



Estudio práctico de la aerodinámica en un automóvil deportivo utilizando el programa de
dinámica de fluidos computacional Flow de Solidworks

AUTORES

Alejandro Arias Parada Código: 1098806914
Marcio Nicolas Cediell Urrea Código: 1095831019

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO
Bucaramanga
05-06-2019**



Estudio práctico de la aerodinámica en un automóvil deportivo utilizando el programa de
dinámica de fluidos computacional Flow de Solidworks

AUTORES

Alejandro Arias Parada Código: 1098806914
Marcio Nicolas Cediel Urrea Código: 1095831019

**Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en Operación y Mantenimiento Electromecánico**

DIRECTOR

M.Sc.Eng. Diana Carolina Dulcey Díaz

Grupo de Investigación en Diseño y Materiales-DIMAT

**UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA
TECNOLOGÍA EN OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO ELECTROMECAÁNICO
Bucaramanga
05-06-2019**

Nota de Aceptación

Firma del jurado

Firma del Jurado

DEDICATORIA

Primero que todo dedicamos a Dios el desarrollo de esta investigación, a nuestros padres, Casimiro Arias, Andrea Parada, Manuel Cediel, Isabel Urrea, gracias a sus palabras de aliento y motivación que nos ayudaron a salir adelante y no decaer, también a nuestros demás familiares que nos apoyaron durante este proceso.

A nuestros docentes y nuestra directora de proyecto M.Sc.Eng. Diana Carolina Dulcey Díaz quienes nos apoyaron en todo momento compartiendo sus conocimientos.

A todas aquellas personas que estuvieron presentes durante esta etapa de nuestras vidas apoyándonos con motivación constante para culminar con éxito este sueño.

Muchas gracias a todos.

Alejandro Arias Parada
Marcio Nicolas Cediel Urrea

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer a Dios por haber guiado este camino hasta este momento, a nuestros padres quienes han sido un gran apoyo a lo largo de este camino y en los momentos difíciles como estudiante, a todos nuestros profesores quienes día a día compartieron y transmitieron sus conocimientos brindándonos bases para nuestro desarrollo académico, por último, a nuestra directora de proyecto M.Sc.Eng. Diana Carolina Dulcey Díaz quien nos guió en todo momento en la realización de esta investigación.

TABLA DE CONTENIDO

1.	<u>DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN</u>	12
1.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2.	JUSTIFICACIÓN	14
1.3.	OBJETIVOS	15
1.3.1.	OBJETIVO GENERAL	15
1.3.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.4.	ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES	16
1.4.1.	INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA AUTOMOTRIZ	16
1.4.2.	ESTUDIO MEDIANTE CFD DEL ALERÓN TRASERO DE UN MONOPLAZA CON EL DRS VIERTO Y CERRADO EN DIFERENTES CIRCUITOS	16
1.4.3.	ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN AUDI R8 MEDIANTE TÉCNICAS	17
1.4.4.	MALLADO Y SIMULACIÓN CFD DE UN AUTOMOVIL	18
1.4.5.	MEJORA AERODINÁMICA DE UN TURISMO	19
2.	<u>MARCO REFERENCIAL</u>	20
2.1.	MARCO TEÓRICO	20
2.1.1.	PRINCIPIO DE BERNOULLI	20
2.1.2.	TERCERA LEY DE NEWTON	21
2.1.3.	EFECTO VENTURI	21
2.1.4.	NUMERO DE REYNOLDS	22
2.1.5.	TIPOS DE FLUJO	23
2.1.6.	TIPOS DE COEFICIENTES	23
2.1.7.	FUERZAS IMPLICADAS EN LA AERODINÁMICA	23
2.1.8.	PRINCIPIO DE CONTINUIDAD	24
2.1.9.	ECUACIÓN NAVIER-STOKES	24
2.1.10.	FUNCIONAMIENTO DE UN CÓDIGO CFD	25
2.1.11.	ERRORES E INCERTIDUMBRES EN EL MODELAMIENTO CFD	25
2.2.	MARCO CONCEPTUAL	26
2.3.	MARCO LEGAL	29
3.	<u>DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO</u>	31
3.1.	DIAGRAMA DE LAS ETAPAS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO	31
3.2.	ETAPA 1. PRE PROCESAMIENTO	32
3.2.1.	INSTALACIÓN Y COMPROBACIÓN DE SOLIDWORKS SIMULATION	32
3.2.2.	MODELADO DEL VEHÍCULO	33
3.2.3.	CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA	35
3.2.4.	DOMINIO COMPUTACIONAL	36
3.2.5.	ESTABLECER OBJETIVOS	37
3.2.6.	DETERMINACIÓN DEL MALLADO	38

3.3.	ETAPA 2. PROCESAMIENTO	39
3.3.1.	EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS	39
3.4.	ETAPA 3. POST PROCESAMIENTO	41
3.4.1.	VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y GRÁFICOS.....	41
3.4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
4.	<u>RESULTADOS</u>	<u>51</u>
4.1.	DESARROLLO DEL MANUAL.....	51
4.1.1.	ESTRUCTURA DEL MANUAL.....	51
4.1.2.	DESCRIPCIÓN DEL MANUAL	52
4.2.	MODELADO DEL VEHICULO AUDI R8	52
4.2.1.	MODELADO DEL VEHÍCULO	52
4.3.	OBTENCION DE RESULTADOS DE LA SIMULACION POR CFD	52
4.4.	DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE IDEAL POR MEDIO DEL REFINAMIENTO DE LA MALLA	54
4.5.	COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON UN ESTUDIO REALIZADO POR CARBONELL ROMERO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN AUDI R8 MEDIANTE TÉCNICAS CFD	58
4.6.	VALIDACION DEL MANUAL.....	59
5.	<u>CONCLUSIONES</u>	<u>66</u>
6.	<u>RECOMENDACIONES</u>	<u>67</u>
7.	<u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>68</u>
8.	<u>ANEXOS.....</u>	<u>70</u>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Arbol de Problemas	12
Figura 2 Resistencia del aire al avance de un vehículo (Drag)	17
Figura 3 Modelo CAD	18
Figura 4 Mallado	19
Figura 5 Elementos de fluido utilizados en la ecuación de Bernoulli.	21
Figura 6 Detalles estándar del diseño del principio Venturi.	22
Figura 7 Líneas de corriente del flujo laminar.	27
Figura 8 Líneas de corriente del flujo turbulento.	27
Figura 9 Volumen de control para el interior de una boquilla	28
Figura 10 Diagrama de las Etapas de la simulación de flujo	31
Figura 11 Descarga del SolidWorks.....	32
Figura 12 Instalación del SolidWorks	32
Figura 13 Carrocería del vehículo modelado	33
Figura 14 Rin del vehículo modelado	34
Figura 15 Llanta del vehiculo modelado.....	34
Figura 16 Revisión del CAD Audi R8	35
Figura 17 Configuración de la geometría.....	36
Figura 18 Dominio Computacional del Audi R8	37
Figura 19 Dominio Computacional del Auto Modelado.....	37
Figura 20 Árbol de análisis de Flow Simulation.....	38
Figura 21 Mallado del Audi R8.....	39
Figura 22 Mallado del Auto Modelo.....	39
Figura 23 Opción de control de Calculo	40
Figura 24 Calculo de Monitoreo	40
Figura 25 Diagrama de corte de la velocidad del Audi R8	41
Figura 26 Diagrama de corte de la velocidad del Auto Modelado.....	41
Figura 27 Superficie de corte de la velocidad del Audi R8.....	42
Figura 28 Superficie de corte de la velocidad del Auto Modelado	42
Figura 29 Visualización de las Isosuperficies del Audi R8.....	43
Figura 30 Visualización de las Isosuperficies del Auto Modelado	43
Figura 31 Flujo de Trayectoria de la velocidad del Audi R8	44
Figura 32 Flujo de Trayectoria de la velocidad del Auto Modelado.....	44
Figura 33 Estudio de partículas de la velocidad del Audi R8	45
Figura 34 Estudio de partículas de la velocidad del Auto Modelado.....	45
Figura 35 Diagrama de puntos de la velocidad del Audi R8.....	46
Figura 36 Diagrama de puntos de la velocidad del Auto Modelado	47
Figura 37 Área de superficie de la velocidad del Audi R8	48
Figura 38 Área de superficie de la velocidad del Auto Modelado	48
Figura 39 Volumen de Velocidad del Audi R8.....	49
Figura 40 Volumen de Velocidad del Auto Modelado	49
Figura 41 Grafica de Velocidad	50
Figura 42 Estructura del Manual.....	51
Figura 43 Fuerzas que actuan en el coche del Audi R8	54
Figura 44 Fuerzas que actuan en el coche del Auto Modelado	55
Figura 45 Grafica del Coeficiente de Arrastre ideal del Audi R8	56

Figura 46 Grafica del Coeficiente de Arrastre ideal del Auto Modelado.....	56
Figura 47 Grafica de la fuerza en X según el nivel de refinamiento.....	57
Figura 48 Grafica del coeficiente de arrastre según el nivel de refinamiento.....	58
Figura 49 Índice diagnóstico de las competencias básicas.....	61
Figura 50 Índice diagnóstico de las competencias prácticas.....	62
Figura 51 Índice de competencias básicas luego de la exposición del manual.....	63
Figura 52 Índice de competencias prácticas luego de la exposición del manual.....	63
Figura 53 Sustentación del manual al semillero SIIMA.....	64
Figura 54 Sustentación del manual al semillero SIIMA.....	65

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores de los resultados de parámetros de puntos del Audi R8.....	46
Tabla 2 Valores de los resultados de parámetros de puntos del Auto Modelado.....	47
Tabla 3 Valores de los resultados de parámetros de superficie del Audi R8.....	48
Tabla 4 Valores de los resultados de parámetros de superficie del Auto Modelado.....	48
Tabla 5 Valores de los resultados de parámetros de volumen del Audi R8.....	49
Tabla 6 Valores de los resultados de parámetros de volumen del Auto Modelado.....	49
Tabla 7 Resultados de la Velocidad.....	50
Tabla 8 Definición de Parámetros.....	53
Tabla 9 Resultados de los Parámetros del Audi R8.....	53
Tabla 10 Resultados de los Parámetros del Auto Modelado.....	53
Tabla 11 Resultados del Coeficiente de Arrastre ideal del Audi R8.....	55
Tabla 12 Coeficiente de arrastre según el nivel de refinamiento del Audi R8.....	57
Tabla 13 Coeficiente de arrastre según el nivel de refinamiento del Auto modelado.....	57
Tabla 14 Comparacion de datos del vehículo Audi R8 por medio de los dos proyectos.....	59
Tabla 15 Rejilla de evaluación diagnostica.....	60

RESUMEN EJECUTIVO

Los avances tecnológicos han permitido desarrollar herramientas digitales que facilitan el estudio y la fiabilidad en los análisis numéricos. En la industria automotriz es común la utilización de este tipo de programas en el área de diseño aerodinámico de vehículos debido a que por medio de estos se pueden lograr prototipos innovadores y más eficientes.

En ingeniería automotriz se busca que los vehículos sean más eficientes en términos de la aerodinámica, para lograrlo se investiga cómo se puede disminuir el consumo de combustible, el desarrollo de mecanismos para provechar al máximo la potencia del motor, y selección del conjunto de sistemas para la obtención de mayores velocidades finales, todo esto se puede realizar usando la dinámica computacional por medio de la optimización del perfil aerodinámico de la carrocería del vehículo, donde se selecciona el de mejor coeficiente de arrastre.

Basados en la necesidad que tienen actualmente los estudiantes del Semillero de Investigación en Ingeniería y Automotriz- SIIMA de las Unidades Tecnológicas de Santander, sobre el desarrollo de conocimiento en las temáticas de diseño automotriz y teniendo como criterio la obtención del coeficiente de resistencia aerodinámica por medio de la utilización de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), se logró el diseño de un manual de estudio, utilizando como herramienta el software Solidworks Flow Simulación, cumpliendo la normatividad vigente colombiana, y mostrando de manera detallada cómo realizar un análisis aerodinámico adecuado al vehículo deportivo AUDI R8. Este manual fomenta el estudio de la línea de investigación en diseño, modelamiento, simulación e implementación de estructuras, y equipos electromecánicos, termo fluidos y de aplicación, además facilita el aprendizaje de la utilización de un programa CFD donde se vea claramente las condiciones de un vehículo, realizando adecuaciones en la parte aerodinámica, con miras a lograr mejoras en el desempeño.

PALABRAS CLAVE.

Aerodinámica, CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), Manual, SolidWorks, Vehículo.

INTRODUCCIÓN

Con el paso del tiempo el ser humano innova o evoluciona en un desarrollo más óptimo a la manera de ejecutar cálculos matemáticos a mayor velocidad y precisión, en el ámbito de la aerodinámica han existido grandes pasos, cada día se crean nuevos métodos y tecnologías que hacen que la aerodinámica sea más sencilla y facilite su estudio convirtiendo su desempeño en algo eficaz.

La aerodinámica es la parte de la mecánica que se encarga de estudiar el movimiento de los gases o fluidos (Romero, 2015), por lo mismo y tanto se ha convertido en campo fundamental del sector automovilístico ya sea en el sector de competencia para su desempeño o en el sector de vehículos de calle para su estética.

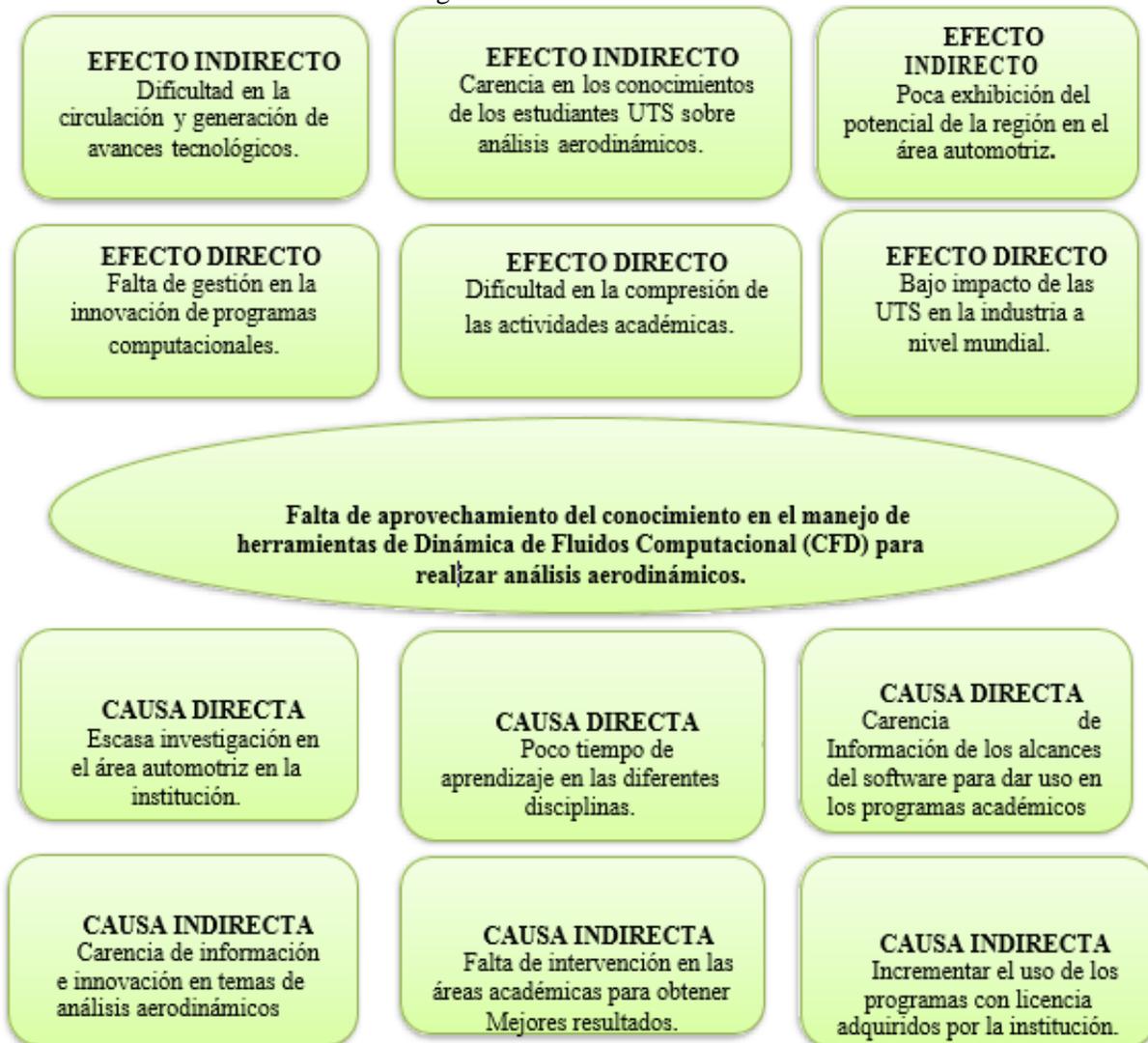
En este sector de la aerodinámica se encuentran cálculos o ecuaciones muy complejas para su desarrollo común, por lo tanto, se han creado métodos en los cuales logra aproximar o incluso a resolver estas complejidades, los métodos más comunes hasta la actualidad son los túneles de viento y los CFD (Computational Fluid Dynamics); el método de los túneles de viento son los más preciso, pero, su construcción y utilización es muy costosa y solo las grandes compañías los tienen, por otro lado los CFD es un método tecnológico de un menor presupuesto pero de muy buena precisión en cuanto a su utilidad, los CFD utilizan las aproximaciones por elementos finitos para hallar una solución a las ecuaciones de la aerodinámica, existen muchos tipos de CFD pero uno de ellos muy común es el Solidworks Flow Simulation, el cual, es un software que brinda simulaciones con eficacia para obtener el cálculo del flujo de fluidos y fuerzas de transferencia de calor, conociendo cómo afecta un gas o líquido en movimiento el rendimiento del vehículo, realizando análisis de elementos finitos (FEA), que permiten comprender la geometría exacta durante el proceso de mallado.

De esta manera se llevó a cabo una simulación aerodinámica a un CAD de un vehículo deportivo Audi R8 mediante el programa Solidworks Flow Simulation con el fin de determinar su coeficiente de arrastre y el comportamiento del fluido respecto al vehículo, también se realizó un manual de aprendizaje respecto a esta simulación, del tal modo, que brinde una gran ayuda al semillero de investigación SIIMA.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Figura 1 Arbol de Problemas



Fuente: Autores

El modelo propuesto en el PEI de la institución motiva a los estudiantes el desarrollo de competencias en sus dimensiones del saber, el ser y del hacer que les permita ser competitivos en el contexto. Como lo afirma (Tobón, 2006, pág. 7) “La formación laboral y profesional es una contribución muy importante del enfoque de competencias porque permite diseñar los planes de estudio con el componente laboral, buscando que los estudiantes se conecten de forma pertinente con el mundo del trabajo. Esto, sin embargo, no se opone a la formación disciplinar y científica. Antes por el contrario, se busca potenciar esta formación y por ello se habla de competencias científicas, de tal manera que posibiliten en los estudiantes abordar y resolver problemas nuevos, con creatividad”. En este proceso de mejora de competencias de los estudiantes del programa de Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico, se busca con este proyecto incentivar el uso de herramientas de diseño y análisis, que permitan en el estudiante adquirir habilidades para su vida laboral.

La Dinámica de Fluido Computacional (CFD), como lo describe (López, Mancuso, Aguirre, Herderson, & Coussirat, 2016, pág. 1615) permite el estudio de los fenómenos relacionados con la dinámica de los fluidos y ayuda al estudiante de grado en la comprensión de los ejercicios prácticos y de las prácticas de laboratorio y lo introducen en el manejo de estas herramientas complementando su formación como profesional. También brinda ayuda en diseños y soluciones rápidas evitando altos costos de prueba, generado una excelente visualización y animación de los diferentes fenómenos presentados en variables de fluidos, uno de ellos es el componente Solidworks Flow Simulation

En la Institución Tecnológica (Unidades Tecnológicas de Santander), en el programa de Tecnología en Operación y Mantenimiento Electromecánico y en el semillero SIIMA se observa la necesidad de comprobación de fenómenos de las dichas teorías vistas y aprendidas en las diferentes asignaturas de hidráulica e instrumentación industrial, mecánica de fluidos.

Según la problemática, se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿La implementación de un manual para el análisis de dinámica de fluidos computacionales (CFD) aplicado a una geometría CAD de un vehículo deportivo ya predeterminado utilizando como herramienta el Solidworks Flow Simulation cómo permitirá el estudio de los parámetros de velocidad, presión, dirección de fluido y coeficiente aerodinámico?

1.2. JUSTIFICACIÓN

En la evolución de la ingeniería automotriz se perciben cambios positivos en cuanto a la elaboración de excelentes prototipos o vehículos, dando muy buenos desempeños y facilidades a en la vida diaria, tal lo describe (Carbajal Suárez, 2010) al mencionar que “el sector automotriz mundial se ha caracterizado por un constante proceso de reestructuración, con lo que se ha convertido en una de las industrias más dinámicas de la era moderna. Esta reestructuración debe analizarse a partir de dos ámbitos distintos, el de la innovación tecnológica en los procesos productivos y de organización laboral y el de la reconfiguración del mercado”.

Los avances tecnológicos en el área automotriz han promulgado el desarrollo de una gran variedad de programas para facilitar el diseño de prototipos y vehículos. Uno de los programas más utilizados para el diseño aerodinámico, que juega un papel importante en el rendimiento energético de cualquier vehículo, es la herramienta de simulación, Solidworks Flow Simulation, la cual brinda simulaciones con eficacia para obtener el cálculo del flujo de fluidos y fuerzas de transferencia de calor, conociendo cómo afecta un gas o líquido en movimiento el rendimiento del vehículo, realizando análisis de elementos finitos (FEA), que permiten comprender la geometría exacta durante el proceso de mallado, para dar más precisión en los resultados de los análisis de diseños aerodinámicos, a través de estudios hipotéticos que le permiten llevar a cabo la optimización utilizando los resultados.

Pero debido a la deficiencia de tiempo e infraestructura con la que cuenta las Unidades Tecnológica de Santander para realizar prácticas o comprobar ciertas teorías en las áreas de mecánica de fluidos y diseño, se promueve con este proyecto la utilización de programas como el Solidworks Flow Simulation que brindan una facilidad en el análisis aerodinámico, en un ambiente virtual, para esto se realizará un documento específico que condense los pasos y procedimientos para realizar una práctica en el análisis de la configuración aerodinámica de un vehículo deportivo, este análisis busca conocer los coeficientes aerodinámicos de resistencia al avance y sustitución. Con este manual se pretende incentivar el uso de software en ingeniería en los estudiantes para contribuir a la autoformación del estudiante y para ser utilizado como base referencial para realizar estudios de características aerodinámicas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un manual de aplicación de estudios aerodinámicos en la carrocería de un vehículo deportivo Audi R8 mediante el software Solidworks Flow Simulation para las Unidades Tecnológicas de Santander con la finalidad de apoyar los procesos de enseñanza, aprendizaje e investigación en el área automotriz.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar la carrocería del vehículo por medio del programa Solidworks para determinar la geometría del perfil del vehículo.
- Simular el comportamiento dinámico de la carrocería por medio del software Solidworks Flow Simulation para obtener velocidad, coeficiente de arrastre y distribución del flujo de aire alrededor del vehículo.
- Determinar el coeficiente de arrastre ideal del vehículo por medio de refinamiento de la malla e iteraciones de la simulación con el fin de validar el proceso para la realización de CFD
- Elaborar un manual de prácticas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) del software Solidworks Flow Simulation por medio de los resultados obtenidos en la validación, con el fin de obtener una guía para realizar análisis aerodinámicos de carrocerías en vehículos mediante la información recopilada y siguiendo el lineamiento de la normatividad vigente ISO 9001 de 2015

1.4. ESTADO DEL ARTE / ANTECEDENTES

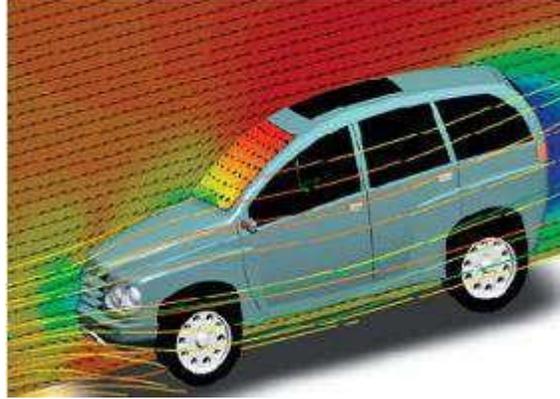
1.4.1. INTRODUCCIÓN A LA AERODINÁMICA AUTOMOTRIZ

Día a día la tecnología avanza por consiguiente la aerodinámica automotriz va muy de la mano con dicha evolución, por lo tanto los mejoramientos y los estudios van a ser más exactos, se tendrá también, mejores desempeños en los vehículos con mayor facilidad. La aerodinámica es la parte de la mecánica que se ocupa de estudiar los movimientos de gases o movimientos relativos de gases y fluidos. Cuando se habla de estudio de la aerodinámica, esta hablando del cómo se comporta todo tipo de fluido en movimiento al interactuar con otra superficie, en la mayoría de casos los sólidos. Como las ecuaciones que rigen el estudio de la aerodinámica son muy complejas para el desarrollo, es por eso que se necesitan de unas herramientas más completas para este tipo de caso como los son los túneles de viento y los programas de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), para este caso, los CFD son los que se van utilizar por cuestiones de economía ya que utilizar un túnel de viento es demasiado costoso.

1.4.2. ESTUDIO MEDIANTE CFD DEL ALERÓN TRASERO DE UN MONOPLAZA CON EL DRS VIERTO Y CERRADO EN DIFERENTES CIRCUITOS.

“El grueso de dicho proyecto, se centra en usar una geometría aproximada de los perfiles de ala que se encuentran en el alerón posterior de un fórmula 1 y sobre los que actúa el sistema de reducción de Resistencia al Avance (Drag) (ver figura 2), para simularla en diferentes condiciones y situaciones con la finalidad de obtener datos suficientes que nos lleven a unas conclusiones que resalten la gran importancia que tiene dicho sistema en el mundo de la competición”. (Murillo Fuentes, 2016). Se ve como con la ayuda de los programas de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD) pueden determinar qué tipo de alerón, les es de mayor ayuda para obtener un Drag o un coeficiente de arrastre menor y así tener un mejor desempeño en la hora de la competencia de la fórmula 1, todo esto gracias a los estudios de mecánica de fluidos en base a la aerodinámica de los fluidos y a los análisis aerodinámicos que ellos realizan con el programa de CFX de ANSYS que es un programa que pertenece al grupo de los programas de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), se realizará el estudio con el programa Solidworks que también pertenece al grupo de los (CFD).

Figura 2 Resistencia del aire al avance de un vehículo (Drag)

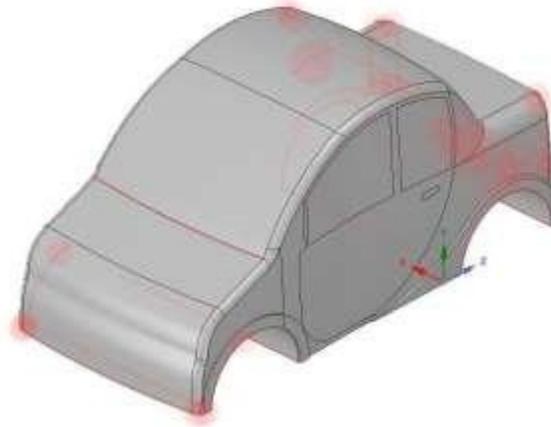


Fuente: (Alba Tarabata & Guangasi Núñez, 2018, pág. 29)

1.4.3. ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN AUDI R8 MEDIANTE TÉCNICAS

“A partir de un modelo de vehículo deportivo, como es el Audi R8, una configuración óptima utilizando un alerón con distintas inclinaciones. La configuración que se va a tener en cuenta es aquella que logre tanto una buena velocidad en recta, como en curva, observando que dependiendo de la aplicación, puede ponderar una más que la otra. ” (Carbonell Romero, 2015) Para que logren obtener los resultados esperados de este análisis aerodinámico en el vehículo Audi R8, se procede primero que todo, al análisis de fuerzas que actúan sobre el Audi R8, después, se realizan todo lo relacionado con la geometría y el mallado respectivamente, resumidamente lo que realizan es el análisis aerodinámico con el CFD, primero utilizan el Solidworks para realizar las respectivas adecuaciones del sistema de CAD (ver figura 3) , para poder utilizarlo en el software Ansys Fluent, el cual es el que utilizan para hacer los respectivos estudios y análisis aerodinámicos del vehículo Audi R8 y así logren obtener los mejores resultados del alerón en las diferentes pruebas de velocidad final y en curva del respectivo vehículo

Figura 3 Modelo CAD

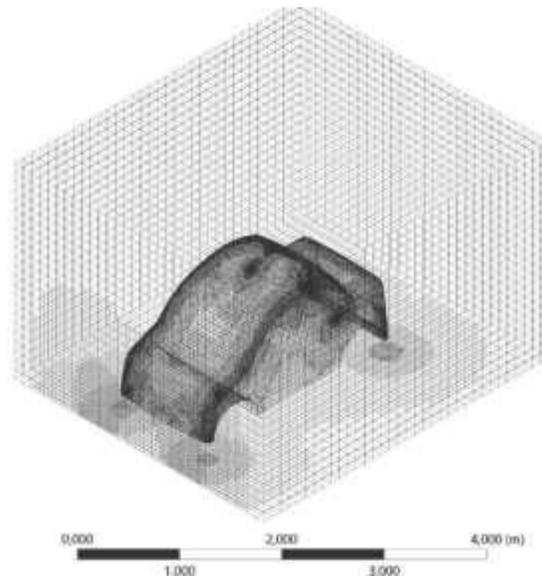


Fuente: (Alba Tarabata & Guangasi Núñez, 2018, pág. 101)

1.4.4. MALLADO Y SIMULACIÓN CFD DE UN AUTOMOVIL

“El mallado y simulación con programas de Dinámica de Fluidos Computacionales (CFD), toma como bases la geometría de uno de los modelos de vehículo más potentes disponibles en el mercado. El objetivo final es simular la aerodinámica del mismo bajo diferentes condiciones. Para ello, primeramente, se ha de generar una discretización del modelo mediante un software de mallado (ver figura 4). ” (Gomez Gonzáles, 2017) En este caso se generarán un par de mallados por medio de dos software que son el ICEM y el ANSA para luego logren hacer la respectiva simulación aerodinámica del vehículo Koenigsegg Regera, el cual es uno de los últimos vehículos tradicionales de lujo. Se utilizan dos software de alta calidad para poder escoger el mejor mallado, dando así mejor calidad de mallados que los originales del vehículo. En este proyecto se ve claramente la importancia de las simulaciones para poder escoger los mejores resultados y así obtener mayor eficiencia en el vehículo.

Figura 4 Mallado



Fuente: (Alba Tarabata & Guangasi Núñez, 2018, pág. 103)

1.4.5. MEJORA AERODINÁMICA DE UN TURISMO

“Aprovechando la presentación explícita de la mejora aerodinámica de un vehículo, se quiere hacer hincapié en el hecho que los añadidos en el chasis del automóvil no son una acción únicamente estética, sino que permiten una mejora aerodinámica del vehículo, disminuyendo los coeficientes de arrastre y sustentación. ” (Morillo, 2016) Lo que se pretende realizar en este proyecto es un mejoramiento aerodinámico en el vehículo Volkswagen Golf MK1 para así obtener un menor número en el coeficiente de arrastre, para ello lo primero que determinan son los valores reales del vehículo, para poder hacer una comparación de los resultados obtenidos con el programa CFD Solidwork, una vez realizado la comparación, proceden hacer un mejoramiento de las partes del vehículo más deficientes dichas por el estudio aerodinámico de comparación y así lograr la respectiva reducción del coeficiente de arrastre que es el principal objetivo de toda esta simulación.

En la actualidad las grandes empresas de automóviles trabajan fuertemente en los diseños aerodinámicos por medio de los CFD de muy alta calidad ya que facilitan sus estudios y sus análisis de resultados con la gran importancia de tener vehículos de menor consumo de combustible, menor

coeficiente de resistencia, etc.

Uno de los CFD que se utilizan en la actualidad y el que se utilizará para el presente estudio es el Solidworks Flow Simulation, del cual se puede decir que es una excelente herramienta ya que resuelve un gran cantidad de complejidades, no es la mejor, pero, si es de gran ayuda para las personas porque explica y a la vez enseña la importancia de estos programas y el alcance que ellos tienen en área de la aerodinámica automotriz.

2. MARCO REFERENCIAL

2.1. MARCO TEÓRICO

Para la aerodinámica automotriz se aplican varias teorías, teoremas y leyes a los diferentes vehículos para poder cumplir con unos estudios y experimentos más exactos y así obtener los resultados requeridos. Entre unas de esas son:

2.1.1. PRINCIPIO DE BERNOULLI

La ecuación de Bernoulli toma en cuenta los cambios en la carga de elevación, carga de presión y carga de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Al suponer que no hay pérdidas o adiciones de energía entre los dos puntos, la carga total permanece constante. La suma de energía total en un punto de la sección del elemento del fluido, donde la energía total es igual a la energía cinética, potencial y de flujo.

$$E = EC + EP + EF$$

Donde:

Energía cinética:

$$EC = 1wv^2/2g$$

Energía potencial:

$$EP = wz$$

Energía de flujo:

$$EF = wp/y$$

Cuando el fluido se mueve de la sección 1 a la 2, los *valores* p, z, w son diferentes en las dos secciones, pero si no hay energía que se agregue o pierda en el fluido entre la sección 1 y 2, entonces por principio de conservación de la energía $E_1 = E_2$. Como w es común en todos los términos se elimina al dividir entre él, por lo tanto la ecuación de Bernoulli (Mott, 2006, pág. 166) es:

w =Peso del elemento.

v =Velocidad.

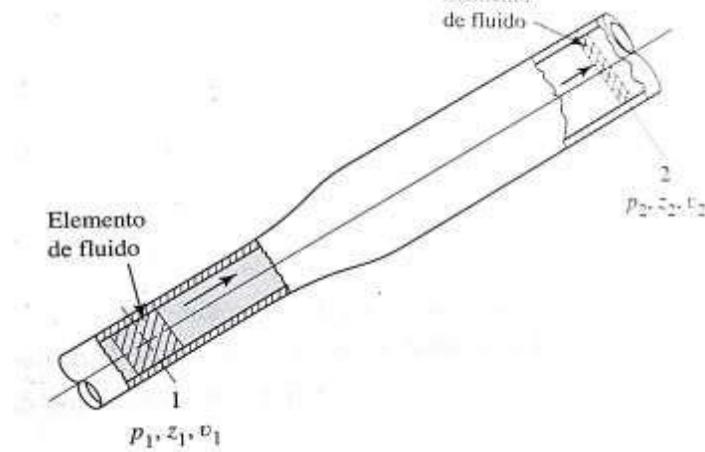
z =Elevación.

p =Presión.

g =Gravedad.

γ =Peso específico del fluido.

Figura 5 Elementos de fluido utilizados en la ecuación de Bernoulli.



Fuente: (Mott, 2006, pág. 167)

2.1.2. TERCERA LEY DE NEWTON

La tercera Ley del movimiento de Newton es donde se demuestra que en una acción de fuerza tiene una reacción de igual intensidad, pero sentido contrario. (Morillo, 2016).

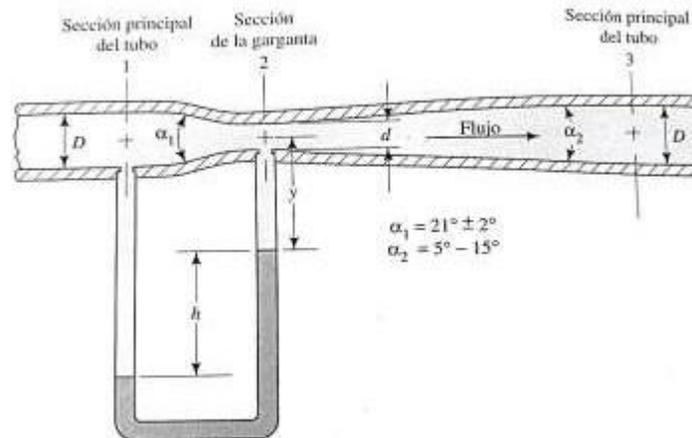
$$F_{12} = -F_{21}$$

2.1.3. EFECTO VENTURI

Consiste en canalizar un flujo haciéndolo pasar por un estrechamiento donde el fluido alcanza mayor velocidad y al mismo tiempo disminuye la presión produciéndose así una especie de succión. El efecto Venturi (ver Figura 6.) se basa en la aplicación de la ecuación de Bernoulli y el principio de continuidad para encontrar la velocidad del flujo, la sección estrecha del tubo Venturi hace que la

velocidad de flujo se incrementa ahí, con la disminución correspondiente de la presión. (Aguirre Gómez, 2015, pág. 14); (Mott, 2006, pág. 476).

Figura 6 Detalles estándar del diseño del principio Venturi.



Fuente: (Mott, 2006, pág. 477)

2.1.4. NUMERO DE REYNOLDS

Son números adimensionales, utilizados en la mecánica de fluidos, que ayudan a determinar según la trayectoria de las partículas, si el flujo es de tipo laminar o turbulento dentro de la tubería. Adopta formas diferentes para secciones transversales que no sean circulares, canales abiertos y flujo alrededor de cuerpos sumergidos (Mott, 2006, pág. 231).

- Si $NR < 2000$, el flujo es laminar.
- Si $2000 < NR < 4000$, el flujo es de transición.
- Si $NR > 4000$, el flujo es turbulento.

$$NR = \frac{VD\rho}{n} = vD/V$$

Dónde:

NR= Número de Reynolds.

v= Velocidad promedio del flujo.

D= Diámetro del tubo.

ρ = Densidad del fluido.

n= Viscosidad.

$V =$ Viscosidad cinemática

2.1.5. TIPOS DE FLUJO

Para realizar el estudio aerodinámico de un vehículo se focaliza en la resistencia aerodinámica, que se experimenta cuando un cuerpo está en movimiento atravesando una masa de aire. Así que se podría decir que la resistencia aerodinámica es la fuerza que se opone al avance de un cuerpo a través del aire. Cuando un cuerpo está en movimiento aparecen dos tipos de flujo y con ellos diversas fuerzas de resistencia que condicionarán a la aerodinámica del vehículo:

Flujo externo: Debido al paso del aire por la superficie exterior del vehículo con lo cual origina fuerzas de resistencia al avance y fuerzas laterales, debidas al viento lateral. Son fuerzas de gran importancia en el vehículo, ya sea por prestaciones o por seguridad.

Flujo interno: Debido al aire que pasa por el interior de la carrocería del vehículo, es decir, el aire que entra al motor por las entradas de aire. Beneficiosas para la refrigeración del motor pero a la vez muy perjudicial para la aerodinámica del vehículo. (Morillo, 2016, pág. 15).

2.1.6. TIPOS DE COEFICIENTES

En un cuerpo que se encuentra en movimiento sumergido en un fluido, va a experimentar fuerzas ocasionadas por la acción del fluido, el efecto total de estas fuerzas es muy complejo. De tal manera, para propósitos de diseño o estudios del comportamiento de un cuerpo en un fluido existen tres fuerzas de importancia: CX, CY, CZ. (Mott, 2006, pág. 520).

2.1.7. FUERZAS IMPLICADAS EN LA AERODINÁMICA

Estas son 2 fuerzas ejercidas, en el momento que el fluido pasa por el automóvil. Una fuerza vertical y otra horizontal.

Resistencia al Avance :Dentro de las fuerzas que actúan en la aerodinámica tenemos la resistencia aerodinámica, o también llamada resistencia al avance, la misma que dependerá del coeficiente de resistencia (Cz) , producto del diseño del vehículo, específicamente el área frontal y la velocidad que afecta esta resistencia de forma exponencial y no proporcional. Es decir que a mayor velocidad mucho mayor será la fuerza que se opone al avance.

Sustentación: La mayoría de los autos producen sustentación, a medida que la velocidad aumenta, la fuerza de sustentación aumenta y esto hace que el auto se vuelva inestable. (Santamaría Bermeo & Calero Venegas, 2012, pág. 28).

2.1.8. PRINCIPIO DE CONTINUIDAD

El principio de la continuidad habla de un flujo volumétrico con constante que va de una sección 1 a una sección 2, es decir, que cualquier cantidad de fluido que circula por cualquier sección en determinado tiempo se le conoce como flujo estable. Pero si en la sección 1 y 2 no se almacena o retira fluido la masa de fluido que circula en estas secciones es igual a $M1 = M2$. Donde:

$$M = \rho Av$$

Se obtiene que:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 ; \text{ Para fluidos compresibles } M = cte$$

Si el fluido en el tubo es un líquido incompresible tendremos que la densidad del flujo en una sección 1 es igual a la densidad del flujo en una sección 2, $\rho_1 = \rho_2$, por lo tanto la ecuación queda así:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \text{ Para fluidos incompresibles } \rho = cte$$

Entonces el flujo volumétrico por ecuación va a ser igual tanto en la sección 1 como en la sección 2, $Q_1 = Q_2$

Donde:

$$Q = Av$$

Q =Flujo volumétrico.

ρ = Densidad del flujo.

A =Área de la sección transversal.

v = Velocidad de flujo.

M = Masa de fluido.

(Mott, 2006, pág. 156)

2.1.9. ECUACIÓN NAVIER-STOKES

Las ecuaciones de Navier-Stokes (N-S) modelan el comportamiento de cualquier tipo de fluido mediante la conservación de 3 cantidades, a saber: masa, cantidad de movimiento y energía. Estas ecuaciones de N-S también conforman un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales no lineales, es por ello que (a excepción de casos muy simples) no se tienen soluciones analítica conocidas. (Costarelli, Paz, Storti, & Dalcin, 2011).

2.1.10. FUNCIONAMIENTO DE UN CÓDIGO CFD

El objetivo de un código CFD es la resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes. Dado que estas ecuaciones constituyen un sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineal, se procede a la transformación de dichas ecuaciones algebraicas en determinados puntos del dominio físico (los nodos del mallado) mediante lo que se conoce como discretización espacial. (Anónino)

1. **Preproceso:** Importación del objeto de estudio, adaptación de la geometría, delimitación del dominio, mallado del dominio, condiciones de contorno.
2. **Proceso:** Importación de la malla, adaptación del dominio computacional, modelos matemáticos a considerar, designación de los materiales, condiciones de operaciones, condiciones de contorno, parámetros de cálculo y resolución.
3. **Postproceso:** Resultados numéricos, resultados gráficos, vectores de velocidad absoluta. (Cumbe Fárez & Rockwood Iglesias, 2009, págs. 134,157,160)

2.1.11. ERRORES E INCERTIDUMBRES EN EL MODELAMIENTO CFD

En la solución de ecuaciones diferenciales parciales mediante CFD se tienen disponibles una variedad de situaciones acerca de error de redondeo de las ecuaciones, los errores de truncamiento involucrado en los cálculos numéricos. Aunque no existe una ciencia tal cual en CFD para este fin existen dos guías que definen y presentan recomendaciones acerca de los errores e incertidumbres.

Error: Es la deficiencia reconocible en un modelo de CFD que no es causado por la carencia del conocimiento. Las causas o fuente de error son:

1. **Errores numéricos:** Estos pueden ser de tres tipos, errores de redondeo, de discretización y de criterio de convergencia.
2. **Errores de código fuente:** Errores en el software.
3. **Errores de usuario:** Errores humanos mediante uso incorrecto del software.

Incertidumbre: Es deficiencia potencial en un modelo de CFD que es causado por la carencia del conocimiento, las causas o fuentes de incertidumbre son:

1. **Incertidumbre debido a información requerida:** Limitada representación de la geometría, aproximación en condiciones de frontera, propiedades del material o medio fluido.
2. **Incertidumbre debido al modelo matemático:** Diferencias entre flujo real y el modelo

de CFD, por ejemplo, el flujo turbulento real se puede carecer del modelo adecuado para la representación física del flujo. (Xamán & Gijón Rivera, 2016)

2.2. MARCO CONCEPTUAL

Aerodinámica: La aerodinámica es una de las ramas de la mecánica de fluidos que se ocupa de los fluidos, las fuerzas que actúan sobre ellos y estos generan. Algunos ejemplos son el movimiento de un avión a través del aire, las fuerzas que el viento ejerce sobre una estructura o las fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo. (García Martín & Marcelino Sádaba, 2010, pág. 6).

Dinámica de fluidos computacional (CFD): Es el cálculo más avanzado que se puede realizar en sistemas de cálculo de fluidos dinámicos, de esta manera te permitirá llegar al detalle para mejorar al máximo el diseño propuesto, permite una simulación rápida y eficaz del flujo de fluidos y de la transferencia de calor. Puede calcular fácilmente las fuerzas de fluidos y comprender el impacto de un líquido o gas en el rendimiento de un producto. (Solidwoks, 2018).

Resistencia aerodinámica: Aplicada a un vehículo, se expresa como la fuerza que necesita para desplazarse dentro de la atmósfera, sin tener en cuenta el rozamiento con el suelo. En un coche normal, la mayor cantidad de resistencia aerodinámica se debe a la necesidad de desplazar el aire y a las diferencias de presión que se forman debido a ello. (Aguirre Gómez, 2015, pág. 12).

Flujo laminar: El fluido parece moverse debido al deslizamiento de láminas de espesor infinitesimal sobre láminas adyacentes, con el movimiento relativo de partículas de fluido ocurriendo a una escala molecular; las partículas se mueven sobre trayectorias o líneas de corriente definidas y observables. (Franzini & Finnemore, 2006, pág. 66).

Figura 7 Líneas de corriente del flujo laminar.



Fuente: Autores

Flujo turbulento: Caótico, con cantidades significativas de partículas del fluido que se entremezclan, con la consecuente transferencia de cantidad de movimiento entre ellas. El resultado es una velocidad más cerca de la uniforme a través de gran parte de la sección transversal. Aún más, la velocidad en la pared de la tubería es igual a cero. La velocidad local se incrementa con rapidez en una distancia corta a partir de la pared. (Mott, 2006, pág. 256).

Figura 8 Líneas de corriente del flujo turbulento.



Fuente: Autores

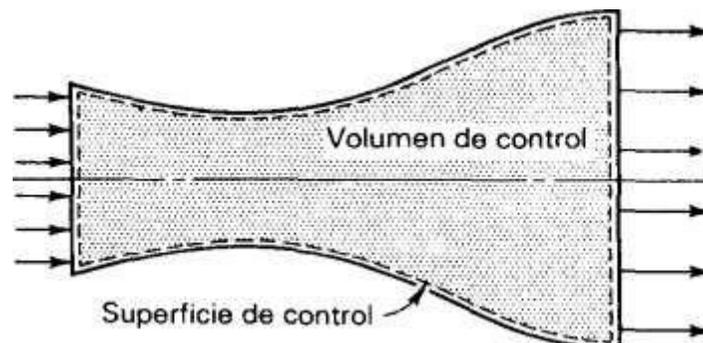
Cx: Denominado coeficiente de arrastre representa a la resistencia aerodinámica, se utiliza para evaluar la eficiencia aerodinámica de una carrocería, donde influye la forma del vehículo, el área frontal y otros parámetros que se irán viendo a lo largo del trabajo. Cuanto menor es este coeficiente más eficiente, aerodinámicamente hablando, es el vehículo.

CY: Representa el coeficiente debido a la fuerza o empuje lateral.

CZ: Representa la fuerza denominada sustentación aerodinámica que es perpendicular a la velocidad de la corriente incidente. (Morillo, 2016, pág. 18).

Volumen de control: Se establece en el espacio y la frontera de este volumen se conoce como superficie de control. La cantidad y la identidad de la materia e el volumen de control puede cambiar con el tiempo, pero la forma de volumen de control permanece fija. (Shames, 1995, pág. 121).

Figura 9 Volumen de control para el interior de una boquilla



Fuente: (Shames, 1995, pág. 121)

Discretización: Es un modelo numérico se efectúa mediante el mallado, la cual divide el dominio en un número finito de elementos, puntos, volúmenes de control. Según el tipo de conectividad existente entre los puntos o celdas de la malla se clasifican en: mallas estructuradas y mallas no estructuradas.

1. **Mallas estructuradas:** están alineadas con las direcciones principales de la malla. en cierto sentido las líneas de la malla siguen las líneas de la corriente, las cuales se alinean con los contornos sólidos del dominio.
2. **Mallas no estructuradas:** se caracterizan por una conectividad irregular, permite cubrir y adaptar con celdas tetraédricas cualquier dominio tridimensional.

Turbulencia: Es una característica del flujo, se define como un movimiento fluctuante, desordenado, estado caótico y aleatorio. Se manifiesta por la aparición de fluctuaciones en las variables de presión, velocidad, temperatura en un instante a lo largo del tiempo. (Casa Tipán, 2016, págs. 49,50).

Como modelar turbulencia: Para modelar la turbulencia se encuentran cuatro modelos:

1. **Modelo de la longitud de mezcla:** Representa la distancia media, perpendicular al flujo, a lo largo de la cual una partícula pierde su cantidad de movimiento extra y adquiere la velocidad

media que exista en la nueva posición.

2. **Modelo k-ε:** Pretende corregir los defectos del método anterior, y permitir calcular flujos con recirculación o separación.
3. **Modelo de las tensiones de Reynolds ('Reynolds Stress Model', RSM):** Establece una ecuación diferencial para cada tensión de Reynolds modelando los términos de producción, difusión, transporte y rotación. Hay que añadir una ecuación para ϵ (la misma del modelo k- ϵ).
4. **Modelo de las tensiones algebraicas ('Algebraic Stress Model', ASM):** Se eliminan o modelan los términos de convección y difusión de R_{ij} , que supone un gran esfuerzo de cálculo. (Martínez de la Calle & Ballesteros Tajadura, 2004-2005, págs. 14,15,18)

2.3. MARCO LEGAL

- **LEY 1298 DE 2009:** Por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, esta ley habla trata que el estado promueva y oriente el adelanto científico y tecnológico, también a incorporar la ciencia y la tecnología a los planes y programas de desarrollo económico y social del país y a formular planes de ciencia y tecnología tanto para el mediano como para el largo plazo.
- **DECISIÓN 486 DE 2000:** Esta decisión o régimen común de propiedad industrial actúa dependiendo de los acuerdos de ADPIC para regular el otorgamiento de marcas y patentes y protege los secretos industriales y las denominaciones de origen, entre otros.
- **Norma ISO 9001 de 2015:** La norma Internacional ISO 9001 está enfocada a la concesión de la calidad en una organización mediante la implementación de un método o sistema de gestión de la calidad (SGC). El manual de calidad es el conjunto de procedimientos documentados que describen los procesos de la organización pero según los criterios que indica la norma ISO 9001:2015, no es requisito la elaboración de un manual, únicamente es obligatoria la aportación de información documentada para evidenciar el cumplimiento de los requisitos de la norma. A continuación se presenta un esquema que puede tomarse como referencia de la estructura de los contenidos de un Manual de Calidad según esta normativa:
 - Título, alcance y campo de aplicación.
 - Introducción sobre aspectos básicos, valores y filosofía de la organización y del propio manual.
 - Política y objetivos de calidad.
 - Mapa de procesos de la organización.

- Descripción de la estructura de la organización, responsabilidades y autoridades.
- Enumeración y definición de los distintos elementos del sistema de calidad.
- Adicionalmente, también se puede incluir un apéndice.

-Formato y estructura

Este aspecto es bastante flexible y depende en gran medida del tamaño y complejidad de cada empresa y de los fines del documento, ya que algunas organizaciones deciden ampliar su utilidad más allá de documentar sus sistemas de gestión de la calidad.

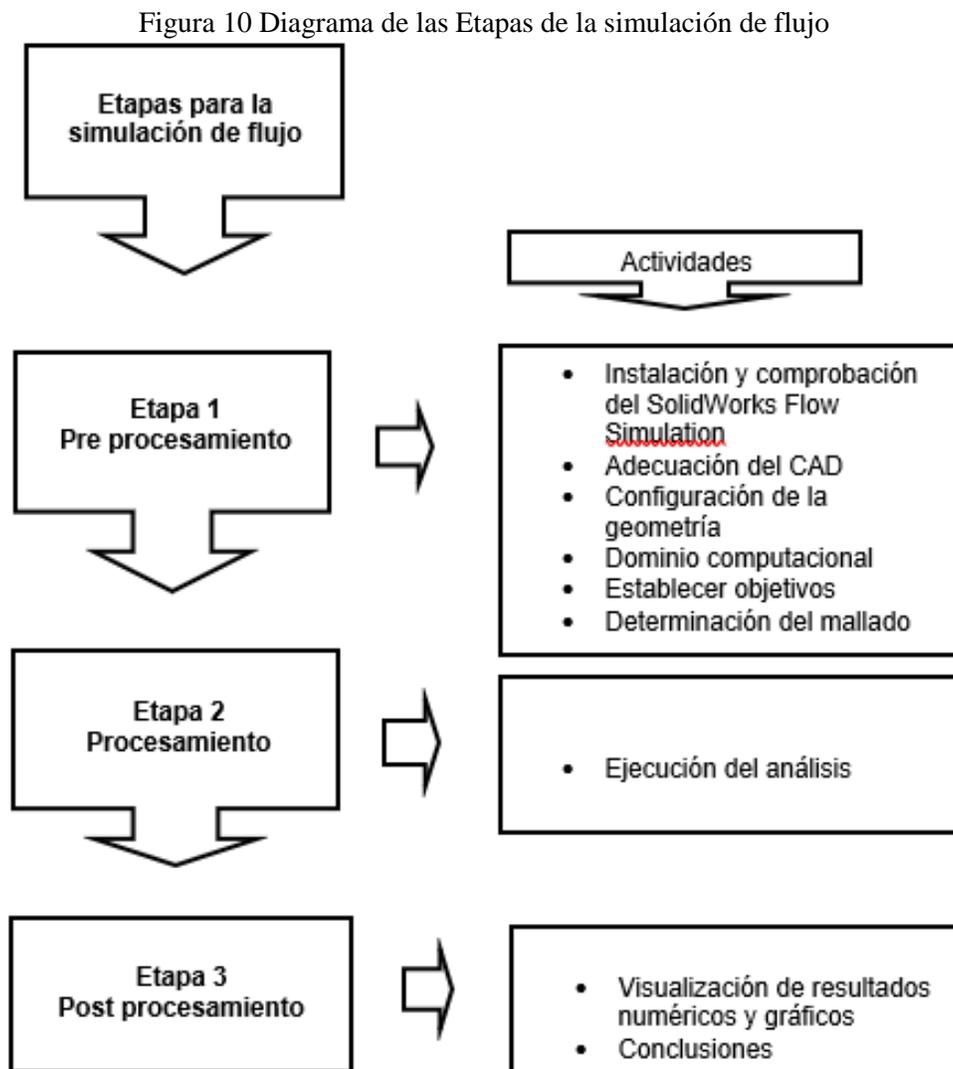
Cada organización, por lo tanto, puede decidir libremente el alcance y ambición de su manual, lo que lógicamente influirá en su estructura, aspectos recogidos y extensión.

Dado que el Manual de Calidad es un documento que constituye la base de todo sistema de calidad, es importante que vaya un paso por delante y que no se limite únicamente satisfacer los requisitos de la norma, incluyendo aspectos relativos a las necesidades de los clientes y de la propia organización.

3. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

3.1. DIAGRAMA DE LAS ETAPAS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJO

Para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo de grado se tuvo en cuenta las siguientes etapas (ver figura 10) que se realizan en una simulación aerodinámica utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD).



Fuente: Autores

3.2. ETAPA 1. PRE PROCESAMIENTO

3.2.1. *INSTALACIÓN Y COMPROBACIÓN DE SOLIDWORKS SIMULATION*

Se descargó el software a través de la página web de SolidWorks, ingresando los datos requeridos para solicitar la descarga (ver figura 11), luego se instaló el software (ver figura 12) en un equipo con los requerimientos de hardware exigidos por el programa, siguiendo detalladamente todos los pasos que el SolidWorks presentó, comprobando el buen estado del programa para su buen funcionamiento en la simulación.

Figura 11 Descarga del SolidWorks

* Ya tengo un número de serie que comienza con 9020: Sí: No:

* Si la respuesta es No, ingrese SDK-ID, SEK-ID o código de prueba:

Versión:

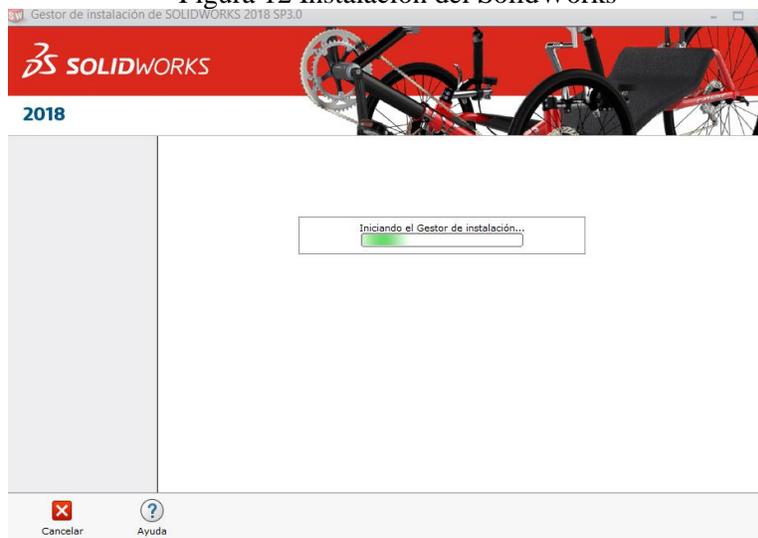
Dirección de correo electrónico:

Seleccione uno de los siguientes: --Seleccionar--

Solicitud de descarga

Fuente: SolidWorks

Figura 12 Instalación del SolidWorks



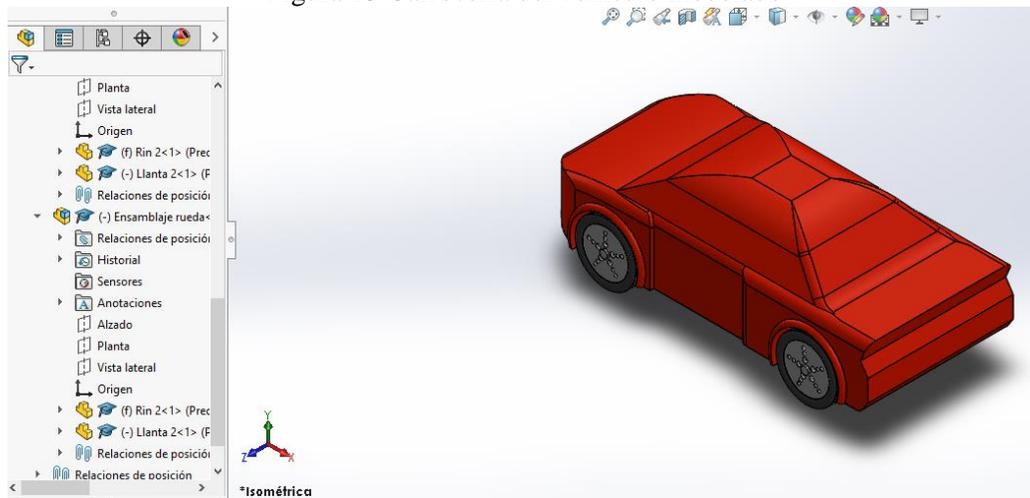
Fuente: SolidWorks

3.2.2. MODELADO DEL VEHÍCULO

Se realiza mediante el software SolidWorks un modelo similar al vehículo Audi R8. En este modelamiento se elaboran las partes principales de un vehículo como su carrocería, sus llantas y sus rines (ver anexo C). Luego de este modelado se le aplica la simulación aerodinámica tanto para este modelo como para el Audi R8.

Se realiza el croquis en plano alzado, luego se extruye Base-Saliente Saliente para crear una operación sólida, obtenido el sólido se extruye Corte para cortar el sólido extruyendo un perfil croquizado, por último, se aplica Chaflán a los bordes superiores de la carrocería (Ver figura 13).

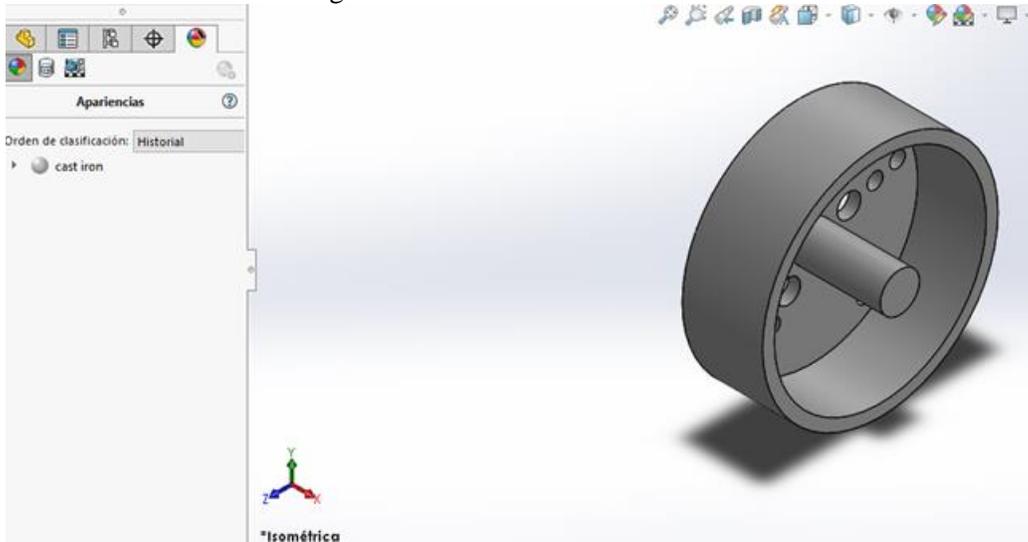
Figura 13 Carrocería del vehículo modelado



Fuente: Autores

Se dibuja el croquis del apoyo y el tamaño del espejo, se extruye Base-Saliente para crear una operación sólida, luego se aplica Redondeo a las aristas, y a partir de allí, se utiliza la operación Recubrir para agregar material entre los dos perfiles para crear una operación sólida (Ver figura 14).

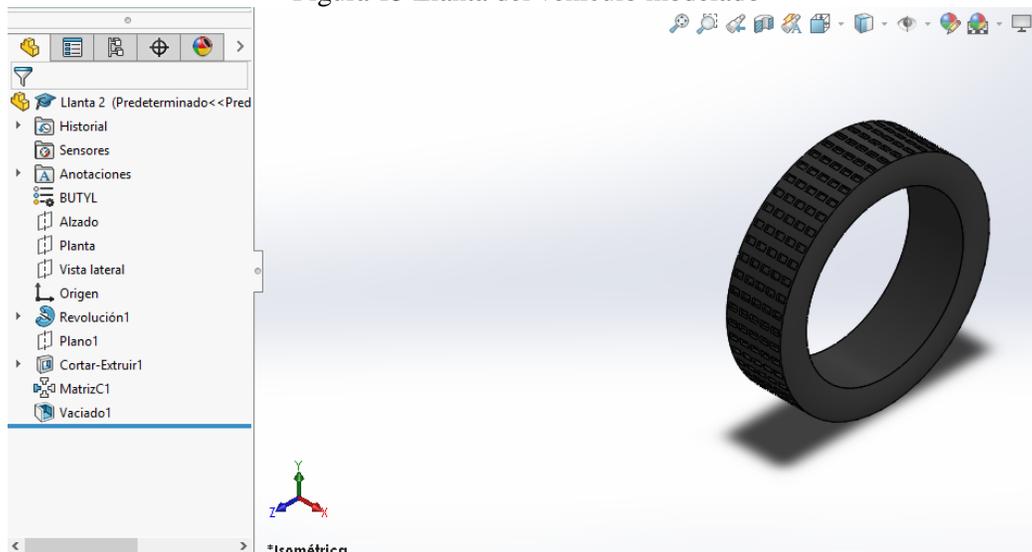
Figura 14 Rin del vehículo modelado



Fuente: Autores

Se dibuja el croquis a partir de una línea constructiva, luego se aplica Revolución de Saliente /Base para crear una revolución del croquis seleccionado con respecto a un eje para crear una operación sólida (ver figura 15).

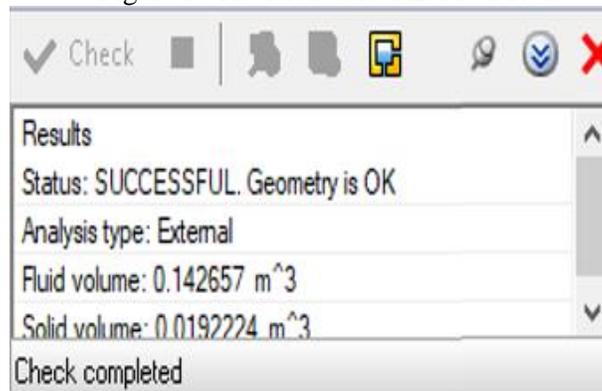
Figura 15 Llanta del vehiculo modelado



Fuente: Autores

Luego de realizado el modelamiento se validó el estado de la carrocería del CAD del vehículo mediante una revisión en la geometría del CAD, a través de una herramienta Check Geometry que ofrece el software Solidwork Flow Simulation permitiendo conocer el estado de la geometría del vehículo y mostrando las posibles incongruencias que se pueden presentar (ver figura 16), cabe resaltar que, para ejecutar la simulación de flujo, el resultado de la geometría del CAD Audi R8 y del auto modelado deben presentar un estado aceptable por la herramienta mencionada anteriormente.

Figura 16 Revisión del CAD Audi R8

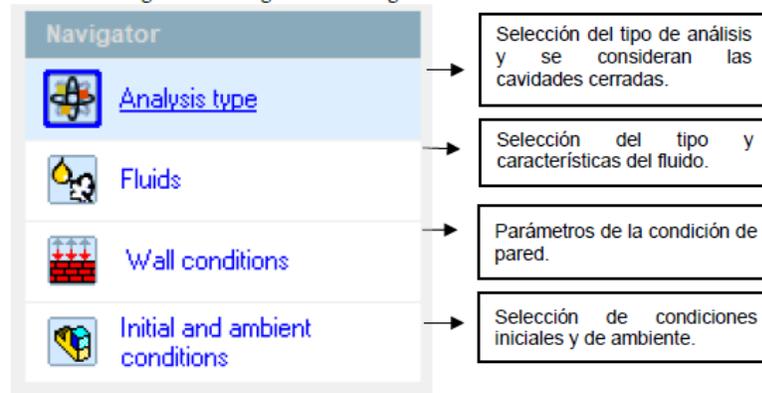


Fuente: Autores

3.2.3. CONFIGURACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Se definió la geometría del sólido a simular configurando sus parámetros iniciales (ver figura 17), como el nombre del proyecto en la sección de Analysis type, el sistema de unidades y el tipo de fluido en la sección de Fluids, las condiciones de pared por medio de la sección Wall conditions, los parámetros ambientales y el tipo de análisis que se utilizó para la ejecución de la simulación en la sección de Initial and ambient condition.

Figura 17 Configuración de la geometría

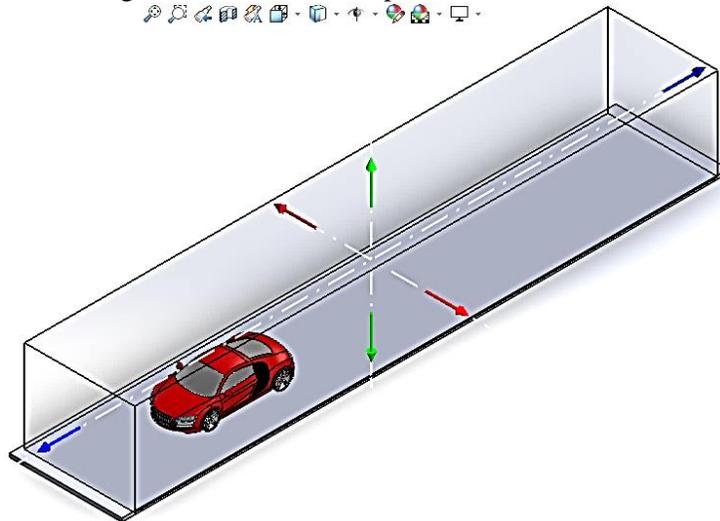


Fuente: Autores

3.2.4. DOMINIO COMPUTACIONAL

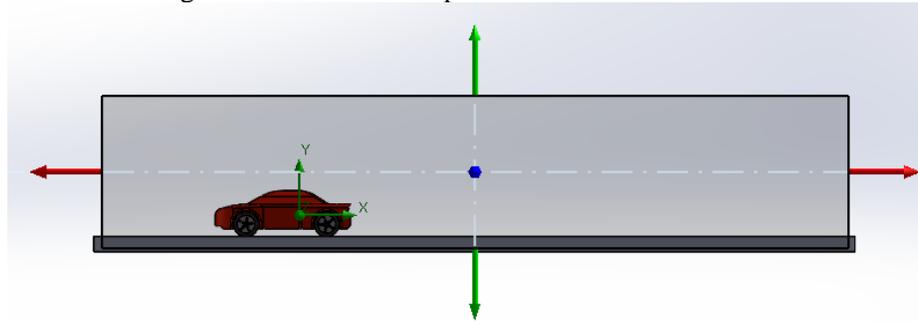
El dominio computacional (ver figura 18 y 19) es la región donde se realizan los cálculos de flujo y transferencia de calor, esta región se crea en el momento que se elabora la configuración de la geometría. Para tener mejores resultados y disminuir el tiempo de simulado se modificó los parámetros de construcción de la caja del dominio, debido a que entre más reducida sea la caja, menor será el número de celdas en el mallado. Para el caso de esta simulación el dominio computacional que se modificó, fue un dominio ideal donde el tamaño de la caja a lo largo fue de cinco veces el tamaño del carro, el ancho de la caja fue también de cinco veces el ancho del vehículo y el alto de la caja también fue de cinco veces la altura del vehículo, creando así un dominio computacional ideal para la simulación de flujo.

Figura 18 Dominio Computacional del Audi R8



Fuente: Autores

Figura 19 Dominio Computacional del Auto Modelado



Fuente: Autores

3.2.5. ESTABLECER OBJETIVOS

En esta actividad se seleccionó los parámetros que se desean observar en la visualización de resultados después de realizada la simulación, estos parámetros se determinan por medio del árbol de análisis de Flow Simulation (ver figura 20).

Cabe resaltar que en esta sección se seleccionan varios parámetros en varias secciones del vehículo, ya que existen varios tipos de objetivos como: los Global Goals que permiten calcular parámetros físicos en todo el dominio computacional. Los Points Goals que permiten calcular parámetros físicos en punto específico del vehículo. Los Surface Goals que permiten calcular parámetros físicos en superficies seleccionadas del vehículo. El

Volume Goals que permiten calcular el volumen del vehículo y por último la Equation Goals que permite calcular el coeficiente de arrastre (C_x) ingresando la ecuación de la resistencia al avance en este objetivo.

Figura 20 Árbol de análisis de Flow Simulation

Parameters					
Parameter	Mir	A ₁	M ₂	Bulk A ₁	Us
Static Pressure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total Pressure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Dynamic Pressure	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Temperature (Fluid)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Total Temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mean Radiant Temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Operative Temperature	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Draught Rate	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Density (Fluid)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mass (Fluid)			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Mass Flow Rate			<input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity (X)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity (Y)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Velocity (Z)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Circumferential Velocity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Mach Number	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Dynamic Viscosity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Turbulent Viscosity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Turbulent Time	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Turbulence Length	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Turbulence Intensity	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

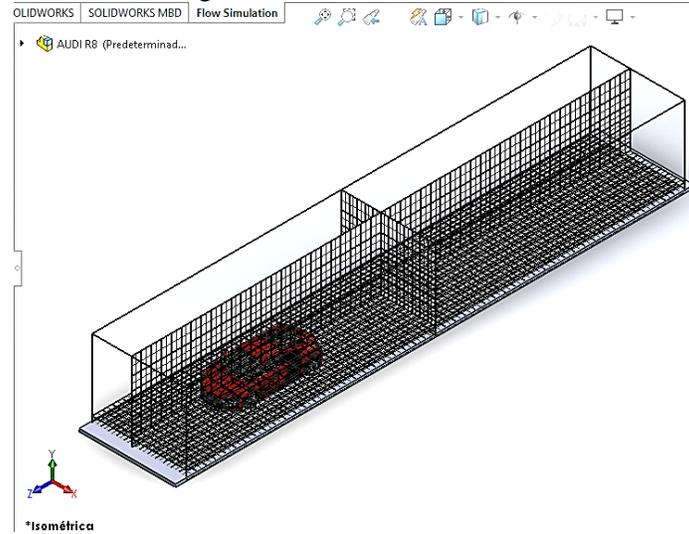
Fuente: Autores

3.2.6. DETERMINACIÓN DEL MALLADO

Una vez se obtuvo la geometría y el dominio computacional definido, éste se discretiza o se divide en celdas para formar un mallado (ver figura 21 y 22) obteniendo un número específico de celdas refinadas, así, resolver las iteraciones y lograr una simulación de flujo óptima.

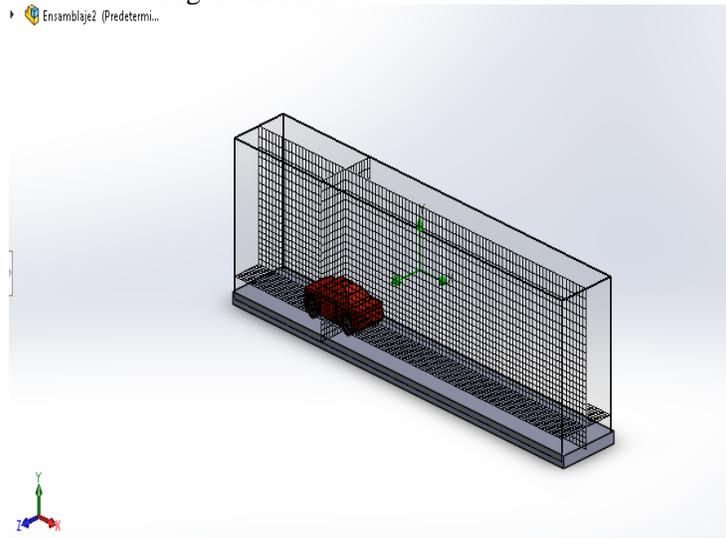
Para este mallado se tuvo en cuenta la herramienta Global Mesh, en la cual, se optó por un mallado automático configurando su nivel inicial de mallado. Se eligió un nivel de refinamiento cinco, ya que este, permite un refinamiento más fino en el número de celdas y un menor tiempo de simulado, se tuvo también en cuenta que un nivel de refinamiento superior podría traer consecuencias al momento de la simulación, ya que, el mallado ayuda a determinar el tiempo del análisis de flujo, porque un mallado más refinado produce una cantidad mayor de iteraciones y viajes en las celdas.

Figura 21 Mallado del Audi R8



Fuente: Autores

Figura 22 Mallado del Auto Modelo



Fuente: Autores

3.3. ETAPA 2. PROCESAMIENTO

3.3.1. EJECUCIÓN DEL ANÁLISIS

Llegados a este punto, se entra ya en la etapa de procesamiento, donde se solucionan las ecuaciones algebraicas pertinentes. En esta etapa se puede realizar ajustes de opción para el control del cálculo (ver figura 23) de la simulación de flujo que se realiza, luego de

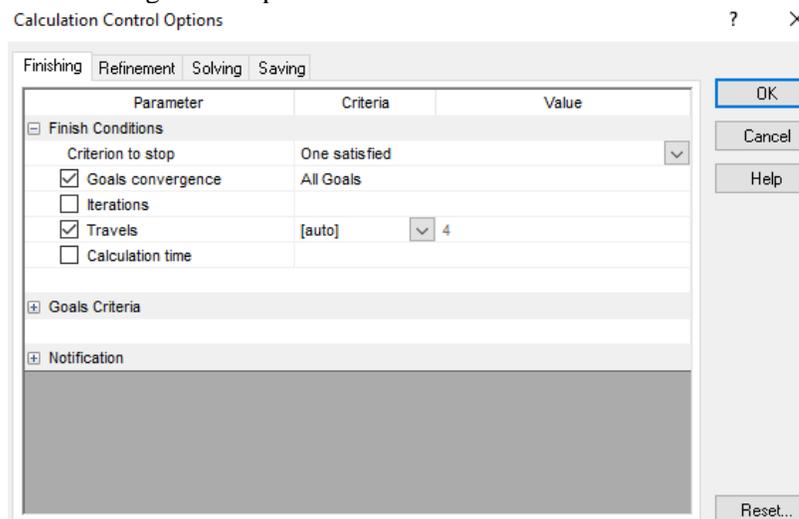
ELABORADO POR:
Oficina de Investigaciones

REVISADO POR:
soporte al sistema integrado de gestión

APROBADO POR : Asesor de planeación
FECHA APROBACION:

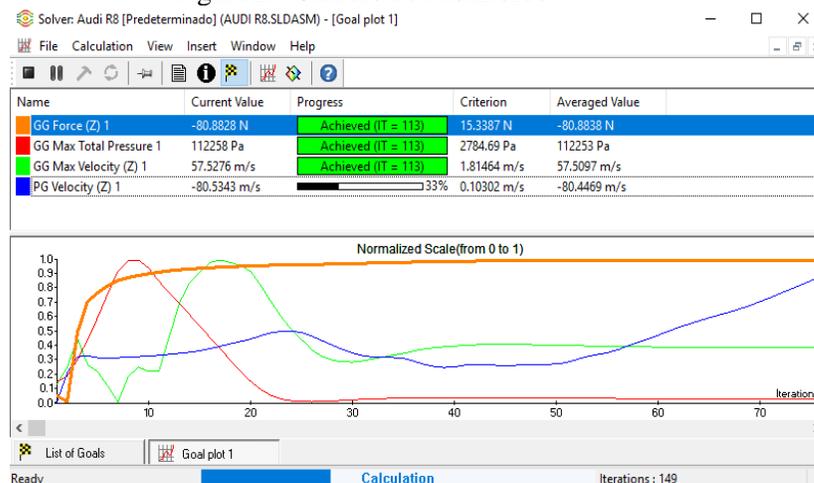
ajustar, se procede a ejecutar la simulación por medio del Run. Durante la simulación se permite monitorear los cálculos a través de la herramienta Calculo de Monitoreo (ver figura 24) que la ejecución del análisis aerodinámico brinda, logrando observar la información y el progreso de la simulación de flujo que se está ejecutando, también durante este proceso se puede detener y modificar la simulación. El tiempo de cálculo requerido por los computadores depende de varios factores, como son el número de elementos del mallado, las especificaciones del equipo informático utilizado, la configuración de finalizado en las opciones de control de cálculo.

Figura 23 Opción de control de Calculo



Fuente: Autores

Figura 24 Calculo de Monitoreo



Fuente: Autores

3.4. ETAPA 3. POST PROCESAMIENTO

3.4.1. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y GRÁFICOS

Una vez se ha terminado la simulación, se entró en la etapa de post procesamiento, donde se visualizaron los resultados de forma gráfica, tablas y numéricamente de los parámetros que se han escogido anteriormente en el establecimiento de objetivos, como lo es el alcance del coeficiente de arrastre (C_x). Para este caso se tuvo en cuenta el parámetro de velocidad en donde se mostrará a continuación todos los resultados o características que se pueden obtener luego de realizar la simulación para la visualización y el análisis de los resultados de cálculo, todos estos resultados o características se pueden visualizar con los demás parámetros que se escogieron en el árbol de análisis durante el proceso de la etapa 1 (establecimiento de objetivos).

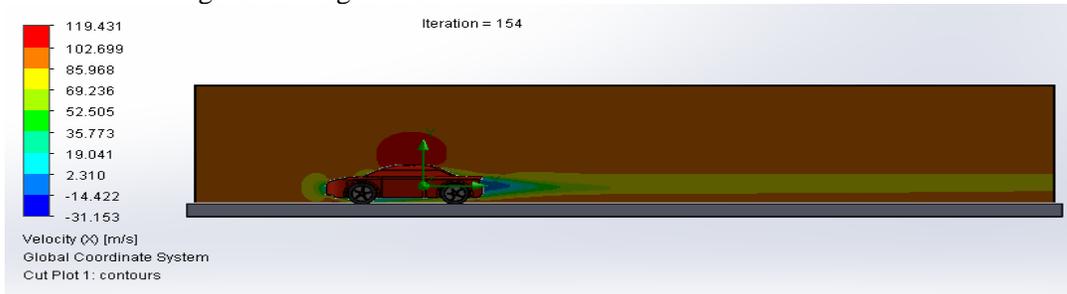
- Diagrama de corte (ver figura 25 y 26): Muestra una vista en sección de una distribución de parámetros.

Figura 25 Diagrama de corte de la velocidad del Audi R8



Fuente: Autores

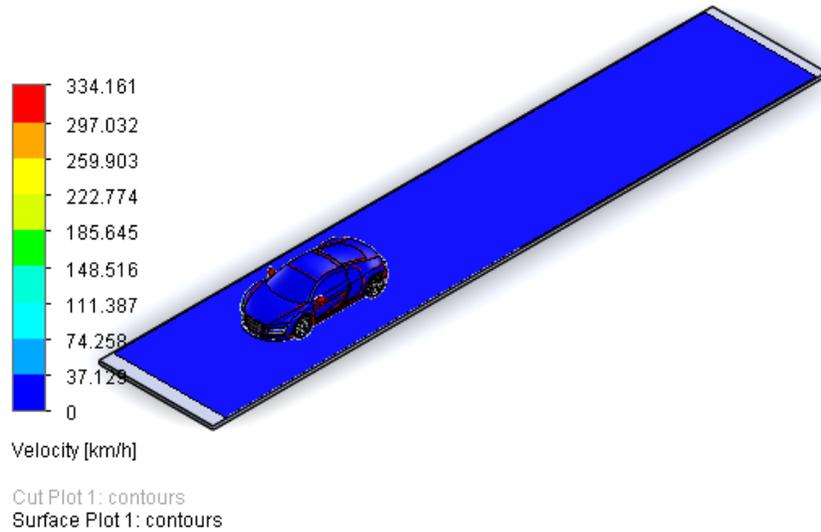
Figura 26 Diagrama de corte de la velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

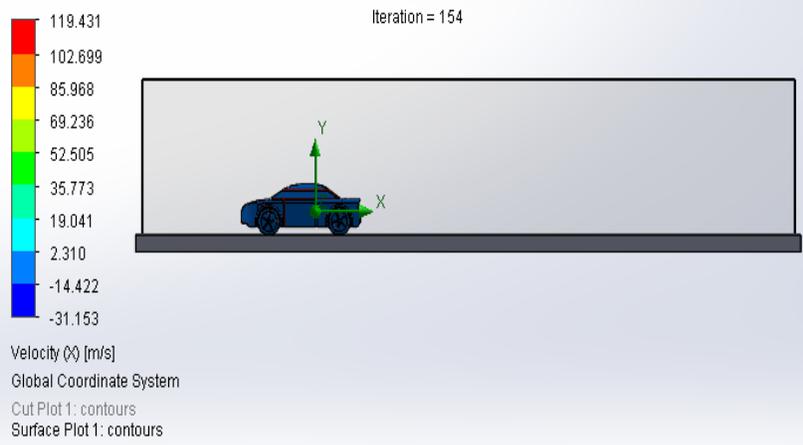
- Gráfico de superficie (ver figura 27 y 28): Muestra una distribución de parámetros en las caras o superficies del modelo seleccionado.

Figura 27 Superficie de corte de la velocidad del Audi R8



Fuente: Autores

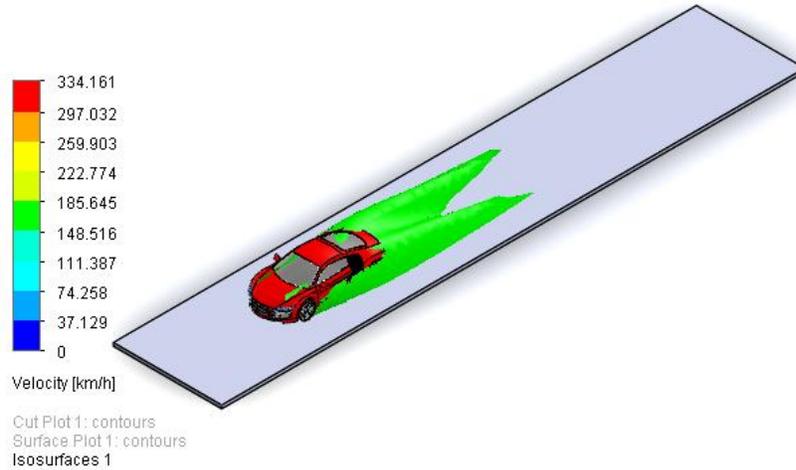
Figura 28 Superficie de corte de la velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

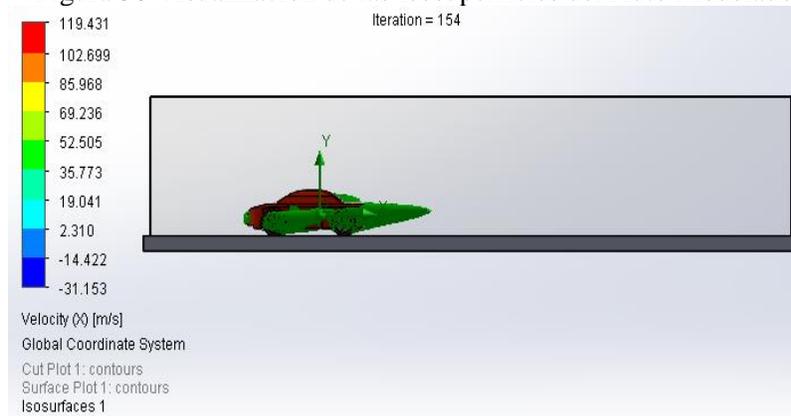
- Isosuperficies (Ver Figura 29 y 30): Muestra una superficie a lo largo de la cual el parámetro seleccionado es constante.

Figura 29 Visualización de las Isosuperficies del Audi R8



Fuente: Autores

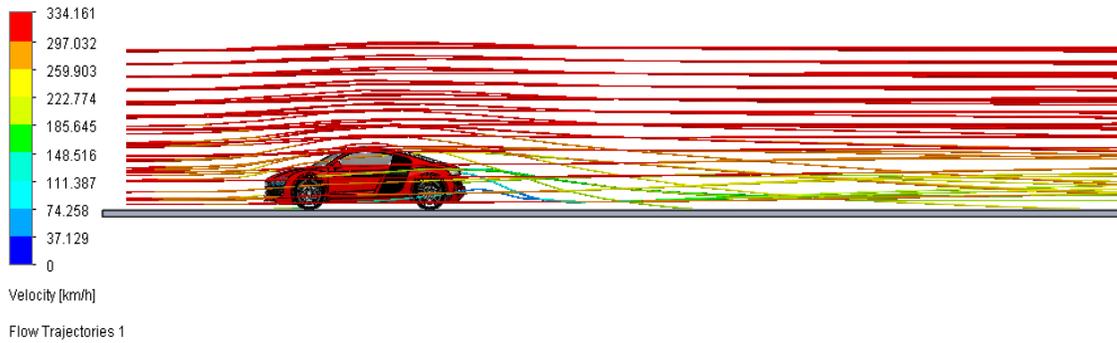
Figura 30 Visualización de las Isosuperficies del Auto Modelado



Fuente: Autores

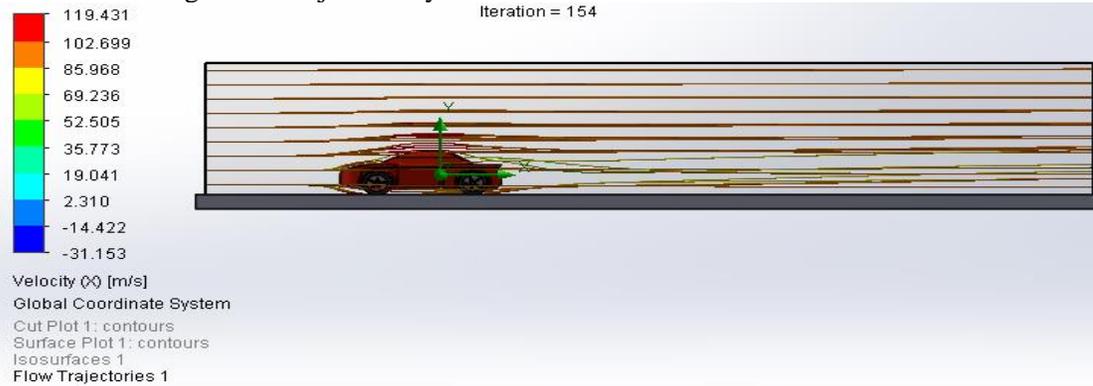
- Trayectorias de flujo (ver figura 31 y 32): Muestra las trayectorias de flujo como líneas de flujo.

Figura 31 Flujo de Trayectoria de la velocidad del Audi R8



Fuente: Autores

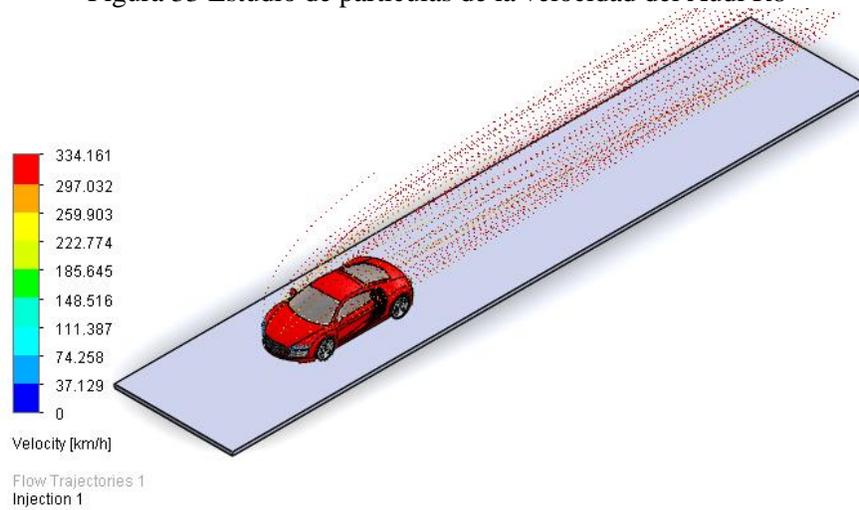
Figura 32 Flujo de Trayectoria de la velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

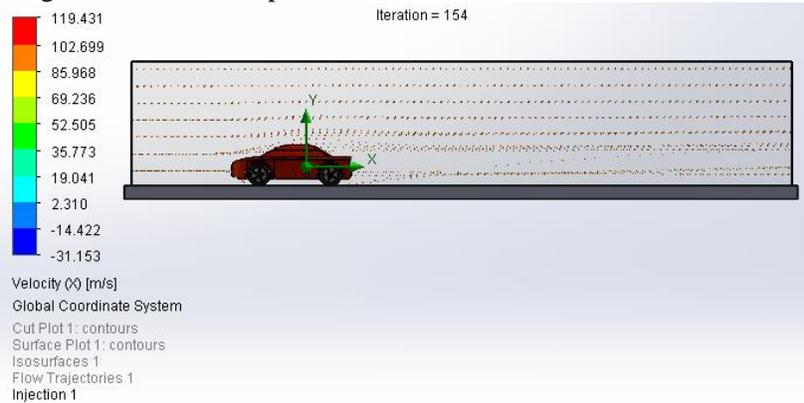
- Estudio de partículas (Ver Figura 33 y 34): Muestra las trayectorias de las partículas físicas y obtiene información diversa sobre el comportamiento de las partículas.

Figura 33 Estudio de partículas de la velocidad del Audi R8



Fuente: Autores

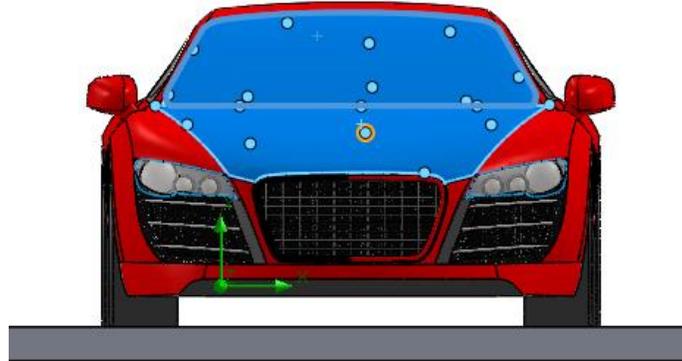
Figura 34 Estudio de partículas de la velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

- Parámetros de puntos (tabla 1 y 2; ver figura 35y 36): Muestra los valores de los parámetros en puntos específicos.

Figura 35 Diagrama de puntos de la velocidad del Audi R8



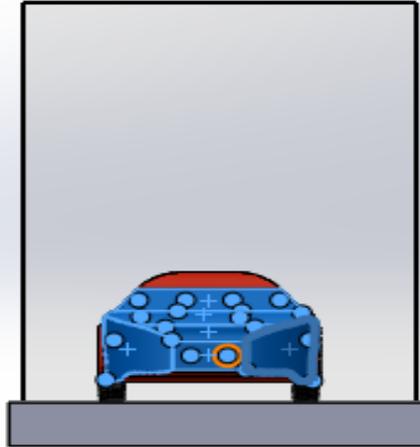
Fuente: Autores

Tabla 1 Valores de los resultados de parámetros de puntos del Audi R8

X [m]	Y [m]	Z [m]	Velocidad [m/s]
-0,00580412	0,086195655	0,248586401	78,71292601
-0,10981759	0,082553811	0,224742979	12,40953065
-0,00402368	0,060317557	0,299882263	1,692734796
0,041941792	0,09304256	0,223249555	25,55296911
-0,05404786	0,09816245	0,214708433	24,5673163
-0,07746532	0,054763325	0,302638739	4,434866492
0,051510539	0,052046042	0,305200189	3,065594848
0,082656108	0,066270038	0,256745666	7,812130026
-0,12432057	0,055828284	0,26839304	76,23392076
-0,00795799	0,033417933	0,415515363	10,99545129
-0,0104723	0,049030822	0,328500539	9,813242525
-0,11317842	0,038258571	0,373599231	31,97128794
-0,13184172	0,049311586	0,273146093	73,81690889
0,066284351	0,03816314	0,382481366	13,5102887
0,026902111	0,009823798	0,463292539	40,42242069
0,057942767	0,049253579	0,309545904	3,263917128
0,10066314	0,049968857	0,263077378	70,07734484
-0,08216013	0,049189728	0,314499289	8,463493013
-0,07596006	0,027011802	0,428217888	15,24029598

Fuente: Autores

Figura 36 Diagrama de puntos de la velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

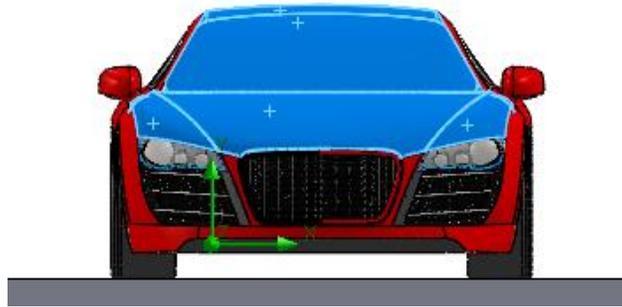
Tabla 2 Valores de los resultados de parámetros de puntos del Auto Modelado

X [m]	Y [m]	Z [m]	Densidad(Fluid) [kg/m ³]	Presión [Pa]	Velocidad [m/s]
-2,76311803	-0,15258557	5,563342094	1,251301534	106974,1433	3,55271E-15
-2,76311803	-0,15258557	5,230657578	1,251287215	106971,7777	0
-1,51006031	0,489015698	4,756163597	1,194088664	100590,9372	0,00064064
-1,51006031	0,489015698	5,183395863	1,210571702	102433,4509	0,000564255
-1,51006031	0,489015698	5,610628128	1,210948116	102430,8033	0,000571178
-1,51006031	0,489015698	6,037860394	1,19461575	100578,0997	0,000648188
-1,75833774	0,360583395	5,11133337	1,221453973	103788,8471	1,44312E-14
-1,77763569	0,35974285	5,691696644	1,220388474	103676,5666	1,44312E-14
-2,02379704	0,340088129	6,238341331	1,194639926	100746,8805	0
-2,28482938	0,296392024	4,774898052	1,190407935	100689,8702	1,44312E-14
-2,34092855	0,283745468	5,675622463	1,195430077	100706,7214	8,88178E-16
-2,67595792	0,175662249	4,999362469	1,213069372	102483,221	3,098880943
-2,67140198	0,17892243	5,811324596	1,212362149	102428,5971	2,167299761
-2,41487718	0,0260005	4,533275604	1,200546204	100976,9614	5,333343207
-2,76178455	0,029042751	5,055196285	1,246811702	106237,5288	0,484709406
-2,24237037	-0,43038815	4,458116055	1,19774525	101300,1704	0,594190186
-2,31942844	0,030349687	6,3072896	1,198537069	100771,731	0,438964285
-2,7629106	-0,31589592	5,731138706	1,204052763	102044,8449	0,581859494
-2,23839378	-0,44401929	6,337152004	1,19513122	100990,5583	0,235527714

Fuente: Autores

- Parámetros de superficie (tabla 3 y 4; ver figura 37 y 38): Muestra los valores de los parámetros (mínimo, máximo, promedio e integral) calculados sobre la superficie especificada.

Figura 37 Área de superficie de la velocidad del Audi R8



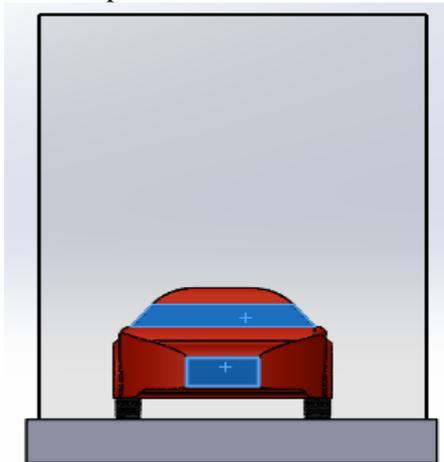
Fuente: Autores

Tabla 3 Valores de los resultados de parámetros de superficie del Audi R8

Parámetro Local	Mínimo	Máximo	Promedio	Área de Superficie [m ²]
Velocidad [m/s]	0	0	0	0,091529264

Fuente: Autores

Figura 38 Área de superficie de la velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

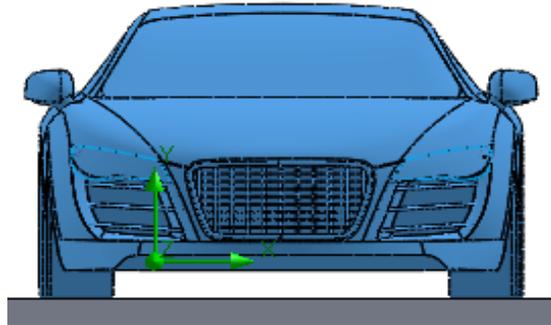
Tabla 4 Valores de los resultados de parámetros de superficie del Auto Modelado

Parámetro Local	Mínimo	Máximo	Promedio	Área de Superficie [m ²]
Pressure [Pa]	95942,52806	107189,3928	103030,6961	1,011311961
Density (Fluid) [kg/m ³]	1,136492665	1,253483611	1,21600861	1,011311961
Velocity (X) [m/s]	0	0	0	1,011311961

Fuente: Autores

- Parámetros de volumen (tabla 5 y 6; ver figura 39 y 40): Muestra los valores de los parámetros (mínimo, máximo, promedio, promedio general e integral) calculados dentro de los volúmenes especificados.

Figura 39 Volumen de Velocidad del Audi R8



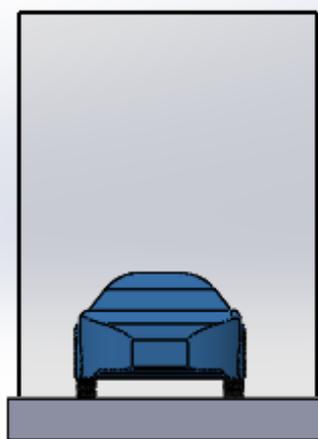
Fuente: Autores

Tabla 5 Valores de los resultados de parámetros de volumen del Audi R8

Parámetro Local	Mínimo	Máximo	Promedio	Volumen Medio	Volumen [m ³]
Velocidad [m/s]	5,373556903	92,91480165	79,98830316	80,01195038	1,437601662

Fuente: Autores

Figura 40 Volumen de Velocidad del Auto Modelado



Fuente: Autores

Tabla 6 Valores de los resultados de parámetros de volumen del Auto Modelado

Parámetro local	Valor	X	Y	Z	Volumen [m ³]
Volumen (Fluid) [m ³]	430,8043232	0	0	0	430,8043232

Fuente: Autores

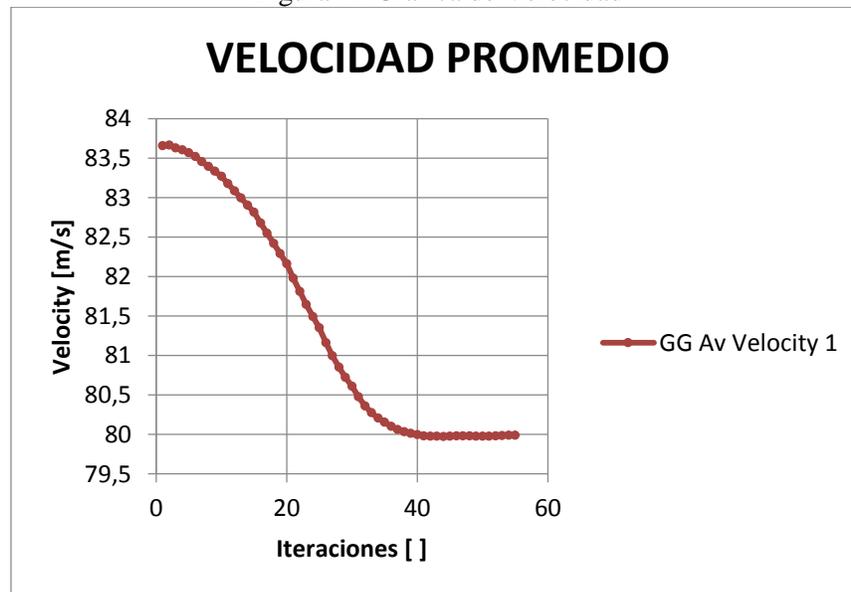
- Gráfico de objetivos (tabla 7 y ver figura 41): Muestra los cambios de objetivos en el curso del cálculo.

Tabla 7 Resultados de la Velocidad

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]
GG Av Velocidad 1	[m/s]	79,98830316	80,00263822	79,97512524	80,15443605	100

Fuente: Autores

Figura 41 Grafica de Velocidad



Fuente: Autores

3.4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

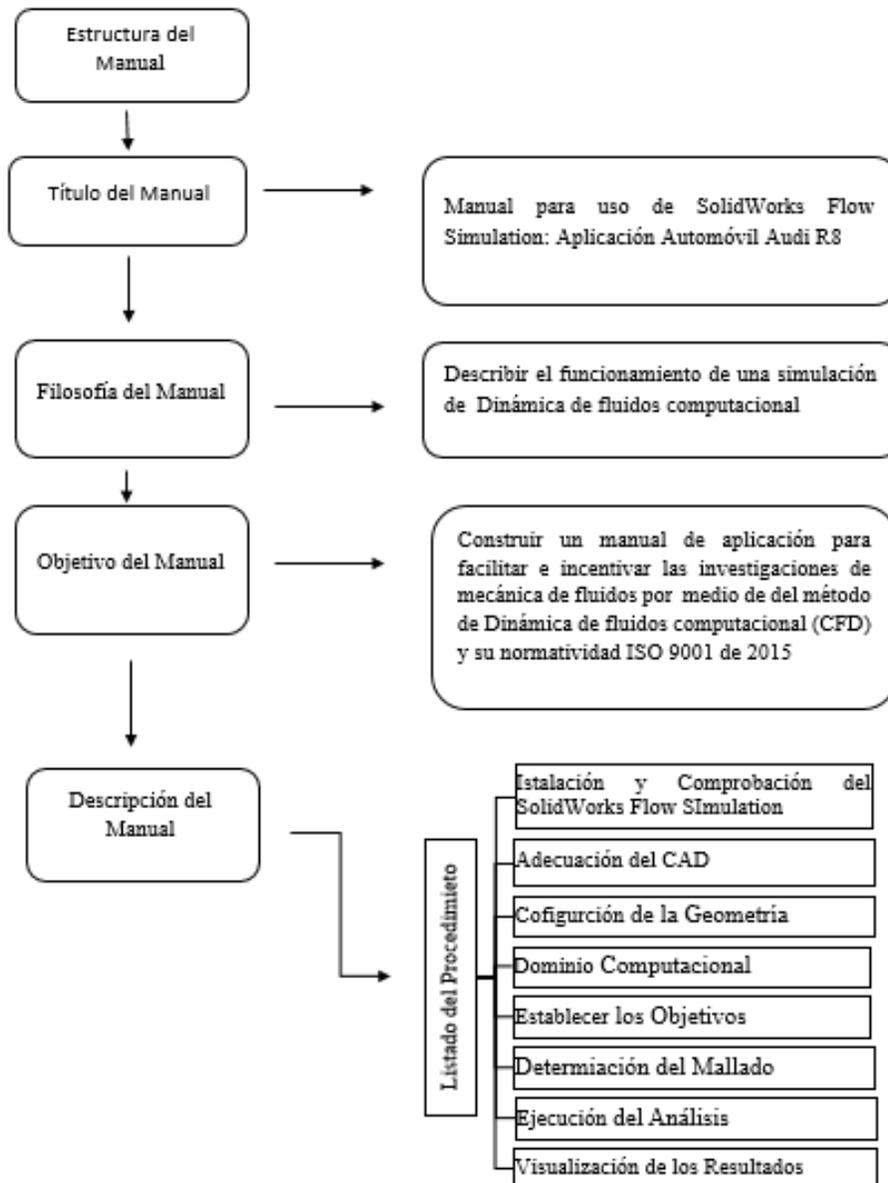
Una vez realizada la extracción de resultados, se analizan y se procede a sacar las diferentes conclusiones y comparaciones de la simulación de flujo.

4. RESULTADOS

4.1. DESARROLLO DEL MANUAL

4.1.1. ESTRUCTURA DEL MANUAL

Figura 42 Estructura del Manual



Fuente: Autores

4.1.2. DESCRIPCIÓN DEL MANUAL

Basados en el objetivo general del proyecto se obtuvo un manual de aplicación para el estudio aerodinámico, el cual, consiste en la descripción metodológica de una simulación de flujo de fluido que se le aplica a un vehículo (Audi R8). Por medio de un método de simulación conocido como CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), donde, se utiliza el software Solidworks Flow Simulation, con la finalidad de aportar procesos de enseñanza, aprendizaje e investigación en el ámbito del área automotriz. Por otra parte, servirle de soporte para investigaciones al semillero de investigación SIIMA (Ver Anexo A).

4.2. MODELADO DEL VEHICULO AUDI R8

Se realiza un modelo del vehículo Audi R8, basado en el CAD original del vehículo obtenido de la página “grabcad.com”, con la finalidad de tener un referente real que cumpla con las características y parámetros originales del vehículo. Con el objetivo de que en el manual se muestre la metodología completa para un análisis CFD, donde se incluya la etapa de diseño asistido por computador, hasta la aplicación del software Solidworks Flow Simulation. Se realiza una simplificación del vehículo Audi R8, para ello se le aplica una revisión o chequeo por medio de una herramienta que brinda el Solidworks Flow Simulation para verificar su estado de construcción y así obtener un simulado eficaz (ver anexo C).

4.2.1. MODELADO DEL VEHÍCULO

Para la realización del Auto modelado se parte de la elaboración de un modelo sencillo de un automóvil con el fin de cumplir el primer objetivo propuesto en este proyecto y además lograr realizarle la simulación aerodinámica a dicho auto. Para la elaboración de este modelo se basa en la simplicidad de un automóvil normal, cuya elaboración de este modelo consta de su body o carrocería, sus rines y llantas (ver anexo D).

4.3. OBTENCION DE RESULTADOS DE LA SIMULACION POR CFD

Luego de la simulación aerodinámica realizada al vehículo Audi R8 y al Auto modelado se obtienen varios resultados que mediante el proceso de simulación se logró determinar a través de una herramienta conocida como Goals. En la cual, en dicha herramienta se seleccionan los parámetros GG (Goals Global “Objetivos Globales”) que se quieren obtener una vez terminada la simulación como: sus velocidades, fuerzas, presiones, coeficientes y distribución de flujo de aire alrededor del vehículo. Algunos de estos parámetros son los siguientes (ver tabla 8). En ella se determina el valor de cada parámetro y a su vez el valor máximo, mínimo y promedio que pueden llegar a alcanzar. A su vez muestra el porcentaje de un progreso del 100%, el cual, habla del cumplimiento del Solver y de todos los cálculos en cada elemento del mallado (ver tabla 9).

Tabla 8 Definición de Parámetros

Parámetros	Concepto
Presión Estática	La presión estática es la que tiene un fluido, independientemente de la velocidad de este, y que se puede medir mediante la utilización de tubos piezométricos.
Presión Total	La presión total que ejerce un fluido -bien sea gaseoso o líquido- se define como la suma de la presión estática y la presión dinámica.
Densidad (fluido)	Es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia; lo que quiere decir que entre más masa tenga un cuerpo mayor será su densidad.
Velocidad	Es la magnitud física que muestra y expresa la variación en cuanto a posición de un objeto y en función del tiempo, que sería lo mismo que decir que es la distancia recorrida por un objeto en la unidad de tiempo.
Fuerza	La fuerza es una magnitud vectorial que mide la razón de cambio de momento lineal entre dos partículas o sistemas de partículas. En este caso será el fluido con el vehículo.
Cx	Denominado coeficiente de arrastre representa a la resistencia aerodinámica, se utiliza para evaluar la eficiencia aerodinámica de una carrocería. Actúa en dirección del flujo.

Fuente: Autores

Tabla 9 Resultados de los Parámetros del Audi R8

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]
GG Máxima Presión Estática 1	[Pa]	105233,084	105237,6453	105204,764	105289,6192	100
GG Máxima Presión Total 1	[Pa]	107460,866	107532,7381	107421,731	107804,1438	100
GG Máxima Densidad (Fluido) 1	[kg/m ³]	1,24241337	1,242686694	1,24217803	1,24342742	100
GG Velocidad Promedio 1	[m/s]	79,9883031	80,00263822	79,97512524	80,15443605	100
GG Máxima Velocidad	[m/s]	92,9148016	93,07175827	92,86260708	93,2101926	100
GG Fuerza(Z) 1	[N]	114,4082	114,8329846	115,5555435	114,3297877	100
Cx	Adimensional []	0,2838481	0,284901834	0,286694511	0,283653398	100

Fuente: Autores

Tabla 10 Resultados de los Parámetros del Auto Modelado

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]
GG Máxima Presión Estática 1	[Pa]	105552,9535	105567,8834	105368,9508	105625,407	100
GG Máxima Presión Total 1	[Pa]	108470,479	108471,397	108454,1649	108491,2774	100
GG Máxima Densidad (Fluido) 1	[kg/m ³]	1,238425525	1,238662835	1,23665521	1,239739166	100
GG Máxima Velocidad	[m/s]	103,732646	104,3112717	103,732646	104,6819741	100
GG Fuerza(Z) 1	[N]	5105,473551	5125,60404	5043,255622	5164,168241	100
Cx	Adimensional []	0,331603294	0,329171181	0,324208477	0,332547523	100

Fuente: Autores

4.4. DETERMINACION DEL COEFICIENTE DE ARRASTRE IDEAL POR MEDIO DEL REFINAMIENTO DE LA MALLA

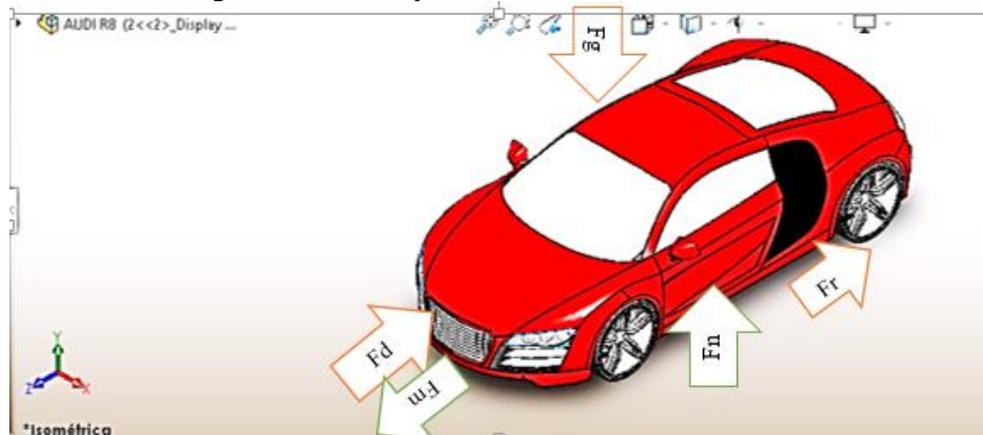
Se determina el coeficiente de arrastre (C_x) ideal (ver tabla 11; ver figura 45 y 46) mediante la herramienta Equation Goals que proporciona el software Solidworks Flow Simulation. En ella se ingresa la ecuación:

$$C_x = \frac{2F_x}{\rho * V^2 * A}$$

Que permite determinar el coeficiente de arrastre (C_x) junto con ello los demás datos que se requiere en la ecuación, luego, la simulación se encarga de resolver los cálculos de la ecuación. Para determinar este coeficiente de arrastre C_x ideal se optó por un nivel de refinamiento 1 porque el software así lo escogió, mediante un análisis que él le realiza al objeto, escogiendo automáticamente su nivel de refinamiento. Los demás datos se obtuvieron a través del programa Solidworks y del vehículo, donde con sus herramientas se logró determinar. Para este coeficiente de arrastre ideal del Audi R8 se obtuvieron 54 iteraciones como se muestra en la gráfica (ver figura 45) y para el Auto Modelado se obtuvieron 41 iteraciones (ver figura 46), las iteraciones son el número de cálculos que se realizaron para obtener dicho C_x .

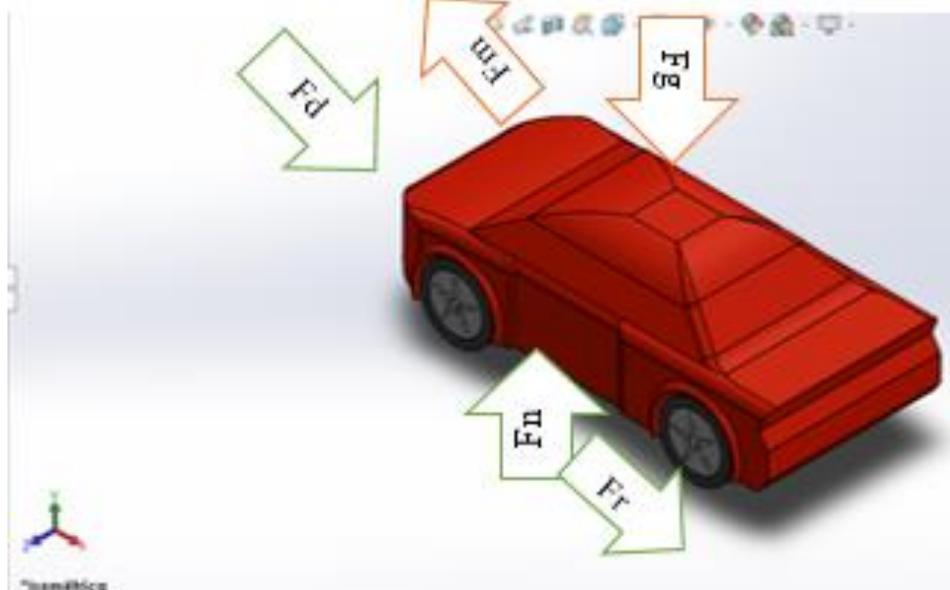
La grafica muestra los valores negativos por el sentido en el que se tomó el C_x , el sentido del vehículo va en el eje Z positivo, pero el C_x actúa en contra del vehículo, por lo tanto el sentido del C_x es en el eje Z negativo. Dando así los valores negativos en la gráfica (ver grafica 43 y figura 45).

Figura 43 Fuerzas que actuan en el coche del Audi R8



Fuente: Autores

Figura 44 Fuerzas que actúan en el coche del Auto Modelado



Fuente: Autores

F_d : Fuerza de drag o de arrastre: Es la fuerza que va e dirección del flujo.

F_m : Fuerza del motor.

F_n : Fuerza normal.

F_r : Fuerza de Rozamiento.

F_g : Fuerza gravitacional.

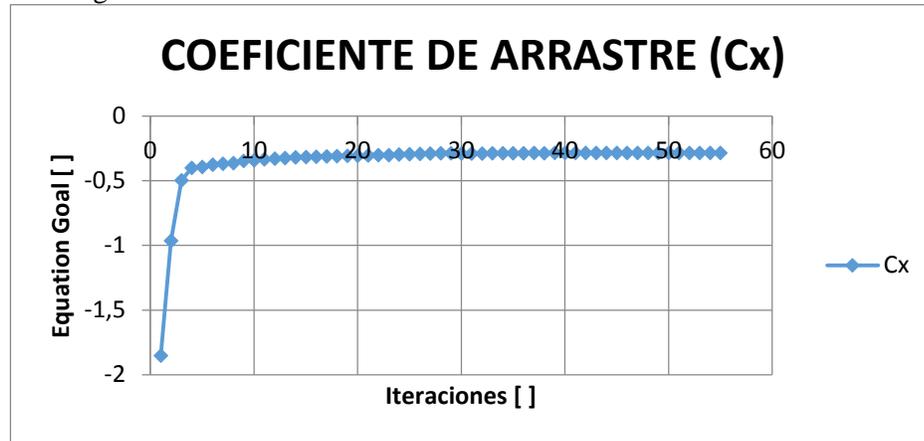
A continuación se muestra los datos y grafica del Cx ideal de las dos simulaciones que se realizaron, luego se mostrará el Cx y Fx (Fuerza en x) dependiendo de su diferente nivel de refinamiento.

Tabla 11 Resultados del Coeficiente de Arrastre ideal del Audi R8

Nombre del Objetivo	Unidad	Valor	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Progreso [%]
Cx	Adimensional []	0,283848 1	0,2849018	0,28669451	0,28365339	100

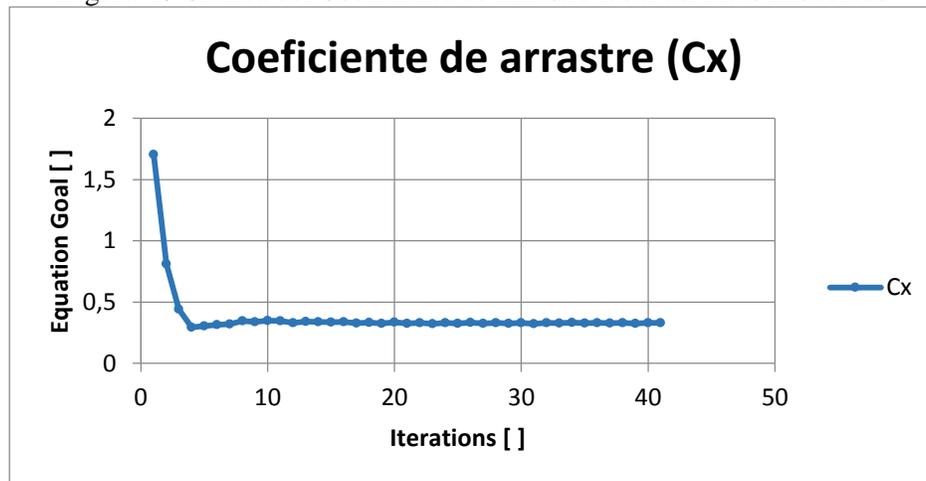
Fuente: Autores

Figura 45 Grafica del Coeficiente de Arrastre ideal del Audi R8



Fuente: Autores

Figura 46 Grafica del Coeficiente de Arrastre ideal del Auto Modelado



Fuente: Autores

El refinamiento es la partición del objeto que se encuentra mallado, este proceso se hace con el fin de mejorar la malla y sus estudios. Existen varios niveles de refinamiento, a medida que el nivel de refinamiento sea mayor, el mallado será más fino o más dividido.

Una vez que el nivel del refinamiento aumenta, en esta disminuye el coeficiente de arrastre (Cx), también, se debe tener en cuenta que se está tomando en un sentido negativo. De igual manera sucede con el Fx (Fuerza en x), debido a que aumenta su estudio en el mallado, el cual, disminuye el tamaño de la celda y aumentado el número de celdas provocando más viajes e iteraciones.

Según los diferentes niveles de refinamiento se calculó el valor de coeficiente de arrastre y la fuerza en el eje x para cada nivel de refinamiento (C_x) (ver tabla 12 y 13; figura 47, 48).

Tabla 12 Coeficiente de arrastre según el nivel de refinamiento del Audi R8

<i>Nivel de refinamiento</i>	<i>F_x</i>	<i>C_x</i>
1	114.833 N	0.2849
2	109.377 N	0.2658
3	88.84 N	0.2207
4	85.154 N	0.2112
5	84.208 N	0.2089
6	83.06 N	0.2060
7	82.557 N	0.2048

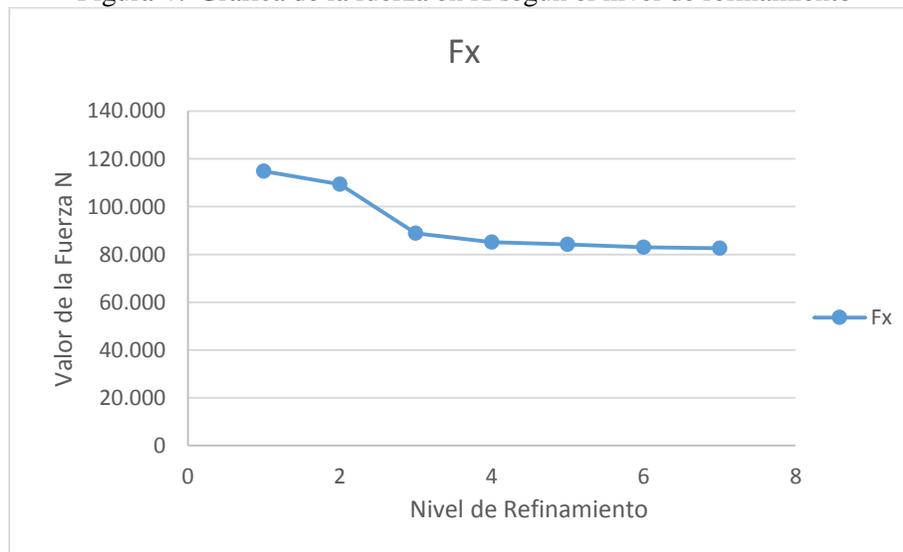
Fuente: Autores

Tabla 13 Coeficiente de arrastre según el nivel de refinamiento del Auto modelado

<i>Nivel de refinamiento</i>	<i>F_x</i>	<i>C_x</i>
1	5125.6 N	0.3291
2	4222.5 N	0.257
3	4398.84 N	0.2523
4	4485.66 N	0.2151
5	4193.45 N	0.2077
6	4592.12 N	0.2115
7	4328.06 N	0.1941

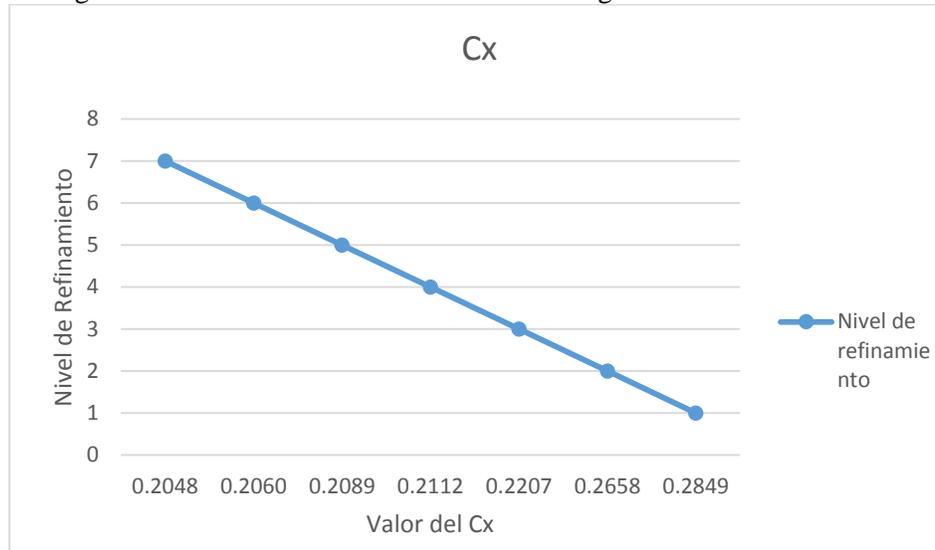
Fuente: Autores

Figura 47 Grafica de la fuerza en X según el nivel de refinamiento



Fuente: Autores

Figura 48 Grafica del coeficiente de arrastre según el nivel de refinamiento



Fuente: Autores

4.5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON UN ESTUDIO REALIZADO POR CARBONELL ROMERO EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA, ANÁLISIS DE DIFERENTES CONFIGURACIONES AERODINÁMICAS DE UN AUDI R8 MEDIANTE TÉCNICAS CFD

En el trabajo “Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Audi R8 mediante técnicas CFD”, obtienen los diferentes datos (ver tabla 14), una vez ya tienen importado el CAD del automóvil, proceden a reducir la complejidad de la geometría del Audi R8 debido a que visualizan muchos detalles que hacen aumentar el tiempo de análisis de automóvil y generar mayor esfuerzo de computación.

En la tabla (ver tabla 14) se plasman los diferentes resultados obtenidos para los diferentes modelos de estudio, entre esos el modelo con el CAD obtenido por medio de la GrabCAD, Inc. que es una startup de Cambridge, Massachusetts que ofrece una plataforma de colaboración gratuita basada en la nube que permite gestionar, ver y compartir archivos CAD analizados, además se muestran los resultados obtenidos por el modelo CAD realizado por el grupo de trabajo de este proyecto, y los resultados originados en el trabajo realizado por Carbonell.

Tabla 14 Comparacion de datos del vehículo Audi R8 por medio de los dos proyectos

Datos del vehículo			
	Modelo Audi R8 versión Carbonell	Modelo Audi R8 versión grabcad.com	Modelo Audi R8 modelado para el proyecto
Masa	1700 Kg	2035 Kg	1599,427 Kg
Potencia	311640	-	-
Área xz	2 m ²	1.27 m ²	2.31 m ²
Área xy	2 m ²	1.27 m ²	2.31 m ²
Coef. Arrastre	0.3837	0.2849	0.3291
Coef. Sustentación	0.5486	-	-
Coef. Rozamiento	1.4	-	-
Coef. R2	0.02	-	-
Altura de cdg	0.5 m	0.08 m	
Base de ruedas	1.8 m	1.7m	1.64m

Fuente: Autores

El valor del coeficiente de arrastre (Cx) con cero grados de inclinación del alerón es 0.37552, para el caso del presente trabajo es de 0.285 debido a que se toma la geometría del Audi R8 (a escala muy reducida, lo que puede diferenciar los resultados) y para el Auto modelado es de 0.3291, sin realizarle modificaciones, además sin la inclusión de alerones. Dando así un porcentaje de error del 24.11% para el Audi R8 y un porcentaje de error del 14.22 para el Auto Modelado todo ello respecto al Carbonell.

4.6. VALIDACION DEL MANUAL

Una vez realizada las etapas de la simulación de flujo y consecuentemente la elaboración del manual para uso de SolidWorks Flow Simulation, se realizó como metodología de validación del manual desarrollado, llevar a cabo una experiencia práctica de estudio con los estudiantes del Semillero de Investigación en Ingeniería y Mecánica Automotriz SIIMA, ya que las necesidades que desea cubrir este manual es que facilite el aprendizaje, proporcione orientación y motive a los estudiantes a utilizar nuevas herramientas que permitan mejorar sus actividades de investigación.

Como actividad previa al uso del manual por los estudiantes, se llevó a cabo la aplicación de una prueba diagnóstica (ver tabla 15). Esta prueba diagnóstica, dio a conocer que pre saberes tenía el estudiante antes de realizar el taller práctico de simulación usando el manual. Posteriormente se realizó el taller donde se dio la oportunidad del uso y manipulación del manual por parte de los estudiantes; y finalizando la actividad se realiza nuevamente una consulta con las mismas preguntas de la prueba diagnóstica, donde se refleja una mejora en el conocimiento del tema principal del manual y así se logró el objetivo de despertar un interés en los estudiantes por el estudio de la dinámica de fluidos computacional, específicamente en la utilización de este software. En esta prueba se trataron temas de conceptos del ámbito aerodinámico automotriz y en el manejo de software que permitan análisis de simulación de fluidos.

Tabla 15 Rejilla de evaluación diagnostica

REJILLA DE EVALUACIÓN DIAGNOSTICA			
CRITERIOS	INDICADORES	Cumple	
		SI	NO
Competencias básicas	¿Reconoce el significado de aerodinámica automotriz?		
	¿Conoce el concepto de simulación flujo?		
	¿Identifica los tipos de flujo que presenta la mecánica de fluidos?		
	¿Reconoce las ecuaciones que rigen la mecánica de fluido?		
	¿Conoce en que se base el método de elementos finitos (FEM)?		
	¿Reconoce el concepto de discretización en el ámbito de aerodinámica de fluidos?		
	¿Identifica las etapas que se presentan en una simulación aerodinámica?		
Competencias practicas	¿Identifica qué son programas de dinámica de fluidos computacional?		
	¿Reconoce el componente Flow Simulation del software Solidworks?		
	¿Ha realizado simulaciones aerodinámicas a partir de análisis numéricos?		
	¿Identifica los coeficientes aerodinámicos que se presentan en un vehículo?		
	¿Tiene idea del coeficiente de arrastre que se presenta en los vehículos?		
	¿Reconoce programas para realizar simulaciones de flujo?		

Fuente: Autores

Aplicación de prueba diagnóstica

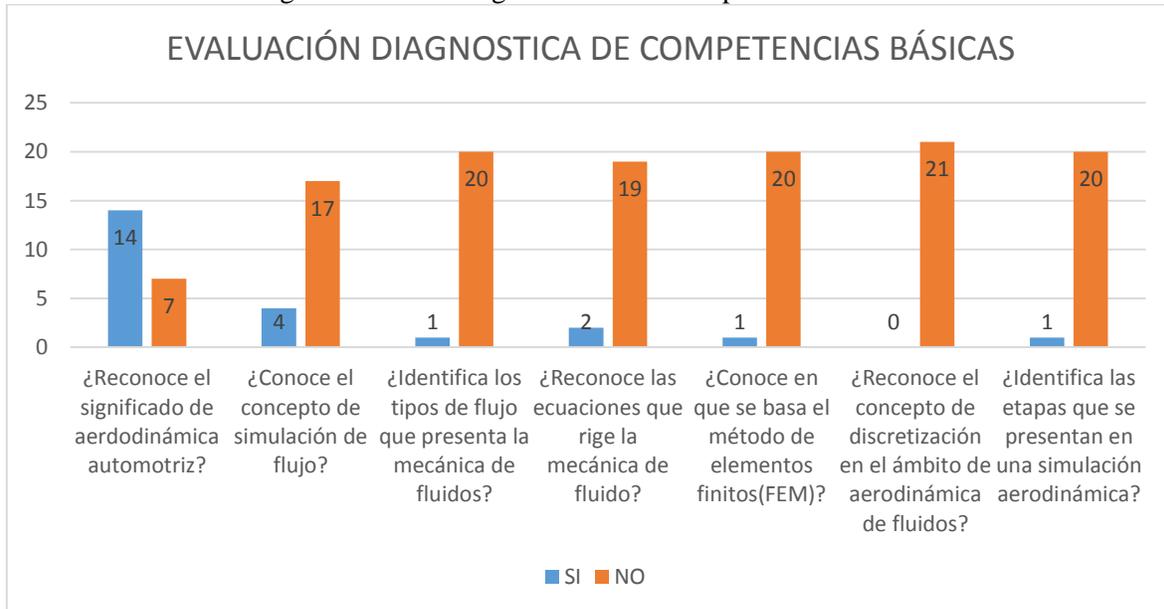
Se aplicó el método de evaluación diagnostica, antes de realizar la explicación del Manual para uso de SolidWorks Flow Simulation: Aplicación automóvil Audi R8, a un grupo de 21 estudiantes que pertenecen al semillero de investigación SIIMA de Electromecánica, para conocer el estado de sus conocimientos en competencia básicas y prácticas sobre el uso y aplicación de herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Análisis de la prueba diagnostica

A continuación, se muestran los resultados de la prueba diagnóstica aplicada a los estudiantes del semillero SIIMA de Electromecánica, mediante gráficos de barras.

- Rejilla de evaluación diagnostica aplicada antes de realizar la exposición del Manual para uso de SolidWorks Flow Simulation (ver figura 49 y figura 50): Aplicación automóvil Audi R8.

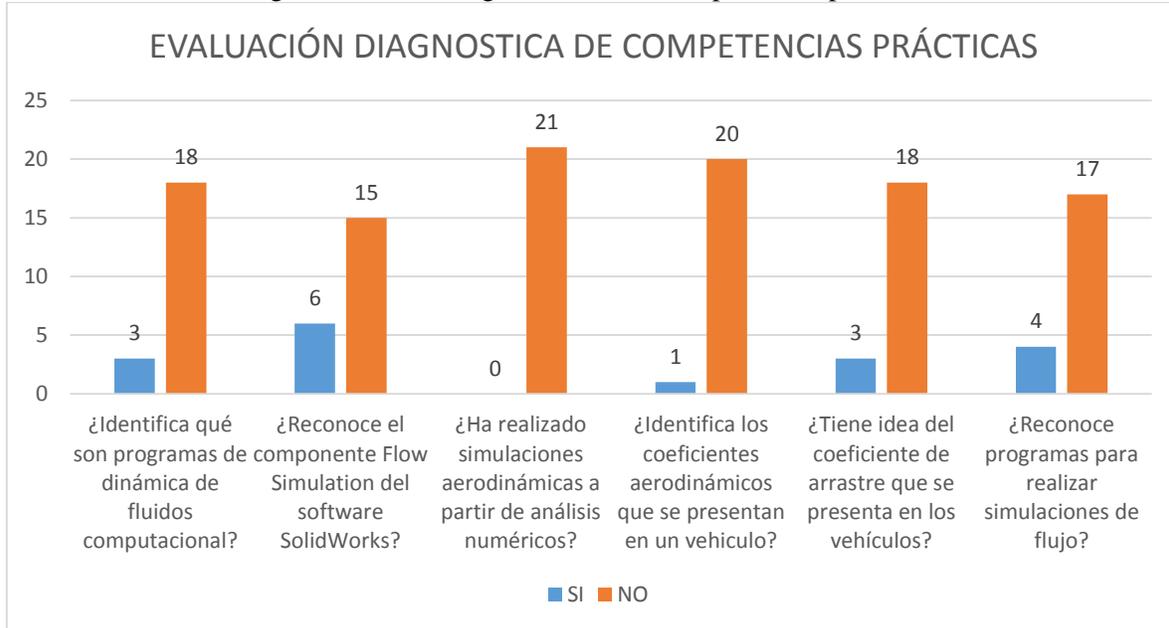
Figura 49 Índice diagnóstico de las competencias básicas.



Fuente: Autores

Según los resultados de las competencias básicas, indica que el 84.35% de los estudiantes del semillero SIIMA, requieren profundizar el área de aerodinámica automotriz para aclarar conceptos básicos a cerca de las simulaciones de flujo en los vehículos y los software que facilitan la aplicación de análisis.

Figura 50 Índice diagnóstico de las competencias prácticas.

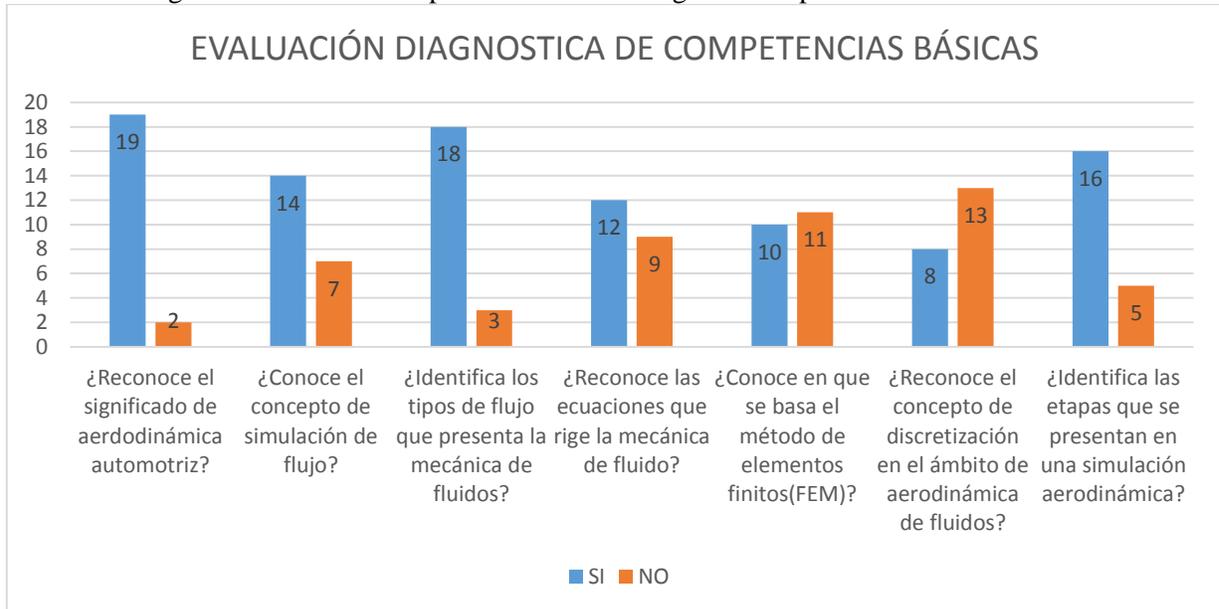


Fuente: Autores

A partir de los resultados de las competencias prácticas, indica que el 86.5% de los estudiantes del semillero SIIMA, no conocen programas de dinámica de fluidos computacional para la aplicación de simulaciones de flujo para la realizar análisis aerodinámicos automotriz.

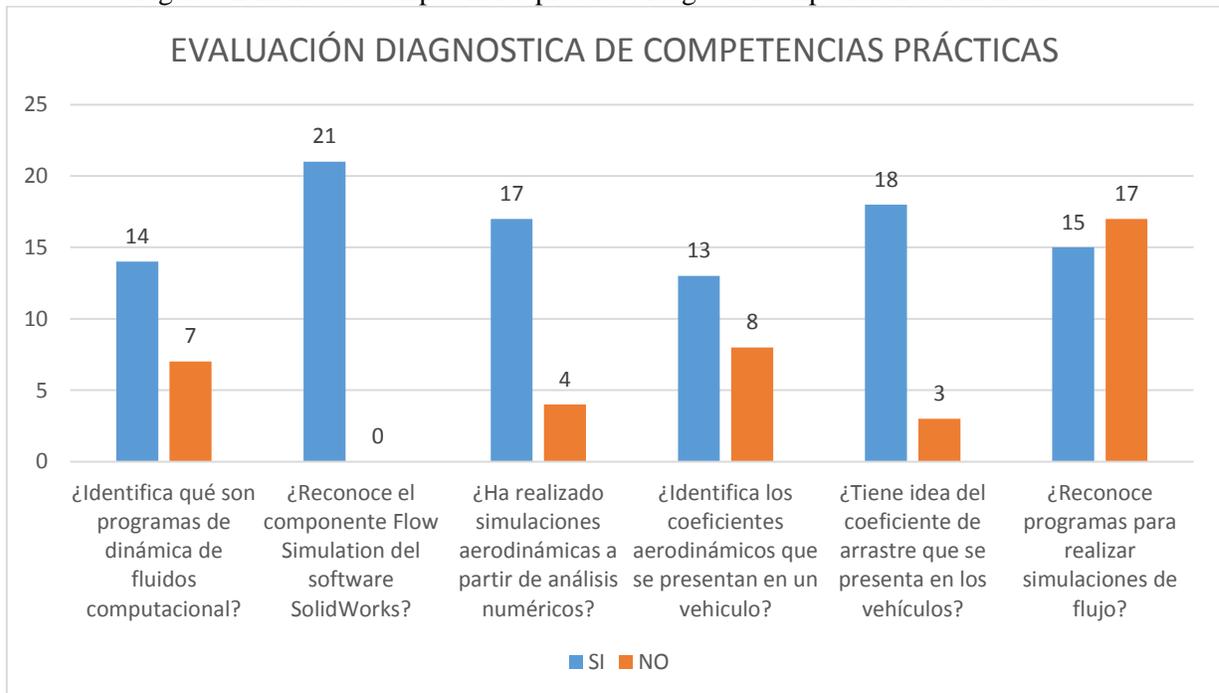
- Rejilla de evaluación diagnostica aplicada después de realizar la exposición del Manual para uso de SolidWorks Flow Simulation (ver figura 51 y figura 52): Aplicación Automóvil Audi R8.

Figura 51 Índice de competencias básicas luego de la exposición del manual.



Fuente: Autores

Figura 52 Índice de competencias prácticas luego de la exposición del manual.



Fuente: Autores

Luego de exponer el manual, señala que el 65.98% en las competencias básicas y el 77.77% en la competencias prácticas, los estudiantes del semillero SIIMA mejoraron los conceptos que se aplican en la aerodinámica automotriz y aplicaron en SolidWorks una simulación de flujo a un automóvil Audi R8. Esto muestra la necesidad de incluir un Manual para uso de SolidWorks Flow Simulation en las Unidades Tecnológicas de Santander, para dar material de apoyo al semillero SIIMA y en los cursos de termodinámica, dinámica y mecánica de fluidos.

Unos de las actividades de este proyecto es la sustentación del manual de práctica para uso de SolidWorks Flow Simulation al grupo de investigación SIIMA, a continuación se adjunta algunas evidencias de dicha sustentación (ver figura 53 y figura 54).

Figura 53 Sustentación del manual al semillero SIIMA



Fuente: Autores

Figura 54 Sustentación del manual al semillero SIIMA



Fuente: Autores

5. CONCLUSIONES

- La elaboración de un manual de aplicación para estudios aerodinámicos, tanto para el grupo de investigación DIMAT como para el grupo de estudiantes del semillero de investigación SIIMA, es una herramienta que pretende ayudar en el proceso de aprendizaje, ya que explica paso a paso un proceso de una simulación aerodinámica a un CAD de vehículo Audi R8 a través de software de CFD conocido como Solidworks Flow Simulation.
- El modelamiento de los CAD de vehículos es de gran importancia para el proceso de una simulación aerodinámica, ya que es lo primero que se debe tener en cuenta porque un CAD mal construido o con errores hace que la simulación arroje datos o resultados no congruentes, por consiguiente se revisa primero que todo la construcción del CAD del vehículo Audi R8 por medio de la herramienta Check Geometry que brinda Solidworks Flow Simulation para la revisión o chequeo de la geometría del automóvil y así establecer un buen modelamiento.
- La simulación de este vehículo CAD Audi R8 conlleva a la obtención de unos resultados que ayudan a realizar una comparación con datos reales para obtener un mejoramiento aerodinámico del automóvil, durante este proceso de la simulación de flujo se escogen que parámetros se quieren calcular como lo son sus velocidades, fuerzas, coeficientes de arrastre y su distribución de flujo en el vehículo, todo esto se efectúa mediante una un árbol de análisis que brinda el Flow Simulation y allí visualizarlos de diferentes maneras según lo requerido.
- El coeficiente de arrastre que presenta el modelo CAD Audi R8 propuesto por Grabcad luego de la simulación practicada a través del software SolidWorks Flow Simulation comparándolo con el valor que describe los autores de este proyecto del auto modelado y con la versión del modelo del proyecto Carbonell, es menor por lo que se infiere que el modelo utilizado de Grabcad para el estudio aerodinámico al tener menor fuerza resistiva al viento y conllevaría a un menor consumo energético. Todo esto aplicándolo a unas mismas condiciones de contorno de simulación automática de dinámica de fluidos computacional por medio del SolidWorks Flow Simulation.

6. RECOMENDACIONES

Luego de concluir este proyecto de grado, se presenta las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda presentar este manual aerodinámico como una práctica de estudio en las diferentes materias de dibujo computarizado, mecánica de fluidos con el fin de promover los estudios aerodinámicos utilizando los CFD.
- Se propone que este manual de simulación aerodinámica sea mejorado y actualizado a medida que se realicen investigación, de tal manera que incentive y mejore el aprendizaje de una forma más sencilla y práctica.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre Gómez, F. (2015). *Análisis aerodinámico del vehículo para la competencia eco-shell (Tesis de maestría)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Alba Tarabata, R., & Guangasi Núñez, D. (2018). *Análisis aerodinámico de un prototipo de auto eléctrico BIPLAZA UTA CIM17 (Tesis de pregrado)*. Universidad Técnica de Ambato, Ambato.
- Carbajal Suárez, Y. (2010). Sector automotriz: reestructuración tecnológica y reconfiguración del mercado mundial. *Paradigma económico*, 24-52.
- Carbonell Romero, P. (2015). *Análisis de diferentes configuraciones aerodinámicas de un Audi R8 mediante técnicas CFD (Tesis de pregrado)*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- Casa Tipán, E. (2016). *Modelación numérica del flujo rasante en una rápida escalonada aplicando la dinámica de fluidos computacional CFD, programa flow 3D (Tesis de maestría)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Costarelli, S., Paz, R., Storti, M., & Dalcin, L. D. (2011). Resolución de las ecuaciones de Navier-Stokes utilizando CUDA. En *Mecánica computacional* (págs. 2979-3008). Rosario, Argentina.
- Cumbe Fárez, E. S., & Rockwood Iglesias, R. E. (2009). *Simulación aerodinámica de un vehículo Toyota Corolla 2005 en un programa de dinámica de fluidos computacional CFD (Tesis de pregrado)*. Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador.
- Franzini, J., & Finnemore, J. (2006). *Mecánica de fluidos con aplicación en ingeniería*. España: MC Graw Hill.
- García Martín, D., & Marcelino Sádaba, S. (2010). *Estudio de la capacidad aerodinámica de carrocerías de vehículos categoría CM (Tesis de pregrado)*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales y de Telecomunicación, Pamplona.
- Gomez González, S. (2017). *Mallado y simulación CFD de automóvil (Tesis de maestría)*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Cataluña.
- López, A. C. (2015). *Resolución numérica de las ecuaciones de Navier-Stokes*. España.

- López, M., Mancuso, F., Aguirre, R. M., Herderson, G. R., & Coussirat, M. G. (2016). Uso de la mecánica de fluidos computacional como apoyo a la enseñanza de la mecánica de los fluidos en la universidad. En *Mecánica computacional* (págs. 1597-1616). Córdoba.
- Martínez de la Calle, J., & Ballesteros Tajadura, R. (2004-2005). *Flujo viscoso en conductos*.
Universidad del Oviedo.
- Morillo, D. M. (2016). *Mejora aerodinámica de un turismo (Tesis de pregrado)*.
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Mott, R. (2006). *Mecánica de fluidos*. México: Pearson Educación.
- Murillo Fuentes, C. (2016). *Estudio mediante CFD del alerón trasero de un monoplaça con el DRS abierto y cerrado de diferentes circuitos (Tesis de pregrado)*.
Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Santamaría Bermeo, J., & Calero Venegas, J. (2012). *Análisis de las propiedades aerodinámicas, efecto suelo y su aplicación en vehículos convencionales específicamente en el Chevrolet Aveo Sedán como forma para aumentar la seguridad activa (Tesis de Pregrado)*. Escuela Politécnica del Ejército, Latacunga.
- Shames, I. (1995). *Mecánica de fluidos*. Santa Fe de Bogotá: McGRAW-HILL.
- Solidwoks. (2018). *Solidwoks*. Obtenido de
Solidwoks: <https://www.solidworks.com/es/package/solidworks-flow-simulation>
- Tobón, S. (2006). *Aspectos básicos de la formación basada en competencias*. Talca: Proyecto Mesesup I.
- Xamán, J., & Gijón Rivera, M. (2016). *Dinámica de fluidos computacional para ingenieros*.
EE.UU: Palibrio.

8. ANEXOS

Anexo A: Manual para uso de SolidWorks Flow Simulation.

Anexo B: Artículo de Investigación.

Anexo C: Planos Técnicos.