



# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

## **FACULTAD DE MECÁNICA ESCUELA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL QUE PERMITA EVALUAR EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA QCCJT003-2014 DE SISTEMAS DE ESCAPE DEL MODELO M4 PARA CIAUTO AMBATO.”**

**WASHINGTON ISRAEL MASAQUIZA MOYULEMA  
LUIS ANGEL MORALES VILLARROEL**

## **TRABAJO DE TITULACIÓN**

**TIPO: PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN**

**Previo a la obtención del Título de:**

## **INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**RIOBAMBA – ECUADOR  
2017**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

---

2016-12-05

Yo recomiendo que el trabajo de Titulación preparado por:

**WASHINGTON ISRAEL MASAQUIZA MOYULEMA**

---

Titulada:

**“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL QUE  
PERMITA EVALUAR EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA QCCJT003-2014  
DE SISTEMAS DE ESCAPE DEL MODELO M4 PARA CIAUTO AMBATO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

\_\_\_\_\_  
Ing. Carlos José Santillán Mariño.  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

\_\_\_\_\_  
Ing. Pablo César Sinchiguano Conde.  
**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_  
Ing. Paúl Alejandro Montúfar Paz.  
**ASESOR**

**ESPOCH**

Facultad de Mecánica

---

**CERTIFICADO DE APROBACIÓN DEL TRABAJO  
DE TITULACIÓN**

---

2016-12-05

Yo recomiendo que el trabajo de Titulación preparado por:

**LUIS ANGEL MORALES VILLARROEL**

---

Titulada:

**“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL QUE  
PERMITA EVALUAR EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA QCCJT003-2014  
DE SISTEMAS DE ESCAPE DEL MODELO M4 PARA CIAUTO AMBATO”**

Sea aceptada como parcial complementación de los requerimientos para el Título de:

**INGENIERO AUTOMOTRIZ**

\_\_\_\_\_  
Ing. Carlos José Santillán Mariño.  
**DECANO DE LA FAC. DE MECÁNICA**

Nosotros coincidimos con esta recomendación:

\_\_\_\_\_  
Ing. Pablo César Sinchiguano Conde.  
**DIRECTOR**

\_\_\_\_\_  
Ing. Paúl Alejandro Montúfar Paz.  
**ASESOR**

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** WASHINGTON ISRAEL MASAQUIZA  
MOYULEMA.

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL QUE PERMITA EVALUAR EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA QCCJT003-2014 DE SISTEMAS DE ESCAPE DEL MODELO M4 PARA CIAUTO AMBATO”

**Fecha de Examinación:** 2017-08-15

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Pablo César Sinchiguano Conde. <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Paúl Alejandro Montúfar Paz. <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. José Francisco Pérez Fiallos  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

# ESPOCH

Facultad de Mecánica

---

## EXAMINACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

---

**NOMBRE DEL ESTUDIANTE:** LUIS ANGEL MORALES VILLARROEL

**TÍTULO DE LA TESIS:** “DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL QUE PERMITA EVALUAR EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA QCCJT003-2014 DE SISTEMAS DE ESCAPE DEL MODELO M4 PARA CIAUTO AMBATO”

**Fecha de Examinación:** 2017-08-15

### RESULTADO DE LA EXAMINACIÓN:

COMITÉ DE EXAMINACIÓN	APRUEBA	NO APRUEBA	FIRMA
Ing. José Francisco Pérez Fiallos <b>PRESIDENTE TRIB. DEFENSA</b>			
Ing. Pablo César Sinchiguano Conde. <b>DIRECTOR</b>			
Ing. Paúl Alejandro Montúfar Paz. <b>ASESOR</b>			

\* Más que un voto de no aprobación es razón suficiente para la falla total.

**RECOMENDACIONES:** \_\_\_\_\_

---

El Presidente del Tribunal certifica que las condiciones de la defensa se han cumplido.

---

Ing. José Francisco Pérez Fiallos  
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL

## **DERECHOS DE AUTORÍA**

El trabajo de grado que presentamos, es original y basado en el proceso de investigación establecido en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. En tal virtud, los fundamentos teórico-científicos y los resultados son de exclusiva responsabilidad de los autores. El patrimonio intelectual le pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

---

Washington Israel Masaquiza Moyulema

---

Luis Angel Morales Villarroel

## **DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD**

Nosotros, Washington Israel Masaquiza Moyulema y Luis Angel Morales Villarroel, declaramos que el presente trabajo de titulación es de nuestra autoría y que los resultados del mismo son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otra fuente están debidamente citados y referenciados.

Como autores, asumimos la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este trabajo de titulación.

---

**Washington Israel Masaquiza Moyulema**  
C.I: 180443485-8

---

**Luis Angel Morales Villarroel**  
C.I:180476958-4

## **DEDICATORIA**

A mis padres Fausto y Ángela, por su apoyo incondicional para que este sueño sea una realidad, porque sin ellos nada de esto hubiera sido posible. A mi hermana Angélica porque soy su ejemplo a seguir. A mi tía Marcita por su apoyo infinito para que pueda alcanzar esta meta y muchas otras más. A todos mis familiares que de alguna u otra manera me apoyaron para llegar a esta meta. A mis amig@s que me apoyaron y acompañaron en el transcurso de mi etapa universitaria.

A todos ustedes gracias y un Dios le pague de todo corazón, ya que hoy estoy cumpliendo una meta que me propuse tiempo atrás.

**Washington Israel Masaquiza Moyulema**

A mis padres Aníbal y Petty, por apoyarme en todo momento de mi vida con su sabiduría e infinito carisma. A mis hermanos Edison y Josué por la paciencia que supieron tenerme, y a todos mis familiares, amig@s y personas especiales que de manera incondicional y sin esperar nada a cambio siempre me apoyaron en este difícil camino, y en esta etapa de mi vida mil gracias.

**Luis Angel Morales Villarroel**

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por brindarme la sabiduría y perseverancia para superar todas las dificultades presentadas a lo largo de mi vida.

A mis padres y mi tía Marcita por su esfuerzo diario para brindarme su apoyo incondicional en el cumplimiento de esta meta, por lo cual siempre viviré agradecido.

A mis abuelos por brindarme su apoyo que de una u otra forma hoy me permite alcanzar esta meta.

A mi tutor Ing. Pablo Sinchiguano y asesor Ing. Paúl Montufar por los conocimientos impartidos durante mi formación y desarrollo de este proyecto.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo especialmente a la Escuela de Ingeniería Automotriz por darme la oportunidad de ser alguien en la vida en el ámbito profesional.

**Washington Israel Masaquiza Moyulema**

A Dios por la Fe, la fuerza y la valentía que me brindo en este arduo y difícil camino, venciendo las adversidades y manteniéndome firme para no dar ni un paso atrás.

A mis padres, hermanos y personas especiales mil gracias por el apoyo moral y el carisma que supieron darme en todos los momentos y en cada paso que di.

A la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo especialmente a la Escuela de Ingeniería Automotriz por darme la oportunidad de formarme intelectualmente y ser un profesional.

**Luis Angel Morales Villarroel**

## CONTENIDO

Pág.

### 1. INTRODUCCIÓN

1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Problematización .....	2
1.3	Justificación .....	3
1.4	Objetivos.....	4
1.4.1	<i>Objetivo general.</i> .....	4
1.4.2	<i>Objetivos específicos:</i> .....	4

### 2. MARCO TEÓRICO

2.1	Marco conceptual .....	5
2.2	Marco teórico.....	6
2.2.1	Sistema de Escape .....	6
2.2.2	Partes del sistema de escape. ....	6
2.2.2.1	<i>Colector de escape.</i> .....	6
2.2.2.1	<i>Convertidor catalítico</i> .....	7
2.2.2.2	<i>Silenciador.</i> .....	8
2.2.2.3	<i>Resonador</i> .....	8
2.2.2.4	<i>Tubo de cola o salida</i> .....	9
2.2.3	Silenciador. ....	10
2.2.4	Tipos de silenciadores. ....	10
2.2.4.1	<i>Zig-zag.</i> .....	10
2.2.4.2	<i>Tubo perforado</i> .....	10
2.2.4.3	<i>Paso directo.</i> .....	10
2.2.5	Gases de escape. ....	10
2.2.6	Gases de escape contaminantes. ....	11
2.2.6.1	Monóxido de carbono (CO). Este.....	11
2.2.6.2	Óxidos de nitrógeno (NOx).....	11
2.2.6.3	Hidrocarburos (HC).....	12
2.2.6.4	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).....	12
2.2.7	Definiciones de los parámetros utilizados para evaluar el diseño de un sistema de escape.....	12

2.2.7.1	<i>Contrapresión.</i>	12
2.2.7.2	<i>Presión de los gases de escape a la salida del motor.</i>	13
2.2.7.3	<i>Las pérdidas de carga.</i>	13
2.2.7.4	<i>Las pérdidas de carga por fricción.</i>	13
2.2.7.5	<i>Las pérdidas de carga singulares.</i>	13
2.2.7.6	<i>Magnitudes características del fluido.</i>	13
2.2.7.7	<i>Codos.</i>	14
2.2.7.8	<i>Perdidas de carga en silenciadores.</i>	15
2.2.7.9	<i>Cambio de sección brusca. Ensanchamiento brusco.</i>	15
2.2.7.10	<i>Ensanchamiento y estrechamiento gradual.</i>	16
2.2.7.11	<i>Pérdida de carga en placas perforadas</i>	17
2.2.8	<i>Flujo másico y flujo volumétrico.</i>	18
2.2.9	<i>CAD (Diseño Asistido por Computadora)</i>	19
2.2.10	<i>Ingeniería inversa</i>	20
2.2.11	<i>CAE.</i>	22
2.2.12	<i>Método de elementos finitos.</i>	23
2.2.13	<i>Dinámica de Fluidos computacional (CFD).</i>	24
2.2.15	<i>ANSYS SpaceClaim.</i>	25
2.2.15	<i>Discretización espacial del CFD.</i>	26
2.2.16	<i>Softwares de Mecánica de Fluidos Computacional.</i>	27
2.2.17	<i>ANSYS.</i>	27
2.2.18	<i>ANSYS FLUENT.</i>	27

### **3 DISEÑO DEL MODELO CFD PARA EL SISTEMA DE ESCAPE DEL VEHÍCULO M4 DE GREAT WALL.**

3.1	<i>Flujograma del diseño del modelo CFD para el sistema de escape del vehículo M4.</i>	30
3.2	<i>Modelación de la geometría del pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4.</i>	34
3.3	<i>Preparación de la geometría del sistema de escape del vehículo M4.</i>	43
3.4	<i>Preparación del modelo CFD en ANSYS – FLUENT.</i>	44
3.4.1	<i>Generación de la malla.</i>	45
3.4.1.1	<i>Criterio para evaluar el tipo de malla.</i>	45

3.4.1.2	<i>Calidad de la malla.</i> .....	47
3.5	Procesamiento y solución del modelo CFD para el flujo de gases combustionados en el sistema de escape del vehículo M4.....	48

## **4 ANÁLISIS DE RESULTADOS**

4.1	Flujograma del cumplimiento del modelo CFD con el ítem 4.5 y 5.2 de la norma QCCJT003-2014.....	50
4.2	Flujograma de la simulación de la trayectoria de los gases de escape en el modelo CFD con datos reales. ....	52
4.3	Análisis de los resultados en la fase de ralentí. ....	52
4.4	Análisis de los resultados en la fase de media carga. ....	56
4.5	Análisis de los resultados en la fase de plena carga. ....	59
4.6	Análisis del comportamiento del fluido.....	62
4.7	Análisis del resonador Helmholtz.....	63
4.8	Cálculo de velocidades y flujo másico de los gases combustionados en el sistema de escape del vehículo M4 en sus tres principales fases de funcionamiento: ralentí, media y plena carga. ....	65

## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones.....	81
5.2	Recomendaciones .....	81

## **BIBLIOGRAFÍA**

## **ANEXOS**

## **PLANOS**

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 3-1 Parámetros de entrada para el modelo CFD.....	34
Tabla 4-1 Parámetros de entrada para el modelo CFD en ralentí.....	52
Tabla 4-2 Parámetros de entrada para el modelo CFD en media carga.....	56
Tabla 4-3 Parámetros de entrada para el modelo CFD a plena carga.....	59
Tabla 4.4 Tabla de valores de la velocidad de salida de los gases de escape del vehículo M4.....	74
Tabla 4-5 Porcentaje de error.....	79

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 2-1. Sistema de escape.....	6
Figura 2-2. Colector de escape. ....	7
Figura 2-3. Convertidor catalítico.....	8
Figura 2-4. Silenciador. ....	8
Figura 2-5. Resonador.....	9
Figura 2-6. Tubo de cola o salida. ....	9
Figura 2-7. Gases contaminantes que genera el vehículo. ....	11
Figura 2-8. Paso del flujo de gases combustionados por un codo del sistema. ....	14
Figura 2-9. Ensanchamiento brusco.....	15
Figura 2-10. Estrechamiento brusco. ....	16
Figura 2-11. Ensanchamiento gradual. ....	17
Figura 2-12. Pérdida de carga en placas perforadas. ....	18
Figura 2-13. Modelo CAD.....	19
Figura 2-14. Escaneo en 3D de una pieza mecánica.....	21
Figura 2-15. Procesamiento de la geometría. ....	22
Figura 2-16. Vista de sección de la geometría en spaceclaim. ....	25
Figura 2-17. Mallado de la geometría de una biela. ....	26
Figura 2-18. Aplicación ANSYS Fluent.....	28
Figura 3-1. Especificaciones técnicas del Vehículo M4 de GREAT WALL. ....	29
Figura 3-2. Montar el vehículo M4 en el elevador hidráulico. ....	30
Figura 3-3. Verificar que el vehículo M4 se soporte adecuadamente en el elevador. ...	31
Figura 3-4. Identificar el pre-silenciador, silenciador y convertidor catalítico ....	31
Figura 3-5. Desacoplar el pre-silenciador del convertidor catalítico.....	32
Figura 3-6. Medir la temperatura de los gases en los tres regímenes de carga.....	32
Figura 3-7. Medir la velocidad y flujo volumétrico de los gases en los tres regímenes de carga del motor. ....	33
Figura 3-8. Montar todo el sistema de escape a su posición inicial.....	33
Figura 3-9. Tubería de acero inoxidable AISI 409. ....	35
Figura 3-10. Separadores internos del silenciador del vehículo M4.....	35
Figura 3-11. Conjunto interno del silenciador del vehículo M4.....	36
Figura 3-12. Pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4 .....	36

Figura 3-13. Escaneo 3D del sistema de escape del vehículo M4.....	37
Figura 3-14. Importación del archivo STL en un software CAD.....	38
Figura 3-15. Importación del archivo STL en un software CAD.....	38
Figura 3-16. Geometría del conjunto interno del silenciador.....	39
Figura 3-17. Geometría del cuerpo del silenciador del sistema de escape.....	39
Figura 3-18. Proyección de curvas para obtener la geometría de los conductos del sistema.....	40
Figura 3-19. Silenciador del sistema de escape del vehículo M4.....	40
Figura 3-20. Geometría del cuerpo del pre-silenciador del sistema de escape.....	41
Figura 3-21. Pre-silenciador del sistema de escape del vehículo M4.....	41
Figura 3-22. Sistema de escape (silenciador y pre-silenciador).....	42
Figura 3-23. Sistema de escape del vehículo M4.....	42
Figura 3-24. Dominio (volumen interno) del sistema de escape.....	43
Figura 3-25. Preparación de la geometría del sistema a través de SpaceClaim.....	43
Figura 3-26. Entorno de ANSYS FLUENT.....	44
Figura 3-27. Condiciones de borde de la geometría del sistema de escape.....	44
Figura 3-28. Generación de la malla del sistema de escape.....	45
Figura 3-29. Mallado del dominio del fluido.....	46
Figura 3-30. Mallado de la tubería del sistema de escape.....	46
Figura 3-31. Mallado del conjunto del sistema de escape.....	47
Figura 3-32. Criterios de aceptación de la calidad de malla.....	47
Figura 3-33. Procesamiento y solución del modelo CFD para el flujo de gases combustionados.....	48
Figura 3-34 Simulación de la trayectoria del flujo de gases de escape.....	49
Figura 4-1 Prueba de estanqueidad del sistema de escape en el modelo CFD.....	51
Figura 4-2. Secuencia de la simulación de flujo en el pre-silenciador.....	53
Figura 4-3. Secuencia de la simulación de flujo en la tubería del sistema.....	54
Figura 4-4. Secuencia de la simulación de flujo en el silenciador del sistema.....	55
Figura 4-5. Simulación de la trayectoria del fluido en el sistema de escape.....	55
Figura 4-6. Secuencia de la simulación de flujo en el pre-silenciador.....	56
Figura 4-7. Secuencia de la simulación de flujo en la tubería del sistema.....	57
Figura 4-8. Secuencia de la simulación de flujo en el silenciador del sistema.....	58
Figura 4-9. Simulación de la trayectoria del fluido en el sistema de escape.....	58
Figura 4-10. Secuencia de la simulación de flujo en el pre-silenciador.....	59

Figura 4-11. Secuencia de la simulación de flujo en la tubería del sistema. ....	60
Figura 4-12. Secuencia de la simulación de flujo en el silenciador del sistema. ....	61
Figura 4-13. Simulación de la trayectoria del fluido en el sistema de escape. ....	61
Figura 4-14. Simulación del comportamiento del fluido en el sistema en ralentí. ....	62
Figura 4-15. Simulación del comportamiento del fluido a media carga. ....	63
Figura 4-16. Simulación del comportamiento del fluido en el sistema a plena carga. ...	63
Figura 4-17. Simulación del comportamiento del fluido en el resonador de Helmholtz en ralentí. ....	64
Figura 4-18. Simulación del comportamiento del fluido en el resonador de Helmholtz a media carga. ....	64
Figura 4-19. Simulación del comportamiento del fluido en el resonador de Helmholtz a plena carga. ....	64

## LISTA DE GRÁFICOS

	<b>Pág.</b>
Gráfico 4-1 Comparación de los valores calculados y CFD.....	74
Gráfico 4-2 Comparación de errores .....	79

## **LISTA DE ABREVIACIONES**

<b>2D</b>	Dos Dimensiones
<b>3D</b>	Tres Dimensiones
<b>AISI</b>	Instituto Americano del Hierro y el Acero
<b>CAD</b>	Diseño Asistido por Computador
<b>CAE</b>	Ingeniería Asistida por Computadora
<b>CFD</b>	Dinámica Computacional de Fluidos
<b>INEN</b>	Instituto Ecuatoriano de Normalización
<b>MEF</b>	Método de los Elementos Finitos
<b>STL</b>	Lenguaje Estándar del Triangulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b><i>m</i></b>	Flujo másico	$kg/s$
<b><i>Ḃ</i></b>	Flujo volumétrico	$m^3/s$
<b>V</b>	Velocidad promedio del fluido	m/s
<b>A</b>	Área	$m^2$
<b><i>ρ</i></b>	Densidad	$kg/m^3$
<b><i>v</i></b>	Volumen específico	$m^3/kg$
<b>P</b>	Presión	Pa
<b>M</b>	Masa molar	Kg/mol
<b>R</b>	Constante universal de los gases	J/°K*mol
<b>T</b>	Temperatura	°K

## **LISTA DE ANEXOS**

- A** NORMA QCCJT003-2014 de sistemas de escape del modelo M4.
  
- B** Carta de conformidad emitida por CIAUTO S.A

## RESUMEN

Para el diseño y validación del sistema de escape del vehículo modelo M4 de la marca GREAT WALL, tramo comprendido entre el pre-silenciador y silenciador, se siguieron varias etapas como: el levantamiento de planos y aplicación de ingeniería inversa, para luego digitalizar la geometría del sistema en un software CAD y así obtener el modelo virtual para su posterior análisis a través de la dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el software ANSYS - FLUENT. Los parámetros de ingreso para el modelo CFD fueron tomados directamente en las instalaciones de la empresa ensambladora CIAUTO S.A., los cuales fueron: velocidad, temperatura y flujo volumétrico de los gases combustionados, medidos a la salida del catalizador y en tres principales fases de funcionamiento del motor: ralentí, media y plena carga. Una vez ingresado los parámetros necesarios para realizar la simulación del modelo CFD, se logró visualizar las trayectorias de los gases combustionados y los puntos críticos; luego se realizó la validación del sistema de escape a través de la comparación de resultados obtenidos mediante el modelo CFD y mediante cálculos analíticos frente a los valores reales tomados a la salida del sistema de escape. Además se realizaron las simulaciones de estanqueidad y prueba de fuga establecidas en la norma QCCJT003-2014 para determinar la fiabilidad del sistema. Mediante la comparación de errores obtenidos en los tres métodos se logró evaluar que el sistema cumple con lo establecido en la norma por tanto es fiable el modelo utilizado en el vehículo M4.

PALABRAS CLAVE: <ANSYS – FLUENT (SOFTWARE)>, <DISEÑO ASISTIDO POR COMPUTADORA (CAD)>, <DINAMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS (CFD)>, <INGENIERIA INVERSA>, <SISTEMA DE ESCAPE>.

## **ABSTRACT**

For the design and validation of the exhaust system of the vehicle model M4 of the GREAT WALL brand, section included between the pre-muffler, several stages were suggested: the lifting of plans and applications of reverse engineering, then, to digitize the system geometry of CAD software and to obtain the virtual model for its later analysis through the computational fluid dynamics (CFD), using the software ANSYS-FLUENT. The input parameters for the CFD model were taken directly from the installations of the CIAUTP S.A. assembly company, which were: velocity, temperature and volumetric flow of the combustion gases, measured at the exit of the catalyst and in three main phases of engine operation: slingshot, measurement and full load. After entering the necessary parameters to perform the simulation of the CFD model, it was possible to visualize the trajectories of the combustion gases and the critical points; then the exhaust system validation was performed through the comparison of results obtained by the CFD model and by analytical calculation against the actual values taken at the exit of the exhaust system. In addition, the leakage and leakage tests established in QCJT003-2014 were used to determine the reliability of the system. By means of the comparison of obtained errors in the three methods, it was possible to evaluate that the system complies with the standard, so the model used in the M4 vehicle is reliable.

**KEYWORDS:** <ANSYS - FLUENT (SOFTWARE)>, <COMPUTER-AIDED DESIGN (CAD)>, <COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS (CFD)>, <REVERSE ENGINEERING>, < EXHAUST PIPE SYSTEM >.

# CAPÍTULO I

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

La ensambladora de vehículos CIAUTO S.A, de la empresa GREAT WALL, posee una moderna infraestructura ubicada en el norte de la ciudad de Ambato en la provincia de Tungurahua, la misma que inició sus operaciones en febrero del 2013.

Debido a la excesiva importación de autopartes, la ensambladora CIAUTO S.A utiliza en sus vehículos componentes nacionales, impulsando la producción de autopartes en el país, de donde surge la necesidad de verificar la conformidad de sus autopartes.

Uno de los componentes nacionales, son los sistemas de escape, específicamente el pre-silenciador y el silenciador, los mismos que son ensamblados en los diferentes modelos de vehículos de la marca GREAT WALL, por tal razón se propone el estudio mediante la aplicación (CFD) para verificar su funcionalidad.

El presente trabajo de titulación se desarrollará a partir de los datos tomados de velocidad, temperatura y flujo volumétrico de los gases combustionados a la salida del convertidor catalítico, del vehículo M4 de la marca GREAT WALL, los mismos que serán indispensables para el desarrollo del modelo CFD.

La finalidad del presente trabajo es comparar los resultados obtenidos del modelo CFD y calculados analíticamente frente a los valores medidos a la salida del sistema de escape. Se espera que los resultados de la comparación sean coherentes, para la aceptación del sistema de escape y su utilización en el modelo de vehículos M4, aumentando la oportunidad a los productores nacionales de sistemas de escapes de insertar sus productos de calidad en los vehículos ensamblados en el país.

## **1.2 Problematización**

El cambio de la matriz productiva de nuestro país, motiva a innovar la industria automotriz apostando a la producción de autopartes que pueden ser insertadas en los vehículos ensamblados por empresas nacionales.

La empresa de Ambato, CIAUTO, ensamblador de vehículos de la marca GREAT WALL, aporta a este cambio, implementando componentes nacionales a todos los modelos de sus vehículos, por lo que debe asegurar la fiabilidad de los mismos. El sistema de escape al igual que otros componentes, debe ser verificado para que cumpla con las respectivas especificaciones descritas en la norma QCCJT003-2014.

Normalmente los ensayos experimentales que se realizan a los sistemas de escape, requieren de mucho tiempo y dinero, aspectos que en ocasiones se ven desperdiciados si dicho ensayo no es realizado correctamente. El modelo CFD permite ahorrar tiempo y dinero, ya que recrea de forma virtual lo que sucede en el ensayo experimental, lo cual permite mejorar el diseño o rediseñar los sistemas de escape.

Por tal motivo es necesario analizarlo a través de un modelo CFD el cual proporciona herramientas de simulación de flujo de fluidos que ayudan a predecir el comportamiento de los elementos y/o componentes y optimizar y validar los diseños antes de su fabricación.

### **1.3 Justificación**

El gobierno ecuatoriano ha establecido incentivos para incrementar el contenido ecuatoriano de partes en el ensamble de vehículos y así promover a la industria autopartista nacional. Se busca que ésta sea más integrada y sólida al tiempo que logre incrementar la participación de autopartes ecuatorianas en la producción de vehículos de un promedio actual de 13% hasta un 40%.

A corto y mediano plazo se estima que se requerirán componentes locales como radiadores, sistemas de cableado (arneses), pinturas, parabrisas, lunetas, tambores y discos de freno, telas, convertidores catalíticos, sistemas de escape, entre otros.

Como una manera de aportar al desarrollo del país y con el fin de dar solución a los diferentes problemas que se presentan en la industria automotriz nacional, La Escuela Superior Politécnica de Chimborazo con su Escuela de Ingeniería Automotriz en acuerdo con la empresa ensambladora de vehículos CIAUTO, ha propuesto diferentes temas de titulación en base a los problemas que se presentan dentro de la misma, uno de ellos es verificar la fiabilidad del sistema de escape, de fabricación nacional, del modelo de vehículo M4, de la marca GREAT WALL, mediante un modelo CFD (Dinámica de Fluidos Computacional), el mismo que servirá para innovar y agilizar el diseño de los futuros sistemas de escape y para mejorar los existentes, incluir un modelo CFD permite optimizar el costo y tiempo que conlleva realizar un modelo experimental.

Para llegar a este objetivo la empresa de Ambato, CIAUTO, ensamblador en Ecuador de vehículos de marca GREAT WALL, exige el cumplimiento de los más altos estándares de calidad en las todas las partes que integran sus vehículos. Además Pietro Pilo, gerente de esta empresa, afirmó que CIAUTO incorporará el 40% de componentes nacionales hasta el 2017 en su producción de pick ups, siendo uno de los componentes el sistema de escape.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1** *Objetivo general.*

Diseñar y validar un modelo computacional que permita evaluar el cumplimiento de la norma QCCJT003-2014 de sistemas de escape del modelo M4 para CIAUTO AMBATO.

### **1.4.2** *Objetivos específicos:*

- Determinar la velocidad, temperatura y flujo volumétrico de los gases combustionados, a la salida del convertidor catalítico del vehículo M4, mediante la toma de datos a través de instrumentos de medición, para su posterior estudio en el modelo CFD.
- Modelar el pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4 mediante un software CAD para obtener digitalmente los componentes a estudiar.
- Realizar la simulación del comportamiento de los gases de escape mediante el modelo CFD para determinar el flujo volumétrico saliente al final del silenciador.
- Comparar el estudio digital con los cálculos realizados mediante herramientas estadísticas para determinar la similitud de datos.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Marco conceptual

*Sistema de escape.* Es una parte esencial del auto pues desempeña dos funciones vitales: expulsa los peligrosos gases de la combustión fuera del auto y reduce el ruido que producen estos al momento de ser arrojados. (TODOAutos)

*Gases de escape.* Se denominan gases de escape al material de residuo en forma de gas que ya no tiene utilidad y que se genera como consecuencia de un proceso de combustión. En el caso de los motores de combustión se ha acuñado el término "gas de escape". (NGK)

*Flujo másico.* Es la velocidad a la que la masa de una sustancia pasa a través de una superficie dada. (MEZA, 2013)

*Flujo volumétrico.* Es el volumen de fluido que pasa por una superficie dada en un tiempo determinado. (MEZA, 2013)

*Diseño.* Es una actividad que se proyecta hacia la solución de problemas planteados por el ser humano en su adaptación al medio que lo rodea, para la satisfacción de sus necesidades, para lo cual utiliza recursos como la tecnología CAD/CAE/CAM. Estas tecnologías se vienen aplicando a través de los métodos de la ingeniería concurrente. La técnica más desarrollada en la ingeniería asistida por computador (CAE), es la aplicación de los análisis por elementos finitos (FEA), que con la mejora de los equipos de cómputo se ha convertido en técnicas accesibles para todos los usuarios. Estas técnicas son usadas industrialmente desde el diseño hasta la fabricación consiguiendo optimizar costos, calidad, tiempo, seguridad, etc. (ROJAS, 2006)

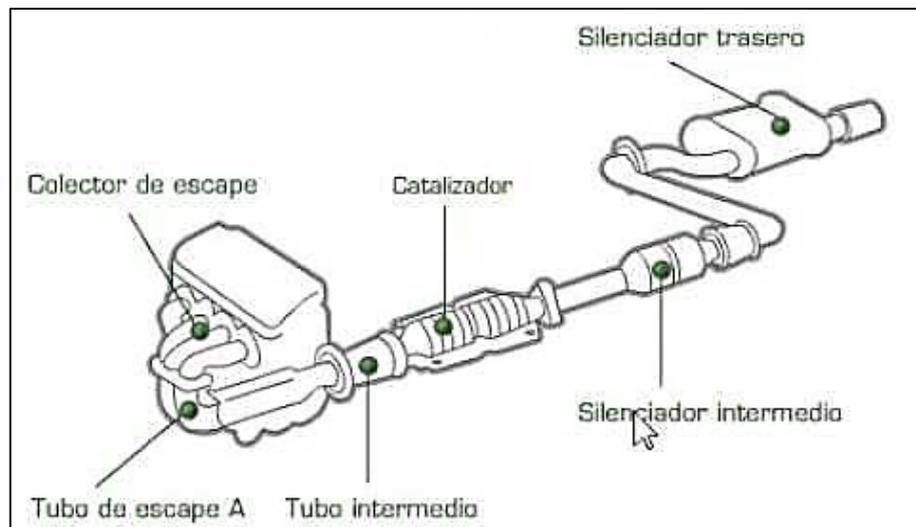
*Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).* Es la ciencia encargada de hallar una solución numérica de las ecuaciones que gobiernan el flujo de fluido en un dominio espacial y temporal. (PEREZ)

*Método de volúmenes finitos.* Este método discretiza las ecuaciones en cada uno de los poliedros del dominio, en los que previamente se realiza una discretización espacial, la misma que se lleva a cabo directamente en el espacio físico del problema, por lo cual no hay problemas en la transformación de sistemas de coordenadas, por tal motivo es el más empleado para la resolución de flujos con geometrías complejas. (CFD)

## 2.2 Marco teórico

**2.2.1 Sistema de Escape.** El sistema de escape del automóvil se encarga de la evacuación de los gases producto de la combustión a la atmósfera, teniendo en cuenta que se deben mitigar tanto el ruido como los gases nocivos para la salud. (GARCÍA)

Figura 2-1. Sistema de escape.



Fuente: [https://i.ytimg.com/vi/qcYch3bf4\\_0/hqdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/qcYch3bf4_0/hqdefault.jpg)

### 2.2.2 Partes del sistema de escape.

**2.2.2.1 Colector de escape.** Es un conjunto de tubos que hacen converger los gases de escape a un tubo único. Este debe ser resistente a la corrosión, duradero y sobre todo debe soportar altas temperaturas, lo que generalmente se logra con un proceso de aluminación, silicación, cromización o la combinación de estos procesos sobre un tubo de acero o hierro fundido aleado, además debe impedir un elevado enfriamiento de los gases calientes, por eso, es común que sean de paredes metálicas gruesas. La forma y longitud de los tubos del múltiple de escape pueden jugar un papel notable a la hora de favorecer la limpieza

del cilindro, y su diseño en particular está relacionado con las características del motor. (GARCÍA)

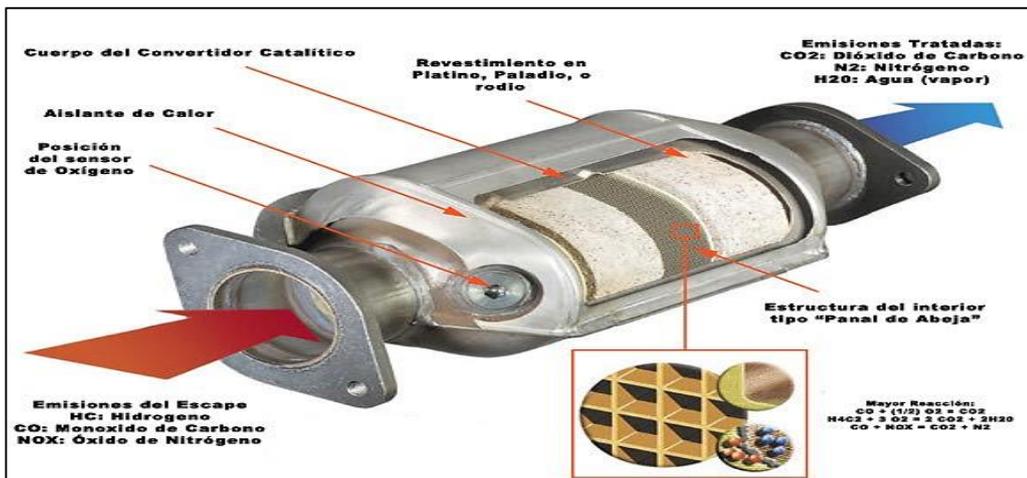
Figura 2-2. Colector de escape.



Fuente: <https://www.ramirezmoto.es/Colector-de-escape-Akrapovic-E-B10R5/32862.html>

**2.2.2.1 Convertidor catalítico.** Se instala en el tubo de escape, y tiene como función específica limpiar los gases de escape producto de la combustión del motor, de la mayor cantidad de sustancias nocivas para el medio ambiente. Este dispositivo transforma el monóxido de carbono (CO), el combustible no quemado (HCx) y los óxidos de nitrógeno (NOx) en dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), agua y nitrógeno, sustancias mucho más amables con el planeta. El fenómeno se produce gracias a la acción catalizadora de metales semipreciosos: paladio, rodio y platino, que se incorporan en el interior de este dispositivo. El catalizador tiene una larga vida, siempre y cuando no se utilice gasolina con plomo, que le hace perder sus cualidades. (MARÍN)

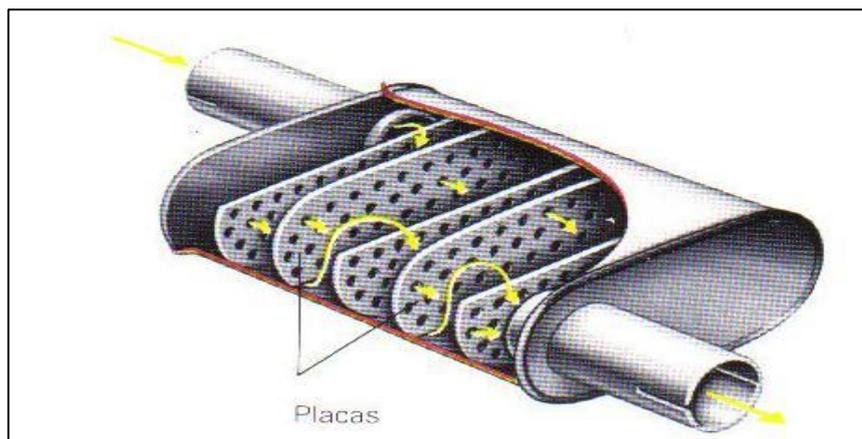
Figura 2-3. Convertidor catalítico.



Fuente: [http://www.autobodymagazine.com.mx/abm\\_previo/2014/09/deteccion-del-mal-funcionamiento-del-convertidor-catalitico4/](http://www.autobodymagazine.com.mx/abm_previo/2014/09/deteccion-del-mal-funcionamiento-del-convertidor-catalitico4/)

2.2.2.2 *Silenciador*. Este elemento tiene el objetivo de amortiguar el ruido que se produce por las ondas mecánicas de choque generadas cuando se abre la válvula de escape. Hay infinidad de diseños de silenciadores con mejor o peor eficiencia acústica, pero todos sin excepción, lo que buscan es convertir el flujo pulsante de ondas de choque de los gases de escape a un flujo continuo y silencioso. Para ello se utiliza la cualidad de las ondas de reflejarse e interferirse. (GARCÍA)

Figura 2-4. Silenciador.



Fuente: <https://luisarteaga.wikispaces.com/MOFLE+SILENCIADOR>

2.2.2.3 *Resonador*. El resonador es otro dispositivo con un funcionamiento análogo al silenciador, y que refuerza el trabajo de eliminación de ruidos para obtener un escape más silencioso. Hay una variante del resonador que hace todo lo contrario, lo que busca es

cambiar el patrón de ruido y hacerlo de mayor volumen y con una frecuencia modificada que da la impresión psicológica de un motor más potente. Lo más común es que se coloquen en el lugar del tubo de cola. (GARCÍA)

Figura 2-5. Resonador.

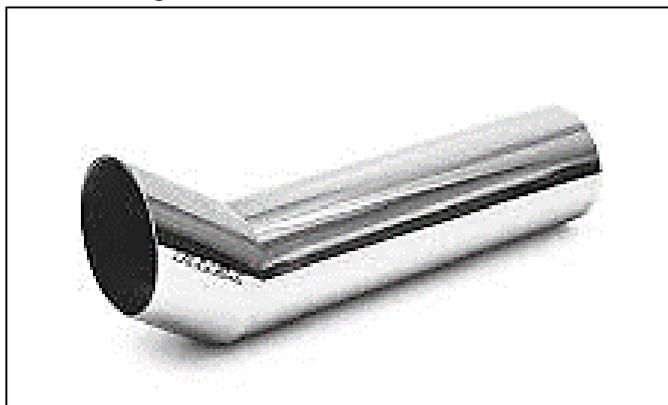


Fuente:

[http://accesoriosazteca.com/index.php?id\\_product=12734&controller=product](http://accesoriosazteca.com/index.php?id_product=12734&controller=product)

2.2.2.4 *Tubo de cola o salida.* Durante su trayectoria a lo largo de todo el laberinto anterior en el tubo de escape, los gases se han enfriado, este enfriamiento, en ciertos casos de funcionamiento a poca potencia, permite que los gases puedan llegar a una temperatura menor de 100°C dentro del tubo de escape, lo que implica que el abundante vapor de agua que contienen pueda condensarse como agua líquida, más probablemente en el tubo de cola que está al final. El agua en este estado puede formar soluciones con las otras sustancias que contienen los gases de escape, para producir agentes muy corrosivos, preferentemente ácidos: nítrico, con los óxidos de nitrógeno, y sulfúrico, con el dióxido de azufre de las gasolinas que contiene este elemento. Además de este factor funcional, el tubo de cola es el elemento visible del tubo de escape, por estas dos razones esta parte final se construye de materiales vistosos y resistentes a la corrosión. (GARCÍA)

Figura 2-6. Tubo de cola o salida.



Fuente: <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcT6A9BV4otcvifzFDwKlKxRTFcKTh3I89LN1RnyuT-Zro2KOUjY>

### **2.2.3 Silenciador.**

Es una caja generalmente de forma cilíndrica, fabricada en lámina moldeada y soldada, conectada a la tubería del sistema de escape, con múltiples formas y diseños internos. Se encarga de absorber el ruido producido por la violenta descompresión de los gases de escape ocasionados por el funcionamiento del motor. (MARÍN)

### **2.2.4 Tipos de silenciadores.**

**2.2.4.1 Zig-zag.** En este sistema el interior del cilindro está delimitado por varios compartimientos que forman placas, que se oponen al flujo de los gases, bajándoles la intensidad. (MARÍN)

**2.2.4.2 Tubo perforado.** En este sistema las tuberías de entrada y salida están descentradas una con la otra, y se prolongan en el interior del silenciador por medio de huecos pequeños. Por allí cruzan lentamente los gases, para poder salir por el lado opuesto a donde ingresaron. (MARÍN)

**2.2.4.3 Paso directo.** Tiene un tubo que atraviesa el silenciador de extremo a extremo, pero tiene orificios en la parte oculta dentro de la carcasa, allí hay lana de vidrio que se encarga de absorber el ruido y la resonancia de los gases. Este sistema tiene el inconveniente de guardar humedad en su interior, facilitando la corrosión. (MARÍN)

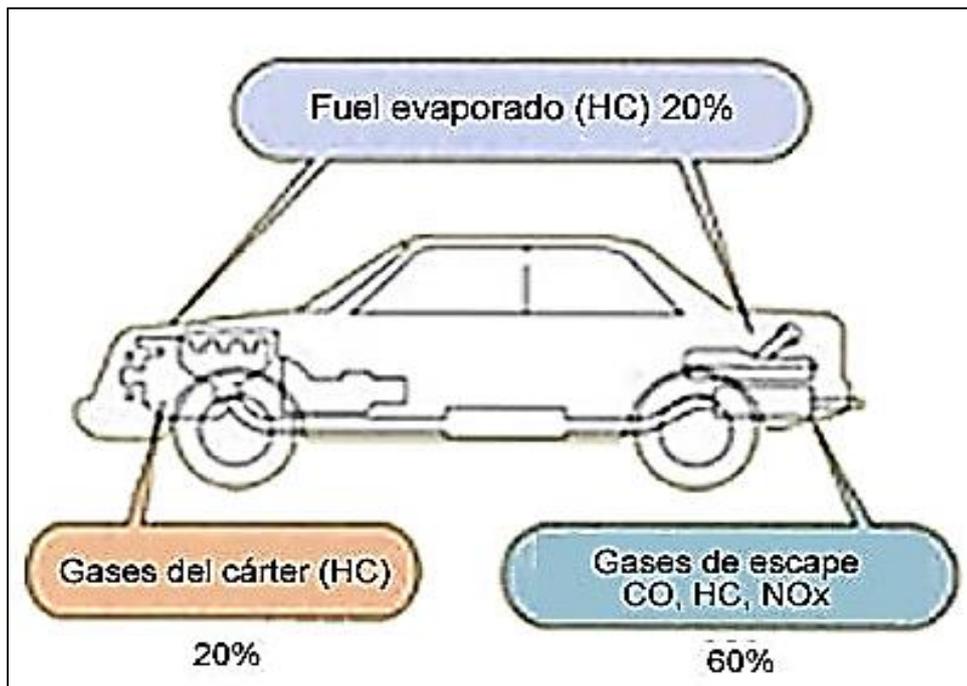
### **2.2.5 Gases de escape.**

Los gases emitidos por un motor de combustión interna de gasolina son, principalmente, de dos tipos: inofensivos y contaminantes. Los primeros están formados, principalmente, por nitrógeno ( $N_2$ ), Oxígeno ( $O_2$ ), vapor de agua ( $H_2O$ ) e hidrógeno. Los segundos o contaminantes están formados, principalmente, por el monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ). (ARROBA, 2012)

### 2.2.6 Gases de escape contaminantes.

Los principales gases contaminantes productos de la combustión de la mezcla aire-combustible en un motor a gasolina son: Monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) e hidrocarburos (HC)

Figura 2-7. Gases contaminantes que genera el vehículo.



Fuente: <http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm>

2.2.6.1 *Monóxido de carbono (CO)*. Este gas se origina por la combustión incompleta del combustible. Es incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico. En la sangre bloquea el transporte de oxígeno por parte de los glóbulos rojos, reduciendo la oxigenación de los tejidos celulares. Si su concentración en la sangre alcanza un 50% produce asfixia y consecuentemente la muerte. (ARROBA, 2012)

2.2.6.2 *Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )*. Se originan al existir una alta presión, alta temperatura y exceso de oxígeno durante la combustión en el motor. El monóxido de nitrógeno (NO), es un gas incoloro, inodoro e insípido que al combinarse con el oxígeno presente en el aire, es transformado en dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), que es un gas de color pardo rojizo y de olor muy penetrante, que provoca una fuerte irritación en los órganos respiratorios. (MEGANEBOY, 2014)

2.2.6.3 *Hidrocarburos (HC)*. Son residuos o restos que se originan por una combustión incompleta en el motor, estos son los principales contribuyentes del smog, que es altamente tóxico y perjudicial para la salud. (ARROBA, 2012)

2.2.6.4 *Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)*. Es un gas incoloro no tóxico, que se origina por la combustión de combustibles compuestos de carbono. Es un gas perjudicial ya que afecta directamente a la atmósfera del planeta, la misma que provee de oxígeno y sirve de protección contra los rayos ultra violetas. Las emisiones del dióxido de carbono son el tema de mayor preocupación dentro de lo que es el calentamiento global puesto que es un gas que produce efecto invernadero o calentamiento global. (MEGANEBROY, 2014)

## 2.2.7 *Definiciones de los parámetros utilizados para evaluar el diseño de un sistema de escape.*

2.2.7.1 *Contrapresión*. La obligación de que los vehículos de nueva generación incorporen un catalizador de gases en el sistema de escape para evitar contaminar el ambiente ha influido en las características de funcionamiento y rendimiento del motor. Tras numerosos estudios se ha descubierto que los gases de los vehículos antiguos que no incorporaban un catalizador alcanzaban una contrapresión de 0,2 y 0,3 bares en los escapes, hasta 0,5 y 0,6 bares que están alcanzando algunos motores actuales sobrealimentados de par constante. Estas pérdidas por contrapresión en los actuales motores obligan a los fabricantes a montar colectores de gran calidad, capaces de soportar fenómenos de cavitación a alta temperatura. (SEGURA)

La misión que tienen asignados los escapes es amortiguar el ruido que produce el motor por las bruscas combustiones de los cilindros. A parte de amortiguar ruidos, el escape tiene otra misión muy importante como es la de mejorar el llenado del cilindro y permitir un aumento del régimen máximo en función de las contrapresiones. Dependiendo de la contrapresión en el escape el rendimiento del motor puede verse alterado perdiendo potencia y produciendo más ruido del debido, dando lugar a efectos indeseados como es un aumento excesivo de la temperatura del motor y un mayor consumo de combustible. Para hacernos una idea 0,2 bares de contrapresión en el escape suponen una pérdida de potencia de un 9,3% llegando a una pérdida del 18,5% al alcanzar los 0,4 bares. (SEGURA)

2.2.7.2 *Presión de los gases de escape a la salida del motor.* Los gases de escape cuando están preparados para ser expulsados de la cámara de combustión se encuentran a una temperatura superior a los 500°C y a una presión aproximada de 5 bares, dichos parámetros van disminuyendo a medida que la cámara se va vaciando es decir cuando los gases entran al escape, siendo la temperatura de 500°C y la presión de 1,5 a 1,1bar dependiendo de las rpm y carga del motor. (CABRERA, 2016)

2.2.7.3 *Las pérdidas de carga.* Las pérdidas de carga en el movimiento de un fluido o un gas reales se hallan en el proceso de transformación irreversible de la energía en calor. Dicha transformación de energía se da como consecuencia de la viscosidad del fluido en movimiento. Se distinguen dos tipos de pérdidas:

- Las pérdidas por fricción.
- Las pérdidas singulares. (SEGURA)

2.2.7.4 *Las pérdidas de carga por fricción.* Las pérdidas por fricción son provocadas por la viscosidad de los fluidos reales que actúan en dicho sistema asociados a un peculiar fenómeno que aparece cuando el fluido se encuentra en movimiento y aparece un intercambio de la cantidad de movimiento (flujo laminar) o entre diversas partículas (flujo turbulento) de capas cercanas de fluido que se mueven a velocidades diferentes. (SEGURA)

2.2.7.5 *Las pérdidas de carga singulares.* Las pérdidas singulares o accidentales se producen cuando existe perturbación del flujo laminar y formación de torbellinos en lugares donde hay cambios de sección o dirección del flujo, o presencia de obstáculos como la entrada en un tubo taladrado, filtrado a través de cuerpos porosos y codos. (SEGURA)

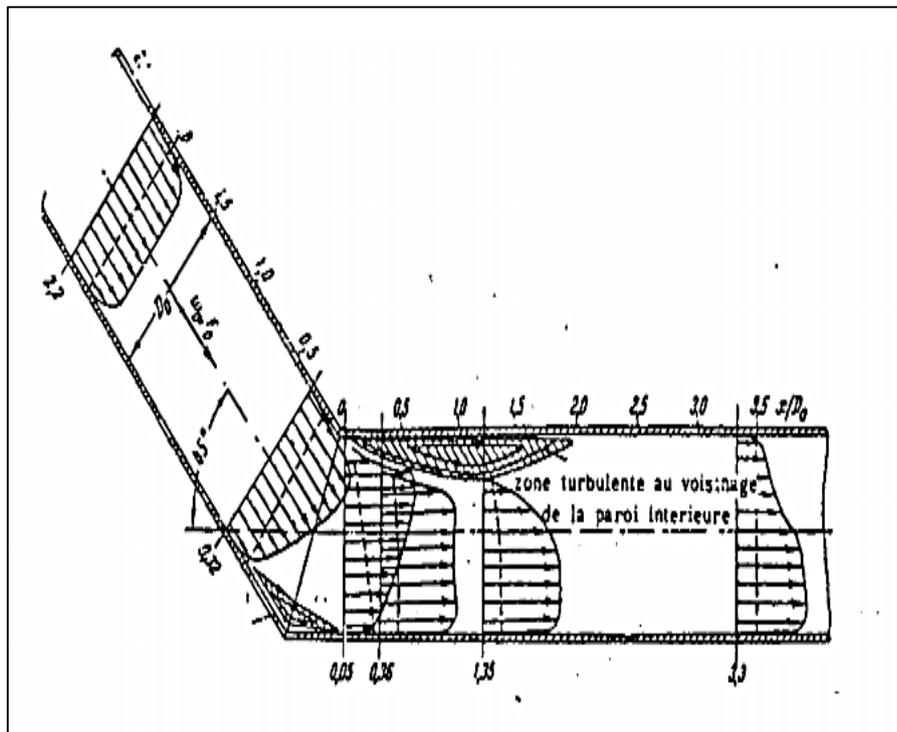
2.2.7.6 *Magnitudes características del fluido.* Medir perdidas de presión real en sistema de escape es todo un reto ya que no es fácil simular las verdaderas condiciones de funcionamiento del motor, igual que sucede con el posterior análisis teórico de los resultados obtenidos. En el análisis se debe distinguir dos casos: el caso del fluido compresible y el del incompresible y esta distinción se realizará teniendo en cuenta las variaciones posibles de la densidad del fluido. Si la densidad permanece constante se puede considerar al fluido como incompresible, por supuesto en el caso contrario se

considerará compresible. En este caso se tratará con aire quemado, considerando al flujo como incompresible. Esta consideración facilita mucho los cálculos y el posterior análisis. (SEGURA)

2.2.7.7 *Codos*. En conducciones y canales curvos, por la causa del cambio de dirección del flujo, aparecen fuerzas centrífugas dirigidas desde el centro de la curvatura hacia la pared exterior. En este caso tenemos un aumento de la presión alrededor de la pared exterior y una disminución en la pared interior, cuando el flujo pasa de la conducción rectilínea a la parte acodada, la velocidad del flujo se hace mucho más débil hacia la pared interior y más fuerte hacia la exterior. (SEGURA)

Cuando un flujo pasa por un codo, ya sea en régimen laminar o turbulento, aparece en la curva un fenómeno conocido como “flujo secundario”. Este es un movimiento de rotación perpendicular al eje del conducto, que se superpone al movimiento principal en la misma dirección del eje. Las resistencias causadas por la fricción de las paredes y la acción de la fuerza centrífuga combinadas producen la rotación, dando a las líneas de corriente una forma helicoidal. (SEGURA)

Figura 2-8. Paso del flujo de gases combustionados por un codo del sistema.



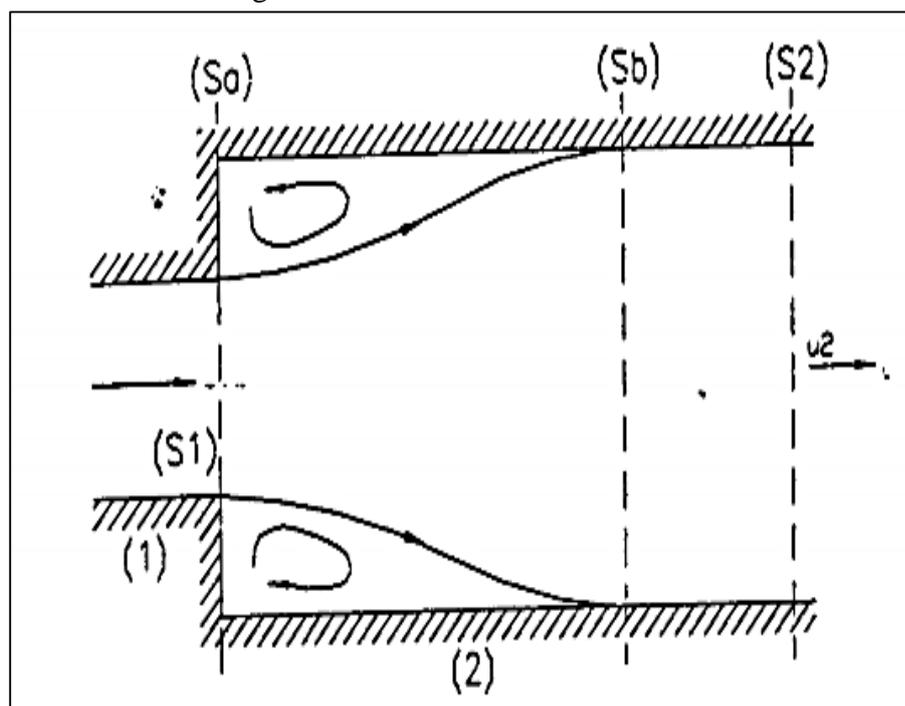
Fuente: <http://www.todomecanica.com/blog/69-contrapresion-escape.html>.

2.2.7.8 *Perdidas de carga en silenciadores.* La pérdida de presión que se produce en un silenciador, se puede asociar a:

- Rozamiento en las paredes, que depende de la rugosidad de la superficie interior, diámetro interior, de la velocidad y de la viscosidad del fluido en cuestión.
- Cambios de dirección del flujo.
- Restricciones en el paso del flujo. (SEGURA)

2.2.7.9 *Cambio de sección brusca.* Ensanchamiento brusco.- Si tomamos un conductor que tiene una sección determinada y desemboca en un conducto con una mayor sección, como consecuencia de ensanchamiento brusco de sección se genera una zona de turbulencia entre las secciones primera y segunda que se conoce con el nombre de separación de flujo. La aparición de esta zona en la que se produce turbulencia se debe a la redistribución de energía en el flujo, necesaria para que se pueda producir un re-ataque de fluidos a las paredes de la sección. El efecto de la formación de la zona de turbulencia en un ensanchamiento brusco de sección tiene como consecuencia la disipación de energía. Esta pérdida de energía por turbulencia junto con las pérdidas originadas en el re-ataque constituye la pérdida asociada de energía a un ensanchamiento brusco de sección. (SEGURA)

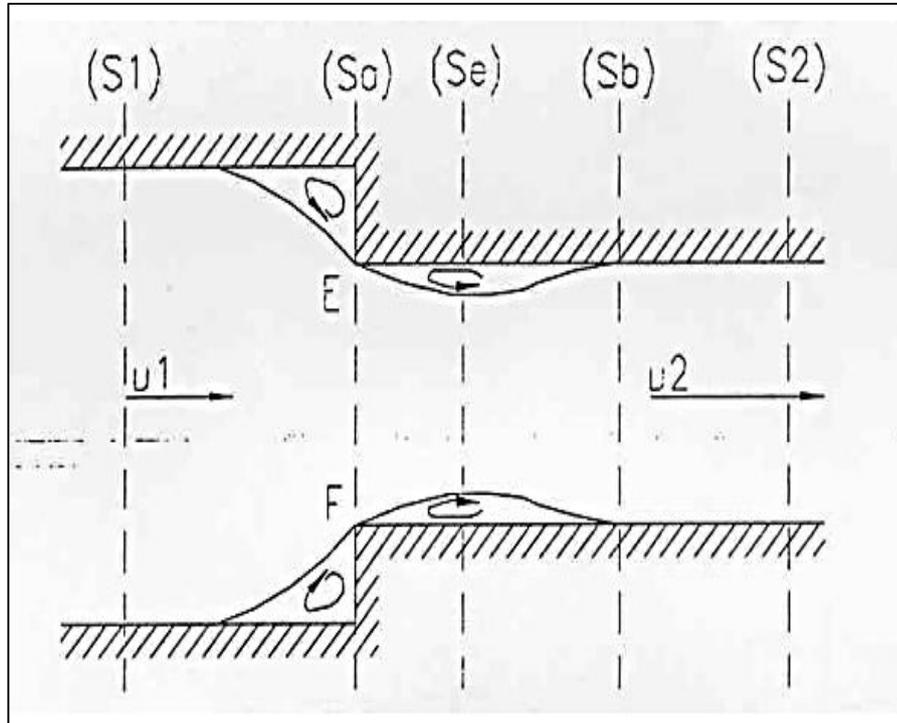
Figura 2-9. Ensanchamiento brusco.



Fuente: <http://www.todomecanica.com/blog/69-contrapresion-escape.html>.

Estrechamiento brusco.- En este caso el fluido pasa de una sección mayor a una menor, dando origen a ligeros torbellinos en las paredes de la tubería de menor sección hasta que fluido ocupe toda su sección. (SEGURA)

Figura 2-10. Estrechamiento brusco.



Fuente: <http://www.todomecanica.com/blog/69-contrapresion-escape.html>.

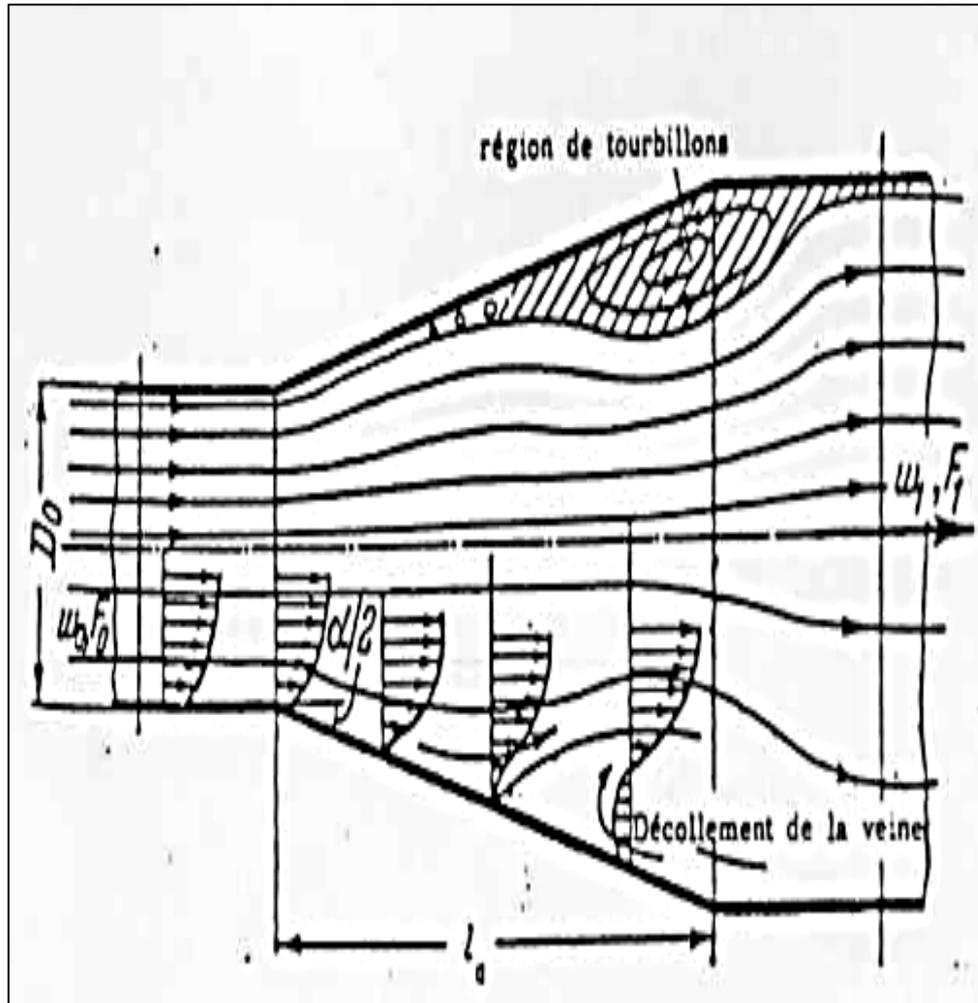
2.2.7.10 *Ensanchamiento y estrechamiento gradual.* Estrechamiento gradual.- En un estrechamiento gradual la presión va disminuyendo a lo largo del flujo, de modo que el flujo se pega a las paredes y la pérdida de presión es debida, única y exclusivamente al rozamiento con las paredes. (SEGURA)

Ensanchamiento gradual.- En un ensanchamiento gradual o difusor, la pérdida de carga puede ser importante. La energía cinética del fluido se transforma en energía de presión. La presión aumenta a lo largo del flujo y se producen despegues de fluido de la pared del conducto. (SEGURA)

En un tubo que se ensancha de esta manera la turbulencia es más grande que en un tubo recto, y por consiguiente, las pérdidas de carga también son mayores. Este fenómeno se puede observar en la siguiente figura. Cuanto mayor sea el ángulo en el vértice del cono

mayor será la pérdida debida al despegue, que es generalmente mayor que la pérdida por rozamiento. (SEGURA)

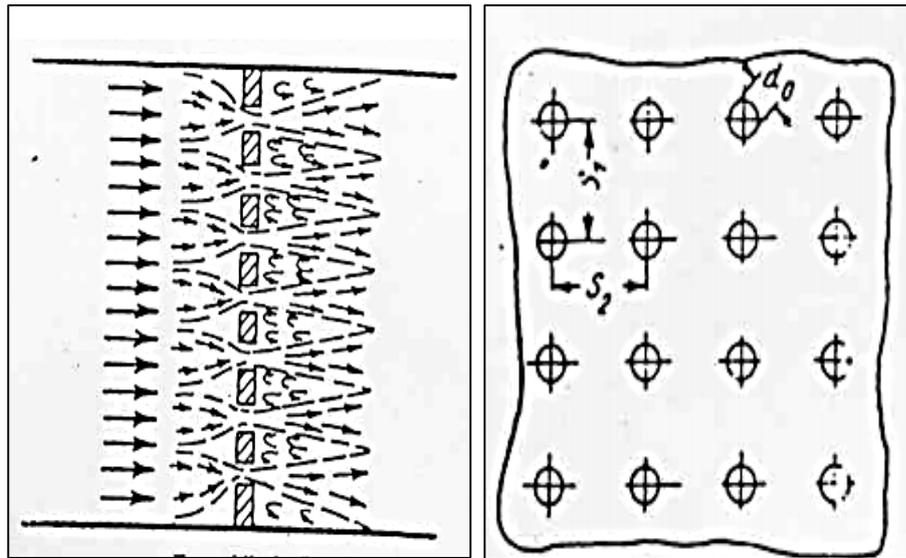
Figura 2-11. Ensanchamiento gradual.



Fuente: <http://www.todomecanica.com/blog/69-contrapresion-escape.html>.

2.2.7.11 *Pérdida de carga en placas perforadas.* Los obstáculos que se encuentran repartidos uniformemente en la sección de un tubo o un canal pueden ser del tipo de una rejilla o placa perforada. Al llegar el flujo a la placa, la corriente de gases se contrae en los agujeros y sale de nuevo al pasarlos pero con una velocidad mayor. Así aparecen las pérdidas, ligadas tanto a la entrada de los agujeros como al ensanchamiento brusco a su salida. (SEGURA)

Figura 2-12. Pérdida de carga en placas perforadas.



Fuente: <http://www.todomecanica.com/blog/69-contrapresion-escape.html>.

### 2.2.8 Flujo másico y flujo volumétrico.

Flujo másico ( $\dot{m}$ ), es la medición directa de una variación de masa en el tiempo, considerando las condiciones del proceso. El flujo másico es equivalente al flujo volumétrico ( $\dot{V}$ ) multiplicado por la densidad. Como la presión y temperatura cambian, el volumen también cambia, causando un cambio en la densidad; pero sin embargo la masa permanece constante. (PASTOR, 2012)

$$\dot{V} = V \times A = V_{prom} \times A \quad (m^3/s)$$

$$\dot{m} = \rho \times V_{prom} \times A = \rho \times V = \frac{\dot{V}}{v} \quad (kg/s)$$

Donde:

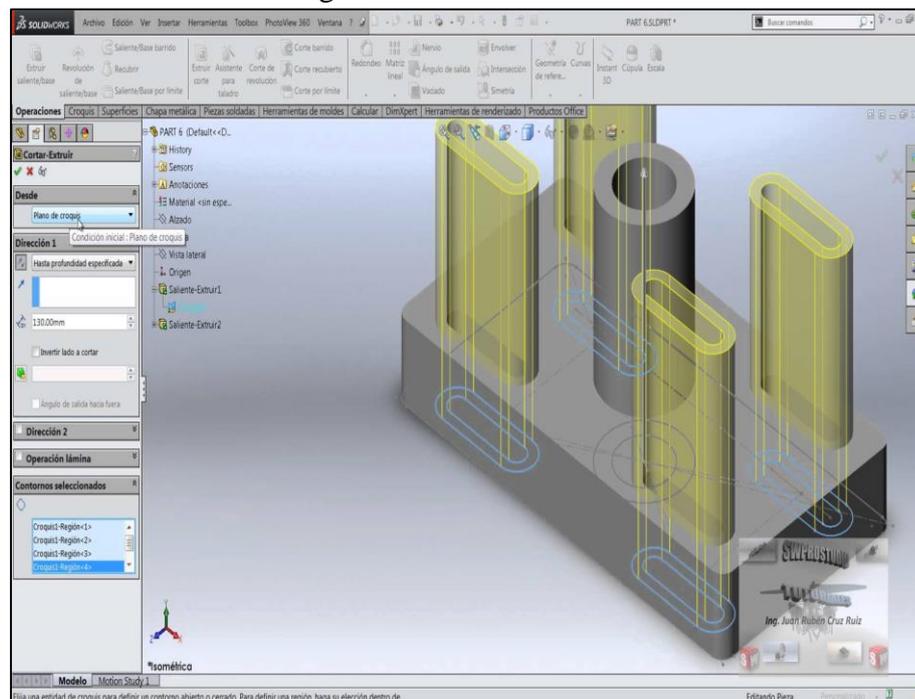
- **V:** Velocidad promedio del fluido.
- **A:** Área
- **$\rho$ :** Densidad
- **v:** Volumen específico (CEPEDA, 2009)

### 2.2.9 CAD (Diseño Asistido por Computadora)

CAD (Computer-aided design), es el uso de programas computacionales para crear representaciones gráficas de objetos físicos ya sea en segunda o tercera dimensión (2D o 3D). El software CAD puede ser especializado para usos y aplicaciones específicas. CAD es ampliamente utilizado para la animación computacional y efectos especiales en películas, publicidad y productos de diferentes industrias, donde el software realiza cálculos para determinar una forma y tamaño óptimo para una variedad de productos y aplicaciones de diseño industrial. (SIEMENS, 2017)

En diseño de industrial y de productos, CAD es utilizado principalmente para la creación de modelos de superficie o sólidos en 3D, o bien, dibujos de componentes físicos basados en vectores en 2D. Sin embargo, CAD también se utiliza en los procesos de ingeniería desde el diseño conceptual y hasta el lay out de productos, a través de fuerza y análisis dinámico de ensambles hasta la definición de métodos de manufactura. Esto le permite al ingeniero analizar interactiva y automáticamente las variantes de diseño, para encontrar el diseño óptimo para manufactura mientras se minimiza el uso de prototipos físicos. (SIEMENS, 2017)

Figura 2-13. Modelo CAD.



Fuente: <https://www.youtube.com/watch?v=5kW5xAdx01o>

Los beneficios del CAD incluyen menores costos de desarrollo de productos, aumento de la productividad, mejora en la calidad del producto y un menor tiempo de lanzamiento al mercado. (SIEMENS, 2017)

- Mejor visualización del producto final, los sub-ensambles parciales y los componentes en un sistema CAD agilizan el proceso de diseño.
- El software CAD ofrece gran exactitud de forma que se reducen los errores.
- El software CAD brinda una documentación más sencilla y robusta del diseño, incluyendo geometría y dimensiones, lista de materiales, etc.
- El software CAD permite una reutilización sencilla de diseños de datos y mejores prácticas. (SIEMENS, 2017)

#### **2.2.10 Ingeniería inversa**

Es el proceso de descubrir los principios tecnológicos de un objeto, herramienta, dispositivo o sistema, mediante el razonamiento abductivo (haciendo conjeturas) de su estructura, función y operación. Dicho de otra manera, se trata de tomar algo, por ejemplo un dispositivo mecánico o electrónico, para analizar su funcionamiento en detalle, con el objetivo de crear un dispositivo que haga la misma tarea o una similar sin copiar los detalles del original. (MEKS, 2014)

La ingeniería inversa tiene muchas aplicaciones en el mundo actual y es aplicada por todo tipo de empresas, de todos los ámbitos tecnológicos. Algunos de los usos principales son:

- Investigar, analizar y comprender la tecnología utilizada por otras naciones o por otras empresas.
- Analizar los productos de la competencia para analizar sin infringen alguna patente de otra empresa.
- Desarrollar productos que sean compatibles con otros productos, sin tener acceso a los detalles técnicos de estos últimos.
- Comprobar la seguridad de un producto. (MEKS, 2014)

Muy a menudo en ingeniería inversa se utilizan escáneres 3D. Estos obtienen imágenes que permitan obtener un modelo en formato digital en cualquier software CAD, y a partir

de este, fabricar las piezas tal como eran originalmente, o también las pueden modificar y mejorar. (AXAYACATL, 2015)

Figura 2-14. Escaneo en 3D de una pieza mecánica.



Fuente: <http://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/134268-Escaner-laser-3D-para-ingenieria-inversa-pruebas-y-control-dim.html>.

Se toma el modelo tridimensional del proceso de escaneado; se realiza el proceso de ingeniería inversa, con lo que se genera un conjunto completo de datos CAD. Para verificar los resultados de la ingeniería inversa, se compara el modelo tridimensional (malla poligonal) con el conjunto de datos inversos (modelo CAD) en una fracción de segundo.

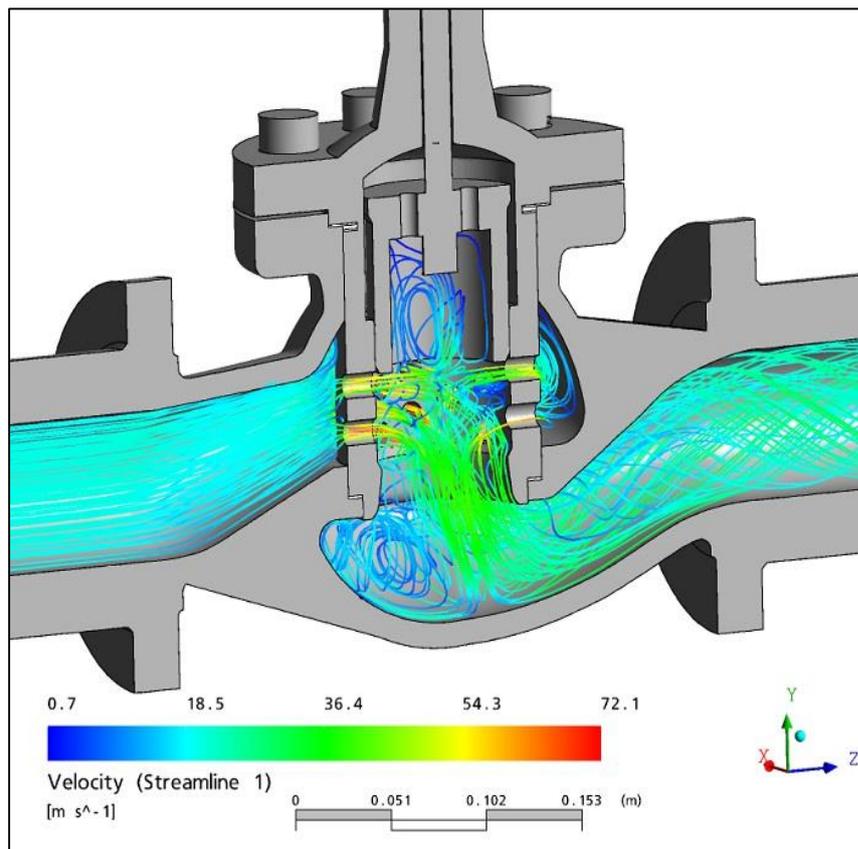
Cualquier desviación entre los dos modelos se visualiza mediante la representación en color falso. Los últimos pasos del proceso de ingeniería inversa son la documentación de las desviaciones identificadas, la conversión del conjunto de datos CAD al modelo tridimensional y la entrega al cliente para la producción del molde y las herramientas. (CEDILLO, 2017)

### 2.2.11 CAE

Ingeniería asistida por computadora (CAE), es el uso de software computacional para simular desempeño y así poder hacer mejoras a los diseños de productos o bien apoyar a la resolución de problemas de ingeniería para una amplia gama de industrias. Esto incluye la simulación, validación y optimización de productos, procesos y herramientas de manufactura. (PRADO, 2012)

Un proceso típico de CAE incluyen pasos de pre-procesado, solución y post-procesado. En la fase de pre-procesado, los ingenieros modelan la geometría y las propiedades físicas del diseño, así como el ambiente en forma de cargas y restricciones aplicadas. En la fase de post-procesado, los resultados se presentan al ingeniero para su revisión. (PRADO, 2012)

Figura 2-15. Procesamiento de la geometría.



Fuente: <http://www.esss.com.br/blog/es/2014/08/engenharia-assistida-por-computador-o-que-e-e-como-funciona/>.

Las aplicaciones CAE soportar una gran variedad de disciplinas y fenómenos de la ingeniería incluyendo:

- Análisis de estrés y dinámica de componentes y ensambles utilizando el análisis de elementos finitos (FEA).
- Análisis Termal y de fluidos utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD).
- Análisis de Cinemática y de dinámica de mecanismos (Dinámica multicuerpos).
- Simulación mecánica de eventos (MES).
- Análisis de control de sistemas.
- Simulación de procesos de manufactura como forja, moldes y troquelados.
- Optimización del proceso del producto. (PRADO, 2012)

### ***2.2.12 Método de elementos finitos.***

Es un método de cálculo numérico para la resolución de ecuaciones diferenciales que se utiliza en diversos problemas de mecánica de sólidos aplicados a la ingeniería y física, sin embargo es un método que no proporciona una solución exacta a un problema dado, sino que posibilita una obtener una solución aproximada que con el juicio ingenieril puede ser aceptada por el calculista con un criterio de aceptación para la solución del problema planteado que se encarga de dividir el cuerpo o estructura dividida en elementos discretos, que establecen condiciones de vínculo, esto genera sistemas de ecuaciones que se resuelve de forma numérica. (uc3m)

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un sistema continuo en un sistema discreto y a la vez esta se transforma en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no. (PEZZOTTI, 2008)

### 2.2.13 *Dinámica de Fluidos computacional (CFD).*

El CFD es una rama de la mecánica de fluidos, la cual tiene una gran variedad de aplicaciones en distintas áreas de la ingeniería y que permite realizar 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 ya que reduce la necesidad de crear prototipos y ahorra tiempo y costes de desarrollo. (SOLIDWORKS)

#### *Ventajas del CFD:*

- Predice las propiedades del fluido con gran detalle.
- Optimiza y valida los diseños antes de su fabricación

#### *Desventajas del CFD:*

- Usuarios con gran experiencia y formación especializada.
- Inversión computacional elevada.
- Alto consumo de recursos computacionales.

#### 2.2.13.1 *Estructura del CFD.* Consta de tres etapas:

##### *Pre-proceso:*

- Definir la geometría o dominio computacional.
- Generar la malla.
- Establecer condiciones iniciales y de frontera.
- Definir las cargas aplicadas sobre el dominio.

##### *Solución:*

- Proceso de discretización.
- Solución del sistema de ecuaciones asociadas al problema.

##### *Post-proceso:*

- Análisis de los resultados.
- Visualización gráfica de las variables que gobiernan el flujo.
- Interpretar los resultados obtenidos.

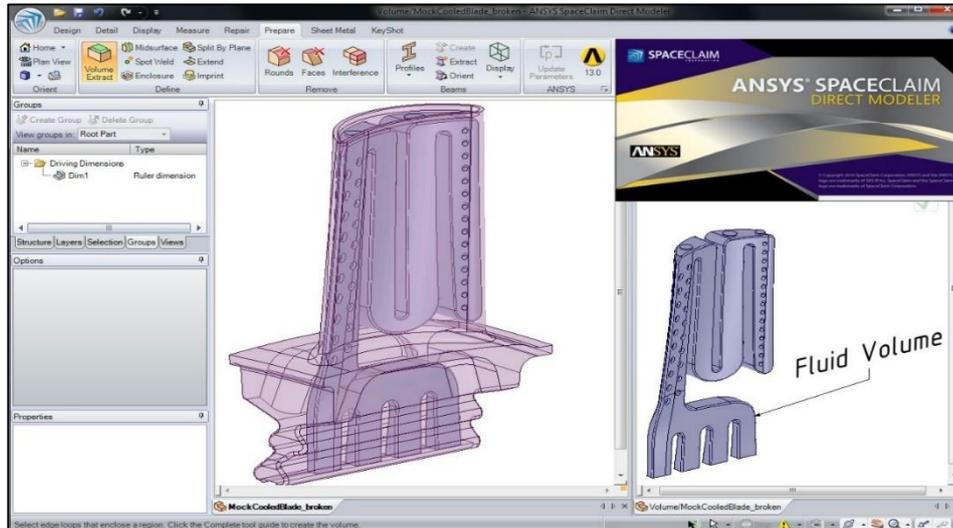
### 2.2.14 ANSYS SpaceClaim

ANSYS SpaceClaim es un software de modelado tridimensional que permite a cualquier analista o ingeniero crear, editar y reparar geometrías sin preocuparse por la tecnología subyacente. Con SpaceClaim, trabajar con el software de modelado 3D se hace rápido, fácil, flexible y gratificante, sin importar en qué parte del flujo de trabajo lo necesite. (SpaceClaim Corporation, 2013)

ANSYS SpaceClaim le permite:

- Trabajar con cualquier geometría, no importa de dónde provenga.
- Concentrarse en la tarea que está a la mano, en lugar de sobreponerse con tecnología complicada.
- Aprender el software en cuestión de semanas en lugar de meses.
- Realizar un retorno de la inversión más rápido de lo esperado. (SpaceClaim Corporation, 2013)

Figura 2-16. Vista de sección de la geometría en spaceclaim.



Fuente: <https://www.fiuxy.co/programas-gratis/4289354-ansys-spaceclaim-2016-sp0-0-a.html>.

Con SpaceClaim, CAE (Computer-aided engineering) impulsa la innovación y el desarrollo de productos desde el inicio del proceso de diseño para acelerar el tiempo de análisis y aumentar la eficiencia en el diseño y producción de productos. (ANSYS, Inc, 2017)

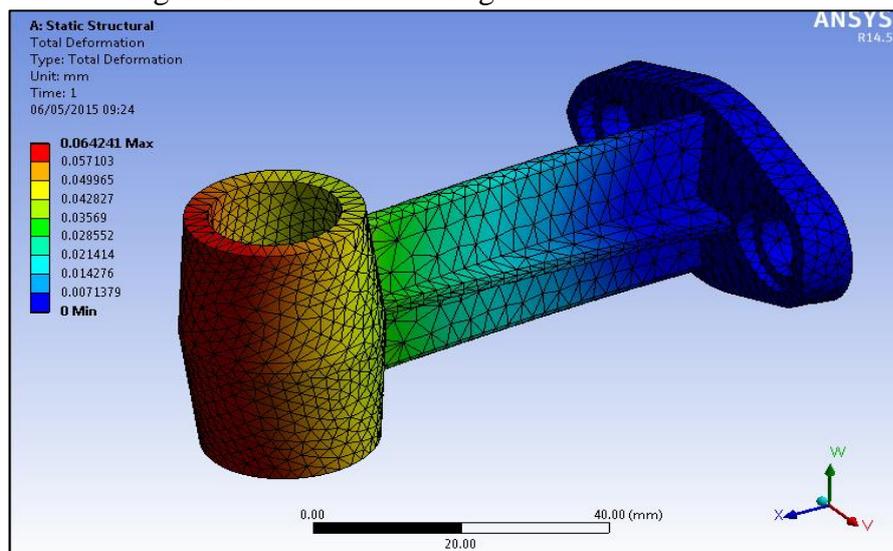
### 2.2.15 Discretización espacial del CFD.

Los esquemas de discretización se clasifican en tres categorías principales: diferencias finitas, volúmenes finitos y elementos finitos. Todos estos métodos requieren una previa discretización geométrica especial para poder realizar la discretización de las ecuaciones que gobiernan el fluido. (BIBING, 2017)

Básicamente, existen dos tipos de mallado:

- *Mallados estructurados*: Las celdas de la malla son cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D.
  - *Mallados no estructurados*: Las celdas de la malla, en este caso, son una mezcla de cuadriláteros y triángulos en 2D y tetraedros y hexaedros en 3D.
- a) *Diferencias finitas*: En este método la geometría es sencilla, el dominio de la solución es cubierto por una malla y en cada punto de la malla la ecuación diferencial es aproximada a partir de valores nodales de las funciones.
  - b) *Volúmenes finitos*: el dominio es subdividido en un cierto número de volúmenes de control contiguos sobre los que se aplican las ecuaciones de conservación de la masa, cantidad de movimiento y la energía.
  - c) *Elementos finitos*: el dominio se subdivide en un conjunto de elementos discretos generalmente no estructurados empleadas generalmente en geometría complejas. (BIBING, 2017)

Figura 2-17. Mallado de la geometría de una biela.



Fuente: <http://autofem.com/en/about-autofem/comparison.html>.

### **2.2.16 *Softwares de Mecánica de Fluidos Computacional.***

En la actualidad existen diferentes herramientas que ayudan a los profesionales de ingeniería a realizar análisis de Fluido dinámica Computacional. Algunos son paquetes multifísicos, como es el caso del ANSYS AIM, que combina la simulación de propiedades mecánicas, térmicas, eléctricas y fluido-mecánicas en una única interfaz y permite desarrollar un proyecto completo, desde el diseño hasta la simulación y análisis de los resultados. (esss, 2017)

Sin embargo, también existen herramientas con foco exclusivo en las soluciones de Mecánica de Fluidos Computacional, como los softwares Fluent y CFX de ANSYS. Estas dos herramientas permiten realizar diferentes análisis CFD tales como turbulencia, transferencia de calor, reacciones químicas, aeroacústica, turbomáquinas, modelar el flujo de fluidos etc. (esss, 2017)

### **2.2.17 *ANSYS.***

ANSYS es un software que ayuda a encontrar soluciones a problemas de ingeniería a través de la teoría de los elementos finitos para estructuras y de los volúmenes finitos para fluidos. Se utiliza para cálculos estáticos y resuelve problemas lineales y no lineales para estructuras, transferencia de calor, dinámica de fluidos, problemas acústicos y electromagnéticos. (ANSYS, 2017)

Esto tiene ventajas e inconvenientes. Las ventajas son evidentes: gran variedad de aplicaciones y la misma forma de trabajar. Las desventajas son que se puede necesitar cálculos específicos de un análisis determinado que no están implementados en el programa. Ello sin embargo, se puede soslayar con la capacidad de ANSYS para intercambiar datos con aplicaciones externas, y utilizando algoritmos que permitan realizar cálculos a partir de los resultados nodales obtenidos. (ANSYS, 2017)

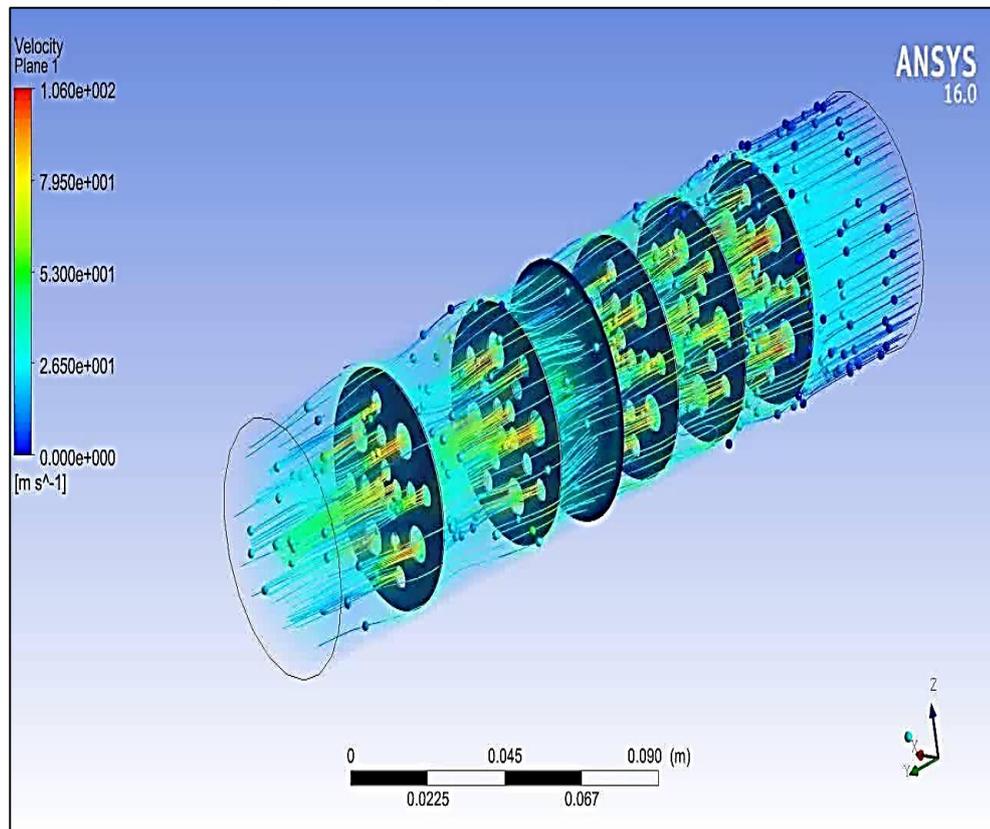
### **2.2.18 *ANSYS FLUENT***

ANSYS Fluent es la más potente herramienta de software de dinámica de fluidos computacional (CFD) disponible, lo que le permite avanzar más y más rápidamente a medida que optimiza el rendimiento de su producto. Fluent incluye capacidades de

modelado físico bien validadas para ofrecer resultados rápidos y precisos en la más amplia gama de aplicaciones CFD y multifísicas. (ANSYS, 2017)

El software ANSYS Fluent contiene las más amplias capacidades de modelado físico, necesarias para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor y las reacciones para aplicaciones industriales, desde el flujo de aire sobre un ala de avión hasta la combustión en un horno, desde columnas de burbujas hasta plataformas petrolíferas. Desde la fabricación de semiconductores y el diseño de salas limpias hasta plantas de tratamiento de aguas residuales. Fluent cubre un amplio alcance, incluyendo modelos especiales con capacidades para modelar la combustión en cilindro, aeroacústica, turbomáquinas y sistemas multifísicos. (ANSYS, 2017)

Figura 2-18. Aplicación ANSYS Fluent.



Fuente: [https://i.ytimg.com/vi/L\\_svDxEweZg/maxresdefault.jpg](https://i.ytimg.com/vi/L_svDxEweZg/maxresdefault.jpg)

## CAPÍTULO III

### 3 DISEÑO DEL MODELO CFD PARA EL SISTEMA DE ESCAPE DEL VEHÍCULO M4 DE GREAT WALL.

Para simular el flujo de los gases combustionados en el sistema de escape mediante un modelo CFD, es necesario tener los parámetros de entrada respectivos. Dichos parámetros, son los valores de temperatura, velocidad y flujo volumétrico, medidos a la salida del convertidor catalítico del vehículo M4, en los tres principales regímenes de funcionamiento del motor: ralentí, media y plena carga.

Cabe recalcar que las mediciones se las realizaron en estos regímenes debido a que son las etapas más críticas de funcionamiento del motor, debido a que el rendimiento volumétrico en la cámara de combustión es bajo en ralentí, incrementa a media carga y baja nuevamente a plena carga.

Figura 3-1. Especificaciones técnicas del Vehículo M4 de GREAT WALL.

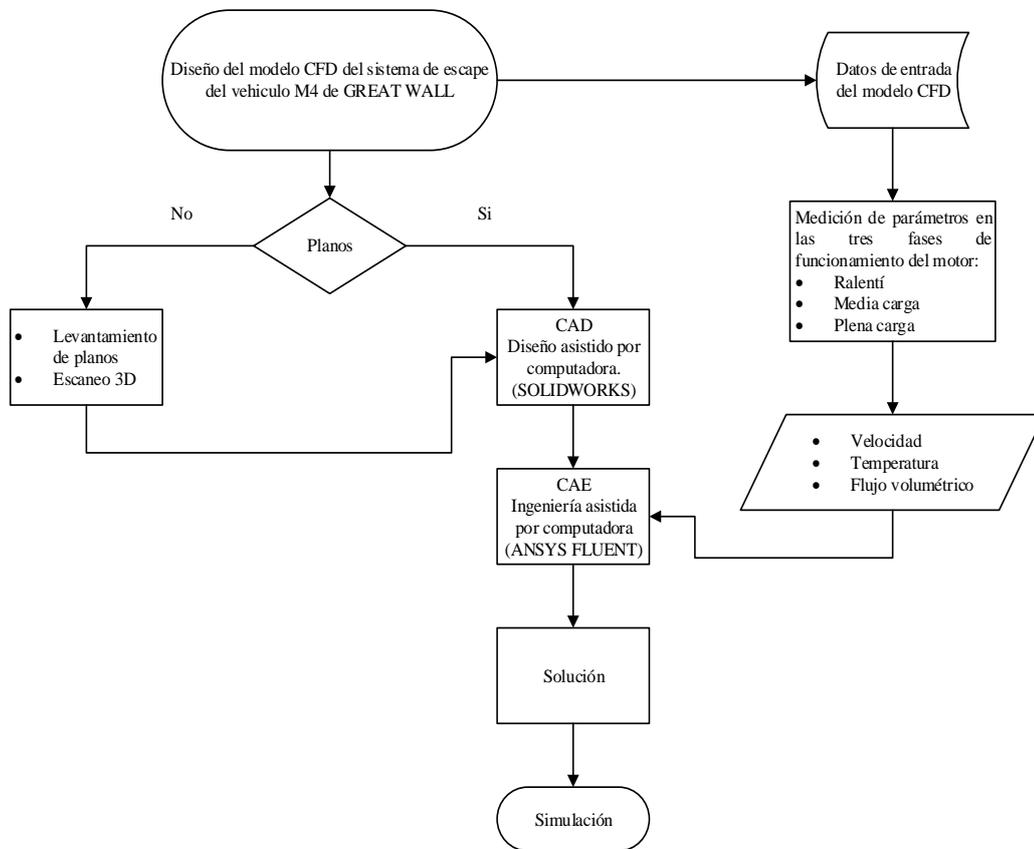


ESPECIFICACIONES TÉCNICAS	
Versiones	M4
Cilindrada (L)	1.5
Motor	4 cilindros en línea, DOHC, sistema VVT
Potencia (HP/RPM)	105 / 6.000
Torque (NM/RPM)	138 / 4.200
Transmisión	Manual de 5 velocidades

Fuente:

[http://www.greatwallmotors.cl/modelos/ficha\\_Great\\_Wall\\_M4.php#.WUqhyWg1\\_IU](http://www.greatwallmotors.cl/modelos/ficha_Great_Wall_M4.php#.WUqhyWg1_IU)

### 3.1 Flujograma del diseño del modelo CFD para el sistema de escape del vehículo M4.



A continuación se detalla el procedimiento realizado para la toma de datos.

Figura 3-2. Montar el vehículo M4 en el elevador hidráulico.



Fuente: Autores.

Figura 3-3. Verificar que el vehículo M4 se soporte adecuadamente el elevador.



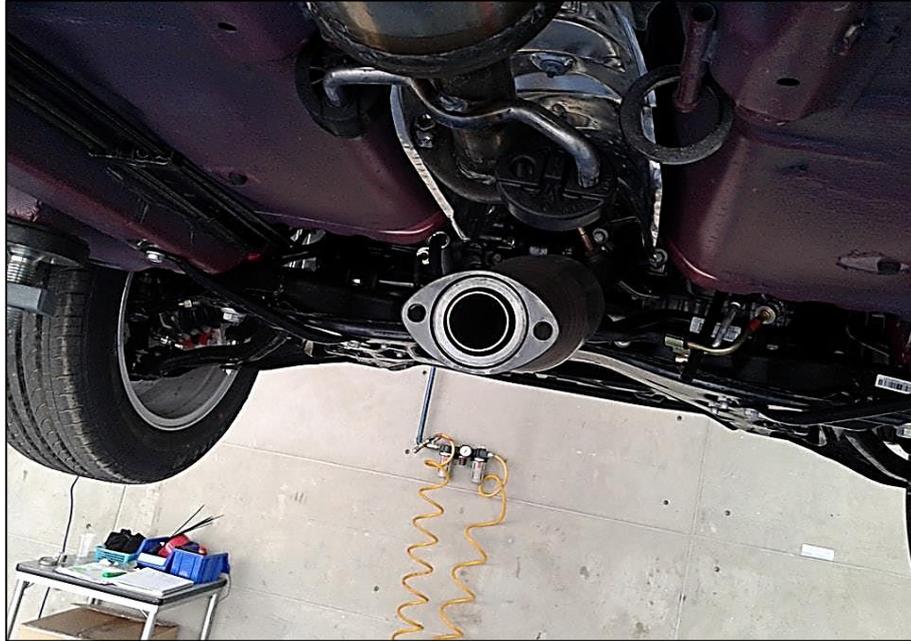
Fuente: Autores.

Figura 3-4. Identificar el pre-silenciador, silenciador y convertidor catalítico.



Fuente: Autores.

Figura 3-5. Desacoplar el pre-silenciador del convertidor catalítico.



Fuente: Autores.

Figura 3-6. Medir la temperatura de los gases en los tres regímenes de carga.



Fuente: Autores

Figura 3-7. Medir la velocidad y flujo volumétrico de los gases en los tres regímenes de carga del motor.



Fuente: Autores

Figura 3-8. Montar todo el sistema de escape a su posición inicial.



Fuente: Autores.

Tabla 3-1 Parámetros de entrada para el modelo CFD.

GASES DE ESCAPE.				
Vehículo: M4 (hatchback - mini SUV)			Marca: GREAT WALL	
Cilindrada (c.c.): 1500			Motor: 4 cilindros en línea, DOHC, Sistema VVT.	
Potencia máxima (HP/RPM): 105/6000			Torque máximo (NM/RPM): 138/4200	
Lugar y fecha: Ambato, 18 de mayo del 2017			Empresa: CIAUTO S.A	
Condición de prueba	Ralenti	Media carga	Plena carga	Instrumento utilizado
Revoluciones (RPM)	850	4200	6000	Tacómetro del vehículo
Velocidad (km/h)	20	32	52	Anemómetro digital
Temperatura (°C)	128	460	570	Multímetro digital
Flujo volumetrico ( $m^3/h$ )	30	48	73	Anemómetro digital
<p><b>Observaciones:</b> Los datos dispuestos en esta hoja de control fueron tomados a la salida del convertidor catalítico del sistema de escape del vehículo M4, en el taller de la empresa CIAUTO, ensambladora de vehículos de la marca Great Wall. Dichos datos son indispensables para el desarrollo del trabajo de titulación planteado: <b>“DISEÑO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO COMPUTACIONAL QUE PERMITA EVALUAR EL CUMPLIMIENTO DE LA NORMA QCCJT003-2014 DE SISTEMAS DE ESCAPE DEL MODELO M4 PARA CIAUTO AMBATO.”</b></p>				

### 3.2 Modelación de la geometría del pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4.

Para llevar a cabo este estudio, es necesario adquirir un conocimiento previo de las partes externas e internas que conforman el sistema de escape, sus dimensiones, materiales, normas y disposición en el vehículo.

La Industria Ecuatoriana De Partes Y Accesorios (INDAPARTS C.L.) ubicada en la ciudad de Quito provincia de Pichincha, es una empresa que fabrica partes y accesorios automotrices, uno de ellos es el pre-silenciador y silenciador del sistema de escape, los mismos que están fabricados de acero inoxidable AISI 409 de 1,5 mm de espesor, el cual proporciona mayor resistencia a la oxidación y corrosión.

Este tipo de acero pertenece a la familia de los aceros inoxidable ferríticos, y está compuesto por un 11,5% de Cr, 0,06% C + Ti, el titanio estabiliza al acero mejorando la soldabilidad.

Figura 3-9. Tubería de acero inoxidable AISI 409.



Fuente: Autores.

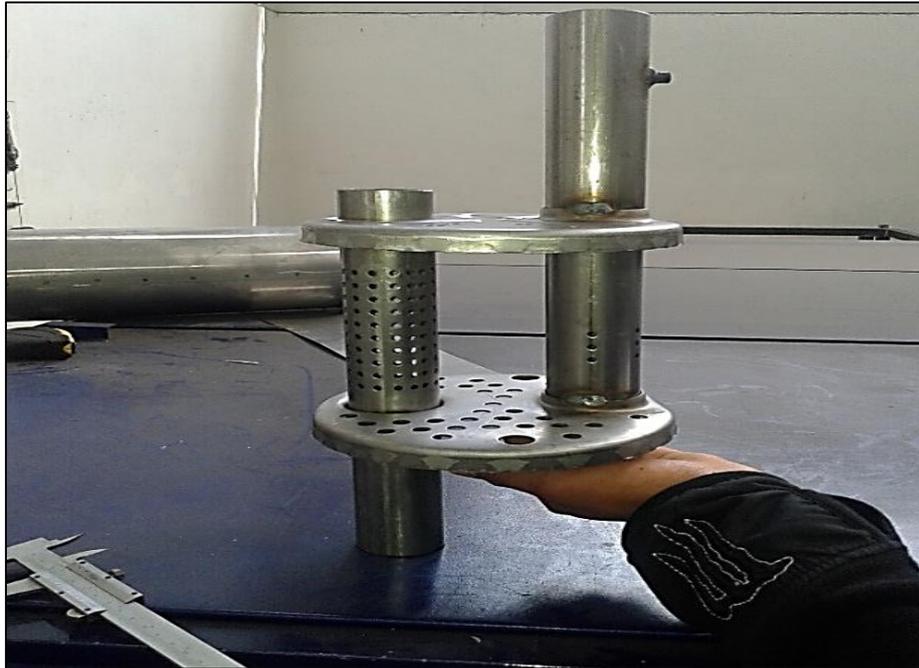
Para el desarrollo del proyecto, la empresa INDAPARTS C.L facilitó los planos de los componentes internos del pre-silenciador y silenciador del sistema de escape. Dicha información no fue suficiente para desarrollar la geometría del sistema por lo cual fue necesario levantar los planos en las instalaciones de la planta.

Figura 3-10. Separadores internos del silenciador del vehículo M4.



Fuente: Autores.

Figura 3-11. Conjunto interno del silenciador del vehículo M4.



Fuente: Autores.

La geometría del exterior del pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4, fue desarrollada gracias a los ejemplares existentes en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería Automotriz, de la facultad de Mecánica en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Figura 3-12. Pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4



Fuente: Autores.

Para modelar el sistema de escape recurrimos a la técnica de ingeniería inversa, mediante el escaneo 3D del sistema, el mismo que se realizó en las instalaciones del Centro de Fomento Metalmeccánico y Carrocero de la ciudad de Ambato.

Esta técnica es un proceso que consiste en capturar una serie de imágenes que permitan de una u otra forma obtener un duplicado digital de una pieza, componente o sistema, sin ayuda de planos o documentación.

Para poder obtener un modelo CAD idéntico a la pieza, componente o sistema, se parte del modelo físico y se usan métodos ingenieriles de medida, análisis y diseño. (UNAM, 2013)

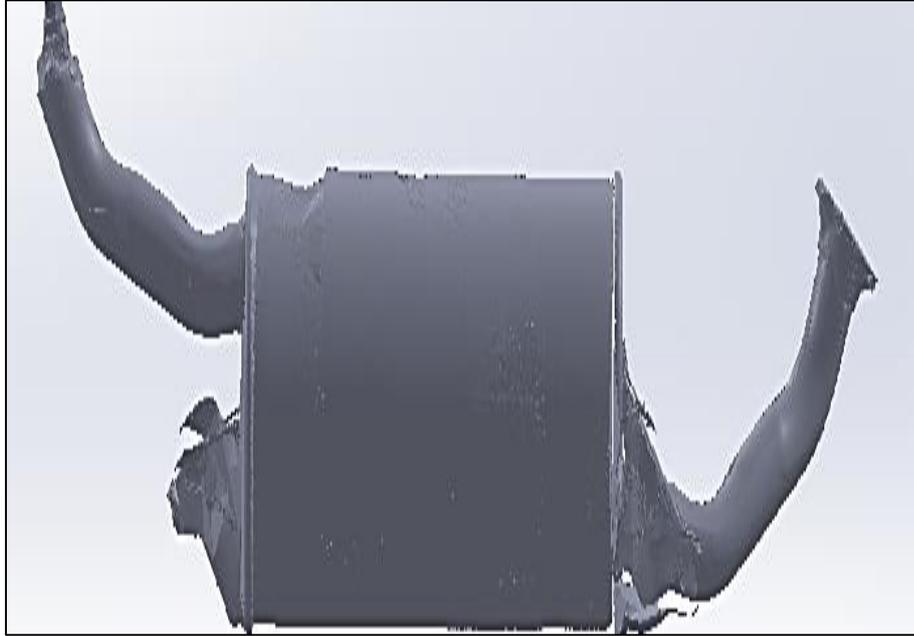
Figura 3-13. Escaneo 3D del sistema de escape del vehículo M4.



Fuente: Autores.

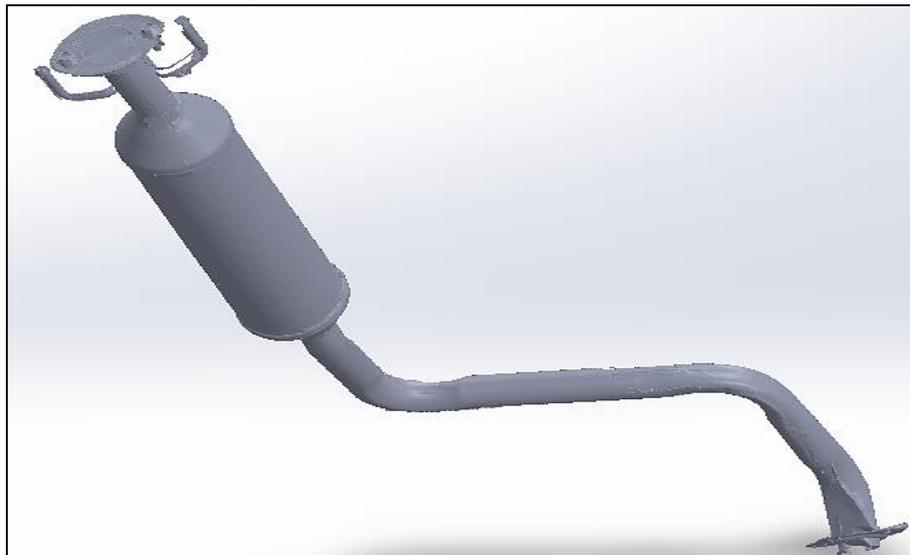
Como resultado del escaneo 3D se genera un archivo con formato STL que define la geometría 3D de los componentes del sistema de escape, en la cual se excluye información como color, texturas y propiedades físicas. Los archivos STL pueden crearse a partir de dos clases de datos: nube de puntos o modelo CAD (superficies o sólidos). (R3ALD)

Figura 3-14. Importación del archivo STL en un software CAD.



Fuente: Autores.

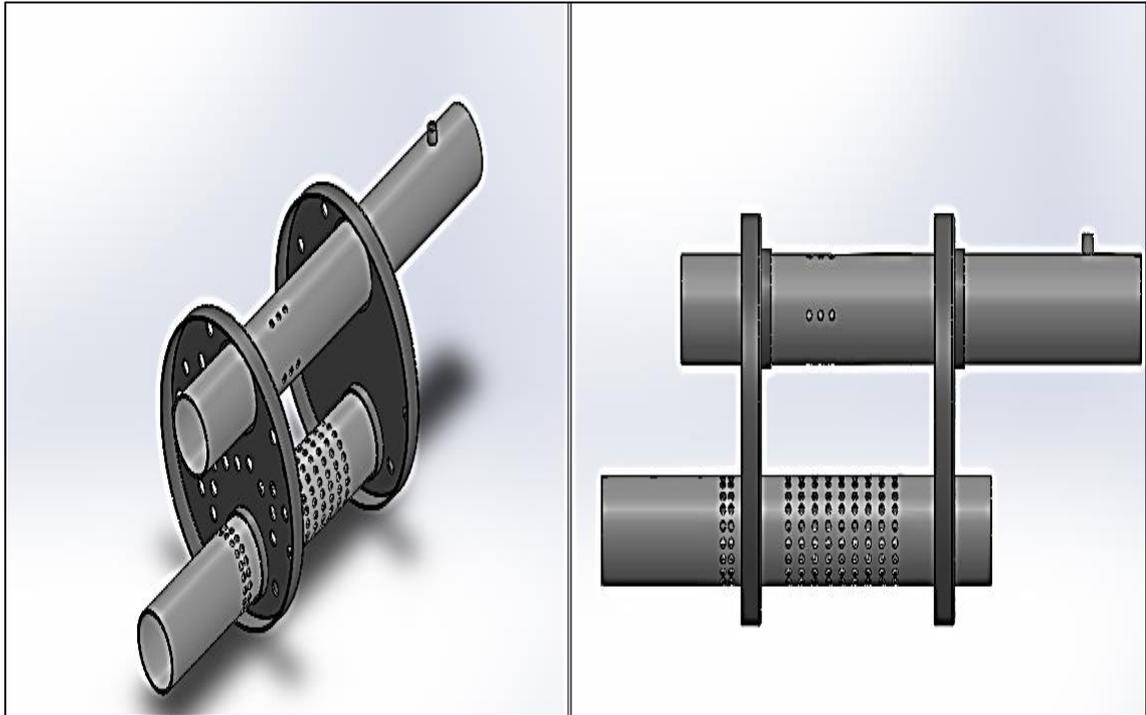
Figura 3-15. Importación del archivo STL en un software CAD.



Fuente: Autores.

El modelado del sistema de escape se realizó en el software CAD SolidWorks. Se partió modelando y ensamblando el conjunto interno del silenciador, basado en los planos levantados. El conjunto interno consta de dos separadores y dos conductos, uno de entrada y el otro de succión del fluido de gases de escape o combustionados.

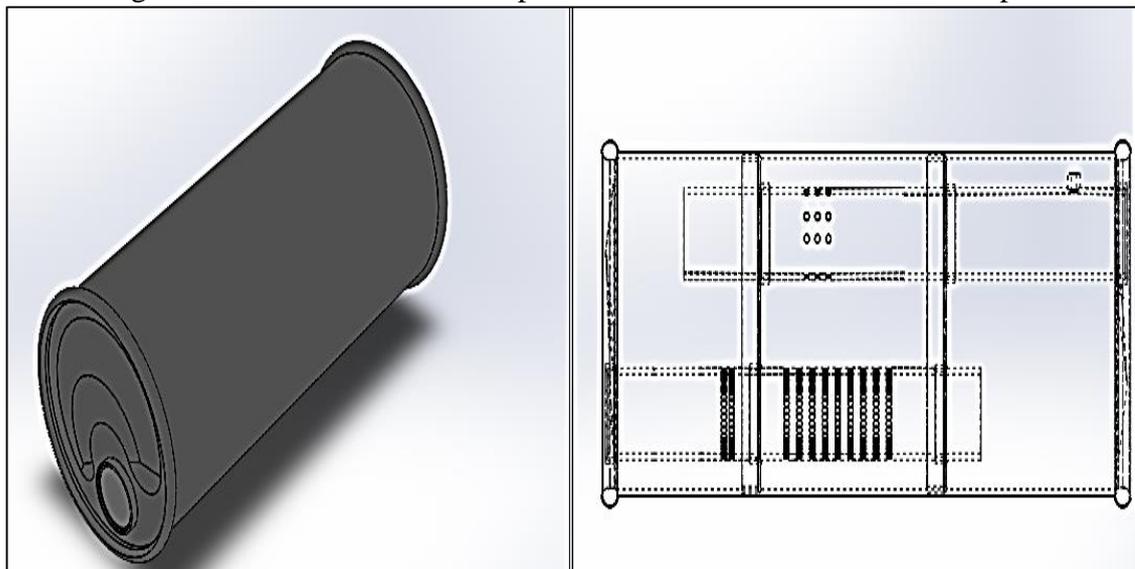
Figura 3-16. Geometría del conjunto interno del silenciador.



Fuente: Autores.

Posteriormente, se modeló la parte externa del silenciador, basada en los planos levantados en la planta de la empresa INDAPARTS, para luego ensamblarla con su conjunto interno y obtener un solo cuerpo.

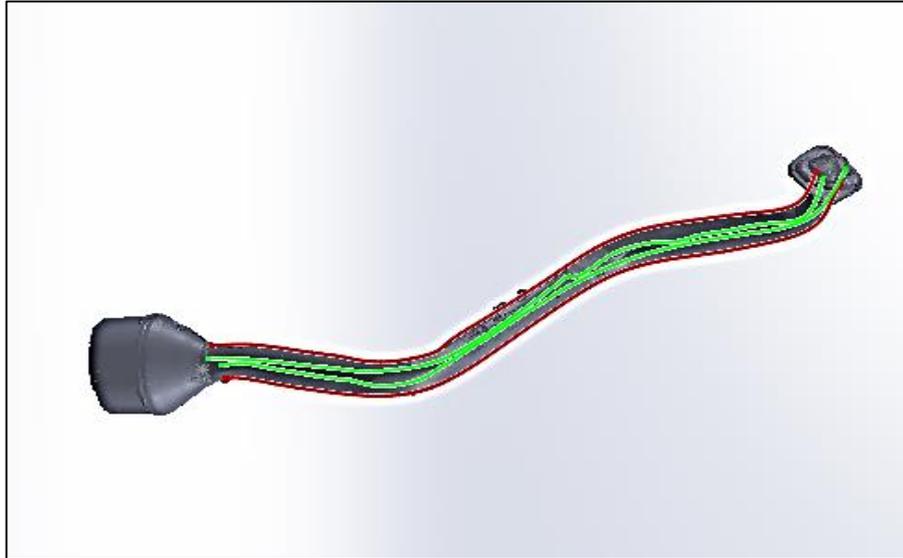
Figura 3-17. Geometría del cuerpo del silenciador del sistema de escape.



Fuente: Autores.

El modelado de los conductos de entrada y salida tanto del silenciador como del pre-silenciador se llevó a cabo a través de la proyección de curvas sobre un sólido con formato STL importado en el software CAD SolidWorks.

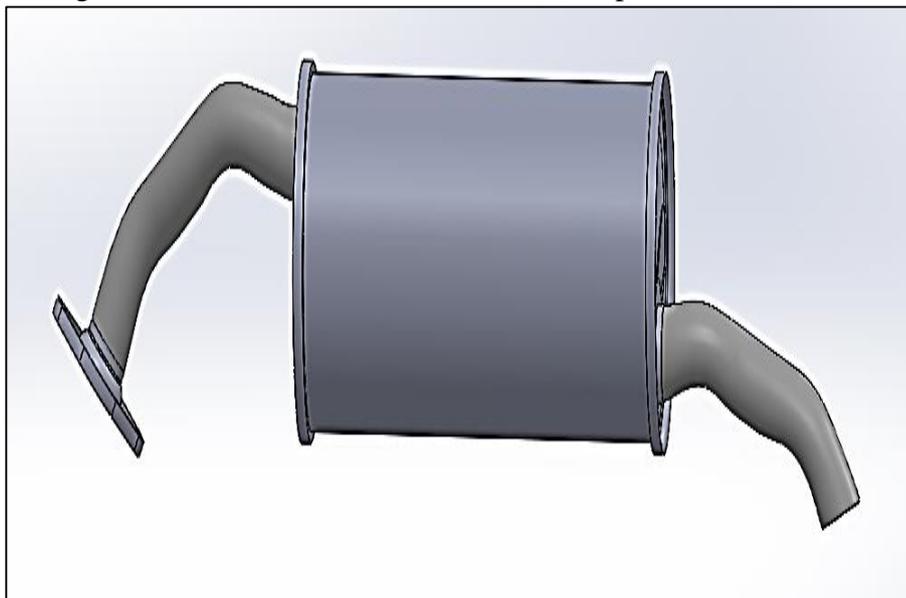
Figura 3-18. Proyección de curvas para obtener la geometría de los conductos del sistema.



Fuente: Autores

Luego se modeló la brida que va al inicio del conducto de entrada, para finalmente ensamblarla con el cuerpo del silenciador y obtener un solo conjunto.

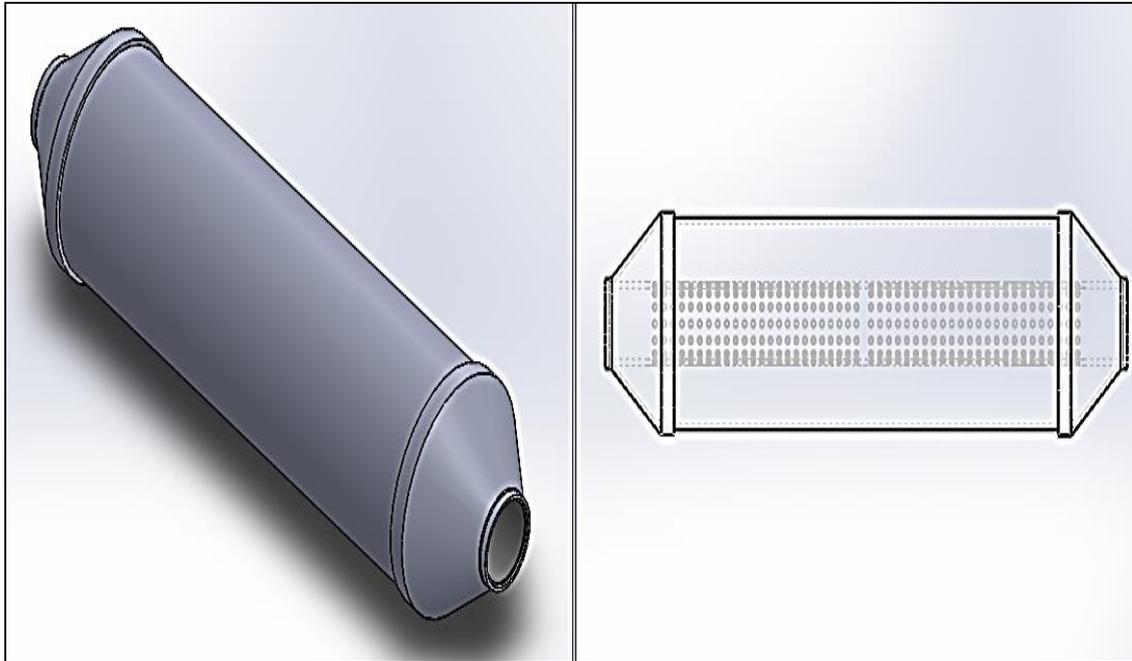
Figura 3-19. Silenciador del sistema de escape del vehículo M4.



Fuente: Autores.

De la misma manera se modeló el conjunto interno y la parte externa del pre-silenciador para luego ensamblarlos y obtener un solo cuerpo.

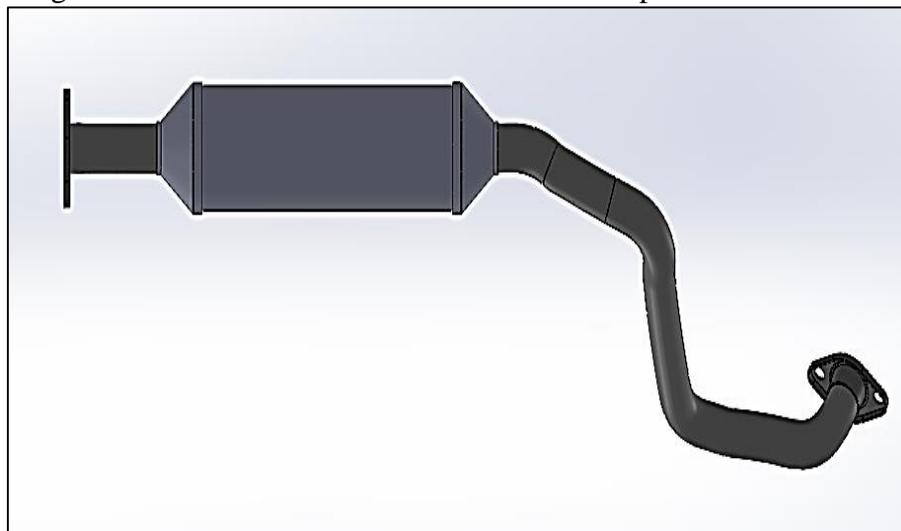
Figura 3-20. Geometría del cuerpo del pre-silenciador del sistema de escape.



Fuente: Autores.

Posteriormente, se modelaron las bridas para ensamblarlas con los conductos de entrada y de salida, los mismos que finalmente se ensamblaron con el cuerpo del pre-silenciador para obtener un solo conjunto.

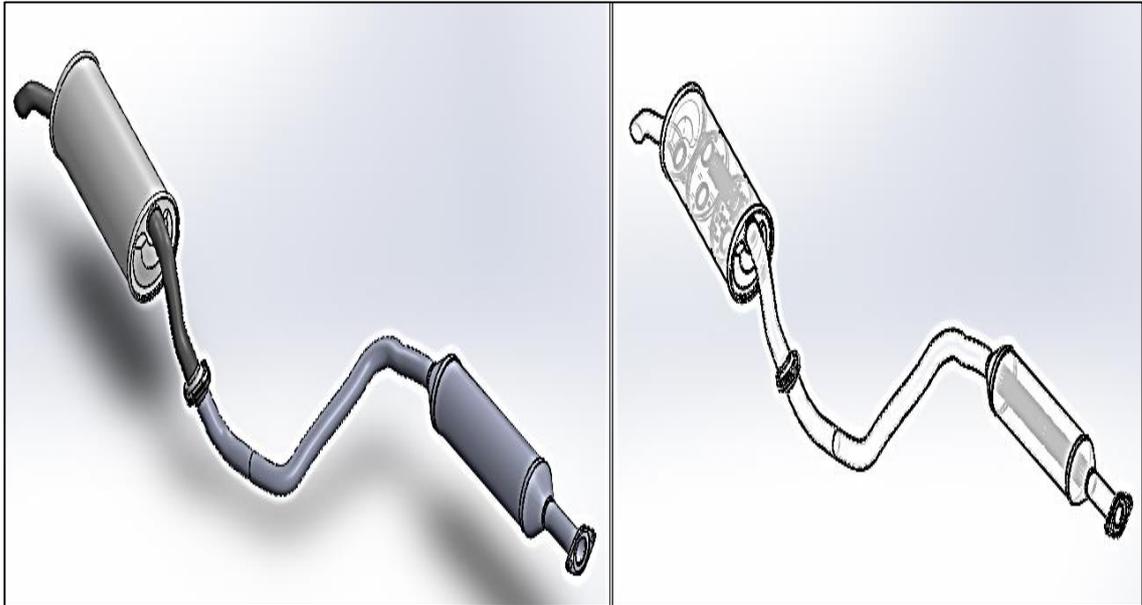
Figura 3-21. Pre-silenciador del sistema de escape del vehículo M4.



Fuente: Autores.

Una vez modelados los conjuntos del pre-silenciador y silenciador, se procede a ensamblarlos para finalmente obtener un solo conjunto, con todos los detalles tanto internos como externos.

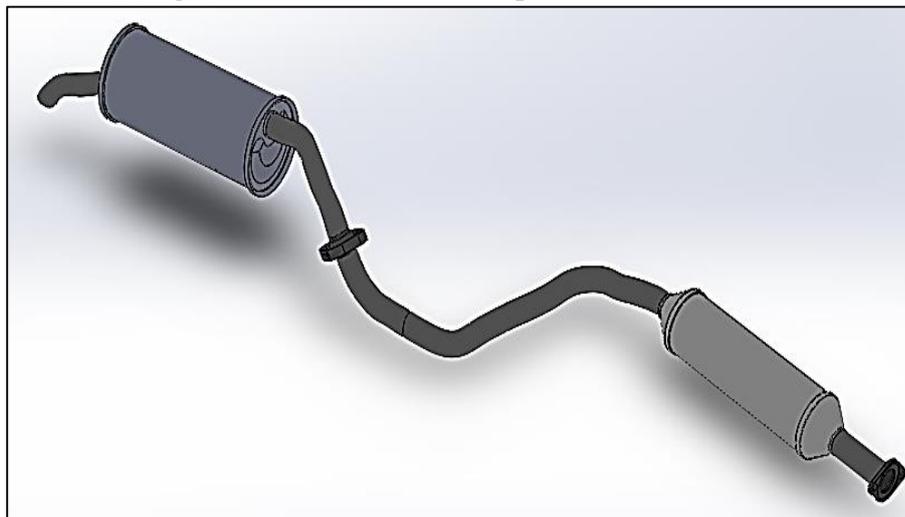
Figura 3-22. Sistema de escape (silenciador y pre-silenciador).



Fuente: Autores.

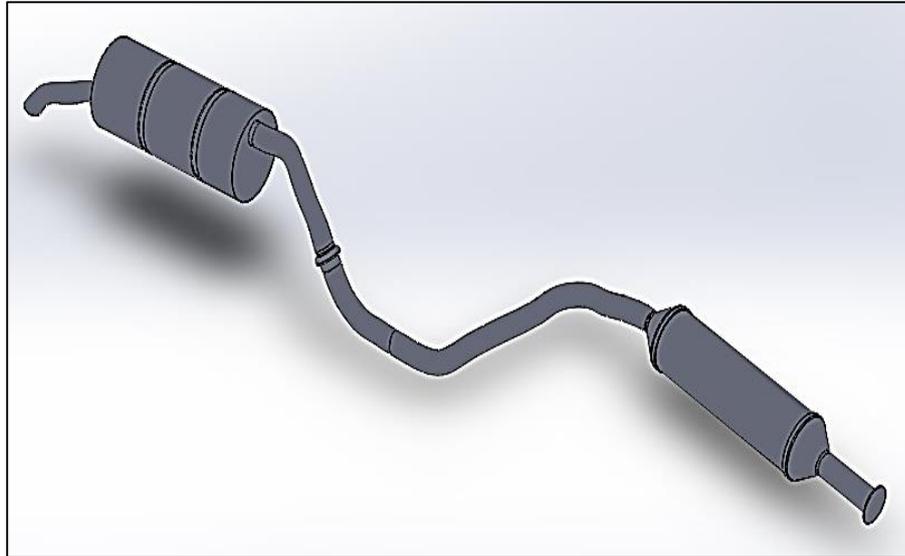
Al obtener una sola pieza con el pre-silenciador y silenciador fusionados, se procede a obtener el dominio del sistema es decir su volumen interno, el cual gobierna la trayectoria de los gases combustionados dentro sistema de escape.

Figura 3-23. Sistema de escape del vehículo M4.



Fuente: Autores.

Figura 3-24. Dominio (volumen interno) del sistema de escape.

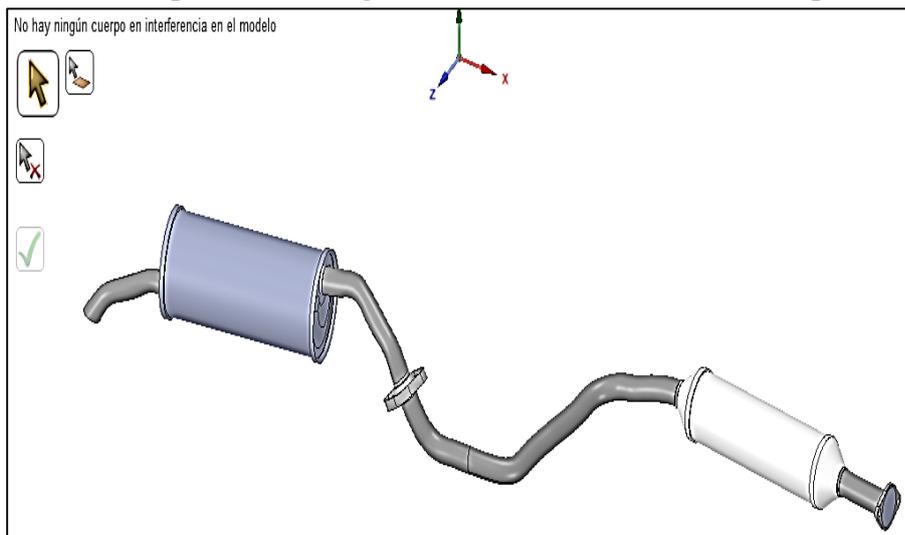


Fuente: Autores.

### 3.3 Preparación de la geometría del sistema de escape del vehículo M4.

Antes de proceder a la simulación es necesario preparar la geometría del sistema de escape, para ello debe ser guardada como un archivo tipo Parasolid(\*.x\_t) mediante solidworks. Dicho archivo es importado hacia el software ANSYS- SpaceClaim, con el propósito de eliminar las interferencias, superficies sobrepuestas, separaciones mínimas y superficies basura, de tal manera que se verifica que la geometría del sistema de escape este bien dibujada.

Figura 3-25. Preparación de la geometría del sistema a través de SpaceClaim.



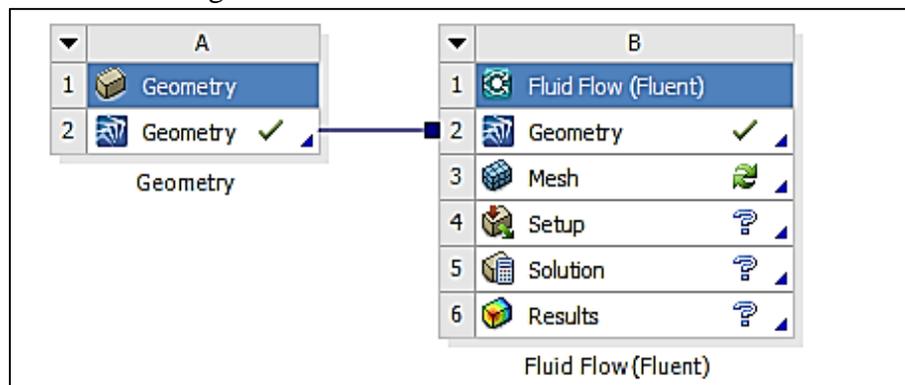
Fuente: Autores.

### 3.4 Preparación del modelo CFD en ANSYS – FLUENT.

Para simular el flujo de los gases de escape dentro del sistema, se utilizó ANSYS-WORKBENCH con su complemento FLUENT, que es un software de dinámica de fluidos computacional (CFD), utilizado para la solución de problemas de ingeniería.

Para empezar a trabajar en el entorno de ANSYS Fluent es necesario importar y cargar la geometría preparada en SpaceClaim.

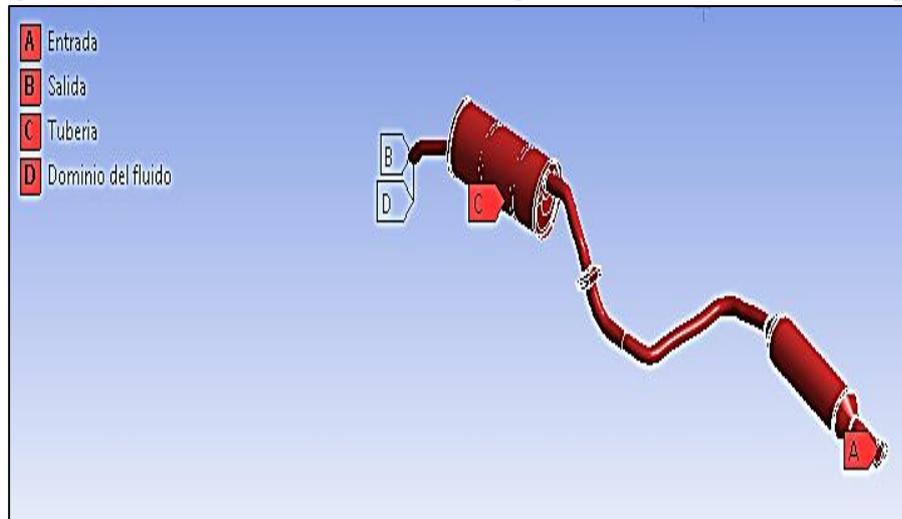
Figura 3-26. Entorno de ANSYS FLUENT.



Fuente: Autores.

Luego en el apartado de *Mesh* (Malla), se procede a establecer las condiciones de borde de la geometría del sistema de escape, como son: la entrada, salida y dominio del fluido, así como la tubería, mediante Named Selections.

Figura 3-27. Condiciones de borde de la geometría del sistema de escape.

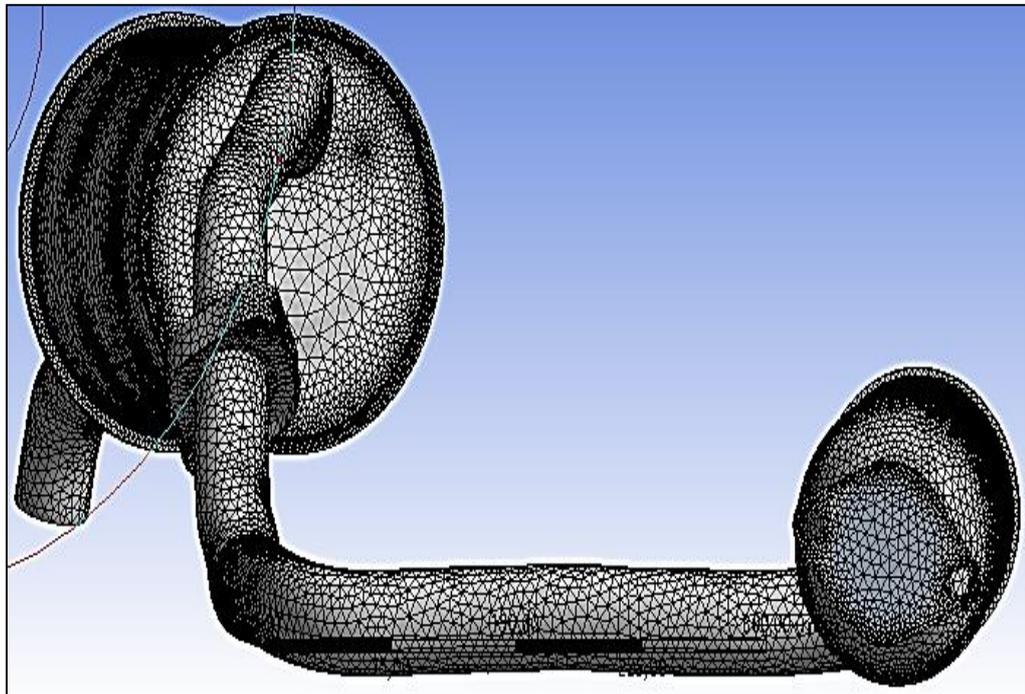


Fuente: Autores.

### 3.4.1 *Generación de la malla.*

Para la generación del mallado de la geometría del sistema de escape en ANSYS-Fluent, es necesario utilizar volúmenes finitos con una malla no estructurada, la misma que es utilizada en geometrías complejas, ya que genera tetraedros 3D cuyo fin es reducir el número de nodos y elementos de la malla, para poder optimizar la resolución del problema y reducir el gasto computacional.

Figura 3-28. Generación de la malla del sistema de escape.



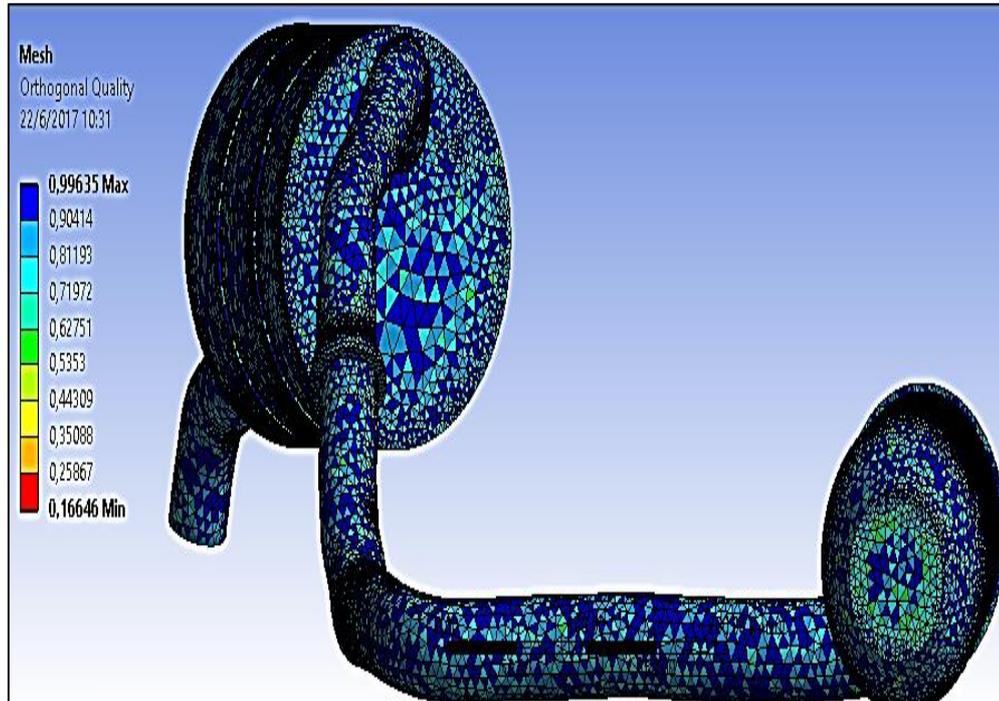
Fuente: Autores.

#### 3.4.1.1 *Criterio para evaluar el tipo de malla.*

Dentro de las herramientas que ofrece ANSYS-Fluent para evaluar el criterio de malla se encuentran:

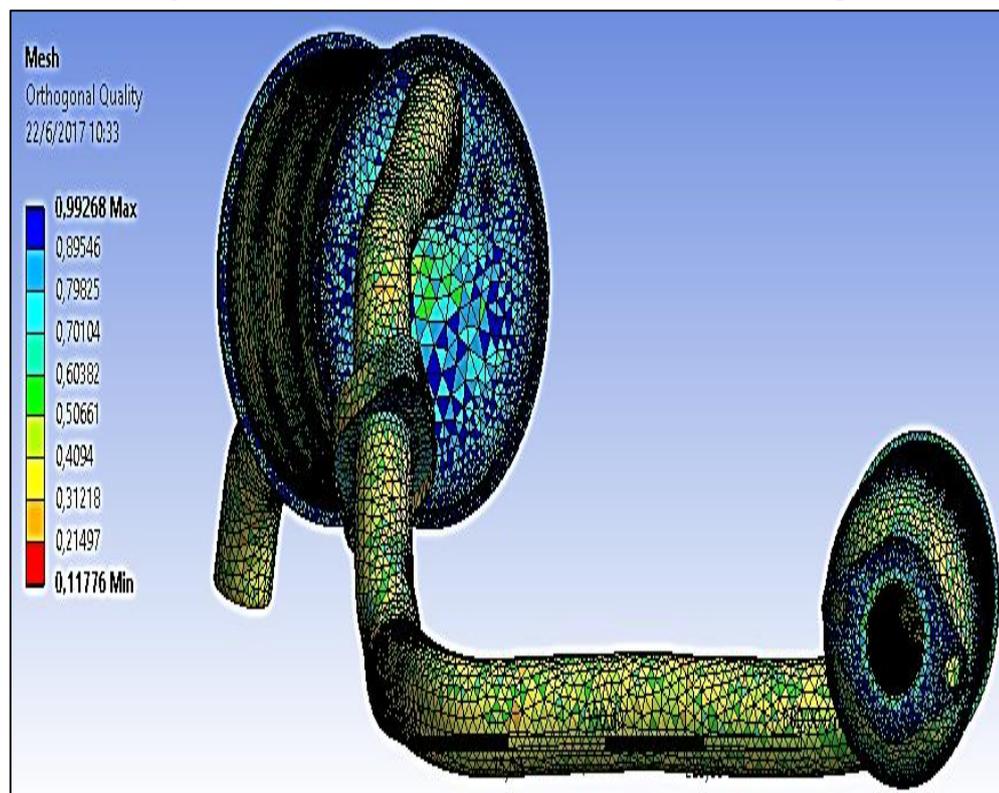
- Element Quality
- Aspect Ratio
- Jacobian Ratio
- Warping Factor
- Parallel Deviation (ANSYS, 2017)
- Maximum Corner Angle
- Skewness
- Orthogonal Quality

Figura 3-29. Mallado del dominio del fluido.



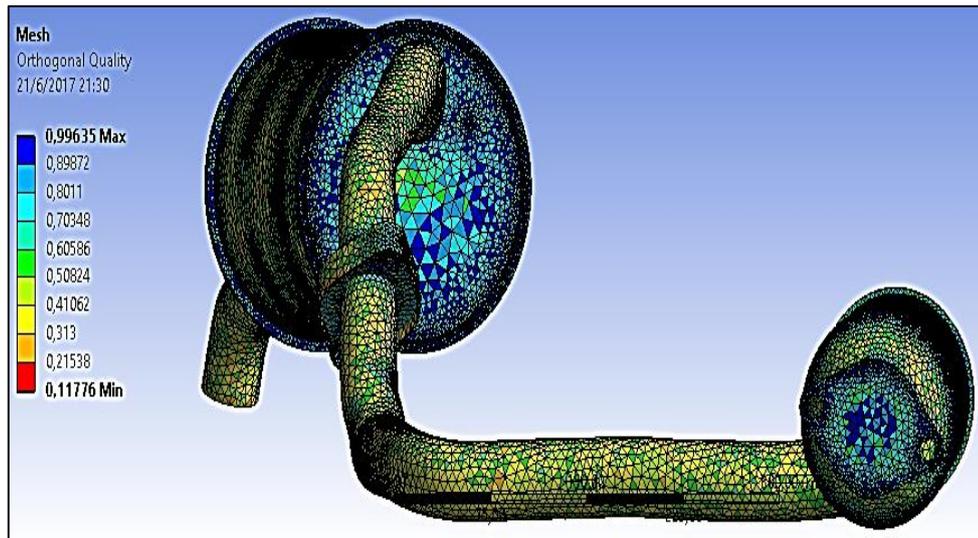
Fuente: Autores.

Figura 3-30. Mallado de la tubería del sistema de escape.



Fuente: Autores.

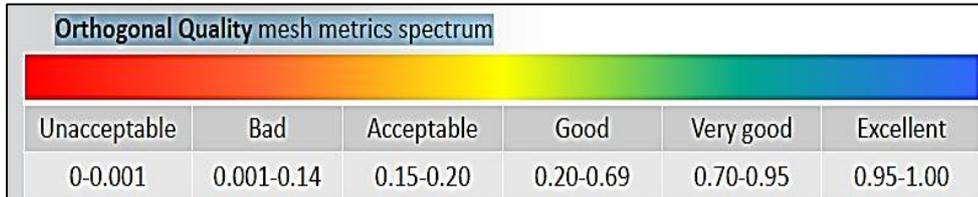
Figura 3-31. Mallado del conjunto del sistema de escape.



Fuente: Autores.

**Orthogonal Quality:** Es el criterio principal con el cual se evalúa la calidad de mallado para fluidos. En la siguiente figura se muestra los distintos rangos de mallado en una escala de valores con la cual se evalúa la calidad de malla. De tal forma que los criterios de la malla del sistema están dentro de los valores estipulados y es aceptable. (ANSYS, 2017)

Figura 3-32. Criterios de aceptación de la calidad de malla.



Fuente: Introduction to ANSYS Meshing.

#### 3.4.1.2 Calidad de la malla.

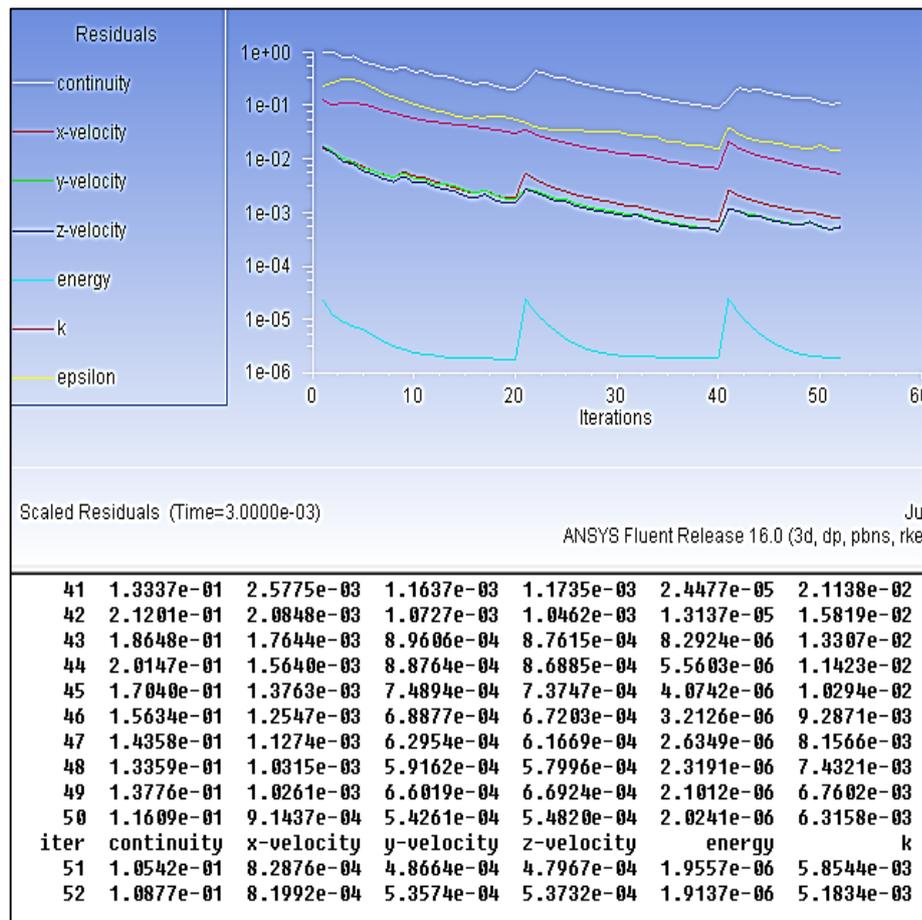
La calidad de la malla tiene un impacto considerable en el análisis computacional de la solución y en el tiempo necesario para obtener esta. Desde este punto de vista, la evaluación de este parámetro da indicios sobre los costos computacionales. No se puede llegar al promedio excelente de mallado debido a que el gasto computacional es elevado, por la razón que se requeriría una máquina computacional de altas prestaciones para obtener una calidad de malla excelente. (GARCÍA, 2008)

### 3.5 Procesamiento y solución del modelo CFD para el flujo de gases combustionados en el sistema de escape del vehículo M4.

El procesamiento y solución del modelo CFD del flujo de los gases de escape es un análisis implícito, en el que el gasto computacional se eleva debido a la complejidad geométrica del sistema. La simulación del flujo se realizó para una secuencia de segundos o tiempo determinado denominado *time transient*, de tal manera que se logra ver el comportamiento real del fluido a lo largo del sistema.

Los valores de velocidad y temperatura de los gases de escape, medidos a la salida del convertidor catalítico en las tres fases principales de funcionamiento del motor: ralentí, media y plena carga, son los parámetros de entrada en el modelo CFD, a partir de los cuales se desarrollara la simulación.

Figura 3-33. Procesamiento y solución del modelo CFD para el flujo de gases combustionados.

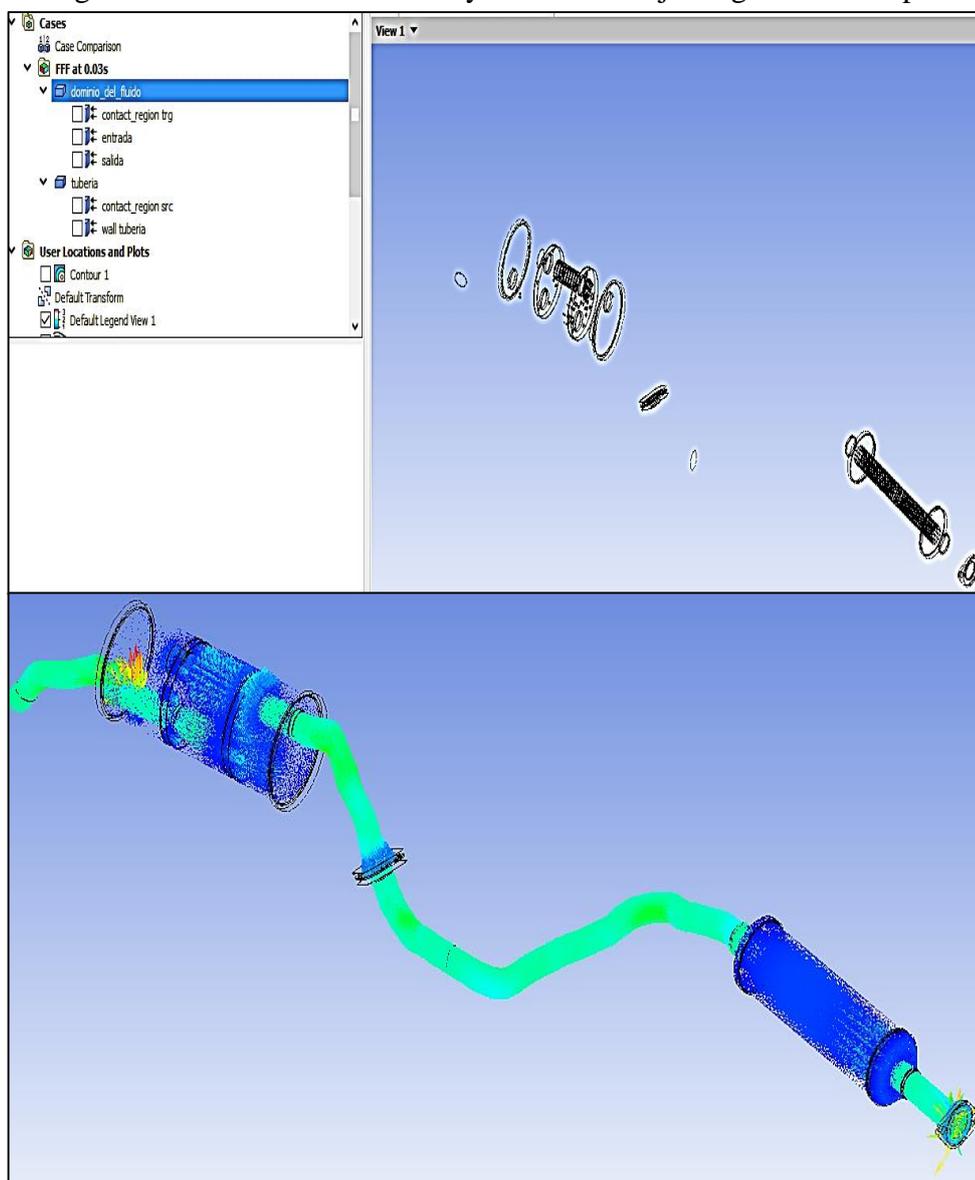


Fuente: Autores.

### 3.5 Simulación de la trayectoria del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del vehículo M4

La simulación permite visualizar la trayectoria y comportamiento de los gases combustionados a lo largo del sistema de escape, en las tres principales fases de funcionamiento del motor. La misma que debe ser interpretada minuciosamente con criterio ingenieril para dar soluciones a los posibles problemas que se puedan presentar en la geometría diseñada.

Figura 3-34 Simulación de la trayectoria del flujo de gases de escape.



Fuente: Autores.

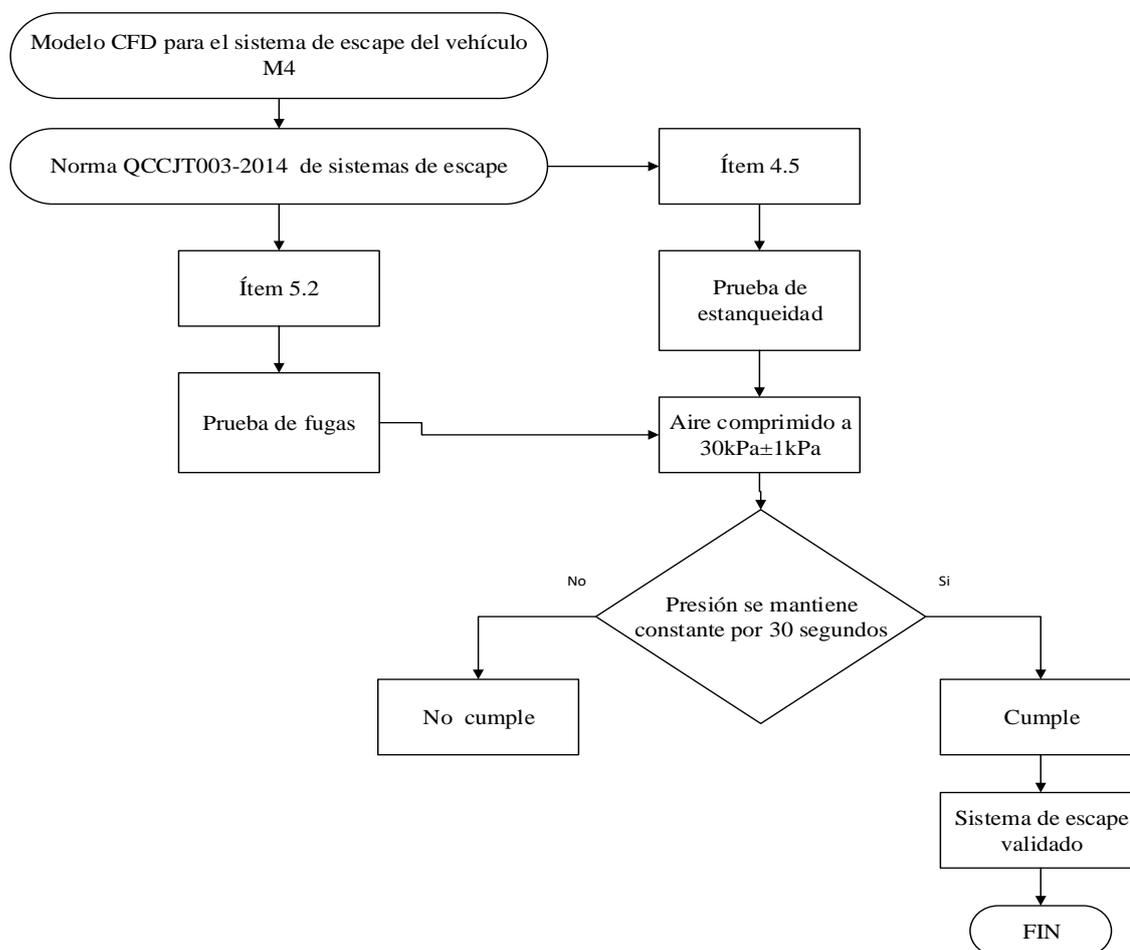
## CAPÍTULO IV

### 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.

La norma QCCJT003-2014 estipula términos, definiciones, requerimientos técnicos y reglas de inspección, identificación, embalaje transportación y almacenamiento del silenciador del escape del vehículo.

Este estudio abarca los requerimientos técnicos de la prueba de estanqueidad estipulados en el ítem 4.5 de la norma QCCJT003-2014. Cabe recalcar que dicho ítem puede ser realizado mediante un ensayo experimental o virtual, de tal forma que se puede o no sustentar el cumplimiento de la norma.

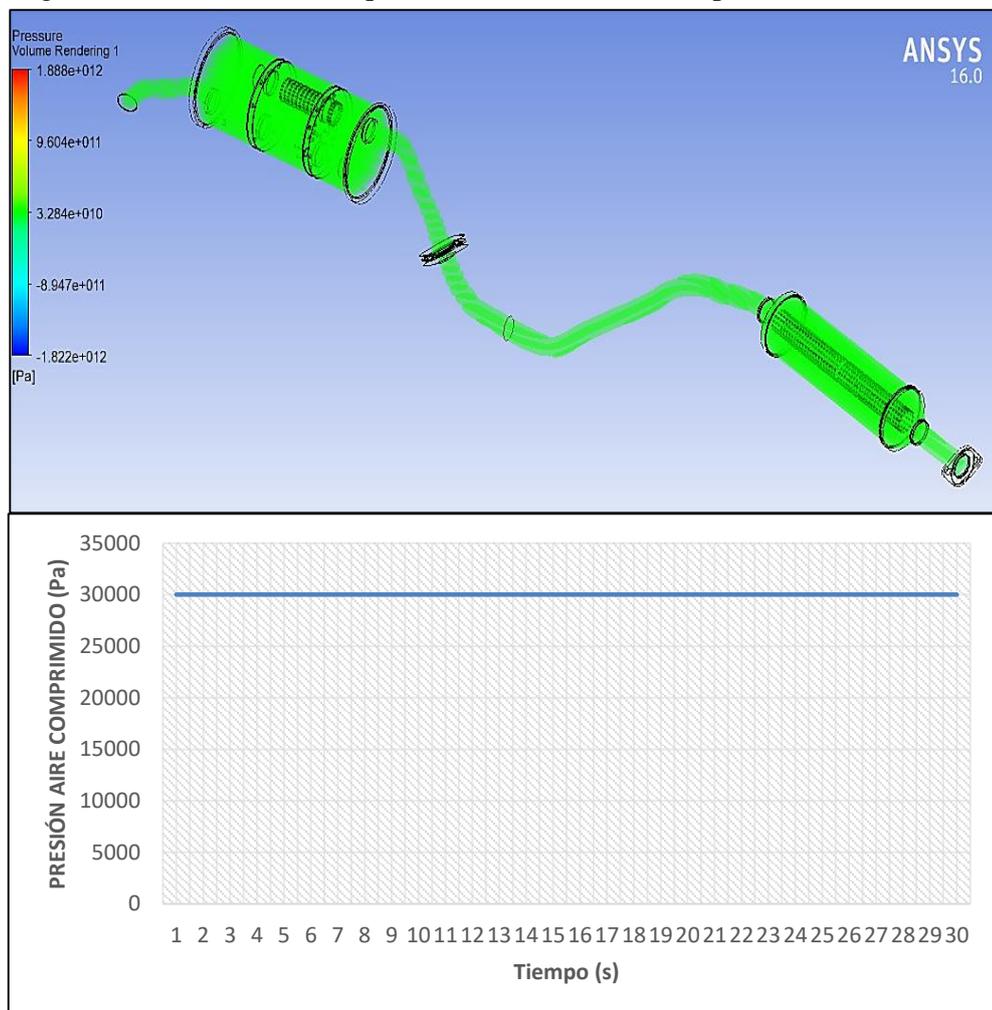
#### 4.1 Flujograma del cumplimiento del modelo CFD con el ítem 4.5 y 5.2 de la norma QCCJT003-2014.



Para la prueba de estanqueidad del sistema escape en el modelo CFD se toma como parámetro de ingreso una presión de aire a la entrada al sistema de 30 kPa, valor que exige la norma QCCJT003-2014 en el ítem 4.5, dicha presión debe mantenerse constante en un periodo de 30 segundos, verificando así el cumplimiento de la norma QCCJT003- 2014 en el ítem 5.2.

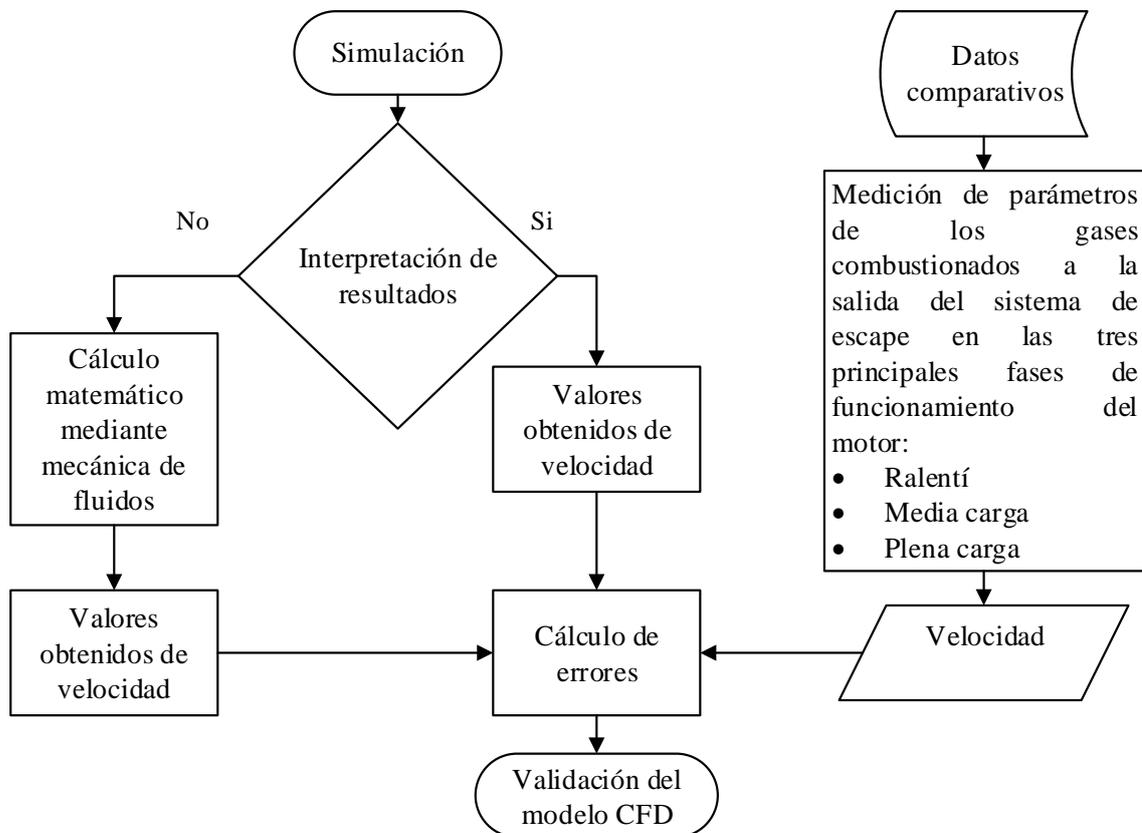
En la figura 4-1 muestra la simulación del fluido dentro del sistema de escape, donde se puede visualizar que la presión se mantiene constante por 30 segundos dentro del sistema y por ende no existen fugas del fluido hacia el exterior, por tal motivo cumple lo estipulado en la norma.

Figura 4-1 Prueba de estanqueidad del sistema de escape en el modelo CFD.



Fuente: Autores.

**4.2 Flujograma de la simulación de la trayectoria de los gases de escape en el modelo CFD con datos reales.**



**4.3 Análisis de los resultados en la fase de ralentí.**

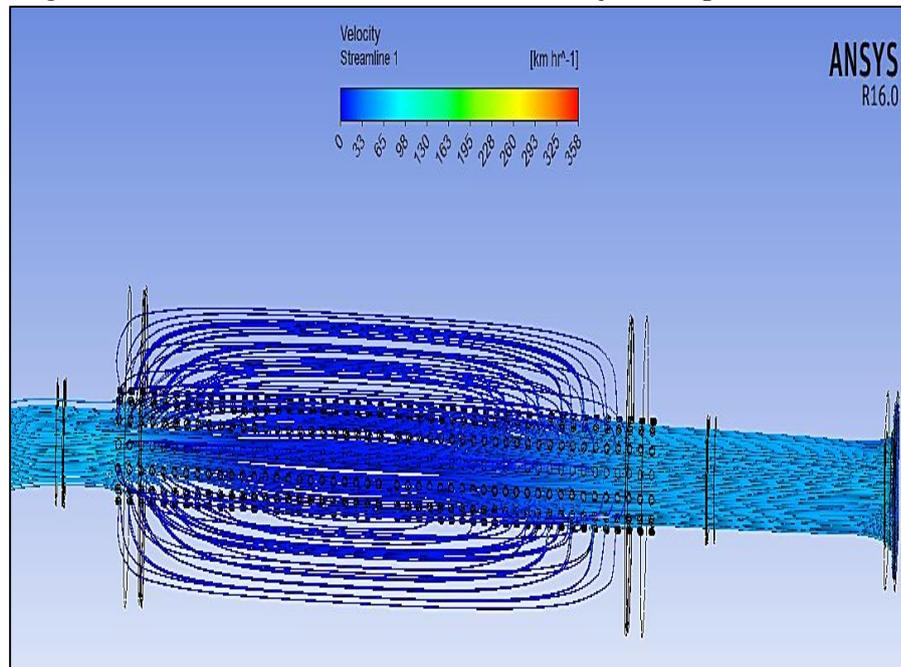
Tabla 4-1 Parámetros de entrada para el modelo CFD en ralentí.

Magnitud	Medicion 1 ( Ralentí)
Revoluciones (RPM)	850
Velocidad (km/h)	20
Temperatura (°C)	128
Flujo volumetrico (m <sup>3</sup> /h)	30

El procesamiento y solución del modelo CFD con los datos de entrada en ralenti es de 10 horas, con una computadora portátil Intel Core i5 con 4 procesadores de 2,7 GHz y 16 GB de memoria RAM. La solución del modelo se la restringió para un *time step* (tiempo de avance) de 0,001s con 5 steps (pasos) con 6 iteraciones cada uno, esto debido al tiempo y gasto computacional que conlleva.

En la simulación del flujo de los gases combustionados se puede observar que el fluido ingresa al sistema con una velocidad de 20 km/h, la misma que se reduce radicalmente al ingresar en el pre-silenciador, esto debido a que el fluido se expande a través del tubo perforado, de tal forma que al chocar con las paredes internas del mismo crean turbulencia lo que hace que la pérdida de energía sea considerable y por ende la velocidad disminuya.

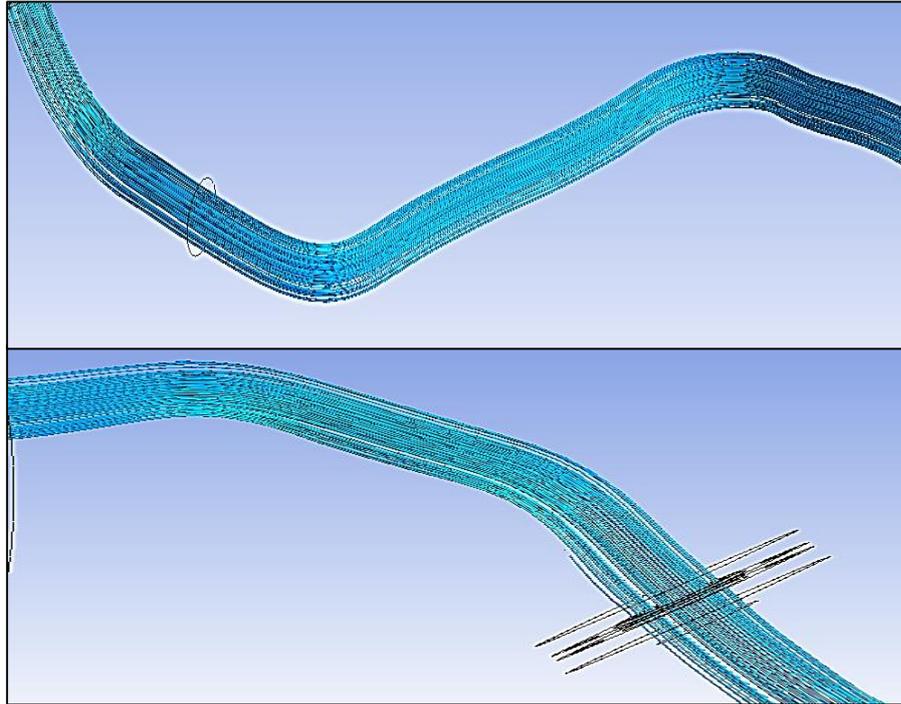
Figura 4-2. Secuencia de la simulación de flujo en el pre-silenciador.



Fuente: Autores

El recorrido de los gases de escape continúa por la tubería del sistema en el cual se expanden hasta cubrir toda su sección, en las partes más críticas como los codos la velocidad disminuye en su curvatura externa, mientras que aumenta en su curvatura interna, esto debido a la fuerza centrífuga provocada por el cambio de dirección del flujo.

Figura 4-3. Secuencia de la simulación de flujo en la tubería del sistema.

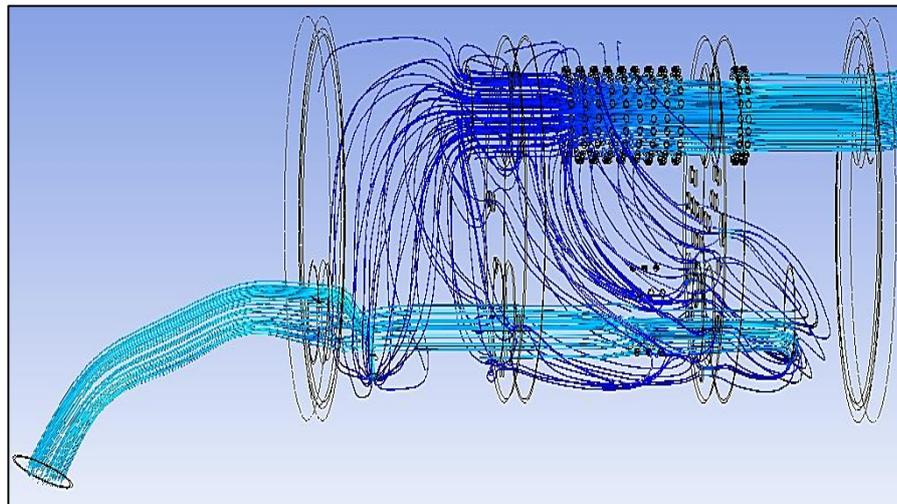


Fuente: Autores

El flujo de gases de escape al ingresar al silenciador se dispone a perder la mayor parte de su energía en tres cámaras de expansión, en la primera cámara una pequeña parte del fluido se expande a través de las perforaciones existentes en el tubo de entrada, logrando que pierda energía y velocidad hasta ser succionado hacia el exterior, posteriormente el fluido restante pasa a la segunda cámara donde el proceso se repite pero con mayor magnitud, ocupando así toda su sección hasta que el flujo se expanda hacia la primera cámara a través de las perforaciones del separador para luego ser succionado hacia el exterior.

El fluido no evacuado por las dos primeras cámaras pasa a una tercera donde se expande libremente hasta ocupar toda su sección, para luego atravesar por las perforaciones de los separadores hacia la segunda y primera cámara respectivamente, a fin que se reduzca al máximo su energía y velocidad, para así ser succionados al exterior. Cabe recalcar que en la tercera cámara existe un pequeño bypass hacia el tubo de succión, donde una mínima parte del fluido es extraída hacia el exterior.

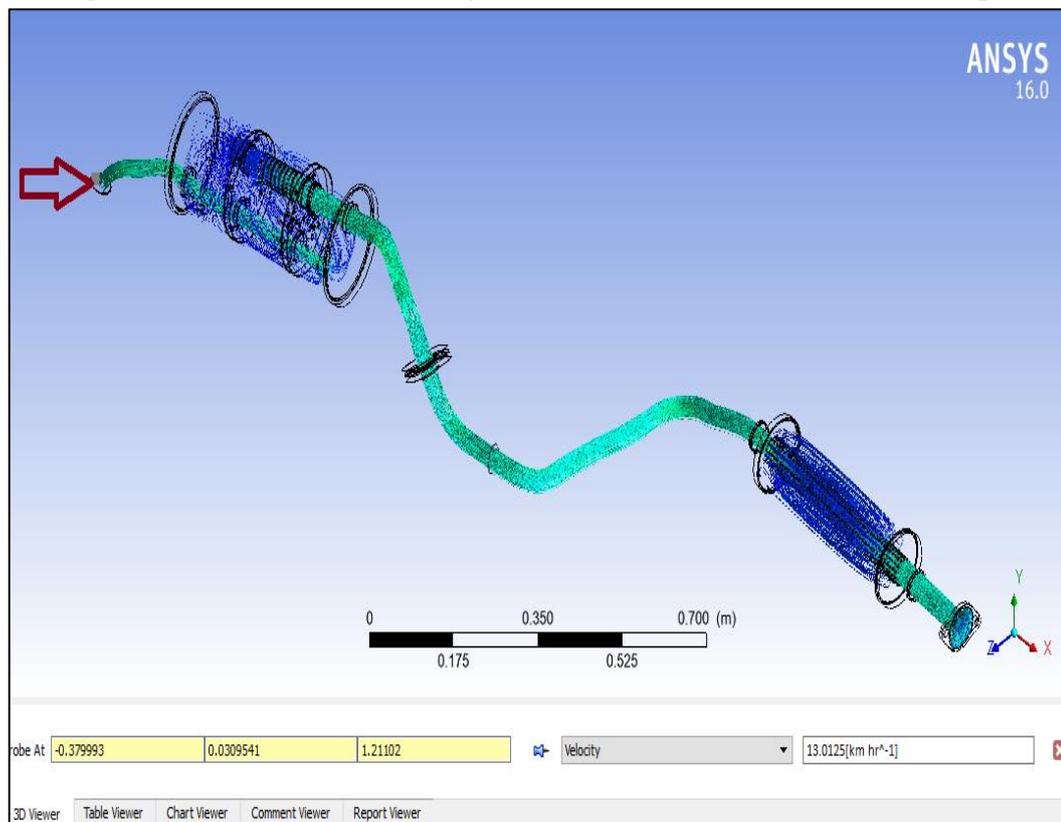
Figura 4-4. Secuencia de la simulación de flujo en el silenciador del sistema.



Fuente: Autores

A continuación se muestra la trayectoria del fluido a través del sistema de escape en la fase de ralentí.

Figura 4-5. Simulación de la trayectoria del fluido en el sistema de escape.



Fuente: Autores

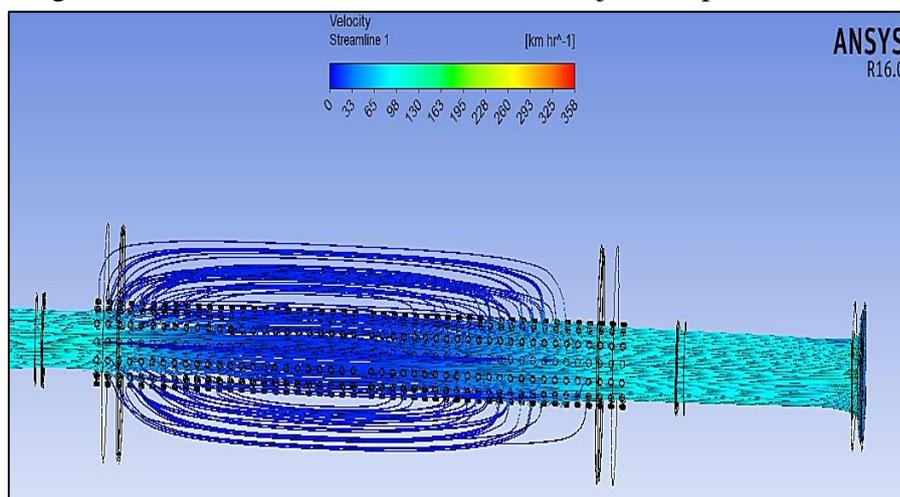
#### 4.4 Análisis de los resultados en la fase de media carga.

Tabla 4-2 Parámetros de entrada para el modelo CFD en media carga.

Magnitud	Medicion 2 ( Media carga)
Revoluciones (RPM)	4200
Velocidad (km/h)	32
Temperatura (°C)	460
Flujo volumetrico ( $m^3/h$ )	45

Al aumentar las revoluciones en un motor se crean más ciclos de trabajo, y aumentan los gases combustionados y por ende en la simulación se puede observar que el fluido ingresa al sistema con una velocidad de 32 km/h, la misma que se reduce radicalmente al ingresar en el pre-silenciador, esto debido a que el fluido se expande a través del tubo perforado, de tal forma que al chocar con las paredes internas del mismo crean mayor turbulencia que en la fase de ralentí, lo que hace que la pérdida de energía sea mayor y su velocidad disminuya.

Figura 4-6. Secuencia de la simulación de flujo en el pre-silenciador

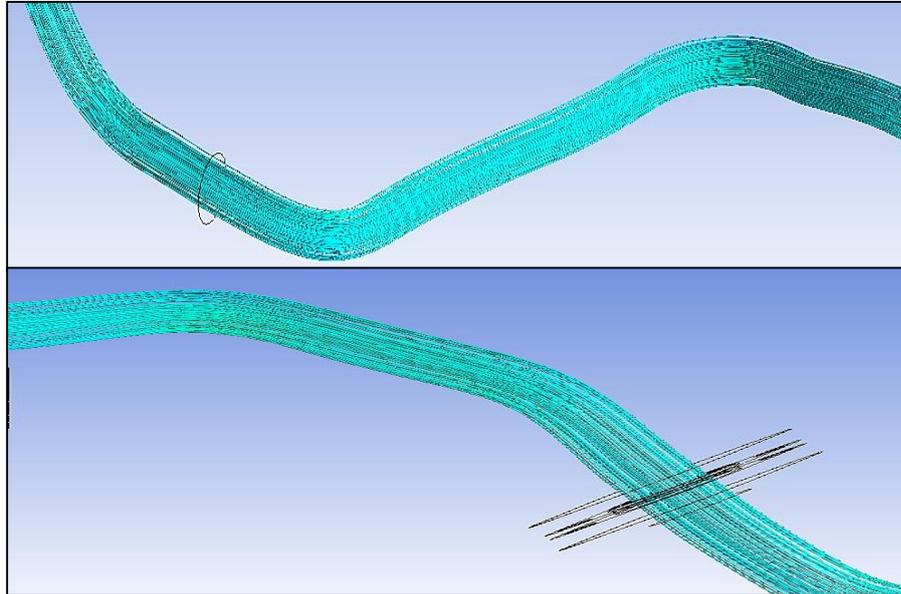


Fuente: Autores

El recorrido de los gases de escape continúa por la tubería del sistema los cuales se expanden hasta cubrir toda su sección, en las partes más críticas como los codos la

velocidad disminuye en su curvatura externa, mientras que aumenta en su curvatura interna, esto debido a la fuerza centrífuga provocada por el cambio de dirección del flujo.

Figura 4-7. Secuencia de la simulación de flujo en la tubería del sistema.

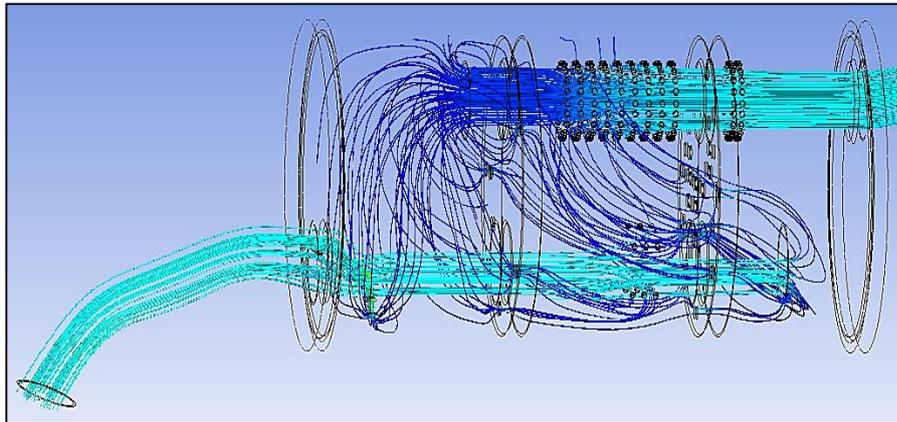


Fuente: Autores

Siguiendo la trayectoria del flujo de gases de escape al ingresar al silenciador se dispone a perder la mayor parte de su energía debido a la velocidad con la que ingresan en tres cámaras de expansión, en la primera cámara una pequeña parte del fluido se expande a través de las perforaciones existentes en el tubo de entrada, logrando que pierda energía y velocidad hasta ser succionado hacia el exterior, posteriormente el fluido restante pasa a la segunda cámara donde el proceso se repite pero con mayor magnitud, ocupando así toda su sección hasta que el flujo se expanda hacia la primera cámara a través de las perforaciones de los separadores para luego ser succionado hacia el exterior.

El fluido no evacuado por las dos primeras cámaras pasa a una tercera donde se expande libremente hasta ocupar toda su sección, para luego atravesar por las perforaciones de los separadores hacia la segunda y primera cámara respectivamente, a fin que se reduzca al máximo su energía y velocidad, para así ser succionados al exterior. Cabe recalcar que en la tercera cámara existe un pequeño bypass hacia el tubo de succión, donde una mínima parte del fluido es extraída hacia el exterior.

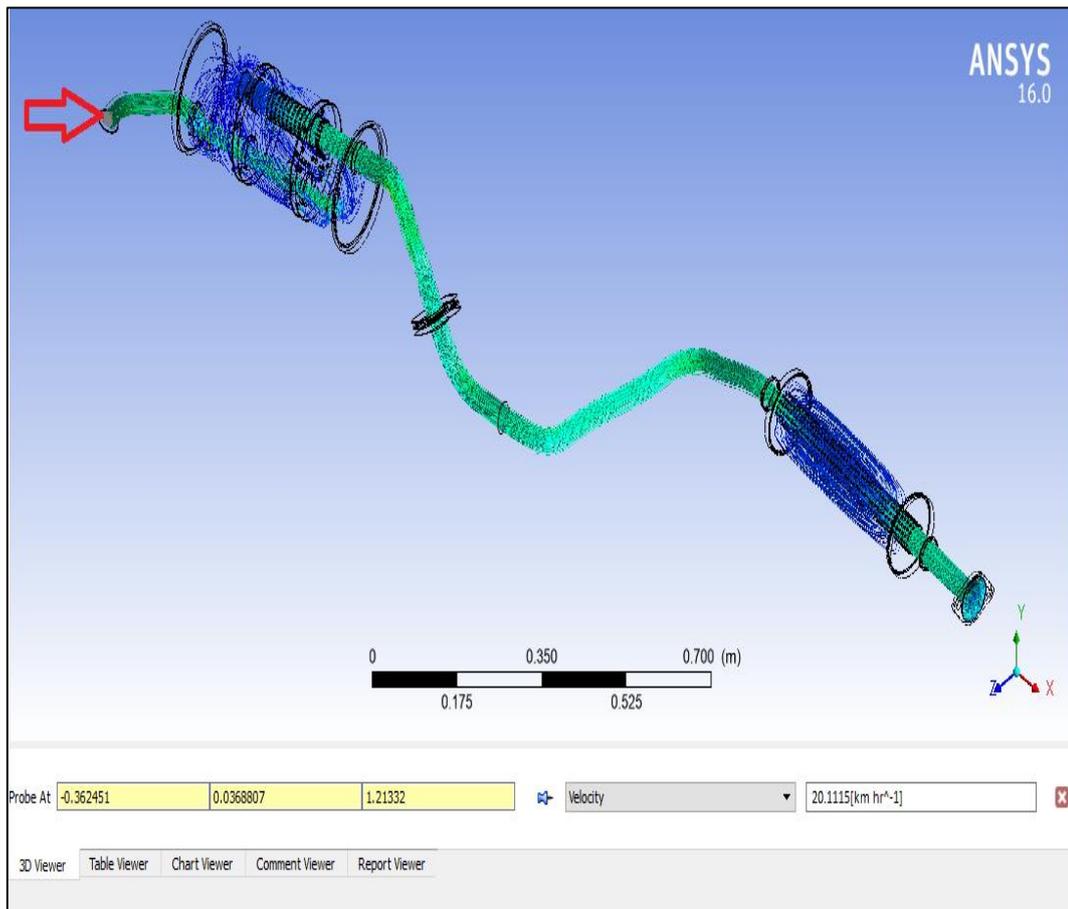
Figura 4-8. Secuencia de la simulación de flujo en el silenciador del sistema.



Fuente: Autores

A continuación se muestra la trayectoria del fluido a través del sistema de escape a plena carga.

Figura 4-9. Simulación de la trayectoria del fluido en el sistema de escape.



Fuente: Autores

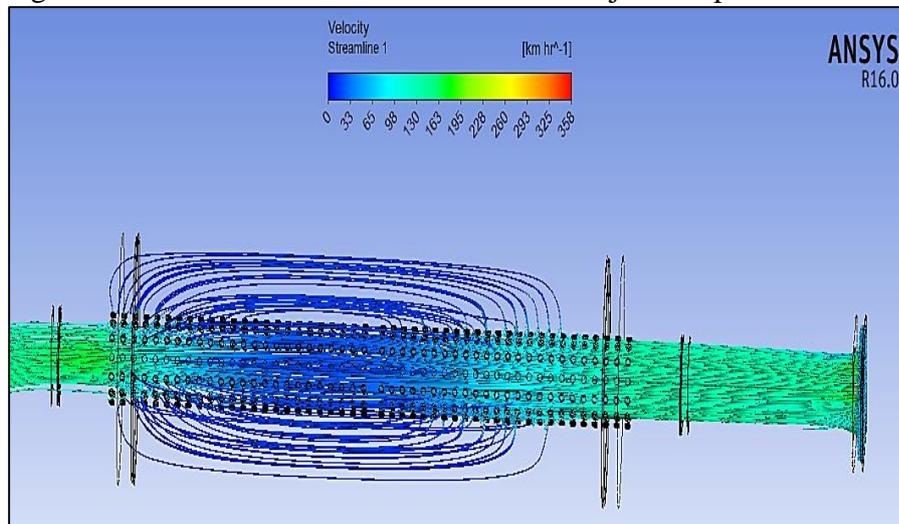
#### 4.5 Análisis de los resultados en la fase de plena carga.

Tabla 4-3 Parámetros de entrada para el modelo CFD a plena carga.

Magnitud	Medicion 3 ( Plena carga)
Revoluciones (RPM)	6000
Velocidad (km/h)	52
Temperatura (°C)	570
Flujo volumetrico (m <sup>3</sup> /h)	73

En la simulación de la trayectoria del fluido se puede observar que el fluido ingresa al sistema con una velocidad de 52 km/h, la misma que se reduce radicalmente al ingresar en el pre-silenciador, esto debido a que el fluido se expande a través del tubo perforado, de tal forma que al chocar con las paredes internas del mismo crean turbulencia lo que hace que la pérdida de energía sea considerable y por ende la velocidad disminuya.

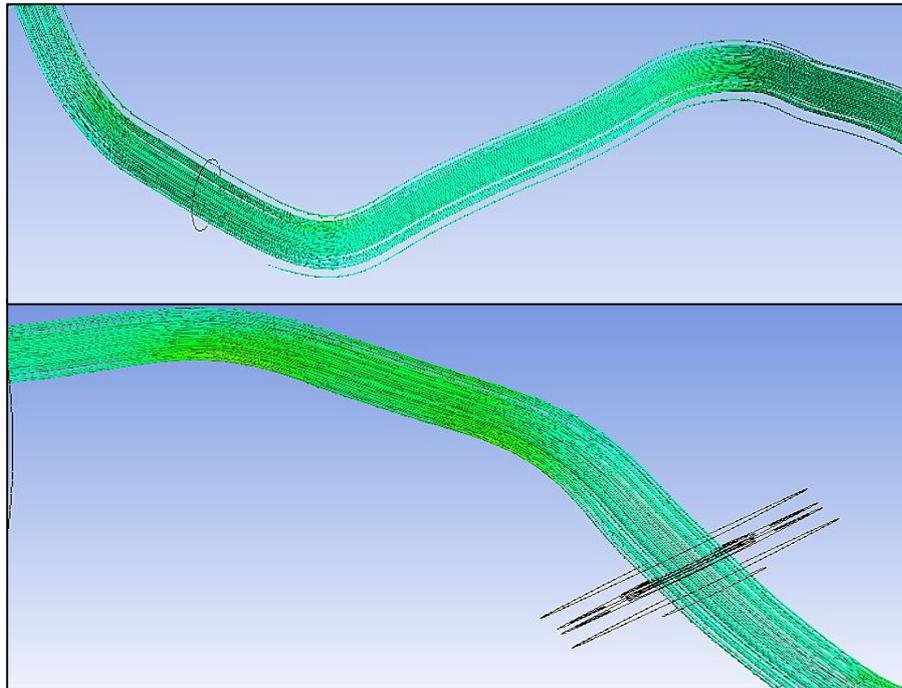
Figura 4-10. Secuencia de la simulación de flujo en el pre-silenciador.



Fuente: Autores

El recorrido de los gases de escape continúa por la tubería del sistema en la cual se expanden hasta cubrir toda su sección, en las partes más críticas como los codos la velocidad disminuye en su curvatura externa, mientras que aumenta en su curvatura interna, esto debido a la fuerza centrífuga provocada por el cambio de dirección del flujo.

Figura 4-11. Secuencia de la simulación de flujo en la tubería del sistema.

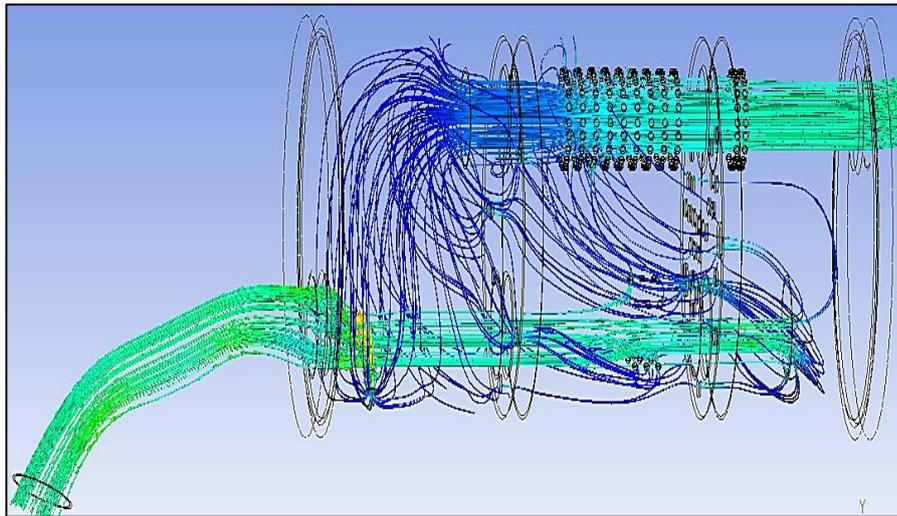


Fuente: Autores

El flujo de gases de escape al ingresar al silenciador se dispone a perder la mayor parte de su energía en tres cámaras de expansión, en la primera cámara una pequeña parte del fluido se expande a través de las perforaciones existentes en el tubo de entrada, logrando que pierda energía y velocidad hasta ser succionado hacia el exterior, posteriormente el fluido restante pasa a la segunda cámara donde el proceso se repite pero con mayor magnitud, ocupando así toda su sección hasta que el flujo se expanda hacia la primera cámara a través de las perforaciones del separador para luego ser succionado hacia el exterior.

El fluido no evacuado por las dos primeras cámaras pasa a una tercera donde se expande libremente hasta ocupar toda su sección, para luego atravesar por las perforaciones de los separadores hacia la segunda y primera cámara respectivamente, a fin que se reduzca al máximo su energía y velocidad, para así ser succionados al exterior. Cabe recalcar que en la tercera cámara existe un pequeño bypass hacia el tubo de succión, donde una gran parte del fluido es extraída hacia el exterior.

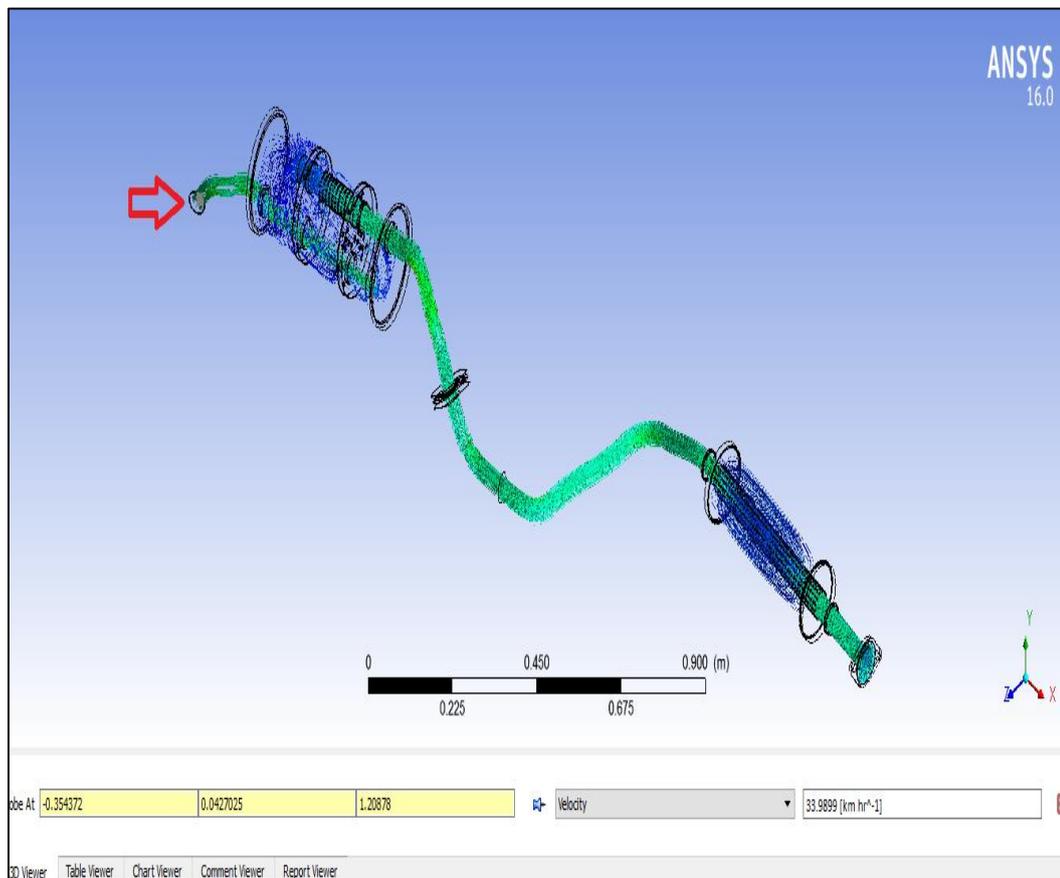
Figura 4-12. Secuencia de la simulación de flujo en el silenciador del sistema.



Fuente: Autores

A continuación se muestra la trayectoria del fluido a través del sistema de escape a plena carga.

Figura 4-13. Simulación de la trayectoria del fluido en el sistema de escape.



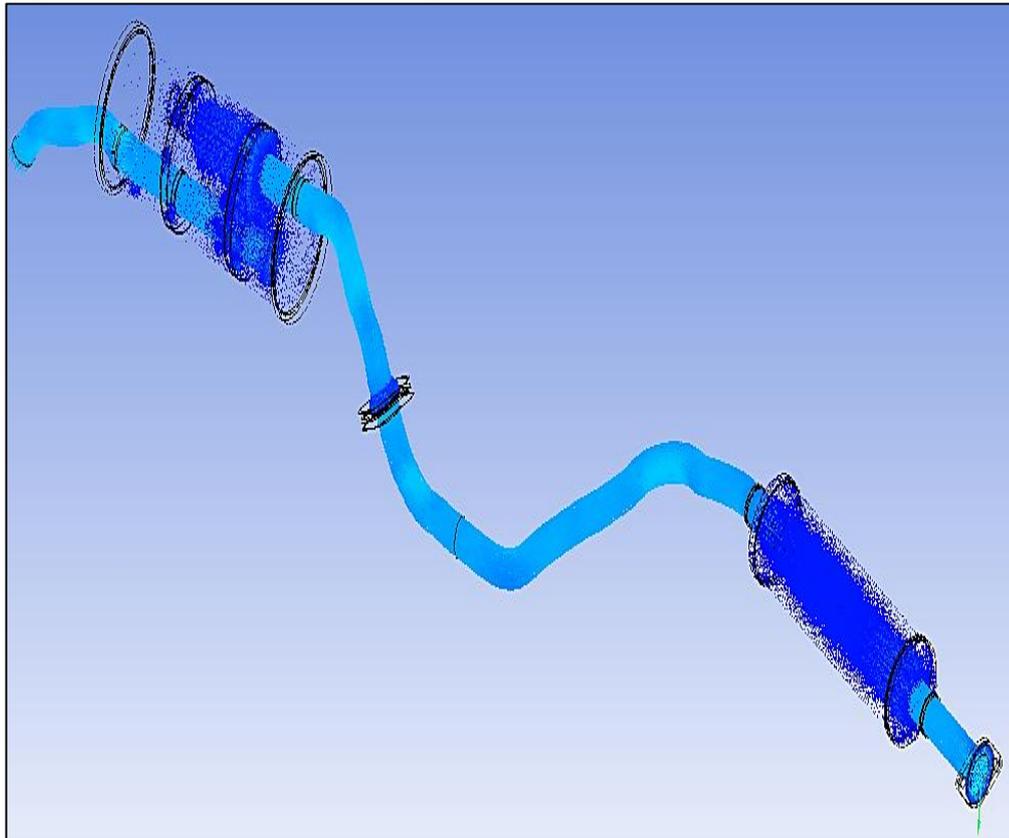
Fuente: Autores

#### 4.6 Análisis del comportamiento del fluido.

Los gases combustionados al ser expulsados de la cámara de combustión en el ciclo de escape del motor, pasan al múltiple o colector de escape cuya geometría debe asegurar el vaciado total de la misma, luego dichos gases nocivos (CO, NOx, HC) pasan al convertidor catalítico donde se transforman en gases no contaminantes (CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O) mediante un sinnúmero de reacciones de oxidación y reducción, finalmente pasan al silenciador, que no es más que un laberinto de cámaras expansivas donde los gases chocan entre si y contra el aire que se encuentra dentro, logrando así pérdida de energía por fricción, lo que se traduce en una notable reducción de velocidad y ruido de los gases.

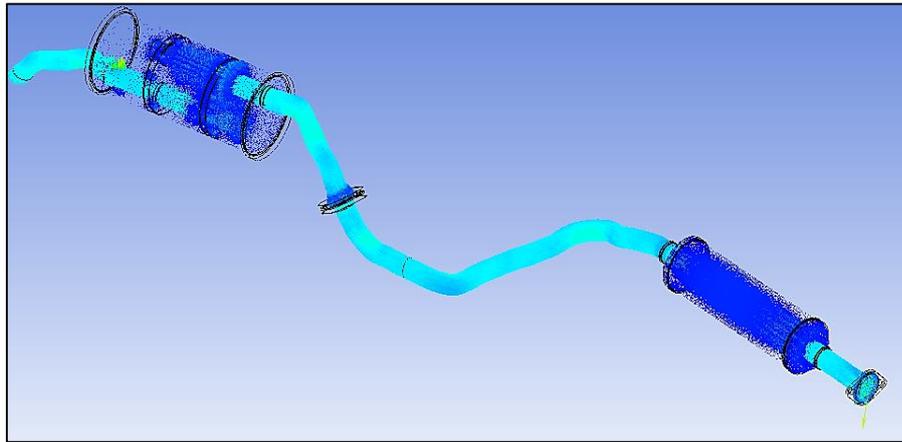
A continuación se muestra el comportamiento del fluido en las tres fases de trabajo del motor: ralentí, media y plena carga.

Figura 4-14. Simulación del comportamiento del fluido en el sistema en ralentí.



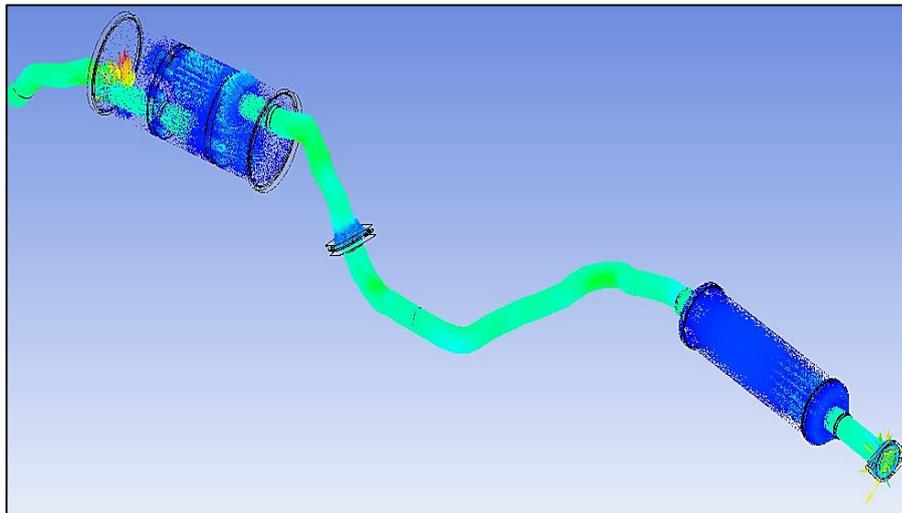
Fuente: Autores.

Figura 4-15 Simulación del comportamiento del fluido a media carga.



Fuente: Autores.

Figura 4-16. Simulación del comportamiento del fluido en el sistema a plena carga.



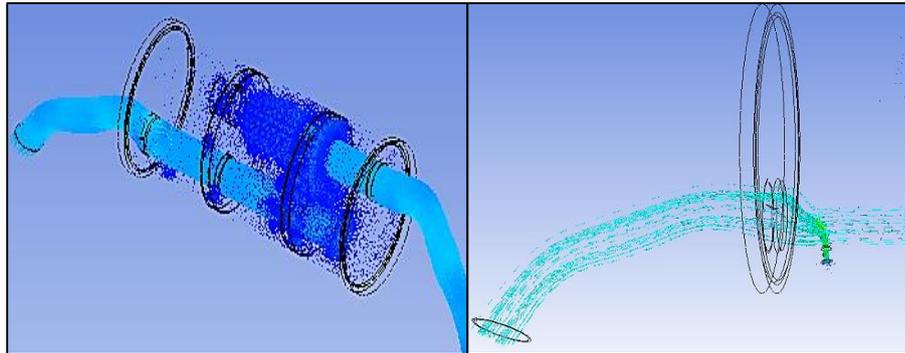
Fuente: Autores.

#### 4.7 Análisis del resonador Helmholtz.

En la tercera cámara de expansión del silenciador se encuentra el resonador de Helmholtz que comunica dicha cámara con la tubería de salida del sistema. Este resonador se encarga de evacuar una significativa cantidad de gases de alta frecuencia, sin embargo se apoya de las dos primeras cámaras para reducir al máximo la energía de los gases no evacuados, que luego serán evacuados a través del tubo de salida del sistema.

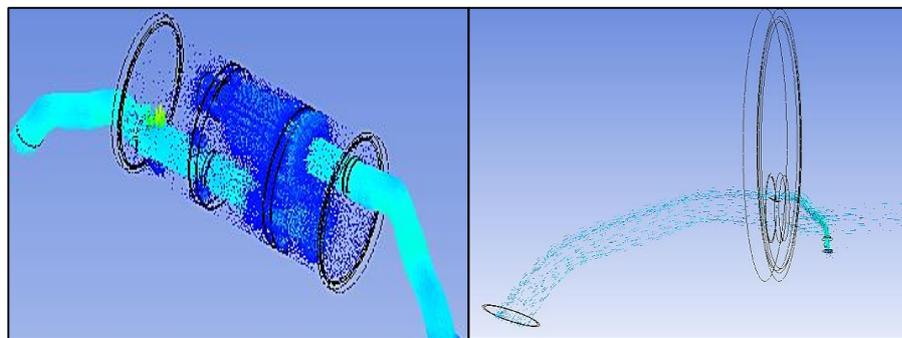
A continuación se muestra el comportamiento del resonador de Helmholtz, en las fases principales de funcionamiento del motor: ralentí, media y plena carga.

Figura 4-17. Simulación del comportamiento del fluido en el resonador de Helmholtz en ralentí.



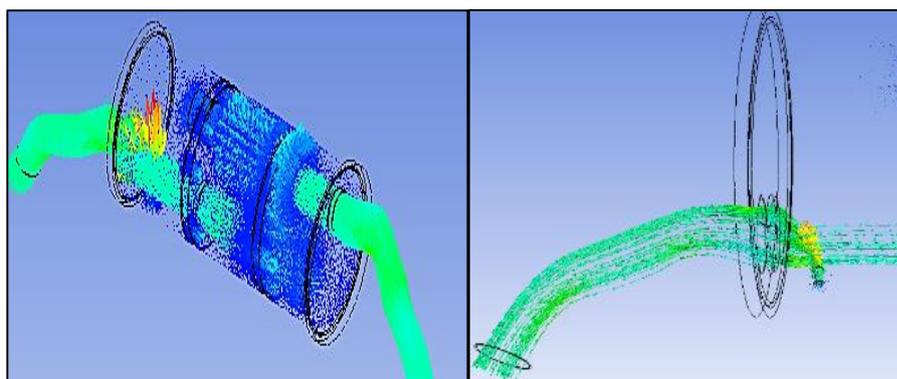
Fuente: Autores.

Figura 4-18. Simulación del comportamiento del fluido en el resonador de Helmholtz a media carga



Fuente: Autores.

Figura 4-19. Simulación del comportamiento del fluido en el resonador de Helmholtz a plena carga.



Fuente: Autores.

**4.8 Cálculo de velocidades y flujo másico de los gases combustionados en el sistema de escape del vehículo M4 en sus tres principales fases de funcionamiento: ralentí, media y plena carga.**

- $P \times V = n \times R \times T$  (1)

- $\rho = \frac{m}{V}$  (2)

- $n = \frac{m}{M}$  (3)

$$P \times V = n \times R \times T$$

$$P \times V = \frac{m}{M} \times R \times T$$

$$\frac{P \times M}{R \times T} = \frac{m}{V}$$

$$\rho = \frac{P \times M}{R \times T} \quad (4)$$

**$\rho$** : Densidad (Kg/m<sub>3</sub>)

**P**: Presión (Pa)

**M**: Masa molar (Kg/mol)

**R**: Constante universal de los gases (J/°K\*mol)

**T**: Temperatura (°K)

**DATOS:**

**Gas:  $CO_2$**

**Cálculo de la densidad del  $CO_2$  dentro del sistema de escape.**

- **P** = 1,5 atm = 151988 Pa (Presión dentro del sistema de escape)
- **T** = 570°C = 843.15 °K (Temperatura dentro del sistema de escape)
- **M** = 44,01 g/mol = 0.04401 Kg/mol
- **R** = 8.3144598 J/°K\*mol

$$\rho = \frac{P \times M}{R \times T}$$

$$\rho = \frac{151988 \text{ Pa} \times 0.04401 \text{ Kg/mol}}{8.3144598 \text{ J/°K} * \text{mol} \times 843.15 \text{ °K}}$$

$$\rho = 0.9542 \text{ Kg/m}_3$$

**Cálculo de la densidad del  $CO_2$  a la salida del sistema de escape.**

- **P atm**= 732.81hPa = 73281 Pa (Presión atmosférica de la ciudad de Ambato)
- **T ambiente**= 16°C = 289.15 °K (Temperatura ambiente en la ciudad de Ambato)
- **M** = 44,01 g/mol = 0.04401 Kg/mol
- **R** = 8.3144598 J/°K\*mol

$$\rho = \frac{P \times M}{R \times T}$$

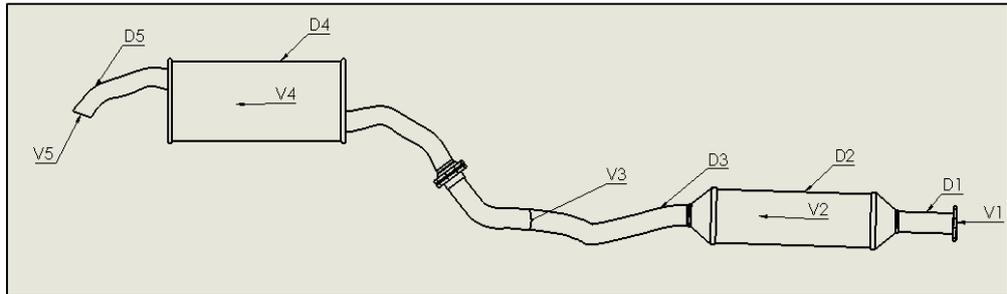
$$\rho = \frac{73281 \text{ Pa} \times 0.04401 \text{ Kg/mol}}{8.3144598 \text{ J/°K} * \text{mol} \times 289.15 \text{ °K}}$$

$$\rho = 1.3414 \text{ Kg/m}_3$$

## DATOS:

1. Velocidad de los gases de escape a la salida del catalizador a plena carga:  $V_1$

$$V_1 = 52 \text{ km/h} = 14.4444 \text{ m/s}$$



- $D_1 = D_3 = D_5 = 41.445 \text{ mm} = 0.041445 \text{ m}$
- $D_2 = 110 \text{ mm} = 0.110 \text{ m}$
- $D_4 = 167 \text{ mm} = 0.167 \text{ m}$

$$Q_1 = Q_2 \quad (5)$$

$$\partial_1 \times A_1 \times V_1 = \partial_2 \times A_2 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\partial_1 \times A_1 \times V_1}{\partial_2 \times A_2}$$

$$V_2 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 14.4444 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \times 0.0095033 \text{m}^2}$$

$$V_2 = 2.051 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_2 = Q_3$$

$$\partial_2 \times A_2 \times V_2 = \partial_3 \times A_3 \times V_3$$

$$V_3 = \frac{\partial_2 \times A_2 \times V_2}{\partial_3 \times A_3}$$

$$V_3 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.00095033\text{m}^2 \times 2.051 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494\text{m}^2}$$

$$V_3 = 14.4444 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_3 = Q_4$$

$$\partial_3 \times A_3 \times V_3 = \partial_4 \times A_4 \times V_4$$

$$V_4 = \frac{\partial_3 \times A_3 \times V_3}{\partial_4 \times A_4}$$

$$V_4 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494\text{m}^2 \times 14.4444 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0219039\text{m}^2}$$

$$V_4 = 0.8899 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_4 = Q_5$$

$$\partial_4 \times A_4 \times V_4 = \partial_5 \times A_5 \times V_5$$

$$V_5 = \frac{\partial_4 \times A_4 \times V_4}{\partial_5 \times A_5}$$

$$V_5 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0219039\text{m}^2 \times 0.8899 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.3414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494\text{m}^2}$$

$$V_5 = 10.2755 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_5 = \text{Velocidad de salida de los gases de escape} = 10.2755 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 37 \text{ km/h}$$

$$M_{SALIDA} = \rho_5 \times A_5 \times V_5$$

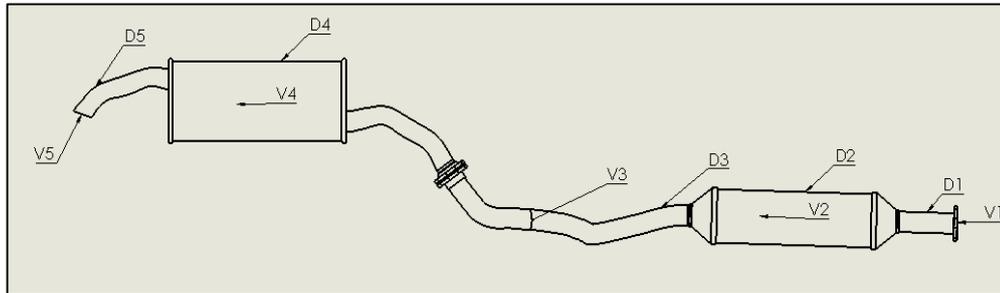
$$M_{SALIDA} = 1.3414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 10.2755 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_{SALIDA} = 0.0185995 \text{ Kg/s}$$

$$M_{SALIDA} = 66.9583 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

2. Velocidad de los gases de escape a la salida del catalizador a media carga:  $V_1$

$$V_1 = 32 \text{ km/h} = 8.8889 \text{ m/s}$$



- $D_1 = D_3 = D_5 = 41.445 \text{ mm} = 0.041445 \text{ m}$
- $D_2 = 110 \text{ mm} = 0.110 \text{ m}$
- $D_4 = 167 \text{ mm} = 0.167 \text{ m}$

$$Q_1 = Q_2$$

$$\rho_1 \times A_1 \times V_1 = \rho_2 \times A_2 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\rho_1 \times A_1 \times V_1}{\rho_2 \times A_2}$$

$$V_2 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 8.8889 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0095033 \text{m}^2}$$

$$V_2 = 1.2622 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_2 = Q_3$$

$$\partial_2 \times A_2 \times V_2 = \partial_3 \times A_3 \times V_3$$

$$V_3 = \frac{\partial_2 \times A_2 \times V_2}{\partial_3 \times A_3}$$

$$V_3 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0095033\text{m}^2 \times 1.2622 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494\text{m}^2}$$

$$V_3 = 8.8889 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_3 = Q_4$$

$$\partial_3 \times A_3 \times V_3 = \partial_4 \times A_4 \times V_4$$

$$V_4 = \frac{\partial_3 \times A_3 \times V_3}{\partial_4 \times A_4}$$

$$V_4 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494\text{m}^2 \times 8.8889 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0219039\text{m}^2}$$

$$V_4 = 0.5476 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_4 = Q_5$$

$$\partial_4 \times A_4 \times V_4 = \partial_5 \times A_5 \times V_5$$

$$V_5 = \frac{\partial_4 \times A_4 \times V_4}{\partial_5 \times A_5}$$

$$V_5 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0219039 \text{m}^2 \times 0.5476 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.3414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2}$$

$$V_5 = 6.3230 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_5 = \text{Velocidad de salida de los gases de escape} = 6.3230 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 22,8 \text{ km/h}$$

$$M_{\text{SALIDA}} = \rho_5 \times A_5 \times V_5$$

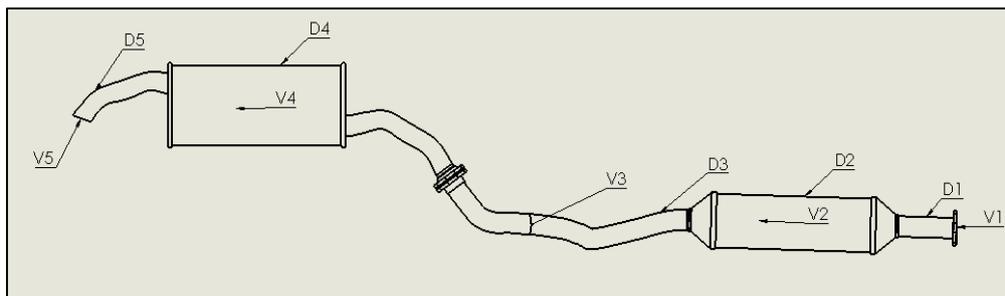
$$M_{\text{SALIDA}} = 1.3414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 6.3230 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{SALIDA}} = 0.0114452 \text{ Kg/s}$$

$$M_{\text{SALIDA}} = 41.21 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

3. Velocidad de los gases de escape a la salida del catalizador a ralentí:  $V_1$

$$V_1 = 20 \text{ km/h} = 5.5556 \text{ m/s}$$



- $D_1 = D_3 = D_5 = 41.445 \text{ mm} = 0.041445 \text{ m}$
- $D_2 = 110 \text{ mm} = 0.110 \text{ m}$
- $D_4 = 167 \text{ mm} = 0.167 \text{ m}$

$$Q_1 = Q_2$$

$$\partial_1 \times A_1 \times V_1 = \partial_2 \times A_2 \times V_2$$

$$V_2 = \frac{\partial_1 \times A_1 \times V_1}{\partial_2 \times A_2}$$

$$V_2 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 5.5556 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0095033 \text{m}^2}$$

$$V_2 = \mathbf{0.7889 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$Q_2 = Q_3$$

$$\partial_2 \times A_2 \times V_2 = \partial_3 \times A_3 \times V_3$$

$$V_3 = \frac{\partial_2 \times A_2 \times V_2}{\partial_3 \times A_3}$$

$$V_3 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0095033 \text{m}^2 \times 0.7889 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2}$$

$$V_3 = \mathbf{5.5556 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$Q_3 = Q_4$$

$$\partial_3 \times A_3 \times V_3 = \partial_4 \times A_4 \times V_4$$

$$V_4 = \frac{\partial_3 \times A_3 \times V_3}{\partial_4 \times A_4}$$

$$V_4 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 5.5556 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0219039 \text{m}^2}$$

$$V_4 = 0.3423 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Q_4 = Q_5$$

$$\partial_4 \times A_4 \times V_4 = \partial_5 \times A_5 \times V_5$$

$$V_5 = \frac{\partial_4 \times A_4 \times V_4}{\partial_5 \times A_5}$$

$$V_5 = \frac{0.9542 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0219039 \text{m}^2 \times 0.3423 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1.3414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2}$$

$$V_5 = 3.9525 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$V_5 = \text{Velocidad de salida de los gases de escape} = 3.9525 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 14.23 \text{ km/h}$$

$$M_{\text{SALIDA}} = \partial_5 \times A_5 \times V_5$$

$$M_{\text{SALIDA}} = 1.3414 \frac{\text{Kg}}{\text{m}_3} \times 0.0013494 \text{m}^2 \times 3.9525 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$M_{\text{SALIDA}} = 0.00715436 \text{ Kg/s}$$

$$M_{\text{SALIDA}} = 25.76 \frac{\text{Kg}}{\text{h}}$$

#### 4.9 Validación del modelo CFD para el sistema de escape del vehículo M4.

Para evaluar el criterio de validación del modelo CFD del sistema de escape es necesario medir la velocidad de los gases combustionados a la salida del silenciador en las tres principales fases de funcionamiento del motor, dicho parámetro es un valor de referencia real al que se puede comparar con los valores obtenidos mediante el modelo CFD y cálculo matemático.

Tabla 4-4 Tabla de valores de la velocidad de salida de los gases de escape del vehículo M4.

VELOCIDAD DE SALIDA DE LOS GASES DE ESCAPE			
Fases de funcionamiento del motor	VCM (km/h)	VCFD (km/h)	VR (km/h)
Ralentí (850 rpm)	14.23	13	13.5
Media carga (4200 rpm)	22.8	20	20.9
Plena carga (6000 rpm)	37	34	34.8

- VCM: Valores del cálculo por matemático.
- VCFD: Valores del modelo CFD (Dinámica de Fluidos Computacional).
- VR: Valores reales o medidos.

Gráfico 4-1. Comparación de los valores calculados y CFD.



Fuente: Autores

En la figura 4-20, se puede observar las curvas originadas por los valores reales de la velocidad de los gases escape a la salida del sistema, de los obtenidos mediante el modelo CFD y de los obtenidos por cálculo, las mismas que son comparadas entre sí para poder determinar su similitud, logrando apreciar que los valores obtenidos por el modelo CFD se aproximan mucho más a los valores reales que los valores obtenidos por cálculo.

## CÁLCULO DE ERRORES

Error existente entre los valores reales y los calculados matemáticamente.

- **A 850 rpm (Ralentí):**

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}|$$

$$E_A = \left| 13.5 \frac{km}{h} - 14.23 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = \left| -0.73 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = 0.73 \frac{km}{h}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$E_R = \frac{0.73 \text{ km/h}}{13.5 \text{ km/h}}$$

$$E_R = 0.0541$$

$$E_R = \mathbf{5.41\%}$$

- **A 4200 rpm (Media carga):**

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}|$$

$$E_A = \left| 20.9 \frac{km}{h} - 22.8 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = \left| -1.9 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = 1.9 \frac{km}{h}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$E_R = \frac{1.9 \text{ km/h}}{20.9 \text{ km/h}}$$

$$E_R = 0.0909$$

$$\mathbf{E_R = 9.1\%}$$

- **A 6000 rpm (Plena carga):**

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}|$$

$$E_A = \left| 34.8 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 37 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right|$$

$$E_A = \left| -2.2 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right|$$

$$E_A = 2.2 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$E_R = \frac{2.2 \text{ km/h}}{34.8 \text{ km/h}}$$

$$E_R = 0.0632$$

$$\mathbf{E_R = 6.32\%}$$

Error existente entre los valores reales y los calculados por el modelo CFD.

- **A 850 rpm (Ralentí):**

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}|$$

$$E_A = \left| 13.5 \frac{km}{h} - 13 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = \left| 0.50 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = 0.5 \frac{km}{h}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$E_R = \frac{0.5 \text{ km/h}}{13.5 \text{ km/h}}$$

$$E_R = 0.0370$$

$$E_R = \mathbf{3.70\%}$$

- **A 4200 rpm (Media carga):**

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}|$$

$$E_A = \left| 20.9 \frac{km}{h} - 20 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = \left| 0.9 \frac{km}{h} \right|$$

$$E_A = 0.9 \frac{km}{h}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$E_R = \frac{0.9 \text{ km/h}}{20.9 \text{ km/h}}$$

$$E_R = 0.04306$$

$$\mathbf{E_R = 4.31\%}$$

- **A 6000 rpm (Plena carga):**

$$\text{Error absoluto} = |\text{Valor verdadero} - \text{Valor aproximado}|$$

$$E_A = \left| 34.8 \frac{\text{km}}{\text{h}} - 34 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right|$$

$$E_A = \left| 0.8 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right|$$

$$E_A = 0.8 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$\text{Error relativo} = \frac{\text{Error absoluto}}{\text{Valor verdadero}}$$

$$E_R = \frac{0.8 \text{ km/h}}{34.8 \text{ km/h}}$$

$$E_R = 0.0229$$

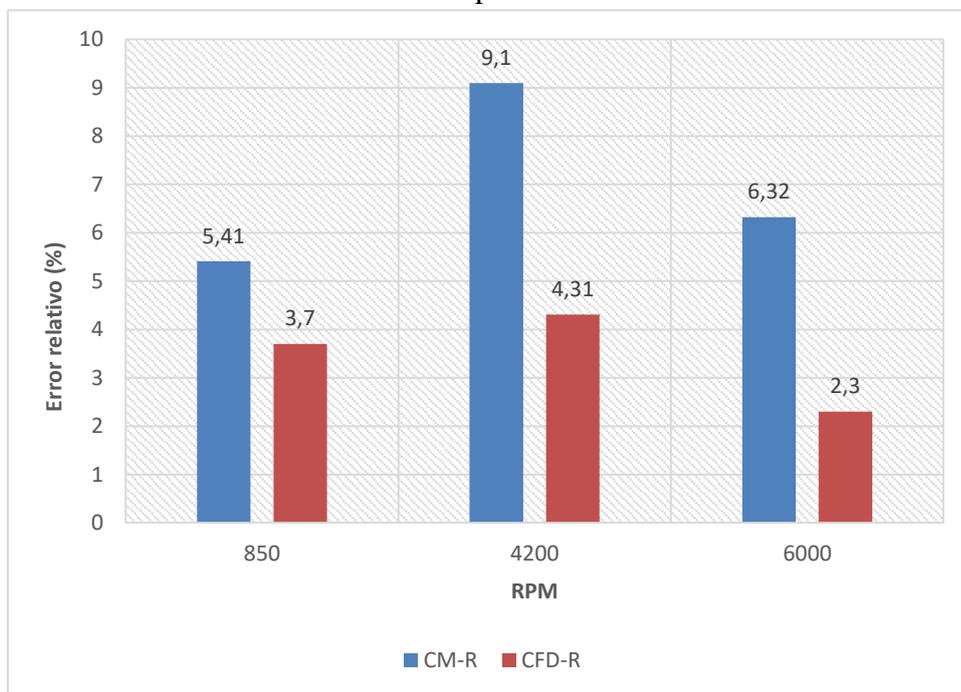
$$\mathbf{E_R = 2.3\%}$$

Tabla 4-5 Porcentaje de error.

Fases de funcionamiento del motor	$E_R$ CM-R	$E_R$ CFD-R
Ralentí (850 rpm)	5.41%	3.70%
Media carga (4200 rpm)	9.1%	4.31%
Plena carga (6000 rpm)	6.32%	2.3%

- $E_R$  CM-R: Error relativo entre los valores de velocidad obtenidos por cálculo y los valores reales.
- $E_R$  CFD-R: Error relativo entre los valores de velocidad obtenidos en el modelo CFD y los valores reales.

Gráfica 4-2 Comparación de errores



Fuente: Autores.

En la figura 4-21 se puede apreciar los indicadores de error, los mismos que son el resultado de la comparación entre los valores obtenidos mediante el modelo CFD y los valores reales, así mismo de los valores obtenidos mediante cálculo matemático y los valores reales, en las tres fases principales de funcionamiento del motor, logrando apreciar que los indicadores de error del modelo CFD son mínimos en comparación a los indicadores de error del cálculo matemático, por tal razón se observa que el modelo CFD se aproxima mucho más a la realidad lo cual reitera su fiabilidad.

El propósito de un análisis computacional no se trata solo de la visualización de resultados números, sino que hay que entender los fenómenos que se están sucediendo en la modelación, la comprensión del comportamiento del sistema ya que no existe una garantía del 100% en los resultados del CFD, los resultados de la simulación deben ser validados mediante datos experimentales recogidos mediante una experimentación, para que así el modelo sea ajustado. (CEDILLO, 2017)

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 *Conclusiones*

Se digitalizo en un software CAD la geometría del pre-silenciador y silenciador del sistema de escape del vehículo M4 de la marca GREAT WALL, para posteriormente prepararlos y realizar la simulación del flujo de los gases combustionados mediante el uso de la dinámica computacional de fluidos en ANSYS-FLUENT.

Se realizó la toma de datos a la salida del catalizador en tres principales fases de funcionamiento del motor: velocidad, temperatura y flujo volumétrico de los gases de escape, los mismos que son los parámetros de entrada para la simulación en el modelo CFD.

Se realizó la simulación del modelo CFD en las tres fases principales de funcionamiento del motor: ralentí, media y plena carga, y se observó la trayectoria del fluido de los gases de escape a lo largo del sistema, notando la reducción de velocidad y energía en el fluido.

Se realizó la simulación del modelo CFD para la prueba de estanqueidad y de fugas, del ítem 4.5 y 5.2 de la norma QCCJT003-2014 para sistemas de escape, teniendo como resultado la aprobación del sistema al cumplir con lo estipulado en la norma.

Se realizó la validación del modelo CFD para el sistema de escape a través de la comparación de los resultados obtenidos con los valores medidos experimentalmente, encontrando similitud entre los mismos, lo cual prioriza la fiabilidad del sistema.

#### 5.2 *Recomendaciones*

Al modelar la geometría del sistema de escape en el software se debe respetar los planos de construcción y los métodos que se utilizan para digitalizarlo, con el fin de evitar interferencias en la geometría y acercarse lo más posible a la realidad.

Se recomienda utilizar un criterio de mallado adecuado para el análisis en el modelo CFD.

Disponer de una computadora que posea altas prestaciones en memoria RAM y velocidad de procesamiento, ya que el análisis CFD demanda de mucha capacidad computacional.

El presente trabajo de investigación puede ser tomado como punto de partida para futuros aportes sobre el desarrollo de sistemas de escape en diferentes áreas de la ingeniería.

## **BIBLIOGRAFÍA**

**AICON, 3D.** *Escáner 3D.* [En línea] 2017. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: <http://aicon3d.com/es/aplicaciones/escaner-3d/ingenieria-inversa/ingenieria-inversa-para-objetos-de-cualquier-forma-y-tamano.html>.

**ANSYS, Inc.** *ANSYS SpaceClaim.* [En línea] 2017. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: <http://www.ansys.com/products/platform/ansys-spaceclaim>.

**ANSYS, Inc.** *ANSYS Fluent.* [En línea] 2017. [Consulta: 21 junio 2017.] Disponible en: <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>.

**ARROBA MUÑOZ, Leonardo Danilo, & JIMÉNEZ MARTÍNEZ, Danny Gabriel.** *“Implementación de un sistema de tratamiento de gases de escape mediante inyección de aire en un vehículo a gasolina”* [En línea] Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz. Riobamba-Ecuador. 2012. [Consulta: 16 marzo 2017.] Disponible en: <http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/2283/1/65T00040.pdf>.

**AXAYACATL, Olmo.** *Ingeniería inversa con escáneres 3D.* [En línea] 2015. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: <https://blogingenieria.com/empresas-ingenieria/ingenieria-inversa-escaneres-3d/>.

**AXAYACATL, Olmo.** *Ingeniería inversa.* [En línea] 2014. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: <https://blogingenieria.com/general/ingenieria-inversa/>.

**CABRERA MUNUERA, Jose.** *Diseño del sistema de escape de un motor de combustión de 4 tiempos para la competición MotoStudent.* [En línea] Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Aeroespacial y Mecánica de Fluidos. Sevilla-España. 2016. [Consulta: 05 julio 2017.] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abrproy/90645/fichero/jose+cabrera+munuera+.pdf>.

**CARNICERO, Antonio.** *Introducción al Método de Elementos Finitos (MEF).* [En línea] 2008. [Consulta: 26 mayo 2017.] Disponible en: <http://www.iit.comillas.edu/~carnicero/>

Resistencia/Introduccion\_al\_MEF.pdf.

**CEPEDA, Frank.** *Termodinámica*. [En línea] 2009. [Consulta: 16 marzo 2017.] Disponible en: [http://unefa-termodinamica.blogspot.com/2009\\_07\\_01\\_archive.html](http://unefa-termodinamica.blogspot.com/2009_07_01_archive.html).

**GARCÍA, Francisco.; PALACIO, Carlos.; GARCÍA, Uriel.** "Generación de mallas no estructuradas para la implementación de modelos numéricos". *DYNA*. [En línea] 2008. (Colombia). [Consulta: 21 junio 2017.] Disponible en: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/9549/11472>.

**GARCÍA, Gilbert.** *Sistema de escape en el automóvil*. [En línea] 2015. [Consulta: 15 marzo 2017.] Disponible en: <https://www.pruebaderuta.com/sistema-de-escape-en-el-automovil-2.php>.

**KESSLER, Martin.** *Dinámica de fluidos computacional*. [blog] 2016. [Consulta: 14 mayo 2017.] Disponible en: <http://www.esss.com.br/blog/es/2016/06/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>.

**LIDERES.** "Ciauto". *Revista Lideres*. [En línea] 2015. [Consulta: 16 marzo 2017.] Disponible en: <http://www.revistalideres.ec/lideres/ciauto-modelo-ecuador-ambato.html>.

**MARÍN, C.** *Sistema de admisión y escape*. [En línea] 2007. [Consulta: 15 marzo 2017.] Disponible en: [http://www.bdigital.unal.edu.co/10472/25/3517413.2007\\_5.pdf](http://www.bdigital.unal.edu.co/10472/25/3517413.2007_5.pdf).

**MEGANEBOY.** *Gases de escape y sistemas de anticontaminación vehicular*. [En línea] 2014. [Consulta: 16 marzo 2017.] Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.net/emision-gases-escape.htm>.

**MEZA, Frank.** *Flujo Másico*. [En línea] 2013. [Consulta: 11 julio 2017.] Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/125378533/Flujo-Masico>.

**NGK.** *Gases de escape y gases contaminantes*. [En línea] 2017. [Consulta: 11 julio 2017.] Disponible en: <https://www.ngk.de/es/tecnologia-en-detalle/sondas-lambda/aspectos-basicos-de-los-gases-de-escape/gases-de-escape-y-gases-contaminantes/>.

**PASTOR, Jose.** *Medición del flujo masico de los gases.* [En línea] 2012. [Consulta: 16 marzo 2017.] Disponible en: <http://termodinamicatorin.blogspot.com/2012/01/medicion-de-flujo-masico-en-gases.html>.

**PEREZ, Alvaro.** *Dinámica de Fluidos, Técnicas Avanzadas de Gráficos 3D.* [En línea] [Consulta: 11 julio 2017.] Disponible en: <http://unicesar.ambientalex.info/infoCT/Dinflucompargraes.pdf>.

**PEZZOTTI, Santiago.** *Introducción a la teoría de elementos finitos.* [En línea] 2008. [Consulta: 26 mayo 2016.] Disponible en: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Introduccion%20a%20la%20Teoria%20de%20Elementos%20Finitos%20-%202008.pdf>.

**PRADO, Jose Luis.** *CAE (Ingeniería asistida por ordenador).* [En línea] 2012. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: <https://sites.google.com/site/grafcomputaciona/estereoscopia/cae-ingenieria-asistida-por-ordenador>.

**ROJAS, Oswaldo, & ROJAS, Luis.** *Diseño asistido por computador (diseño y tecnología).* [En línea] 2006. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9\\_n1/a02.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf).

**SANCHEZ VAZQUEZ, Jesus.** *Simulación numérica directa en paralelo de las ecuaciones de Navier-Stokes en flujos con capa límite desprendida, aplicaciones en instalaciones deportivas con gradas cubiertas.* [En línea] Universidad de Sevilla, Ingeniería Industrial. 2017. [Consulta: 15 mayo 2017.] Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>.

**SEGURA, Jose.** *Contrapresion en el escape.* [blog] 2005. [Consulta: 05 julio 2017.] Disponible en: <http://www.todomecanica.com/blog/69-contrapresion-escape.html>.

**SIEMENS.** *Diseño asistido por computador (CAD).* [En línea] 2017. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: [https://www.plm.automation.siemens.com/es\\_sa/plm/cad.shtml](https://www.plm.automation.siemens.com/es_sa/plm/cad.shtml).

**SOLIDWORKS.** *Dinámica de fluidos computacional (CFD).* [En línea] 2017. [Consulta: 22 junio 2017.] Disponible en: <http://www.solidworks.es/sw/products/simulation/computational-fluid-dynamics.htm>.

**SPACECLAIM.** *ANSYS SpaceClaim.* [En línea] 2013. [Consulta: 23 junio 2017.] Disponible en: <http://www.spaceclaim.com/en/Products/ANSYSSpaceClaim.aspx>.

**TODOAUTOS.** *Sistema de escape: funcionamiento e importancia en el auto.* [En línea] 2016. [Consulta: 11 julio 2017.] Disponible en: <http://www.todoautos.com.pe/portal/auto/mecanica/6406-sistema-escape-auto>.