *La Industria Automotriz en América Latina: Innovación y Desarrollo*. Editorial Académica Española.

15. Ferziger, J. H., & Perić, M. (2002). *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer.
16. Galarza, R., & Rodríguez, H. (2018). Manufacturing Strategy and Business Strategy in the Ecuadorian Automotive Industry. *Journal of Industrial Engineering and Management*,11(4). <https://doi.org/10.3926/jiem.2653>
17. Garcia, P. (2014). *Computer Graphics: Principles and Practice [Gráficos por Computadora: Principios y Práctica]*. Editorial Addison-Wesley.
18. Inversiones, D. d. (07 de 2013). PRO ECUADRO. Obtenido De:http://www.proecuador.gob.ec/wpcontent/uploads/2013/07/PROEC_AS201_AUT_MOTRIZ1.pdf
19. Jones, R. (2016). *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications [Dinámica de Fluidos Computacional: Principios y Aplicaciones]*. Editorial Springer.
20. Jones, R. (2018). *Finite Element Methods in Engineering [Métodos de Elementos Finitos en Ingeniería]*. Editorial McGraw-Hill.
21. Johnson, M. (2016). *Fundamentals of 3D Computer Graphics [Fundamentos de Gráficos por Computadora 3D]*. Editorial CRC Press.
22. Knupp, P. M., & Steinberg, S. (1994). *Fundamentals of Grid Generation*. CRC Press
23. Lee, S. (2017). *3D Modeling and Animation: Synthesis and Analysis Techniques for the Human Body [Modelado y Animación 3D: Técnicas de Síntesis y Análisis para el Cuerpo Humano]*. Editorial Springer.
24. Mavriplis, D. J. (1997). Unstructured Grid Techniques. *Annual Review of Fluid Mechanics*,29(1), 473-514.
25. McBeath, S. (2005). *Aerodinámica del vehículo de competición*. Barcelona: CEAC

26. Nisbett, R. G. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México D.F.: McGrawHill.www.maquinariaszeziola.com. (19 de 05 de 2015). DMZ Maquinaria Zeziola SRL. Obtenido de <http://www.maquinariaszeziola.com/manual-de-curvado/tecnica-de-curvado-decanos.html>
27. Martinez, R. (2019). Interactive Computer Graphics: A Top-Down Approach with WebGL [Gráficos por Computadora Interactivos: Un Enfoque de Arriba hacia Abajo con WebGL]. Editorial Pearson.
28. Vera-Ramos, E., & Adum-Ordoñez, G. (2019). Políticas de promoción industrial para el desarrollo del sector automotor en Ecuador. Revista Espacios, 40(19). Recuperado de: <http://www.revistaespacios.com/a19v40n19/19401911.html>
29. Smith, J. (2017). Advanced Mesh Generation Techniques [Técnicas Avanzadas de Generación de Mallas]. Editorial Wiley.
30. Thomas, E. (2021). Computer Graphics Programming in OpenGL with C++ [Programación de Gráficos por Computadora en OpenGL con C++]. Editorial Mercury Learning and Information.
31. Thompson, J. F., Soni, B. K., & Weatherill, N. P. (1999). *Handbook of Grid Generation*. CRC Press.
32. White, L. (2015). Fundamentals of Graphics Communication [Fundamentos de Comunicación Gráfica]. Editorial McGraw-Hill.
33. White, S. (2022). The Economics of Vehicle Replication: Factors Affecting Pricing and Market Trends. *Automotive Economics Quarterly*, 18(2), 39-48.

34. *Workshop Manual for 356* (1.^a ed., Vol. 1). (1960). [Versión digitalizada].

<https://www.scribd.com/document/527876195/Porsche-356-Workshop-Manual>