



# INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**Proyecto Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Mecánica Automotriz**

**Autor:** José Manuel Montalvo Mora

**Tutor:** Ing. Edgar Vera Puebla, MSc.

**Análisis del Comportamiento Térmico del Flujo de Gases  
Combustionados en el Sistema de Escape del Motor Yamaha  
125 cc con Aplicación a un Kart Homologado**

**Guayaquil-Ecuador |2024**



### **Certificación de Autoría**

Yo, José Manuel Montalvo Mora, con C.I.: 2450190059, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad intelectual, reglamento y leyes.

---

José Manuel Montalvo Mora

C.I.: 2450190059

### **Aprobación del Tutor**

Yo, Edgar Vera Puebla certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su seguridad y autenticidad, como de su contenido

---

Ing. Edgar Vera Puebla, MSc.

C.I.: 1715264105

Director del Proyecto

## **Dedicatoria**

El presente trabajo se lo dedico a mi Madre Grace Mora, este logro académico es un reflejo del incansable esfuerzo que ha invertido para brindarme una educación sólida. Cada sacrificio que ha hecho, cada día de trabajo duro y cada decisión que tomó en mi nombre son el fundamento de mi éxito. Su dedicación y compromiso son un regalo que valoro más allá de las palabras.

***José Manuel Montalvo Mora***

## **Agradecimientos**

Mi eterna gratitud a las personas que han estado al largo de mi carrera universitaria apoyándome y alentándome en todo momento para seguir adelante. Agradezco sobre todo a mi familia, mi madre Grace, mi hermano Sebastián, mi tío Jaime, y mis amigos cercanos con los cuales siempre puedo contar para cualquier adversidad. Y, por último, pero no menos importante agradecer a la Universidad Internacional del Ecuador por brindarme la educación durante estos años, y al Ing. Edgar Vera por guiarme en el proceso de titulación. ¡Muchas gracias!

***José Manuel Montalvo Mora***

## Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimientos.....	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Resumen .....	xii
Abstract.....	xiii
Capítulo I.....	1
Problema de la Investigación.....	1
1.1. Tema de Investigación.....	1
1.2. Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema .....	1
1.2.1. <i>Planteamiento del Problema</i> .....	1
1.2.2. <i>Formulación del Problema</i> .....	3
1.3. Sistematización del Problema.....	3
1.4. Objetivos de la Investigación.....	3
1.4.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.4.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.5. Justificación e Importancia de la Investigación.....	4
1.5.1. <i>Justificación Teórica</i> .....	4
1.5.2. <i>Justificación Metodológica</i> .....	5
1.5.3. <i>Justificación Práctica</i> .....	7
1.5.4. <i>Delimitación Temporal</i> .....	8
1.5.5. <i>Delimitación Geográfica</i> .....	8

1.5.6.	<i>Delimitación del Contenido</i> .....	9
1.6.	Alcance .....	9
Capítulo II.....		11
2.	Marco de Referencia.....	11
2.1.	El Sistema de Escape en el Motor de Combustión Interna.....	11
2.1.1.	<i>Colector de Escape</i> .....	11
2.1.2.	<i>Convertidor Catalítico</i> .....	12
2.1.3.	<i>Silenciador</i> .....	14
2.1.4.	<i>Tubos y Conductor</i> .....	14
2.1.5.	<i>Sonda Lambda (Sensor O<sub>2</sub>)</i> .....	15
2.1.6.	<i>Importancia del Sistema de Escape en el Desempeño de un Kart</i> .....	18
2.2.	Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) .....	19
2.3.	Efectos de la Temperatura en la Eficiencia y Durabilidad del Motor .....	21
2.3.1.	<i>Eficiencia del Motor</i> .....	22
2.3.2.	<i>Durabilidad del Motor</i> .....	22
2.4.	Descripción del Motor Yamaha 125 cm <sup>3</sup> .....	23
2.4.1.	<i>Características Técnicas y Especificaciones</i> .....	24
2.4.2.	<i>Diseño del Sistema de Gases de Escape</i> .....	25
Capítulo III.....		28
3.	Metodología de la Simulación de Dinámica de Fluido Computacional (CFD).....	28
3.1.	Introducción a la Metodología CFD.....	28
3.2.	Consideraciones de Diseño y Materiales .....	28
3.3.	Materiales Aplicados en la Fabricación de los Escapes de Kart .....	29

3.4.	Presión de los Gases de Escape en un Motor Yamaha 125 cm <sup>3</sup> .....	30
3.5.	Extracción de Medidas del Sistema de Escape .....	31
3.6.	Modelado Geométrico del Sistema de Escape.....	33
3.7.	Simulación del Comportamiento del Fluido de Gases de Escape .....	37
3.7.1.	<i>Condiciones de Frontera</i> .....	42
3.7.2.	<i>Generación del Mallado del Flujo de Gases</i> .....	43
3.7.3.	<i>Obtención de Resultados del Proceso de Simulación</i> .....	45
	Capítulo IV .....	48
4.	Análisis de Resultados .....	48
4.1.	Análisis de Datos Obtenidos.....	48
4.1.1.	<i>Análisis de Velocidad del Gases de Escape</i> .....	49
4.1.2.	<i>Análisis de Presión Estática del Gases de Escape</i> .....	52
4.1.3.	<i>Análisis de Coeficiente de Película de Pared de los Gases de Escape</i> .....	54
	Conclusiones.....	56
	Recomendaciones .....	57
	Bibliografía.....	58

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Colector de Gases de Escape</i> .....	12
Figura 2 <i>Convertidor Catalítico</i> .....	13
Figura 3 <i>Silenciador y el Comportamiento de su Flujo de Gases</i> .....	14
Figura 4 <i>Sensor Sonda Lambda</i> .....	17
Figura 5 <i>Sistema de Escape de Gases de un Kart</i> .....	19
Figura 6 <i>Aplicación de Simulación CFD en Autodesk CFD</i> .....	21
Figura 7 <i>Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> Aplicado a Karts</i> .....	24
Figura 8 <i>Sistema de Escape de Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup></i> .....	27
Figura 9 <i>Inicio de Desmontaje de Sistema de Escape de Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup></i> .....	31
Figura 10 <i>Componentes a Medir del Sistema de Escape</i> .....	32
Figura 11 <i>Geometría Interna del Sistema de Escape</i> .....	32
Figura 12 <i>Inicio de Modelado de Brida de Escape</i> .....	33
Figura 13 <i>Aplicación de Extrusión en 3D en Brida</i> .....	34
Figura 14 <i>Aplicación de Barrido de Sección</i> .....	35
Figura 15 <i>Aplicación de Herramienta de Solevar</i> .....	35
Figura 16 <i>Visualización de la Sección Interna y Externa del Sistema de Escape</i> .....	36
Figura 17 <i>Geometría de Salida de los Gases de Escape</i> .....	37
Figura 18 <i>AutoDesk CFD 2024</i> .....	38
Figura 19 <i>Importación de Modelado 3D a CFD</i> .....	38
Figura 20 <i>Eliminación de Bordes</i> .....	39
Figura 21 <i>Eliminación de Objetos Pequeños</i> .....	39
Figura 22 <i>Generación del Volumen de los Gases de Escape</i> .....	40

Figura 23 <i>Extracción de Volumen de los Gases de Escape y Edición de Materiales</i> .....	41
Figura 24 <i>Volumen de los Gases de Escape</i> .....	41
Figura 25 <i>Condiciones de Frontera</i> .....	42
Figura 26 <i>Inicio del Proceso de Mallado</i> .....	43
Figura 27 <i>Finalización del Proceso de Mallado</i> .....	44
Figura 28 <i>Resultados de Velocidad del Flujo de Gases de Escape</i> .....	45
Figura 29 <i>Resultados de Presión del Flujo de Gases de Escape</i> .....	46
Figura 30 <i>Resultados de Coeficiente de Pared del Flujo de Gases de Escape</i> .....	47
Figura 31 <i>Análisis del Modelado del Sistema de Escape con Designación de su Designación de Material</i> .....	48
Figura 32 <i>Análisis de Velocidad del Flujo de Gases de Escape</i> .....	50
Figura 33 <i>Velocidad Máxima y Área de Turbulencia del Flujo de Gases de Escape</i> .....	51
Figura 34 <i>Análisis Integral del Flujo de Gases de Escape</i> .....	51
Figura 35 <i>Análisis de Presión Estática de Gases de Escape</i> .....	52
Figura 36 <i>Análisis del Comportamiento de Presión Estática de Gases de Escape</i> .....	53
Figura 37 <i>Análisis del Comportamiento de Presión Estática de Gases a la Salida del Escape</i> .....	54
Figura 38 <i>Análisis del Coeficiente de Película de Pared de los Gases de Escape</i> .....	55

## Resumen

Este proyecto se centró en el análisis del comportamiento del fluido dinámico de los gases de escape en un motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>, aplicado a un kart homologado, utilizando dinámica de fluidos computacional (CFD). Los objetivos principales fueron investigar la distribución de la velocidad de los gases a lo largo del sistema de escape, realizar simulaciones que evalúen el diseño del sistema en términos de minimización de pérdidas y mejorar el rendimiento del motor, y evaluar los resultados en términos de presión estática, coeficiente de película de pared y velocidad del flujo. Los resultados mostraron que la velocidad de los gases varía significativamente a lo largo del sistema, con un mínimo de 0 cm/s en las paredes laterales internas y un máximo de 4353.94 cm/s en la salida, donde se identificó una turbulencia significativa debido a un orificio de salida reducido. La presión estática también mostró variaciones notables, desde un máximo de 52314.7 dyne/cm<sup>2</sup> en la entrada hasta un mínimo de -1257.55 dyne/cm<sup>2</sup> en la salida, lo que sugiere la necesidad de optimizar el diseño para reducir pérdidas y mejorar la eficiencia. El coeficiente de película de pared alcanzó un valor máximo de 0.00456 W/cm<sup>2</sup>\*K en la sección de salida, indicando áreas críticas para la transferencia de calor. Las conclusiones sugieren que mejoras en el diseño del orificio de salida, refinamiento del modelado en áreas de baja velocidad, y optimización de la transferencia de calor podrían conducir a un sistema de escape más eficiente y un rendimiento mejorado del motor. Este estudio ofrece recomendaciones concretas para optimizar el diseño del sistema de escape y mejorar el desempeño del motor en aplicaciones de karts homologados.

**Palabras Clave:** Sistema de escape, termodinámica, automotriz, kart, dinámica de fluidos.

### **Abstract**

This project focused on the analysis of the dynamic fluid behavior of exhaust gases in a Yamaha 125 cm<sup>3</sup> engine, applied to a homologated kart, using computational fluid dynamics (CFD). The main objectives were to investigate the gas velocity distribution along the exhaust system, perform simulations that evaluate the system design in terms of minimizing losses and improving engine performance, and evaluate the results in terms of pressure static, wall film coefficient and flow velocity. The results showed that the gas velocity varies significantly throughout the system, with a minimum of 0 cm/s at the internal side walls and a maximum of 4353.94 cm/s at the outlet, where significant turbulence was identified due to a reduced exit hole. The static pressure also showed notable variations, from a maximum of 52314.7 dyne/cm<sup>2</sup> at the inlet to a minimum of -1257.55 dyne/cm<sup>2</sup> at the outlet, suggesting the need to optimize the design to reduce losses and improve efficiency. The wall film coefficient reached a maximum value of 0.00456 W/cm<sup>2</sup>\*K in the exit section, indicating critical areas for heat transfer. The findings suggest that improvements in exhaust port design, refinement of modeling in low-speed areas, and optimization of heat transfer could lead to a more efficient exhaust system and improved engine performance. This study offers concrete recommendations to optimize exhaust system design and improve engine performance in homologated kart applications.

**Keywords:** Exhaust system, thermodynamics, automotive, kart, fluid dynamics.

## Capítulo I

### Problema de la Investigación

#### 1.1. Tema de Investigación

Análisis del comportamiento térmico del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc con aplicación a un kart homologado.

#### 1.2. Planteamiento, Formulación y Sistematización del Problema

Dentro del estudio del análisis del comportamiento térmico del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc aplicando la dinámica de fluidos computacional con sus siglas en inglés CFD, este es un proceso complejo de la ingeniería asistida por ordenador fundamental con el fin de comprender y mejorar el rendimiento del flujo de gases de escape de un motor para lograr una mejora en su rendimiento, así como de la forma de los componentes que conforman el sistema de escape de gases aplicado a un kart homologado.

##### 1.2.1. Planteamiento del Problema

Dentro del mundo de las competencias automovilísticas, así como del desempeño de los vehículos en serie se busca constantemente se busca mejorar el rendimiento de forma óptima del motor de combustión interna, para el caso de un kart este tipo de mejoras es de mucha importancia ya que al ser un vehículo utilizado en carreras lo que se busca es mejorar el rendimiento y sobre todo disminuir al máximo el tiempo de carrera por lo que cada fracción de segundo es de suma importancia.

Por este motivo es que el sistema de salida de gases del motor o conocido como escape cumple un papel fundamental en el rendimiento de los motores de combustión interna y para este caso de estudio del motor Yamaha 125 cc, cabe aclarar que el llegar a comprender y mejorar su comportamiento térmico es un desafío complejo. La combustión genera al finalizar su ciclo de operación gases calientes los cuales deben ser expulsados eficientemente

para evitar la retroalimentación negativa del motor provocada por la turbulencia provocada en el sistema de escape, así como la maximización de potencia a la salida del vehículo. Además, la conformación y diseño del sistema de escape debe cumplir según reglamentación específica de la competencia, lo que añade restricciones adicionales al proceso de optimización.

Para el planteamiento del problema en el presente proyecto en definitiva se centra en la necesidad de poder entender de forma detallada como es el comportamiento térmico de un flujo como lo es el provocado por el flujo de los gases de escape del motor al circular por el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc colocado en un vehículo de competencia automovilística como lo es el kart con chasis homologado. Esto implica básicamente realizar el análisis de la distribución de la temperatura, comportamiento de los perfiles de velocidad y de otros parámetros de suma importancia para poder detectar posibles obstrucciones o normalmente llamados cuellos de botella y áreas de mejoras en el diseño generado del sistema de escape.

El desarrollo del presente estudio es justificado por su potencial impacto en el rendimiento global de vehículo kart. Un correcto sistema de escape con optimización puede de manera fácil aumentar la potencia de un motor, mejorar significativamente la eficiencia del combustible y disminuir drásticamente la temperatura del motor, de esta forma lo que se logra es prolongar su vida útil. Además, sin duda alguna al obtener un mejor entendimiento del comportamiento térmico del sistema de escape puedes ayudar significativamente a los departamentos de diseño de las marcas a rediseñar y mejorar estos elementos haciéndolos más ligeros y compactos, mejorando significativamente el rendimiento como la maniobrabilidad del kart durante las competiciones que realizan. En definitiva, el presente proyecto investigativo lo que pretende es abordar un aspecto crítico, pero al mismo tiempo desafiante del diseño del diseño de cada uno de los componentes como sistemas de los karts de

competición, con el único objetivo que es el de mejorar su rendimiento y elevar la competitividad en los circuitos.

### **1.2.2. *Formulación del Problema***

¿Cómo afecta el análisis del comportamiento térmico en el rendimiento general del motor Yamaha 125 cc según la conformación del diseño del sistema de escape aplicado a un kart homologado de competencia?

### **1.3. *Sistematización del Problema***

- ¿Cuál es el rendimiento térmico del sistema de escape del motor Yamaha 125 cc en un kart homologado?
- ¿Cómo afecta la geometría y el diseño del sistema de escape al flujo de gases combustionados?
- ¿Cuál es el impacto de las condiciones de funcionamiento del motor en el comportamiento térmico del sistema de escape?
- ¿Cómo se pueden optimizar el diseño y la configuración del sistema de escape para mejorar su rendimiento térmico?

### **1.4. *Objetivos de la Investigación***

#### **1.4.1. *Objetivo General***

- Analizar el comportamiento del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc con aplicación en un kart homologado, utilizando la dinámica de fluidos computacional (CFD).

#### **1.4.2. *Objetivos Específicos***

- Investigar cómo se distribuye la velocidad de los gases a lo largo del sistema de escape en diferentes condiciones de funcionamiento del motor, identificando zonas críticas donde se podrían producirse sobrecalentamientos o puntos de estrangulamiento del flujo.

- Realizar el modelado y simulación que evalúen el diseño del sistema de escape, según su geometría en términos de minimización de las pérdidas y mejoramiento del rendimiento en el motor.
- Evaluar los resultados obtenidos en la simulación dentro de los parámetros de comportamiento de presión estática, coeficiente de película de pared y velocidad de flujo.

## **1.5. Justificación e Importancia de la Investigación**

La justificación general del presente proyecto de análisis del comportamiento térmico del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc, aplicando la dinámica de fluidos computacional, para un kart homologado, puede basarse en varios aspectos importantes como son el mejoramiento del rendimiento del vehículo, optimización del sistema de escape, reducción de emisiones y cumplimiento normativo, ahorro del costo y tiempo de desarrollo, mejora de la competitividad del vehículo en carrera y contribución al desarrollo tecnológico.

### ***1.5.1. Justificación Teórica***

La justificación planteada al análisis térmico del flujo de gases en el escape de un motor Yamaha 125 cc en un kart homologado es de suma importancia para optimizar el rendimiento que el sistema posee. La dinámica de fluidos computacional permite de una forma clara simular con precisión y casi exactitud la compleja interacción entre los gases de escape y el sistema de escape, proporcionando datos de alta importancia sobre la distribución de temperatura, la eficiencia del escape y las pérdidas de presión generadas por su desempeño natural. Esta información es fundamental para poder de esta manera mejorar el diseño del sistema de escape, maximizando la extracción de energía provocada por el ciclo de la combustión del motor de combustión interna y minimizando las pérdidas térmicas del flujo de los gases combustionados. Además, una comprensión profunda del comportamiento térmico

del sistema de escape contribuye a aumentar la durabilidad del motor de forma significativa y reducir las emisiones nocivas, cumpliendo de esta forma con las regulaciones ambientales y de competición.

Así mismo el desempeño de la búsqueda del sustento teórico tiene su base en distintas fuentes bibliográficas, fichas técnicas de investigación y libros técnicos, artículos científicos y estudios relacionados directamente con la presente investigación, para lo cual a continuación se los presenta de la siguiente manera:

(Camaño, 2021) realiza un “Estudio experimental y modelado CFD del proceso de combustión de mezclas combustibles de hidrógeno, metano y gas de síntesis en una bomba cilíndrica con acceso óptico”.

Según (Quinga, 2021) estudia el “Análisis del proceso de combustión del quemador tipo Venturi mediante simulación CFD de volúmenes finitos, a partir de modelo 3D con extracción de volumen para discretización de malla, finalmente se generó un dominio externo en 2D para simulación de flama”.

(González & Gayubo, 2023) investiga sobre “Determinación de zonas críticas mediante análisis CFD para sensorización de la calidad del aire”.

(Sánchez, 2016) estudia un “Modelo de radiación de gases aplicable a simulaciones CFD en procesos de combustión”.

Finalmente, para base de la presente investigación (Gómez & García, 2020) estudia el “análisis de la combustión en un quemador de turbina de gas mediante la aplicación del modelo CFD”.

### ***1.5.2. Justificación Metodológica***

El estudio de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para poder realizar el análisis del comportamiento térmico del flujo de gases en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc en un kart homologado presenta varias ventajas significativas.

En primer lugar, la dinámica de fluidos computacional brinda una correcta representación detallada y precisa del comportamiento del flujo de gases en el sistema de escape del motor, lo que proporciona un entendimiento correcto de los fenómenos térmicos y de flujo que ocurren en un determinado o limitado entorno complejo. Esta capacidad de modelado 3D y muy detallado es crucial para identificar áreas de elevada temperatura, puntos de estrangulamiento del flujo, zonas de recirculación de gases y otros aspectos que pueden afectar el rendimiento del motor y de cada uno de los elementos que conforman el sistema de escape.

Además, la dinámica de fluidos computacional ofrece la flexibilidad para evaluar una amplia gama de diseños y configuraciones del sistema de escape de manera rápida y verdaderamente eficiente. Esto permite a los ingenieros encargados de los departamentos de diseño de las marcas o empresas automotrices a nivel mundial trabajen con diferentes conceptos de diseño para de esta manera poder optimizar el sistema con el único fin de mejorar el rendimiento térmico, la eficiencia de combustión de combustión interna y la potencia del motor.

Otra ventaja importante de la dinámica de fluidos computacional es su capacidad para simular cada una de las condiciones operativas variadas, como diferentes velocidades de flujo, cargas del motor y condiciones ambientales.

Esto permite lograr evaluar el rendimiento operacional del sistema de escape del motor en una amplia variedad de escenarios de conducción, lo que ayuda a garantizar un funcionamiento óptimo en una amplia gama de condiciones que se presentan al momento del desarrollo de la competencia.

En definitiva, la metodología de la dinámica de fluidos computacional brinda una herramienta de alto valor y versátil para poder comprender y optimizar el comportamiento térmico del flujo de gases en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc en un kart

homologado. Así mismo su capacidad para modelar con precisión el flujo de gases, evaluar diferentes diseños de los sistemas de escape y condiciones operativas y suministrar información detallada hace que sea una elección sólida para este tipo de análisis en ingeniería de vehículos de competencia.

### ***1.5.3. Justificación Práctica***

La justificación práctica del presente estudio investigativo bajo la metodología a ser aplicada para utilizar los softwares Autodesk Inventor y CFD en el estudio del comportamiento térmico del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cc se basa en su capacidad para poder integrar múltiples aspectos fundamentales del diseño y la simulación en un entorno de modelado 3D de forma intuitiva y altamente funcional.

En primer lugar, tanto en el software Inventor como CFD ofrecen potentes herramientas de modelado las cuales permiten crear geometrías sencillas y otras complejas con alta precisión, lo que es crucial para representar con exactitud el sistema de escape y el motor de combustión interna. Estos programas también la facilidad de poder aplicar la importación de geometrías desde otras fuentes, lo que puede ser útil para integrar modelos existentes del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>.

Por otro lado, tanto el software Inventor como CFD cuentan con capacidades de generar la simulación térmica que permiten analizar de forma correcta y fácil el comportamiento del flujo de gases combustionados en el sistema de escape del motor.

Estas herramientas permiten poder definir cada una de las condiciones de contorno, como lo es la temperatura a la salida del motor y la velocidad del flujo con que se desplazan los gases, y simular el comportamiento térmico del sistema de escape bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

Otro aspecto para tomarlo muy en cuenta es la integración de herramientas de modelado y simulación en un único entorno de software facilita el flujo de trabajo y la colaboración entre diseñadores y analistas. Además, tanto Inventor como CFD son plataformas basadas en la nube, lo que significa que los proyectos se pueden acceder y compartir fácilmente desde cualquier ubicación, convirtiéndose de esta manera en una gran ventaja al desarrollar este tipo de estudios investigativos, así como profesionales en el área automotriz.

En resumen, el poder utilizar los softwares Autodesk Inventor y CFD para poder realizar el análisis del comportamiento térmico del flujo de gases en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> ofrece una solución integral y eficiente que combina capacidades de modelado 3D avanzadas con herramientas de simulación térmica precisas, facilitando así el diseño y la optimización del sistema de escape del kart homologado.

#### ***1.5.4. Delimitación Temporal***

La delimitación temporal del proyecto desde el 20 de mayo al 8 de septiembre de 2024 se justifica para garantizar un análisis exhaustivo antes de la temporada de competición de karts. Este período permite la realización completa del estudio, incluida la preparación del modelo, la simulación dinámica de fluido computacional, el análisis de resultados y cualquier ajuste necesario en el diseño del sistema de escape, asegurando que el kart homologado esté listo y optimizado para su rendimiento máximo durante la competición.

#### ***1.5.5. Delimitación Geográfica***

La elección de Guayaquil como ubicación geográfica para el análisis se justifica por su relevancia como centro urbano y su importancia en la industria del karting en Ecuador. La Universidad Internacional del Ecuador ofrece una ubicación central y recursos técnicos adecuados para llevar a cabo el estudio de manera efectiva. Además, la concentración de

equipos y competiciones en la región facilita la aplicación práctica de los hallazgos para mejorar el rendimiento de los karts.

#### **1.5.6. Delimitación del Contenido**

El presente estudio investigativo se enfoca en el análisis térmico del flujo de gases combustionados en el sistema de escape de un motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>, aplicando la dinámica de fluidos computacional por medio de la utilización de los softwares Autodesk Inventor y CFD específicamente para un kart homologado. Se investigará la distribución y comportamiento de temperaturas, la eficiencia del sistema de escape y los efectos del diseño del sistema de escape en el rendimiento del motor. Así mismo se examinarán diversas condiciones de funcionamiento del motor y del kart para comprender cómo afectan al comportamiento térmico del sistema de escape. La investigación no abordará aspectos relacionados con la combustión interna del motor, limitándose exclusivamente al análisis del flujo de gases en el sistema de escape y su interacción con el entorno del kart homologado.

#### **1.6. Alcance**

El alcance que se pretende en esta investigación se centra en el análisis del comportamiento térmico y fluidodinámico del sistema de escape del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>, aplicado a un kart homologado. Se procede a la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) para de esta manera modelar y simular el flujo de gases combustionados que se genera a lo largo de todos los componentes que conforman el sistema de escape. Se investigará la distribución de temperaturas dentro de su comportamiento normal de funcionamiento, los perfiles de velocidad y cualquier fenómeno de recirculación o turbulencia que afecte el rendimiento del motor de combustión interna y las emisiones generadas. Se compararán cada uno los resultados obtenidos con datos experimentales en el kart y estudios previos para validar el modelo de simulación. El análisis de los resultados permitirá identificar específicamente cada una de las áreas de mejora en el diseño del sistema

de escape con que cuenta, así como proporcionar recomendaciones para optimizar la eficiencia del motor y cumplir con los estándares de emisiones dentro de la competencia o su funcionamiento normal. Si bien la investigación se enfoca en el motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> y su aplicación en karts homologados, los hallazgos podrían tener aplicaciones más amplias en el diseño de sistemas de escape para otros motores de combustión interna utilizados en diferentes vehículos recreativos o de competición.

## Capítulo II

### Marco de Referencia

El marco teórico referencial establece la base conceptual para el análisis del comportamiento térmico del flujo de gases en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>. Se apoya en principios de la dinámica de fluidos computacional, que permite modelar y simular con precisión los fenómenos de flujo y transferencia de calor. Este enfoque facilita la comprensión de la interacción entre el diseño del sistema de escape y el rendimiento del motor, con implicaciones significativas para la optimización de los karts homologados.

#### 2.1. El Sistema de Escape en el Motor de Combustión Interna

El sistema de escape de un motor de combustión interna es una parte fundamental de los sistemas de los vehículos que se encarga de evacuar los gases de escape producidos durante el proceso de combustión hacia el medio ambiente.

Al investigar sobre las funciones que cumple un sistema de escape (Álvarez, 2005) indica que “por una parte, evacua los gases de escape evitando o atenuando las contrapresiones de escape y por otra, reducir el ruido generado en el proceso”. Así mismo este sistema consta de varios elementos que trabajan simultáneamente para llevar a cabo estas funciones como lo son:

##### 2.1.1. *Colector de Escape*

Colector o también llamado múltiple de escape esta es la parte inicial de todo el sistema de escape de un motor de combustión interna ya que este se encuentra conectado directamente al cabezote y cilindros del motor. Su función principal es la de recolectar los gases de escape de cada uno de los cilindros y de direccionarlos hacia el siguiente componente del sistema, su forma se puede apreciar en la figura 1.

Según (Álvarez, 2005) indica que “Las funciones del colector de escape es facilitar la salida de gases, minimizar gases residuales, mejora de renovación de carga de gases, soportar altas sollicitaciones térmicas y fatiga dinámica”.

### **Figura 1**

*Colector de Gases de Escape*



Fuente: (Den, 2020)

#### **2.1.2. Convertidor Catalítico**

Desde hace unas décadas ya en la mayoría de los vehículos modernos, este componente es parte del sistema de escape. Su función principal es disminuir la toxicidad de los gases de escape al convertir los gases nocivos, como el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno (NOx) y los hidrocarburos (HC), en gases menos perjudiciales, como el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el nitrógeno (N<sub>2</sub>), por medio de reacciones químicas catalizadas.

Así mismo dentro de su función (Ortmann, 2003) indica que “En los modos de funcionamiento con mezcla pobre el catalizador de tres vías no puede transformar por completo los óxidos de nitrógeno que se producen durante la combustión del motor de combustión interna”.

Un catalizador no es más que una sustancia que se puede colocar a una reacción para aumentar la velocidad de reacción sin ser consumida durante un determinado proceso. Se

debe de tener en cuenta que los catalizadores aceleran una reacción al disminuir la energía de activación o al cambiar el mecanismo de reacción.

El convertidor catalítico o conocido en el mundo automotriz como catalizador forma parte del sistema de escape de los vehículos modernos y se encuentra ubicado entre la salida de gases del motor de combustión interna y el silenciador.

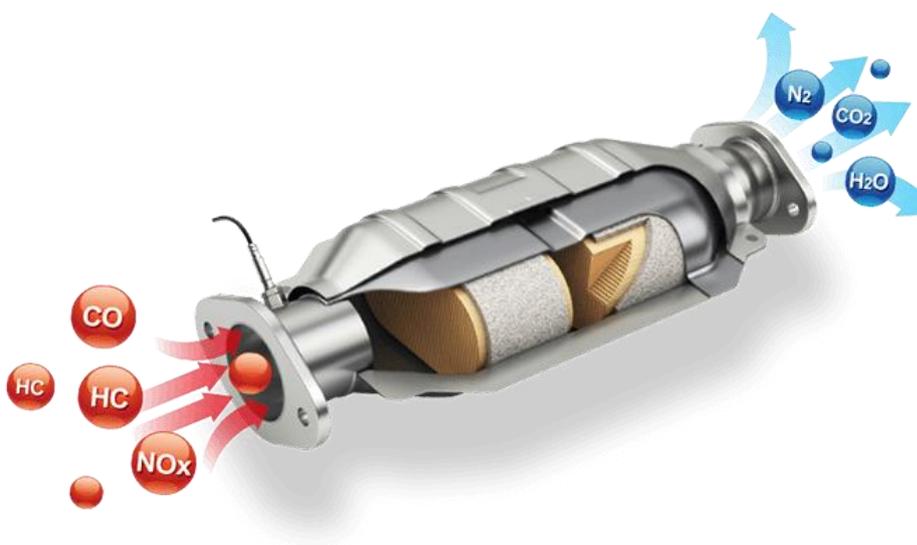
En definitiva, este elemento del sistema de escape su núcleo se producen varias reacciones de reducción y oxidación que contribuyen a descomponer significativamente los gases tóxicos generados por la combustión de los gases del motor en compuestos amigables con el ambiente.

El catalizador especialmente es el encargado de transformar los gases de escape en dos fases: Oxida el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos sin quemar y los convierte en dióxido de carbono y agua.

En la figura 2 se puede observar un convertidos catalítico y como es si conformación en la parte interior.

## Figura 2

*Convertidor Catalítico*



Fuente: (Hangar, 2024)

### 2.1.3. Silenciador

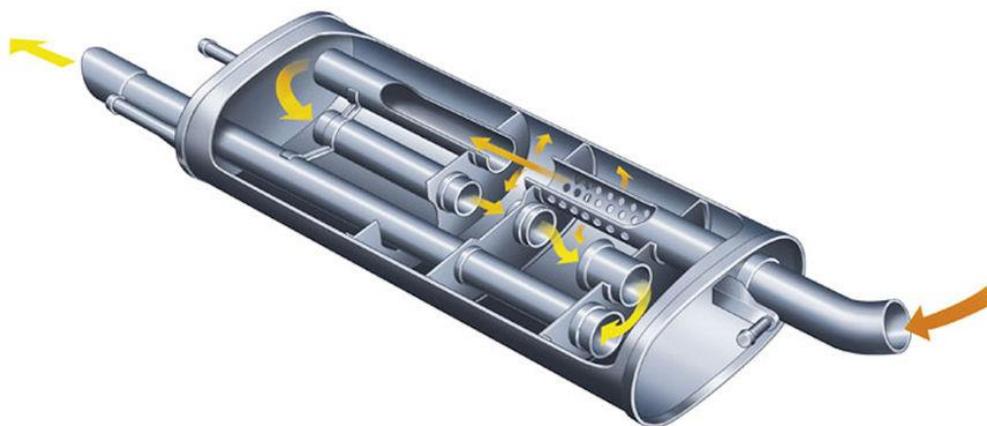
Este elemento muchas veces también conocido como escape o resonador, pero en definitiva es un componente diseñado para disminuir el ruido producido por el escape de los gases ya combustionados o quemados y generados por el motor de combustión interna. Utiliza cámaras de resonancia y materiales absorbentes de ruido para atenuar las ondas de sonido generadas por el flujo de gases de escape.

En definitiva, este elemento del sistema de escape es crucial por el motivo que mejora la comodidad del conductor y los pasajeros al minimizar el ruido del motor durante la operación del vehículo.

En la figura 3 se puede observar claramente como se encuentra constituido internamente las partes del silenciador del sistema de escape de un motor de combustión interna.

#### Figura 3

*Silenciador y el Comportamiento de su Flujo de Gases*



Fuente: (Den, 2020)

### 2.1.4. Tubos y Conductor

Los elementos denominados tubos y conductos en el sistema de escape de un motor de combustión interna tienen la función principal de dirigir los gases de escape desde el motor

hasta el exterior del vehículo y expulsarlos al medio ambiente. Estos elementos, generalmente fabricados con acero aluminizado o acero inoxidable debido a su resistencia a altas temperaturas y corrosión, así mismo unen entre sí los diversos elementos del sistema, como el colector de escape, el convertidor catalítico y el silenciador. En lo concerniente a su diseño y disposición están optimizados para lograr un flujo de gases eficiente, minimizando las restricciones generadas por su geometría y las pérdidas de presión que podrían afectar el rendimiento del motor. Además, ciertos sistemas de escape pueden incluir tubos flexibles para permitir cierta flexibilidad y absorción de vibraciones de forma eficiente, especialmente en vehículos con sistemas de suspensión más suaves. En definitiva, los tubos y conductos del sistema de escape juegan un papel fundamental en la operación y el funcionamiento adecuado en el desempeño del vehículo al garantizar la eliminación adecuada de los gases de escape y mantener un rendimiento óptimo del motor.

#### **2.1.5. Sonda Lambda (Sensor O<sub>2</sub>)**

Este componente es un sensor que cumple una función específica que es la de monitorear el contenido de oxígeno en los gases de escape. La información proporcionada por este sensor es utilizada por el sistema de gestión del motor para ajustar la mezcla de combustible y aire o conocida como relación estequiométrica, optimizando así la eficiencia del motor y reduciendo las emisiones hacia el medio ambiente.

La sonda lambda, también conocida como sensor de oxígeno, es un componente fundamental del sistema de escape de un motor de combustión interna. Se encuentra ubicada por lo general en el tubo de escape, cerca del colector de escape.

Esta sonda cumple la función principal de medir la cantidad de oxígeno presente en los gases de escape y envía esta información a la computadora del motor conocida también por sus siglas ECU de unidad de control electrónico. Basándose en esta lectura, la unidad de

control electrónico del motor ajusta la cantidad de combustible que se inyecta en cada uno de los cilindros para lograr una mezcla aire-combustible óptima para la mezcla.

Una mezcla adecuada maximiza la eficiencia del motor y reduce considerablemente las emisiones contaminantes que son expulsadas directamente al medio ambiente. Cuando la sonda lambda detecta un exceso de oxígeno en los gases de escape es decir se genera una mezcla pobre, la computadora del motor aumenta la cantidad de combustible inyectada. Por otro lado, si detecta un exceso de combustible es decir una mezcla rica, reduce la cantidad de combustible inyectada. Esta retroalimentación continua garantiza de manera principal un funcionamiento eficiente del motor y contribuye a la reducción de emisiones nocivas al medio ambiente.

Existen varios tipos en la actualidad de sensores de sonda Lambda utilizados en la industria automotriz entre los que se tienen los siguientes:

Sonda lambda de banda ancha (Wideband Lambda Sensor): Este sensor tiene la capacidad de medir con precisión alta precisión la concentración de oxígeno que se encuentra en los gases de escape en un amplio rango, generalmente entre 0.5 y 5 partes por millón (ppm) de oxígeno. Cabe aclarar que estos parámetros son ideales para aplicaciones de control de combustible más precisas, como en motores de alto rendimiento o en sistemas de inyección directa.

Sonda lambda de banda estrecha (Narrowband Lambda Sensor): Estos sensores lambda son mucho más comunes y económicos. Se utilizan principalmente en vehículos de producción en masa. Poseen una respuesta más lenta y solo pueden proporcionar lecturas precisas en una estrecha franja de concentraciones de oxígeno, normalmente alrededor de un 14.7:1 partes por millón concerniente a la relación entre la cantidad de aire y la de combustible (relación estequiométrica).

Sonda lambda de titanio (Titania Lambda Sensor): Su característica principal es que utiliza óxido de titanio como material sensible para de esta forma detectar los cambios en la concentración de oxígeno en los gases quemados de escape. Son menos comunes que las sondas de zirconia pero a cambio ofrecen una respuesta más rápida a los cambios en la mezcla aire-combustible.

Sondas lambda de amplio espectro (Wide Spectrum Lambda Sensors): Estos sensores ofrecen una combinación de características de las sondas lambda de banda ancha y estrecha. Proporcionan una respuesta rápida y una amplia gama de medición de parámetros, lo que los hace adecuados para aplicaciones que requieren un control de emisiones más estricto y una optimización del rendimiento del motor.

Estos son algunos de los tipos principales de sensores lambda utilizados en los sistemas de escape de los vehículos modernos, cada uno con sus propias características y aplicaciones específicas.

En la figura 4 se puede apreciar un sensor de Oxígeno o también llamado sensor de Sonda Lambda.

#### **Figura 4**

*Sensor Sonda Lambda*



Fuente: (López, 2021)

En definitiva, el sistema de escape de un motor de combustión interna desempeña un papel de mucha importancia en la operación eficiente y limpia del vehículo, ayudando a disminuir las emisiones contaminantes y del ruido generado por el propio funcionamiento del motor.

### ***2.1.6. Importancia del Sistema de Escape en el Desempeño de un Kart***

El sistema de escape en un motor de kart juega un papel fundamental en su rendimiento general durante una competencia automovilística.

Su diseño y funcionamiento adecuados pueden mejorar significativamente la potencia y la eficiencia del motor de combustión interna, teniendo en cuenta el tipo de competencia a realizarse y sobre todo la geometría de la trayectoria de la pista por donde se va a desplazar el kart.

El sistema de escape está diseñado para gestionar de manera adecuada los gases de escape, expulsando de manera eficiente los residuos de la combustión del motor. Un sistema de escape bien diseñado puede optimizar la velocidad y el flujo de estos gases, lo que a su vez mejora la capacidad de admisión de aire fresco en el cilindro del motor durante el ciclo de admisión.

En un kart el tener un escape mal diseñado puede provocar restricciones en el flujo de gases de escape, lo que resulta en una disminución del rendimiento del motor y por ende disminución de tiempos en carrera. Además, un sistema de escape inadecuado puede generar contrapresión, lo que afecta negativamente al rendimiento general del motor y su capacidad para alcanzar velocidades máximas.

En la figura 5 se puede apreciar de manera clara un sistema de escape aplicado en un kart, el mismo que posee una geometría variable y dentro de su longitud también se considerará las condiciones y características de su diseño de cada uno de los elementos que lo conforman.

En definitiva, un sistema de escape bien diseñado y optimizado de forma adecuada es crucial para maximizar el rendimiento del motor de un kart, garantizando una expulsión eficiente de los gases de escape y una admisión óptima de aire fresco para una combustión más eficiente.

### **Figura 5**

*Sistema de Escape de Gases de un Kart*



Fuente: (Bernardi, 2018)

## **2.2. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD)**

Al momento de poder conceptualizar la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) esta no es más que una técnica de simulación numérica utilizada con el fin de analizar y resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos ya sea líquidos o gaseosos. Este enfoque se encuentra sustentado en la discretización del dominio del fluido sobre el cual se estudia en una determinada malla tridimensional y la resolución numérica de las ecuaciones fundamentales que permiten determinar con precisión el comportamiento del flujo, como las ecuaciones de conservación de masa, momentum y energía.

Autodesk CFD actualmente es una importante herramienta de análisis de elementos finitos (FEA) y análisis estructural que se ha extendido para incluir la capacidad de realizar simulaciones de dinámica de fluidos. Utiliza un enfoque que se sustenta en volúmenes finitos para dar solución a las ecuaciones de flujo en un dominio definido por el usuario.

El proceso de simulación CFD con Autodesk CFD generalmente implica los siguientes pasos:

**Preparación del modelo en 2D y 3D:** Durante este primer paso se importa la geometría del dominio del fluido a ser analizado, que puede incluir componentes como conductos, cámaras de combustión o cualquier otro objeto relevante que son propios en este estudio para el sistema de escape del kart. Esta geometría se prepara para su análisis, lo que puede incluir la creación de mallas y la definición de condiciones de contorno.

**Definición de condiciones de contorno:** En este punto se procede a establecer claramente las condiciones de inicio y de contorno para la simulación, como la velocidad del flujo en la entrada, la presión en la salida y las propiedades del fluido.

**Generación de la malla:** Se procede a generar un determinado tipo de malla tridimensional con sus propias características geométricas que discretiza el dominio del fluido en pequeños volúmenes finitos para facilitar el cálculo de las variables del flujo en cada punto del dominio.

**Configuración de la simulación:** Una vez que se encuentra generada el modelado y el mallado se procede a especificar los parámetros de la simulación del elemento a ser analizado, como el tipo de flujo (estacionario o transitorio), los modelos de turbulencia y las propiedades del fluido.

**Ejecución de la simulación:** Este es el último paso del proceso de forma metodológica en el que se procede a resolver numéricamente las ecuaciones de flujo para obtener

información detallada sobre la distribución de velocidad, presión, temperatura y otras variables en el dominio del fluido.

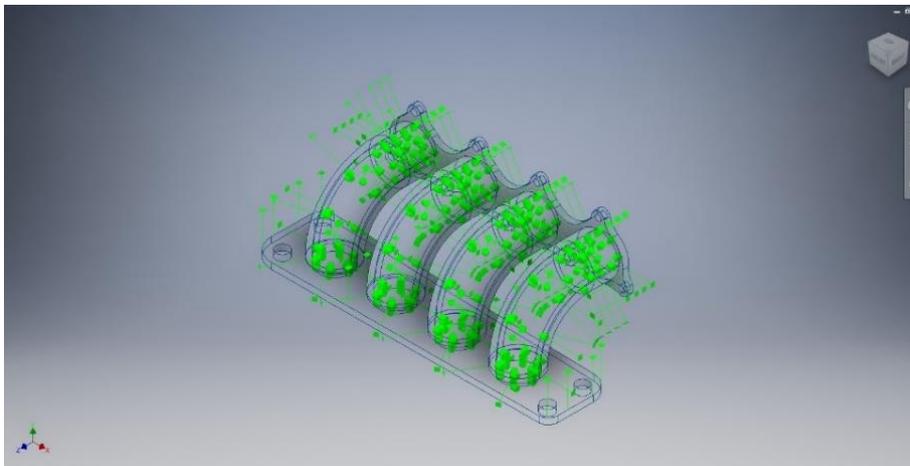
Análisis de resultados: Una vez que se obtienen los resultados por parte del programa se analizan los resultados de la simulación para extraer información de mayor importancia referente al comportamiento del flujo, identificar áreas problemáticas y tomar decisiones de diseño informadas.

En definitiva, la combinación de CFD con Autodesk CFD brinda al presente estudio investigativo ser una herramienta poderosa para el análisis y la optimización de sistemas que involucran fluidos, desde sistemas de escape de motores hasta aerodinámica de vehículos.

En la figura 6 se puede apreciar claramente un ejemplo de aplicación de una simulación de flujo de gas de escape de un motor de combustión interna pero solo de un colector de escape.

### **Figura 6**

*Aplicación de Simulación CFD en Autodesk CFD*



Fuente: (CADBIM, 2016)

### **2.3. Efectos de la Temperatura en la Eficiencia y Durabilidad del Motor**

El fenómeno de la temperatura cumple un papel crítico en la eficiencia y durabilidad del motor de combustión interna, especialmente en el contexto del sistema de escape de sus gases. A continuación, se detallan los efectos de la temperatura en estos aspectos:

### **2.3.1. Eficiencia del Motor**

La temperatura es un fenómeno que influye directamente en la eficiencia termodinámica del motor de combustión interna. Una elevación de la temperatura de los gases de escape puede llegar a provocar una disminución en la densidad del aire de la fase de admisión, lo que disminuye la masa de combustible que puede ser quemada durante el ciclo de la combustión. Esto puede resultar en una disminución del rendimiento del motor de forma considerable y por consiguiente en una pérdida de potencia. Además, las elevadas temperaturas en el sistema de escape pueden provocar un fenómeno conocido como "retroceso de calor", donde parte de la energía o calor generado durante la combustión es devuelto al cilindro, lo que disminuye aún más la eficiencia del motor de combustión y más aún si este motor es aplicado a competencias automovilísticas como lo es del kart que es el estudio del presente proyecto.

### **2.3.2. Durabilidad del Motor**

Teniendo en cuenta las elevadas temperaturas en el sistema de escape también pueden llegar a tener un impacto negativo en la durabilidad del motor de combustión interna. Las temperaturas extremas pueden llegar a provocar la degradación de la mayoría de los materiales, como el deterioro de muchos de los componentes del sistema de escape de gases debido a la corrosión o al sobrecalentamiento. Adicionalmente, el exceso de la cantidad de calor puede afectar de forma negativa a cada uno de los componentes internos del motor, como los pistones, las válvulas y los anillos de sellado, lo que se traduce en una disminución de la vida útil y elevación considerable del riesgo de fallos mecánicos prematuros sobre el motor.

Por lo tanto, es demasiado importante el mantener las temperaturas de cada una de las áreas del motor dentro de los límites adecuados para garantizar un funcionamiento eficiente y duradero del motor de combustión interna. Esto se puede llegar a alcanzar mediante un diseño

óptimo del sistema de escape de los gases del motor que facilite una adecuada disipación del calor a través de cualquiera de sus formas de transmisión de forma natural, así como mediante la implementación de sistemas de refrigeración adecuados y el uso correcto de materiales resistentes a altas temperaturas dentro de los elementos que conforman los mecanismos y el sistema.

Un análisis detallado del comportamiento térmico del sistema de escape de gases del motor de combustión interna, como el realizado mediante la dinámica de fluidos computacional, puede llegar fácilmente a proporcionar información muy importante para optimizar el diseño de sus elementos como de todo el sistema y mejorar así tanto la eficiencia como la durabilidad del motor y por ende del desempeño del kart durante una competencia automovilística.

#### **2.4. Descripción del Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>**

Dentro del mundo de los vehículos de competición automovilística como lo es el karting una de los más aplicados es el motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> que es un componente fundamental con diversas aplicaciones aparte de esta como lo es en motocicletas tanto de serie como de competición. Teniendo en cuenta que la mayoría de las ventajas que brinda este tipo de motor son amplias y sobre todo la eficiencia del mismo permite un correcto desempeño dentro de una competencia de karting en cualquiera de sus categorías y tipo de pistas.

Conocido fundamentalmente por su rendimiento el cual es muy confiable y su diseño compacto, este motor ofrece una combinación de potencia y eficiencia que lo hace muy admirado y popular entre una amplia gama de usuarios sobre todo inmersos en las competencias, en la figura 7 se puede apreciar a un ejemplar de este tipo de motor con aplicación en el karting. Otra de las ventajas que se obtiene con este tipo de motor es su amplia gama de repuestos que hacen que sea confiable.

**Figura 7**

*Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> Aplicado a Karts*



Fuente: (Yamaha Motor Co., Ltd, 2023)

A continuación, se detallan sus características técnicas, especificaciones y el diseño de su sistema de gases de escape.

#### ***2.4.1. Características Técnicas y Especificaciones***

El motor de combustión interna de la marca Yamaha 125 cm<sup>3</sup> es un motor de dos tiempos y monocilíndrico. Sus características técnicas y especificaciones pueden estar variando según el modelo y la aplicación específica que se le dé, pero generalmente incluyen las siguientes:

Cilindrada: Este motor presenta una cilindrada de 125 centímetros cúbicos, lo que lo sitúa en la categoría de motores de tamaño medio, lo que le hace óptimo para el tipo de competencia como lo es el karting.

Arquitectura del motor: Posee una gran ventaja al ser un motor monocilíndrico, lo que significa que en su conformación geométrica tiene un solo cilindro en línea y con su pistón dirigido hacia arriba.

Sistema de alimentación: Este motor puede estar equipado con un carburador o un sistema de inyección de combustible, dependiendo del modelo y la versión, también dependerá de la reglamentación de la competencia.

Refrigeración: Algunos modelos de este tipo de motores pueden tener un tipo de refrigeración por aire, mientras que otros pueden estar equipados con un sistema de refrigeración líquida o conocida como mixta para un mejor control y disipación de la temperatura.

Potencia: La potencia de salida de este tipo de motor puede variar, pero generalmente se encuentra en el rango de 10 a 15 caballos de fuerza, considerando la configuración y el ajuste.

Transmisión: Se puede encontrar con una transmisión manual o semiseccional de cinco o seis velocidades, proporcionando una amplia gama de relaciones de transmisión para adaptarse a diferentes situaciones de conducción.

Arranque: Suele contar con un sistema de arranque eléctrico, aunque algunos modelos más antiguos pueden tener también la opción de arranque por pedal.

Emisiones: Actualmente este tipo de motores cumple con estrictamente cada una de las normativas de emisiones vigentes, lo que garantiza que las emisiones de escape se mantengan dentro de los límites establecidos por la legislación ambiental.

#### ***2.4.2. Diseño del Sistema de Gases de Escape***

Al momento de analizar el diseño del sistema de gases de escape en el motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> es una parte fundamental de su funcionamiento general ya que este sistema posee mucha influencia en el rendimiento del kart en competencia y esta configuración dependerá si

la trayectoria es muy trabada o con mayor porcentaje de rectas y así poder disminuir tiempos en competencia. Este sistema está diseñado para dirigir los gases de escape producidos durante el ciclo de combustión lejos del motor de manera eficiente y segura. Aquí hay un resumen del diseño típico del sistema de escape para su aplicación en karts:

**Colector de escape:** En el caso de este tipo de motor el colector lo conforma la salida de la lumbrera de escape y el empaque de fuego el cual es el que conecta el flujo entre el motor y el tubo de escape.

**Tubo de escape:** Después de pasar por el colector o empaque de colector, los gases de escape fluyen a través del tubo de escape. Este tubo está diseñado para optimizar el flujo de gases y minimizar las restricciones, lo que ayuda a mejorar el rendimiento del motor y reducir la contrapresión.

**Silenciador:** El silenciador, también conocido como escape, es la última parte del sistema de escape en los karts. Su función principal es reducir el ruido generado por los gases de escape al salir del motor. Además, algunos silenciadores están diseñados para modular el flujo de gases de escape, lo que puede tener un impacto en el rendimiento del motor en ciertas condiciones de funcionamiento.

**Diseño específico de Yamaha:** Una de las ventajas que presenta la marca Yamaha es que suele diseñar sistemas de escape específicos para cada modelo de motores que fabrica, teniendo en cuenta factores como el rendimiento, la eficiencia y las regulaciones de emisiones. Esto puede incluir la optimización de la longitud y el diámetro del tubo de escape, así como la selección de materiales para minimizar el peso y mejorar la durabilidad.

En definitiva, se determina que el motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> es un componente versátil y confiable que se encuentra en una variedad de aplicaciones, desde motocicletas hasta karts de competición, como lo es para este estudio investigativo. Su diseño cuidadosamente elaborado, incluido el sistema de gases de escape, garantiza sin duda alguna un rendimiento

óptimo y una experiencia de conducción satisfactoria para los pilotos de karting, como se puede ver en la figura 8.

**Figura 8**

*Sistema de Escape de Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>*



Fuente: (Bernardi, 2018)

## Capítulo III

### Metodología de la Simulación de Dinámica de Fluido Computacional (CFD)

#### 3.1. Introducción a la Metodología CFD

Teniendo en cuenta que la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, por sus siglas en inglés) es una de las técnicas más utilizadas para analizar y resolver problemas relacionados con el flujo de fluidos tanto líquidos como gaseosos mediante simulaciones por computadora en el cual para el presente estudio se aplican programas de AutoDesk. De esta manera se emplea métodos numéricos y algoritmos para resolver las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el movimiento de fluidos. CFD permite modelar fenómenos complejos como la transferencia de calor como lo es en el caso de la presente investigación el comportamiento de los gases de escape del motor de combustión interna, la turbulencia y las interacciones entre fluidos y estructuras. Es una herramienta esencial en diversas industrias, incluyendo la automotriz, aeroespacial y de ingeniería mecánica, para optimizar diseños y lo que se pretende es el mejorar el rendimiento de sistemas fluidodinámicos.

#### 3.2. Consideraciones de Diseño y Materiales

De acuerdo con la conceptualización realizada en el capítulo anterior, el diseño del sistema de escape del kart Yamaha 125 cm<sup>3</sup> debe cumplir la función de optimizar el flujo de gases de escape del motor de combustión interna, minimizar pérdidas de presión y gestionar eficazmente el calor.

Dentro de los aspectos que se consideran en lo concerniente al diseño del tubo de escape del kart se encuentran los siguientes:

- Objetivo para ser analizado con el diseño del escape
- Selección de los materiales que pueden intervenir en un sistema de escape para un kart.
- Factores o dimensiones de diseño clave

- Efectos térmicos y gestión de disipación de calor
- Durabilidad y mantenimiento
- Peso y balance con el vehículo
- Normativas y regulaciones
- Consideraciones aerodinámicas
- Costos de Manufactura
- Innovaciones tecnológicas

Normalmente en este tipo de sistema de escape la selección de materiales como acero inoxidable, titanio, acero al carbono o aluminio influye en la resistencia a la corrosión y al calor, así como en el peso del sistema. Así mismo los factores clave incluyen el diámetro interior de los conductos por donde se desplazan los gases de escape, longitud y curvatura del tubo para evitar turbulencias y maximizar la eficiencia de evacuación de este tipo de gases. La ubicación y diseño del silenciador son cruciales para controlar el ruido y la contrapresión. Además, el diseño debe facilitar la disipación del calor, ser duradero bajo condiciones de fatiga térmica, y ruido, garantizando al mismo tiempo un peso mínimo y un balance óptimo del kart.

### **3.3. Materiales Aplicados en la Fabricación de los Escapes de Kart**

Dentro del campo de elaboración de sistemas de escape para vehículos kart se fabrican comúnmente con materiales que ofrecen características como lo es una buena combinación de resistencia a la corrosión, durabilidad y capacidad para soportar altas temperaturas. Los materiales más utilizados en la fabricación de sistemas de escape para karts incluyen:

**Acero Inoxidable:** El cual es muy resistente al fenómeno de la corrosión y capaz de soportar altas temperaturas sin que su estructura se deforme. Es el material preferido por su durabilidad y capacidad para mantener un buen rendimiento a lo largo del tiempo.

Aluminio: Este material es muy ligero y buen conductor del calor, pero una de sus desventajas es que es menos resistente a las altas temperaturas y a la corrosión en comparación con el acero inoxidable y el titanio. Se utiliza en ciertas aplicaciones específicas donde el peso es una preocupación primordial dentro de las estructuras de vehículos de competencias.

Acero al carbono: Dentro del mercado es un material mucho más económico que el acero inoxidable, pero menos resistente a la corrosión. A menudo se utiliza en sistemas de escape de menor costo y puede estar recubierto con pintura resistente al calor para mejorar su vida útil.

Titanio: Este tipo de material es ligero y con una excelente resistencia a la corrosión y al calor. Aunque es más caro, se utiliza en aplicaciones de alta competencia donde el peso y la durabilidad son críticos.

### **3.4. Presión de los Gases de Escape en un Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>**

Uno de los factores de gran importancia a tomar en cuenta en el presente estudio es la presión de los gases de escape en un motor de 125 cc con un solo cilindro el cual varía en función de varios factores, incluyendo la configuración del motor, el diseño del sistema de escape, la velocidad del motor (RPM), y las condiciones de operación. Sin embargo, se pueden proporcionar estimaciones generales para ser considerado en dentro de los valores de ingreso y salida de la simulación:

*Presión en la Salida del Cilindro:* Justo antes de la lumbrera de escape, la presión puede alcanzar valores bastante elevados, típicamente entre 1 y 3 atmósferas (aproximadamente 15 a 45 psi), dependiendo del estado de carga del motor y la fase del ciclo de combustión.

*Presión en el Tubo de Escape:* A medida que los gases se desplazan de manera continua a través del sistema de escape y se enfrían, la presión tiende a disminuir. En la salida

del sistema de escape (en la atmósfera) por el conducto de desfogue, la presión normalmente se aproxima a la presión atmosférica, que es alrededor de 1 atmósfera (aproximadamente 14.7 psi).

Es importante tener en cuenta al momento de interpretar estas cifras que pueden variar considerablemente según las especificaciones exactas del motor y el sistema de escape. La simulación mediante CFD puede proporcionar datos más precisos y detallados sobre las distribuciones de presión a lo largo del sistema de escape.

### 3.5. Extracción de Medidas del Sistema de Escape

El proceso de extracción de medidas para el sistema de escape del kart es de suma importancia para el presente estudio e implica varios pasos. Primero, se desmonta el sistema de escape del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> como se puede apreciar en la figura 9.

#### Figura 9

*Inicio de Desmontaje de Sistema de Escape de Motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>*



Luego, se utilizan herramientas de medición como calibradores para obtener dimensiones precisas de cada componente, incluyendo el diámetro interno y externo de los tubos, la longitud total, y las curvaturas. Se registran también las posiciones relativas de los componentes, como el silenciador y los conectores como se puede apreciar en la figura 10.

Con cada uno de estos datos se procederán a digitalizar y se utilizan para crear un modelo 3D preciso para la simulación CFD por medio del programa Inventor Pro.

### **Figura 10**

*Componentes a Medir del Sistema de Escape*



Hay que tener en cuenta cada uno de los detalles internos y externos del sistema por el motivo que de manera interna el sistema de escape posee una configuración geométrica variable la cual cumple funciones específicas dentro de su desempeño al momento que los gases de escape son expulsados desde el motor, un ejemplo de su geometría interna se puede apreciar en la figura 11.

### **Figura 11**

*Geometría Interna del Sistema de Escape*



### 3.6. Modelado Geométrico del Sistema de Escape

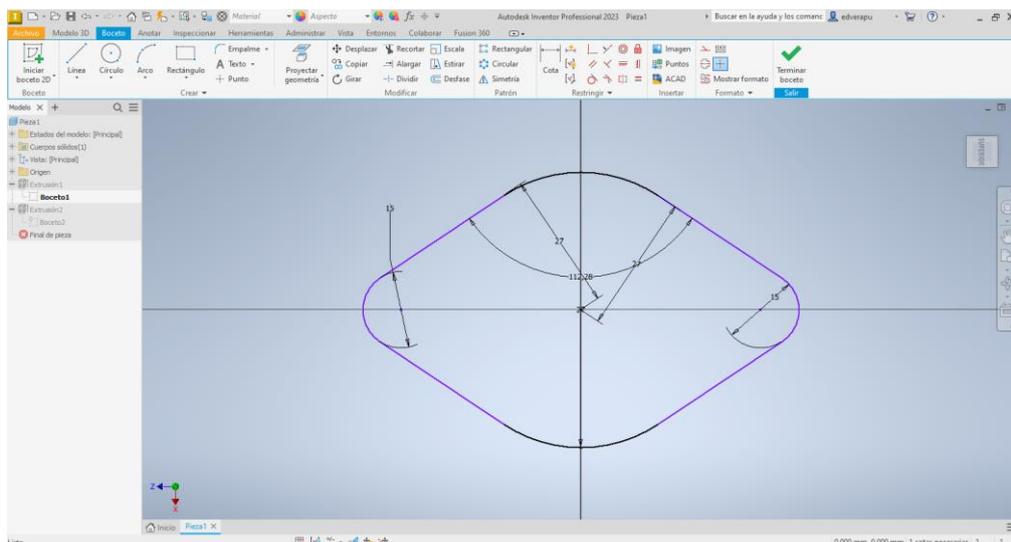
El modelado geométrico del sistema de escape del kart implica la creación de un modelo 3D detallado utilizando software CAD como lo es Inventor de AutoDesk. Se comienza con la digitalización precisa de la geometría del sistema de escape con las medidas extraídas de cada uno de los componentes que lo conforman. Se consideran todas las dimensiones y características relevantes para replicar fielmente la configuración real. Además, se simplifican ciertos detalles para reducir la complejidad computacional sin comprometer la precisión de la simulación CFD.

Este inicio del modelado 2D se puede apreciar en la figura 12, en el que se empieza con la elaboración de la brida de escape.

Con la generación de la sección de boceto en 2D, en esta interfase se selecciona sobre que plano se inicia el proceso de diseño de líneas contemplando cada una de las dimensiones extraídas del elemento real, así mismo se debe tener en cuenta que en la generación de este tipo de bocetos debe estar acatado cada una de las líneas de forma correcta.

**Figura 12**

*Inicio de Modelado de Brida de Escape*

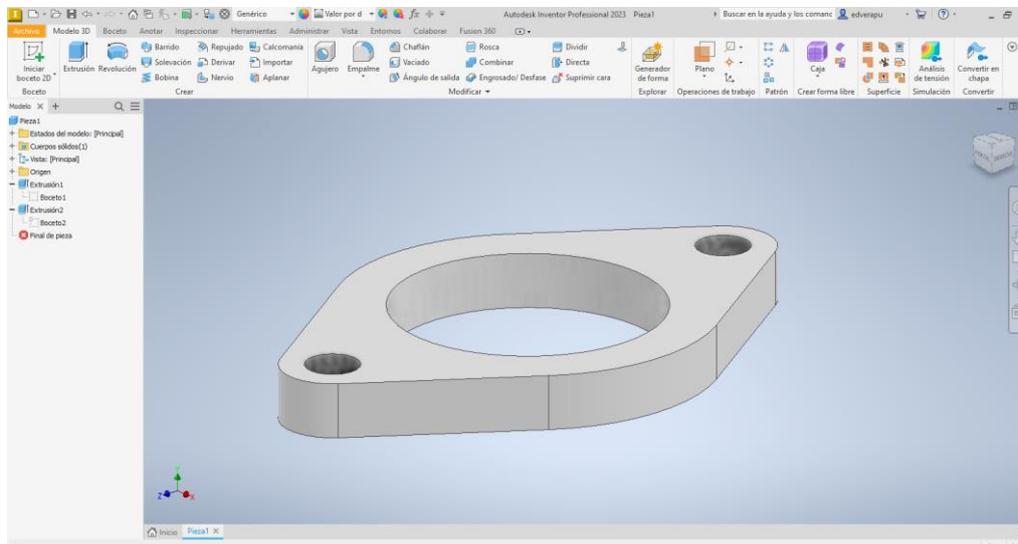


Teniendo en cuenta que la brida es el elemento que une la parte del motor con el inicio del sistema es escape se debe tener en cuenta la planitud de su cara para que de esta manera exista una hermeticidad entre estos elementos.

Una vez finalizado el boceto en 2D de la sección de la brida se empieza a trabajar con las herramientas que el programa nos brinda para trabajar en 3D como lo es el ícono de extrusión como se puede apreciar en la figura 13.

### Figura 13

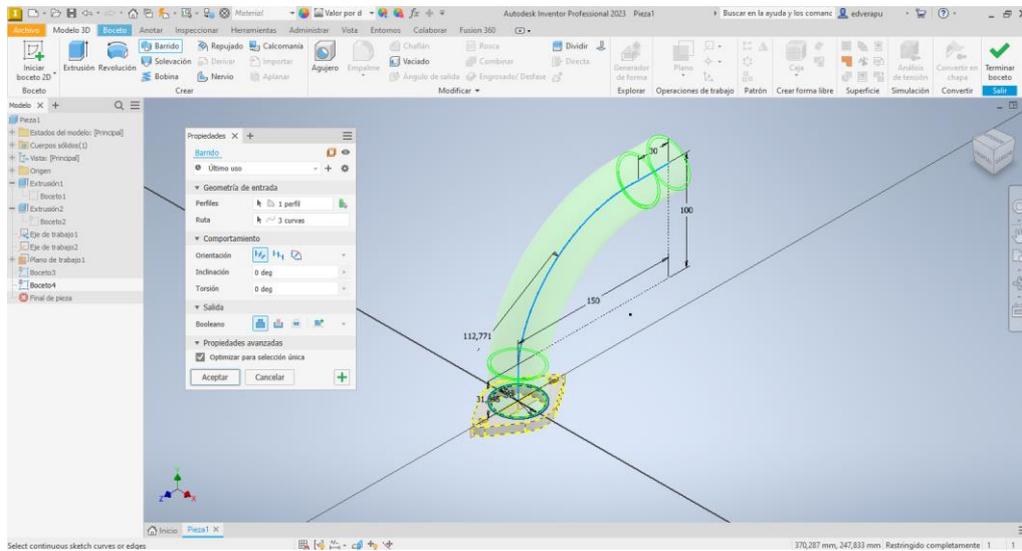
#### *Aplicación de Extrusión en 3D en Brida*



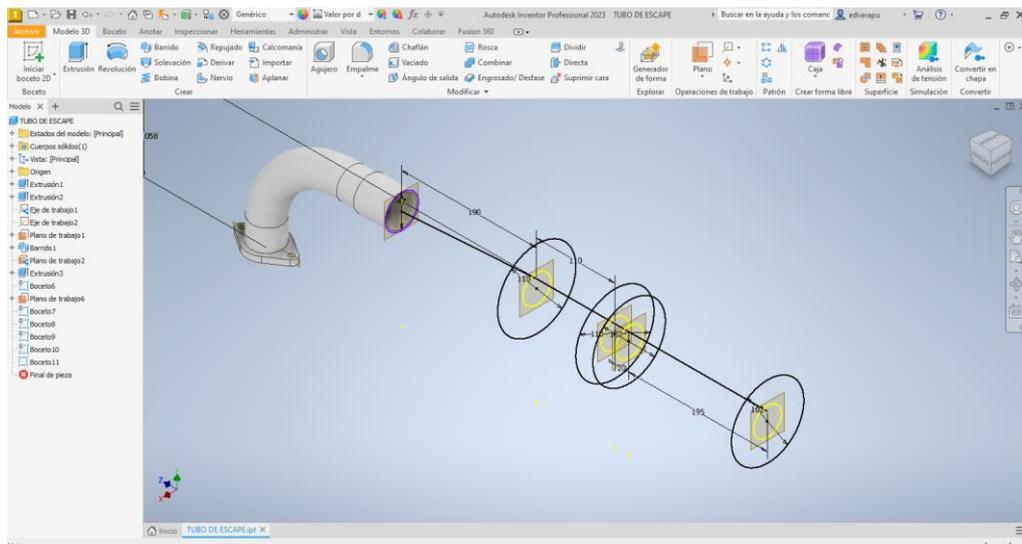
Para continuar con el proceso se aplica otra herramienta una vez generada otro boceto es el de barrido en el cual permite realizar tuberías como es el caso que se puede ver en la figura 14, en la que se representa ya el cuerpo del sistema de tubo de escape de gases combustiónados.

En este caso para las características de medidas de la parte tubular fueron un diámetro interno de 42 mm y como diámetro exterior 47 mm.

Otro elemento a tener en cuenta es el eje de barrido por donde se debe guiar el proceso el mismo que para el ejemplo aplicado posee la distancia aplicada en cada uno de los ejes comprendidos, así como su curvatura y la consideración a ser tomada en cuenta es que la parte inicial debe ser perpendicular a la cara del boceto.

**Figura 14***Aplicación de Barrido de Sección*

Cuando las secciones son diferentes se procede a la aplicación de otra herramienta que brinda el programa como es la de *solevación* la cual combina las distintas formas o secciones de forma automática o parametrizada en la fase de diseño como se puede apreciar claramente en la figura 15.

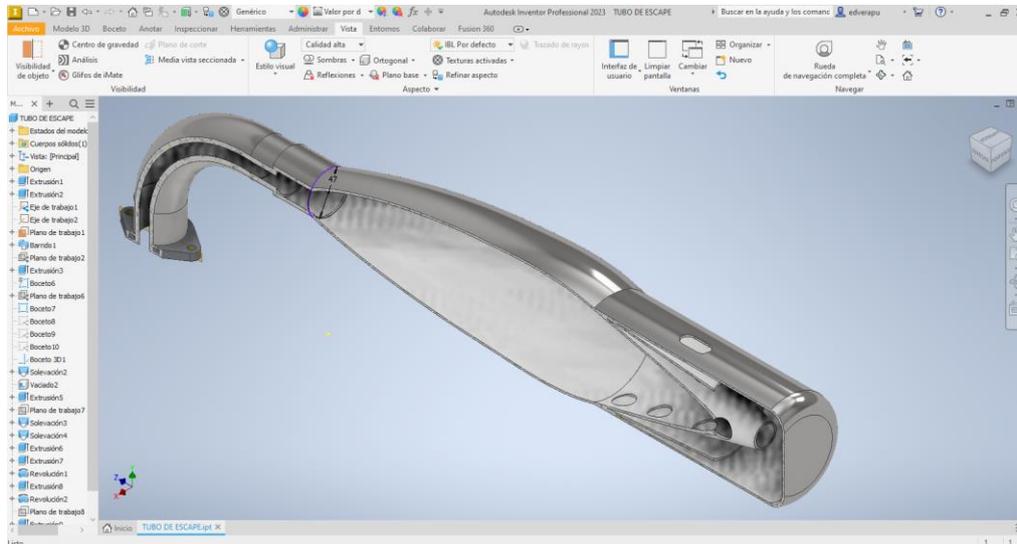
**Figura 15***Aplicación de Herramienta de Solevar*

Esta herramienta es muy importante es este proceso de modelado del sistema de escape el cual también se lo puede ir inspeccionando su desempeño interno con la ayuda de la

visualización por planos como se puede apreciar en la figura 16, la misma que nos permite observar las características de geometría interna y externa del elemento.

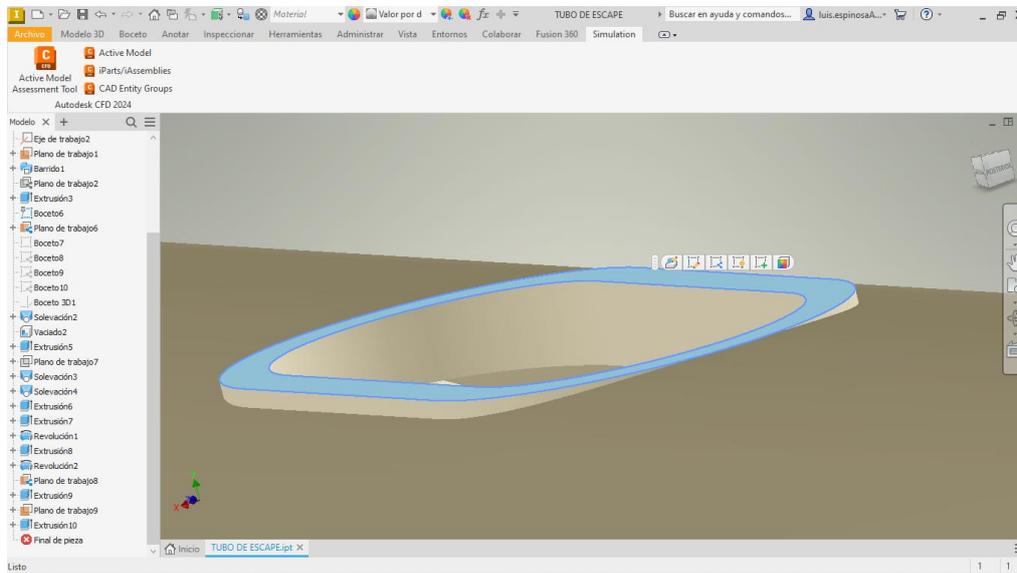
**Figura 16**

*Visualización de la Sección Interna y Externa del Sistema de Escape*



De esta manera se da por finalizada la fase de modelado geométrico del sistema de escape utilizando Autodesk Inventor lo que implicó la creación precisa de todas las partes del sistema, incluyendo la brida, el tubo de escape, el silenciador y sistema de desfogue o salida. Se verifica la exactitud dimensional y se asegura que todas las piezas encajen correctamente. Las propiedades de los materiales se asignan para la fase de simulación. También se realiza un análisis de interferencias para detectar posibles problemas de ensamblaje.

Una consideración de suma importancia que se da al momento de realizar un tipo de simulación con las características establecidas para este tipo de estudio se contempla en las secciones del ingreso como de salida del flujo en la parte de la estructura por lo que estas deben ser completamente planas caso contrario el procesamiento del software durante la fase de resolución del problema emitirá un tipo de falla de resolución, por lo tanto en la figura 17 se puede apreciar claramente esta modificación a la salida del sistema de escape del kart en estudio.

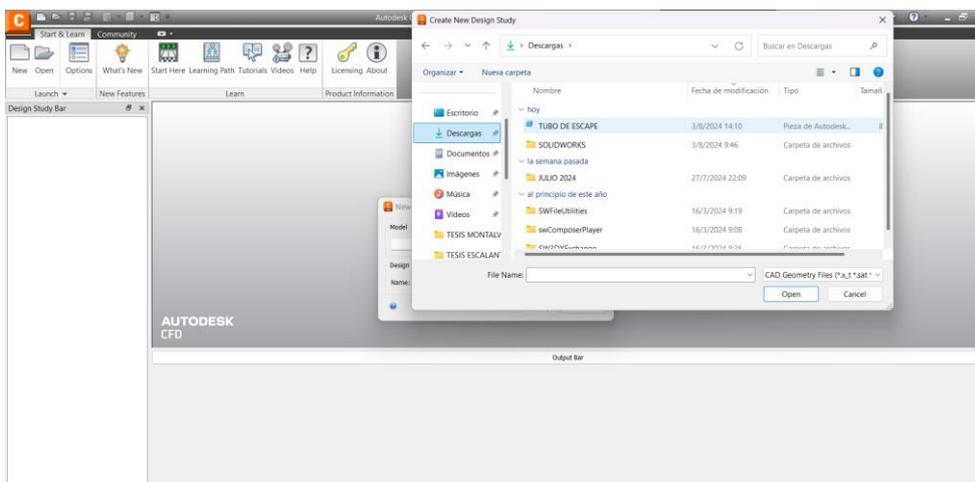
**Figura 17***Geometría de Salida de los Gases de Escape***3.7. Simulación del Comportamiento del Fluido de Gases de Escape**

Esta fase es muy importante en el desarrollo del presente proyecto investigativo correspondiente a la simulación del comportamiento del fluido de gases de escape combustionados el mismo que se realiza utilizando el software CFD de AutoDesk. Primero, se importa el modelado 3D que se realizó en Inventor Pro del sistema de escape, definiendo la geometría precisa del tubo de escape y sus componentes. Parte de lo que se lleva a cabo en esta fase es la de generar una malla computacional adecuada, equilibrando la resolución y el tiempo de cálculo. Las condiciones de contorno se establecen basándose en los parámetros operativos del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup> al expulsar sus gases combustionados, incluyendo la temperatura y presión de los gases de escape. El software CFD de AutoDesk como se puede observar en la figura 18, el cual permite simular el flujo de gases y la transferencia de calor, proporcionando datos detallados sobre la distribución de temperaturas, velocidades del flujo y zonas de turbulencia.

Los resultados se analizan para identificar áreas de mejora en el diseño del sistema de escape.

**Figura 18***AutoDesk CFD 2024*

Una vez en el programa de CFD de AutoDesk, se procede a la importación del archivo del modelado 3D realizado en Inventor Pro teniendo en cuenta su extensión la cual debe ser .ipt, como se puede apreciar en la figura 19.

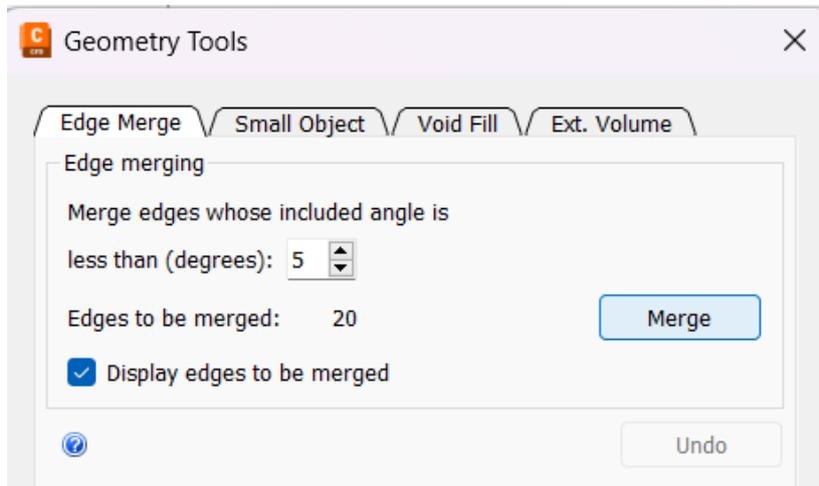
**Figura 19***Importación de Modelado 3D a CFD*

Así mismo se proporciona un nombre al estudio o simulación a realizar en esta etapa, posteriormente se presenta una interfase que permite considerar algunos errores que puede tener el modelado y donde se procede a ser determinados y eliminado por el propio programa computacional.

Entre estas configuraciones está el de fusión de los bordes en la que se procede a eliminarlos como se muestra en la figura 20.

**Figura 20**

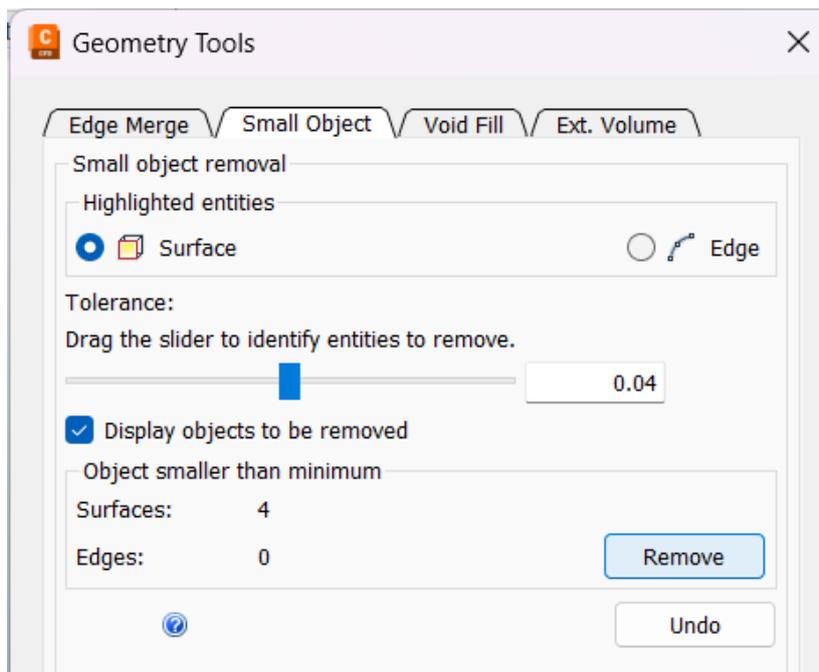
*Eliminación de Bordes*



La siguiente acción para tomar en cuenta es la eliminación de elementos pequeños los cuales pueden llegar a interferir en el desarrollo del proceso, esto se puede apreciar en la figura 21.

**Figura 21**

*Eliminación de Objetos Pequeños*

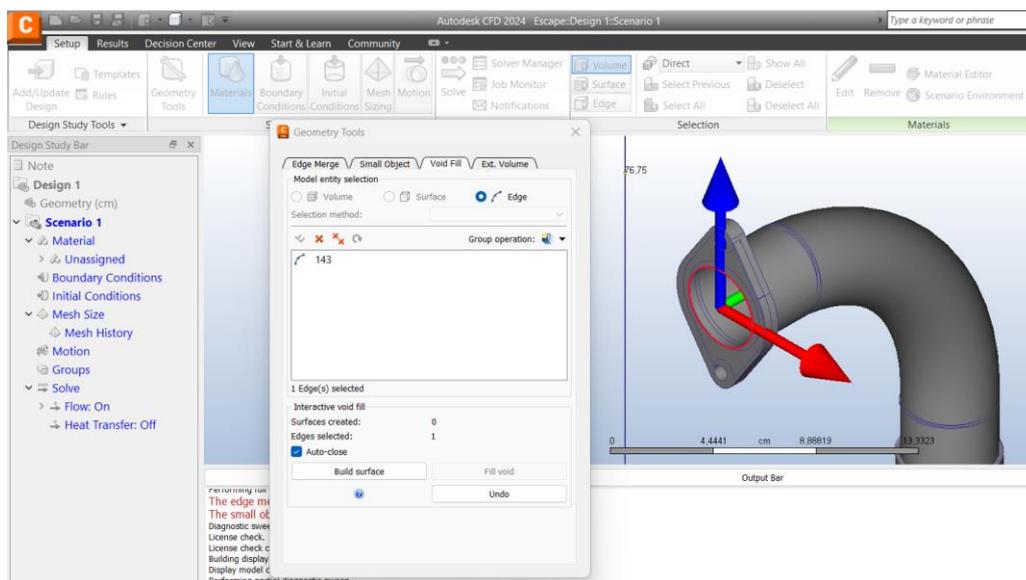


Esta etapa es de mucha importancia por el motivo que se elimina de forma automática algunos errores que se pudieron haber generado durante el proceso de modelado del sistema de escape.

A continuación, se procede a la creación del flujo de gases de escape en AutoDesk CFD una vez que ya se corrigen determinados errores de su geometría, en esta interfase se procede a definir las condiciones de contorno (entrada de gases, salida y temperaturas), se selecciona el modelo o tipo de turbulencia según su condición, asignan las propiedades del material, y finalmente la configuración de la malla computacional. Esta interfase se puede observar de forma clara en la figura 22.

### Figura 22

#### *Generación del Volumen de los Gases de Escape*

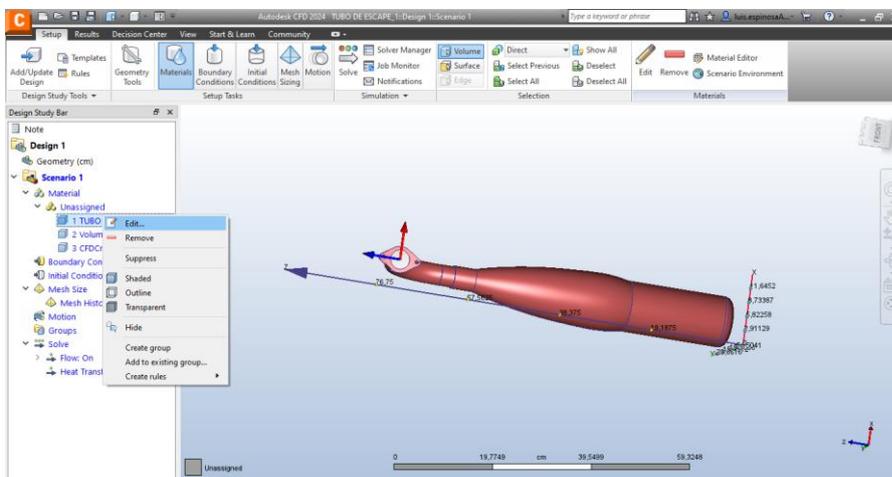


En este punto se debe tener muy en cuenta las entradas y salidas del flujo y tomar muy en cuenta que no existan errores de aberturas o áreas abiertas por el motivo que al momento de generar el volumen del fluido interno el programa lo detecta como error del diseño. Por esto motivo es de suma importancia la determinación el perfil del ingreso y de la salida, así como sus áreas de contacto, las cuales deben ser completamente planas y sin interruptores geométricas del modelado de la pieza al ser analizada.

Finalmente, como parte de esta interfase se procede a la extracción del volumen que para el presente estudio es la geometría hueca que se encuentra al interior del sistema de escape, también se procede a editar el tipo de material con el que se realiza el estudio para lo cual se considera la parte estructural del sistema de escape, así como la del flujo que se va a simular su comportamiento para lo cual se preestablece como aire, como se puede apreciar en la figura 23

**Figura 23**

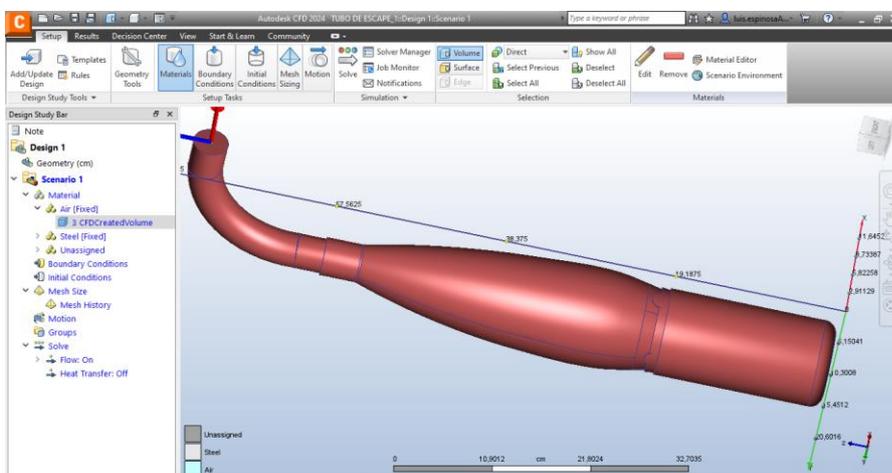
*Extracción de Volumen de los Gases de Escape y Edición de Materiales*



Hay que tener en cuenta que para el presente estudio el análisis es solo del volumen geométrico interno del sistema de gases como se puede ver en la figura 24.

**Figura 24**

*Volumen de los Gases de Escape*



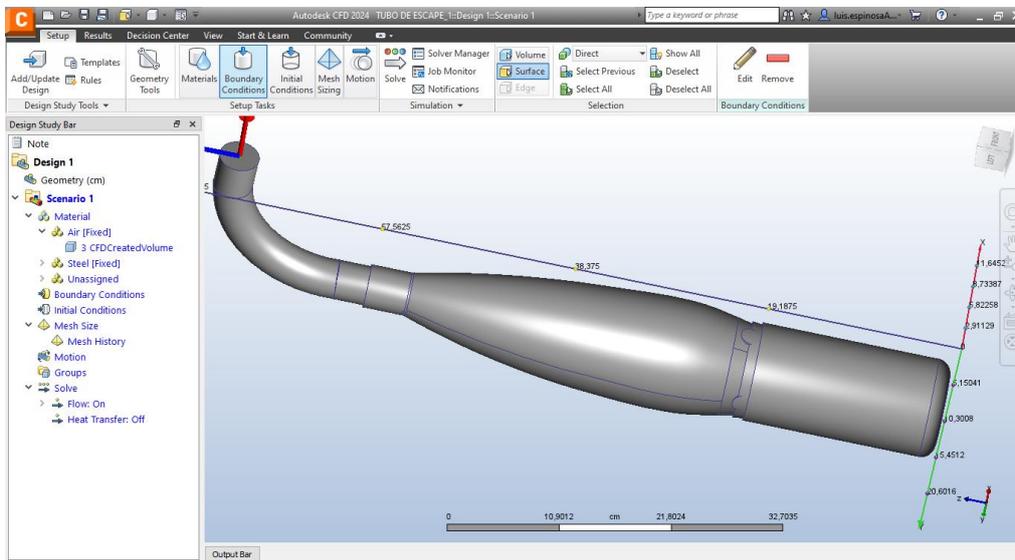
### 3.7.1. Condiciones de Frontera

Una vez concluido la fase de extracción del volumen de los gases de escape en el modelado del sistema se procede a definir las condiciones de frontera en el programa CFD de AutoDesk, este paso es de suma importancia para el desarrollo de la simulación de los gases de escape, primero se identifican las superficies de entrada y salida del modelo.

En la figura 25 se puede apreciar el inicio del proceso de aplicación de las condiciones de frontera del fluido de los gases de escape.

**Figura 25**

*Condiciones de Frontera*



En la entrada, se establecen condiciones de velocidad o presión de los gases basadas en datos experimentales o teóricos del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>, especificando la temperatura inicial y la composición del gas de los cuales su promedio es de 15 a 45 psi, así mismo experimenta una velocidad promedio de ingreso al sistema de escape de 40 a 80 m/s y la temperatura promedio que se experimenta al inicio del sistema de escape está en un promedio de 150°C a 300°C. En las superficies de salida, se aplican condiciones de presión ambiente para simular la liberación de los gases al exterior. Las paredes del sistema de escape se definen como fronteras sólidas, aplicando condiciones de no deslizamiento y especificando

las propiedades térmicas del material, como la conductividad y la temperatura inicial. Finalmente, se validan estas condiciones con datos experimentales o estudios previos para asegurar la precisión de la simulación.

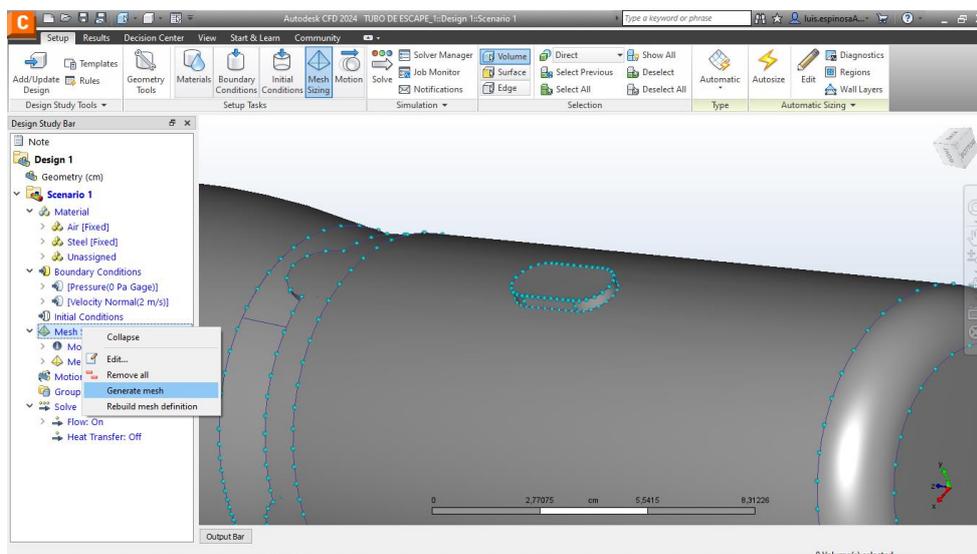
### 3.7.2. *Generación del Mallado del Flujo de Gases*

En lo que se refiere a este nuevo proceso de la generación del mallado del volumen en el sistema de gases de escape utilizando el programa CFD de Autodesk consiste básicamente en la creación de una malla tridimensional que representa el dominio del flujo de los gases emitidos por el motor de combustión interna.

En primer lugar, se procede a definir la geometría del sistema de escape en el software. Luego, el procesamiento del programa divide esta geometría en pequeños elementos finitos, que pueden ser tetraédricos, hexaédricos o prismáticos, dependiendo de la complejidad y los requisitos de precisión del modelo, teniendo en cuenta que es del volumen extraído para el análisis. El mallado involucra ajustar el tamaño y la densidad de estos elementos para equilibrar la precisión de la simulación y el tiempo de cálculo. Parte del proceso se puede apreciar en la figura 26.

**Figura 26**

#### *Inicio del Proceso de Mallado*

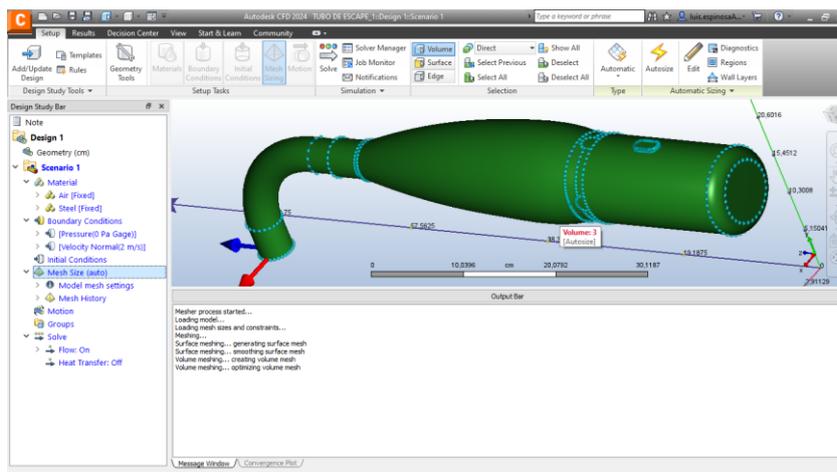


Cada una de las áreas con cambios rápidos de flujo, como curvas y restricciones, requieren una malla más densa para capturar adecuadamente los fenómenos físicos. Autodesk CFD ofrece herramientas automáticas y manuales para refinar la malla, permitiendo un control preciso sobre la calidad del mallado. Este paso es crucial para garantizar resultados precisos en la simulación del comportamiento térmico y dinámico de los gases de escape, ya que una malla bien construida asegura que las ecuaciones de flujo y transferencia de calor, la presión y la velocidad del flujo de los gases de escape se resuelvan correctamente en todo el dominio.

Un aspecto para tomar muy en cuenta en la generación del mallado es que se considera la densidad de elementos en áreas críticas, la calidad de los elementos para evitar deformaciones, el equilibrio entre precisión y tiempo de cálculo, y la adaptabilidad del mallado a cambios en la geometría, y en caso necesario se requiere refinar la malla en zonas con gradientes rápidos es esencial, la finalización del proceso de mallado del volumen de gases de escape se puede apreciar en la figura 27.

## Figura 27

### *Finalización del Proceso de Mallado*



Después de realizar el proceso del mallado en Autodesk CFD, el proceso de simulación realiza la determinación de las condiciones de contorno, como la temperatura y presión de entrada y salida del sistema de escape. Luego, el programa procede a la selección

los modelos físicos adecuados, como la transferencia de calor y la dinámica de fluidos. Finalmente, la simulación se ejecuta resolviendo las ecuaciones involucradas y de energía en cada elemento de la malla del flujo de gases de escape.

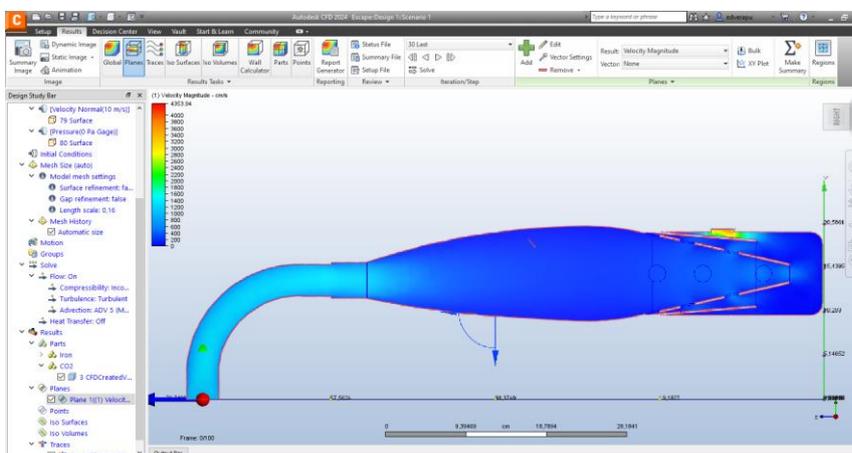
### 3.7.3. *Obtención de Resultados del Proceso de Simulación*

Para la finalización de esta sección de investigación se presenta el proceso de obtención de resultados de la simulación en Autodesk CFD el cual se comienza tras la configuración y ejecución del análisis del flujo de gases de escape del motor de dos tiempos de combustión interna de un kart homologado de la marca Yamaha. Una vez completada la simulación, los resultados se presentan en diversas formas, como gráficos, mapas de contornos y datos numéricos, permitiendo una comprensión detallada de los fenómenos físicos en el sistema de escape.

Para evaluar la velocidad del flujo de los gases de escape, se examinan los vectores de velocidad y los mapas de contorno generados por el programa computacional. Estos resultados muestran cómo varía la velocidad en diferentes secciones del sistema de escape, destacando áreas de aceleración, desaceleración y posibles turbulencias. Esta información es crucial para identificar zonas que podrían beneficiarse de ajustes en el diseño para mejorar el flujo, estos primeros resultados se pueden apreciar en la figura 28.

**Figura 28**

#### *Resultados de Velocidad del Flujo de Gases de Escape*

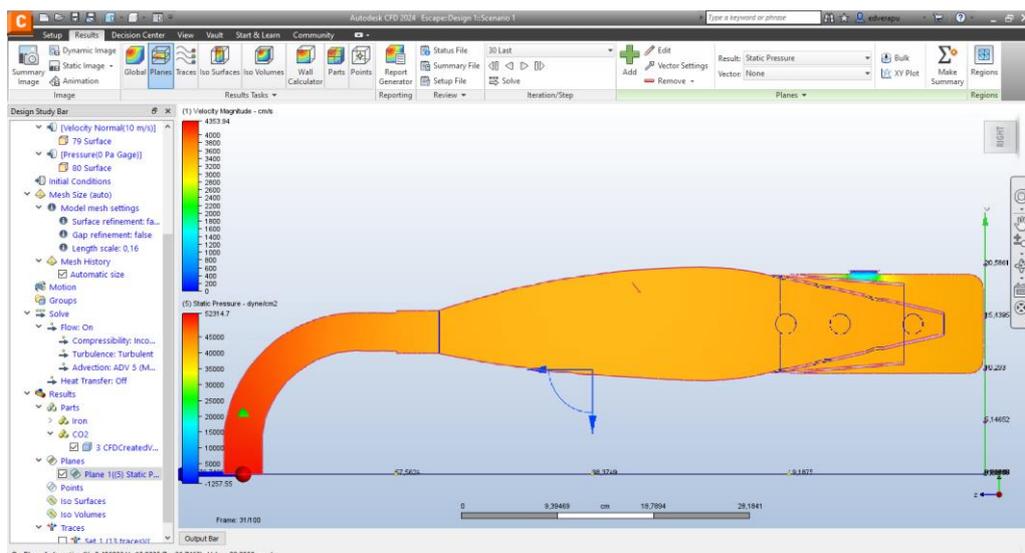


Los valores que se pueden observar que son los siguientes: en sectores se tiene 0 cm/s y valores máximos de 4353.94 cm/s sobre todo a la salida del sistema de escape.

En cuanto a la presión que generan los gases de escape, los mapas de contorno de presión permiten visualizar las variaciones de presión a lo largo del sistema como se puede apreciar en la figura 29. Se identifican puntos de alta presión que podrían estar contribuyendo a pérdidas de eficiencia o resistencia al flujo que se dan a la entrada del sistema de escape con un valor máximo de presión de 52314.7 dyn/cm<sup>2</sup> y un valor mínimo por una depresión a la salida del sistema de -1257.55 dyn/cm<sup>2</sup>. La evaluación de estos datos ayuda a optimizar el sistema para reducir las pérdidas de presión y mejorar la evacuación de los gases.

**Figura 29**

*Resultados de Presión del Flujo de Gases de Escape*

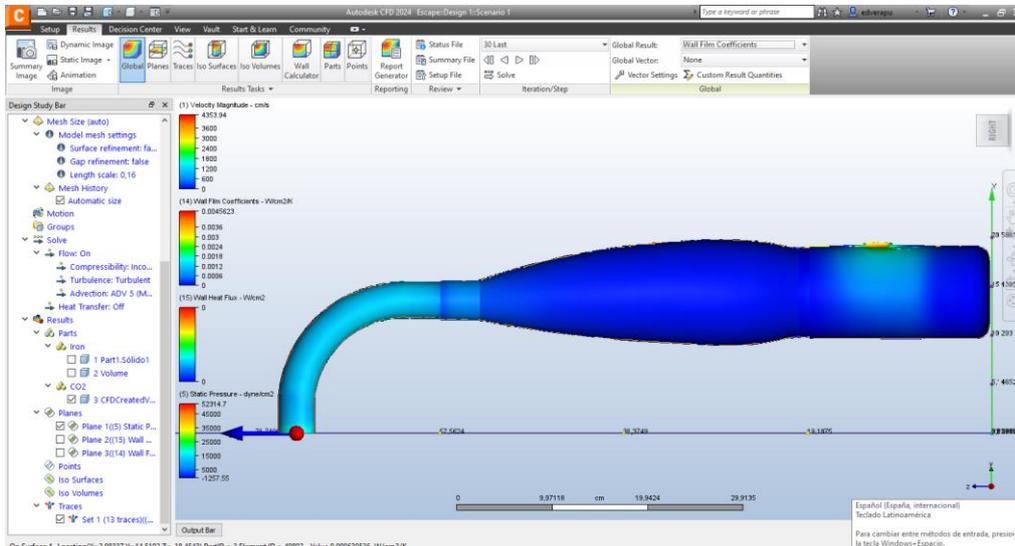


El coeficiente de pared o coeficiente de fricción se analiza para comprender la interacción entre los gases de escape y las paredes del sistema. Este coeficiente influye en la resistencia al flujo y la disipación de energía térmica. Los resultados de la simulación ofrecen un perfil detallado del coeficiente de pared, permitiendo identificar áreas con alta fricción que podrían ser mejoradas mediante modificaciones en la superficie interna del escape o el uso de materiales con menor resistencia al flujo.

Como resultados el programa arrojó un valor máximo de  $0.00456 \text{ W/cm}^2\cdot\text{K}$  y un valor mínimo de  $0 \text{ W/cm}^2\cdot\text{K}$ , esto se puede apreciar claramente en la figura 30.

**Figura 30**

*Resultados de Coeficiente de Pared del Flujo de Gases de Escape*



De esta manera se da por finalizado la etapa de simulación del flujo de gases de escape del motor Yamaha aplicado en un kart homologado.

## Capítulo IV

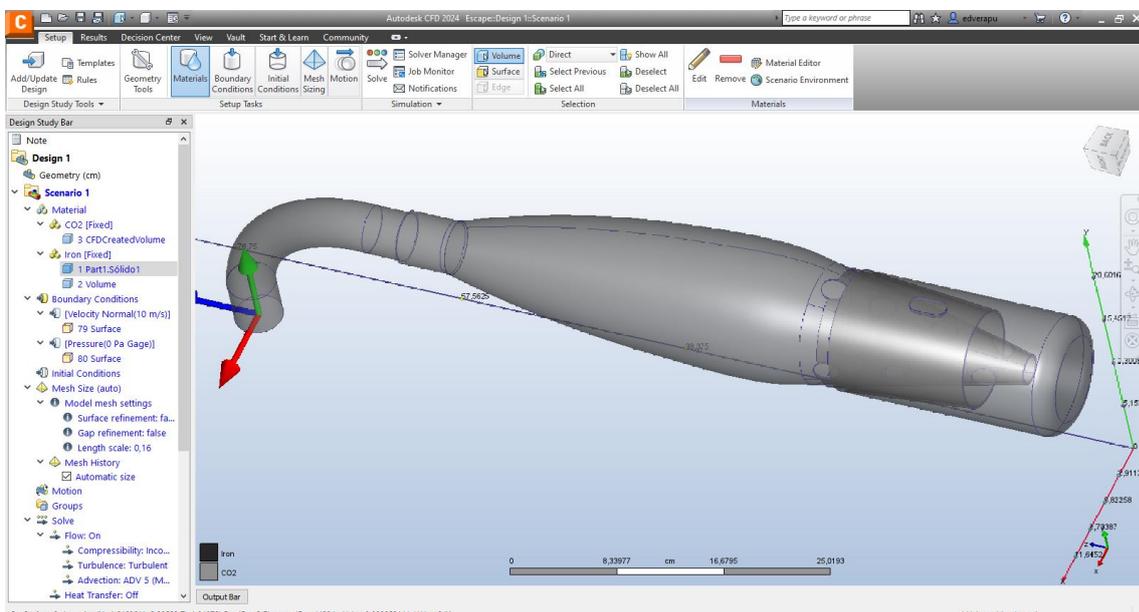
### Análisis de Resultados

#### 4.1. Análisis de Datos Obtenidos

En la última etapa del presente trabajo investigativo, un aspecto de suma importancia para generar la valides del mismo se procede a la realización del análisis de resultados el mismo que se enfoca en interpretar los datos obtenidos de la simulación de la dinámica de fluido computacional obtenido por medio del programa computacional Inventor Pro y CFD de AutoDesk con lo que se procedió a la realización del modelado del sistema de escape con su respectivo material de fabricación por donde se genera el pasó de los gases combustionados por parte del motor como se muestra en la figura 31 y la simulación de los mismos.

**Figura 31**

*Análisis del Modelado del Sistema de Escape con Designación de su Designación de Material*



En definitiva, se evalúan el comportamiento de la velocidad del flujo de gases combustionados del motor dentro de la configuración del sistema de escape, la presión generada en cada una de la configuración interna del sistema y el coeficiente de pared en el sistema de escape del motor Yamaha 125 cm<sup>3</sup>. En la presente sección se procede a comparar

los resultados generados con los objetivos de diseño y expectativas teóricas para identificar áreas de mejora. La distribución de velocidad y presión revela posibles puntos de optimización en la geometría del escape, mientras que el coeficiente de pared indica la eficiencia del flujo y la disipación de energía térmica. Este análisis proporciona recomendaciones específicas para mejorar el rendimiento térmico y fluidodinámico del sistema de escape, contribuyendo a la optimización del motor y la eficiencia del kart homologado.

#### ***4.1.1. Análisis de Velocidad del Gases de Escape***

El análisis de los resultados que se muestran referente al comportamiento de los gases de escape revela varios aspectos críticos del flujo de los gases de escape dentro del sistema. En primer lugar, se observa un valor mínimo de velocidad de 0 cm/s en las paredes laterales internas del sistema de escape.

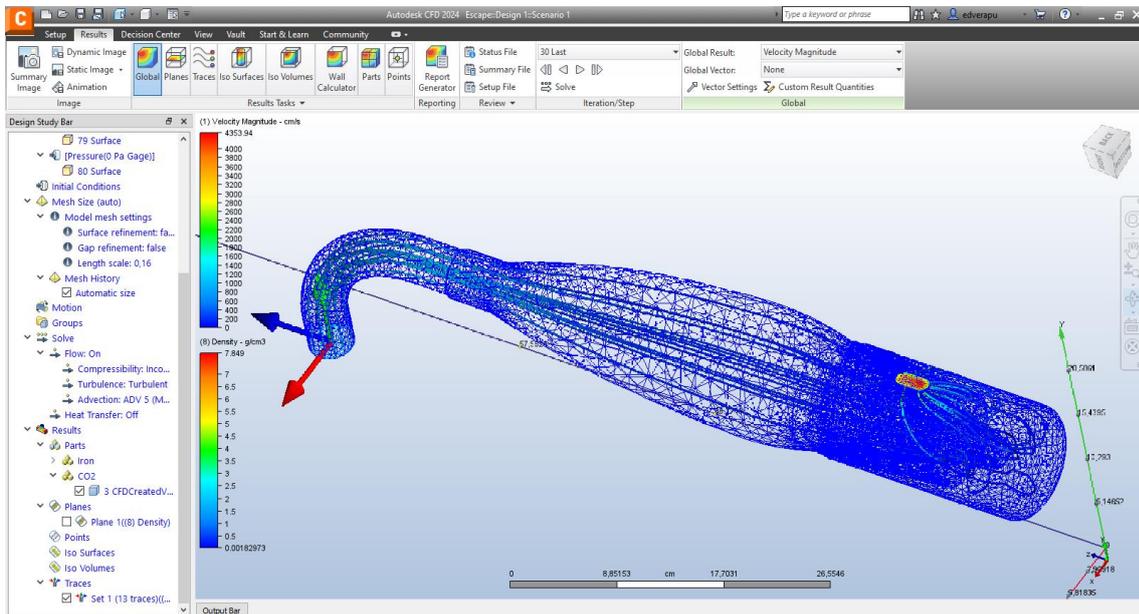
Este resultado es esperado, ya que la velocidad del fluido en contacto con las paredes es nula debido a la condición de no deslizamiento. Este fenómeno indica la presencia de una capa límite, donde la fricción entre los gases y la superficie del escape reduce la velocidad del flujo a cero.

Entender esta interacción es vital para evaluar la pérdida de energía y la eficiencia del sistema de escape, ya que una mayor fricción puede generar más calor y reducir la eficacia del flujo de gases.

Un aspecto de mucha importancia es la forma y las características que se establecen al ingreso del sistema de escape y que salen del motor de combustión interna, los gases tienen una velocidad de 1200 cm/s. Este valor refleja la energía inicial con la que los gases de combustión entran al sistema. La velocidad inicial es crucial para determinar la capacidad del sistema de escape para manejar el volumen de gases emitidos por el motor, esto se puede apreciar de forma clara en la figura 32.

Figura 32

## Análisis de Velocidad del Flujo de Gases de Escape



Una velocidad adecuada en esta etapa asegura que los gases sean expulsados eficientemente del motor de combustión interna, minimizando la contrapresión y mejorando el rendimiento del motor a un elevado nivel de eficiencia. Sin embargo, cualquier impedimento o reducción en la sección transversal del escape puede afectar significativamente este flujo inicial.

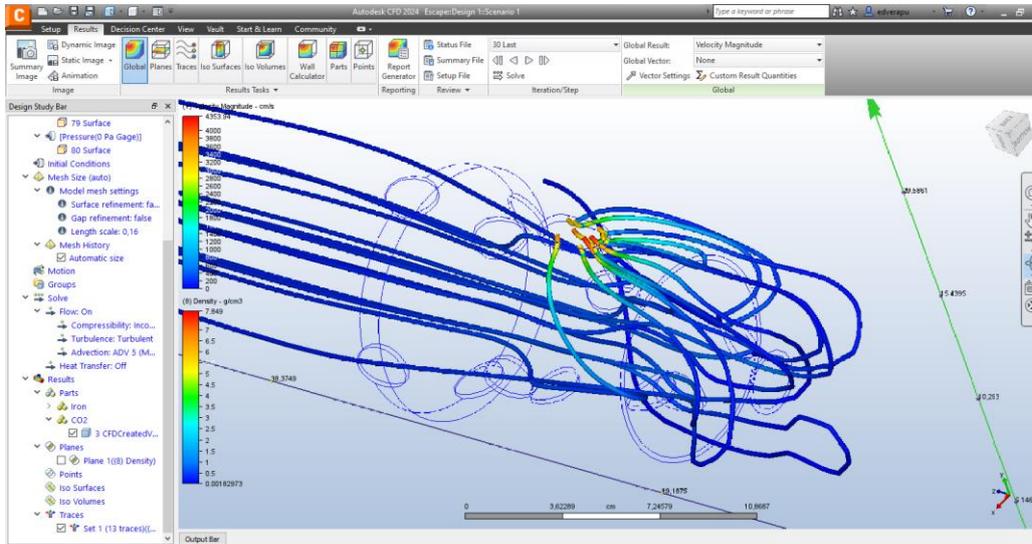
A la salida del sistema de escape y de manera específica en el conducto u orificio de salida, se genera una notable turbulencia debido a lo reducido del orificio de expulsión, con la velocidad de los gases alcanzando un máximo de 4353.94 cm/s.

Esta alta velocidad y la turbulencia resultante indican una restricción significativa en el diseño del orificio de salida, que podría estar causando un aumento en la contrapresión y, por lo tanto, afectando negativamente la eficiencia del sistema de escape, este fenómeno se puede apreciar de forma clara en la figura 33.

La turbulencia generada en la salida no solo puede aumentar el ruido que emite desde el motor hasta la salida del sistema, sino que también puede influir en la eficiencia de expulsión de los gases.

Figura 33

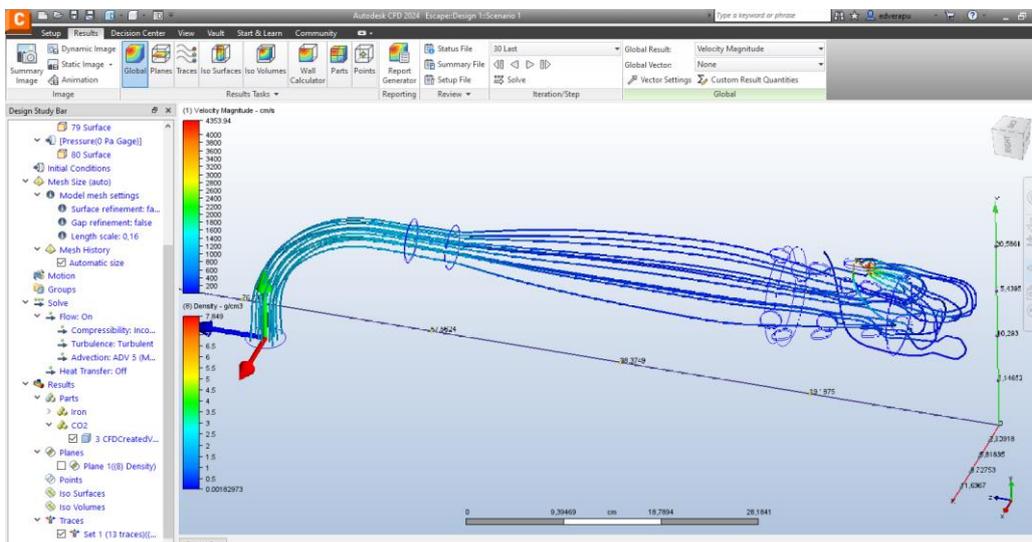
### Velocidad Máxima y Área de Turbulencia del Flujo de Gases de Escape



Finalmente, al hacer el análisis global del flujo de los gases de gases se puede llegar a la consideración de optimizar el diseño del orificio de salida para reducir la turbulencia y la contrapresión podría mejorar el rendimiento general del motor y reducir las emisiones, teniendo en cuenta que al ingreso la velocidad es media y al parar por la sección intermedia esta disminuye por el volumen aumentado y a la salida se incrementa considerablemente por la forma geométrica y reducción de la sección de salida como se puede ver en la figura 34.

Figura 34

### Análisis Integral del Flujo de Gases de Escape

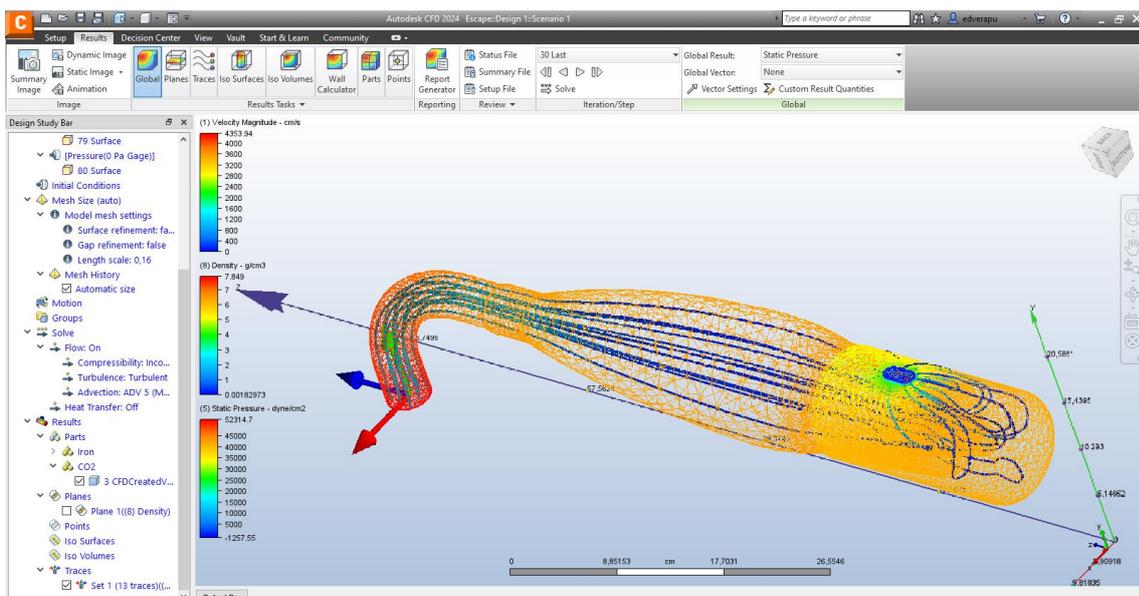


#### 4.1.2. Análisis de Presión Estática del Gases de Escape

En lo correspondiente al análisis de los resultados del comportamiento de la presión estática de los gases de escape en el sistema revela diferencias significativas a lo largo del recorrido de los gases de escape, que son indicativas de la dinámica interna y la eficiencia del comportamiento del sistema de escape. En la sección de ingreso de los gases de escape, se observa que, en esta presente la mayor presión estática, alcanzando los 52314.7 dyne/cm<sup>2</sup>. Este valor elevado es muy coherente con la energía liberada durante la combustión en el motor de combustión interna, donde los gases altamente presurizados son expulsados con fuerza hacia el sistema de escape, como se puede apreciar en la figura 35.

**Figura 35**

*Análisis de Presión Estática de Gases de Escape*

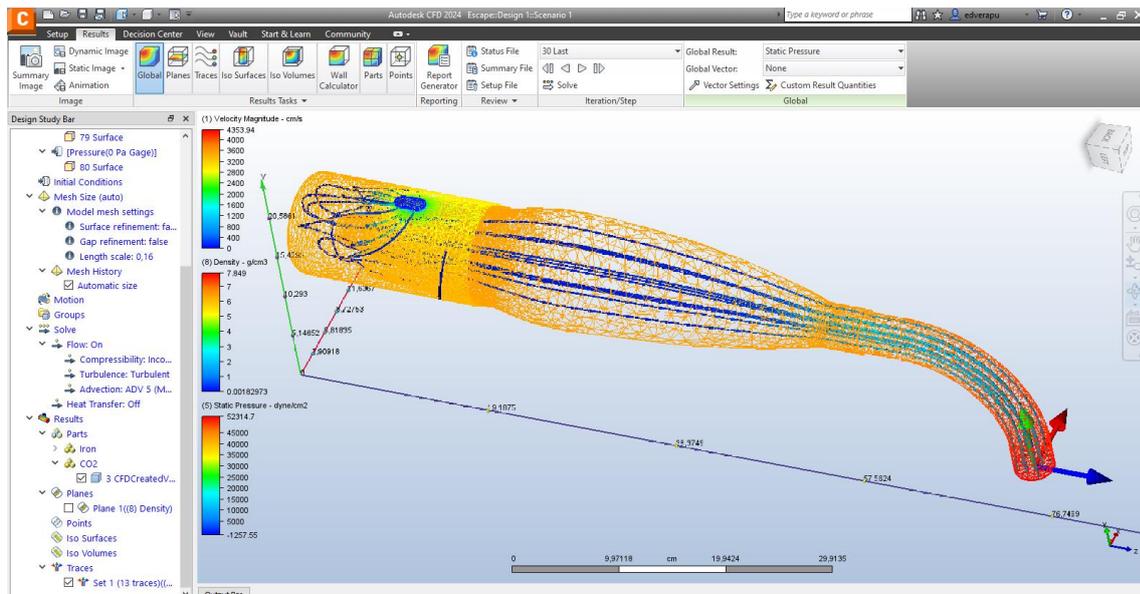


Una presión alta en esta zona es esperada, ya que representa el impulso inicial necesario para desplazar los gases a través del escape. Sin embargo, una presión excesiva podría indicar una posible restricción al flujo, lo cual podría llevar a un incremento de la contrapresión y afectar el rendimiento del motor de combustión interna y lo que afectaría de manera considerable a la eficiencia del vehículo en competencia.

A medida que los gases se desplazan hacia la parte intermedia del sistema de escape, la presión estática disminuye a un valor promedio de 35000 dyne/cm<sup>2</sup>, como se puede observar en la figura 36.

**Figura 36**

*Análisis del Comportamiento de Presión Estática de Gases de Escape*



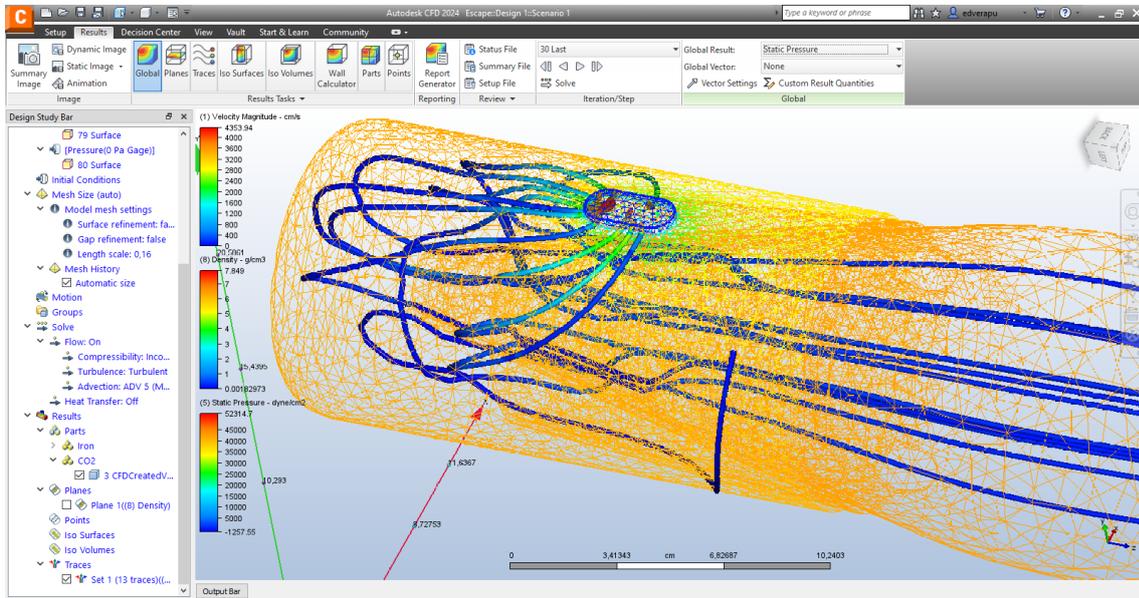
Esta reducción en la presión es un signo del trabajo que realiza el sistema al expandir y enfriar los gases en su camino hacia la salida. El valor promedio sugiere que, en general, el sistema de escape maneja de manera eficiente la transición de alta a baja presión. No obstante, una disminución demasiado abrupta en la presión podría también señalar pérdidas innecesarias de energía y posibles problemas de diseño que podrían ser optimizados, como el alisado de superficies internas o la modificación del diámetro de los tubos en esta sección.

La presión mínima observada, de -1257.55 dyne/cm<sup>2</sup>, se registra en la sección de salida del sistema de escape, como se puede observar en la figura 37. Este valor negativo indica la presencia de un fenómeno de succión o vacío parcial, lo cual es común cuando los gases de alta velocidad pasan por una restricción, como un orificio de salida reducido. Si bien este vacío puede ayudar a extraer gases residuales del cilindro durante la fase de escape, también puede ser indicativo de una turbulencia excesiva en la salida, que no solo afecta la

eficiencia del sistema, sino que también podría incrementar la contrapresión al motor, especialmente si la magnitud del vacío es elevada.

**Figura 37**

*Análisis del Comportamiento de Presión Estática de Gases a la Salida del Escape*



En conjunto, estos resultados sugieren que el sistema de escape podría beneficiarse de un rediseño en la sección de salida para reducir la turbulencia y optimizar el flujo de gases. Ajustes como la ampliación del orificio de salida o el suavizado de las transiciones entre secciones podrían reducir la contrapresión, minimizar las pérdidas de energía y mejorar la eficiencia del motor. Además, se debe considerar la homogeneidad en la disminución de la presión a lo largo del sistema para asegurar una expulsión más eficaz de los gases, manteniendo el equilibrio entre la reducción de presión y el mantenimiento de una velocidad de flujo adecuada.

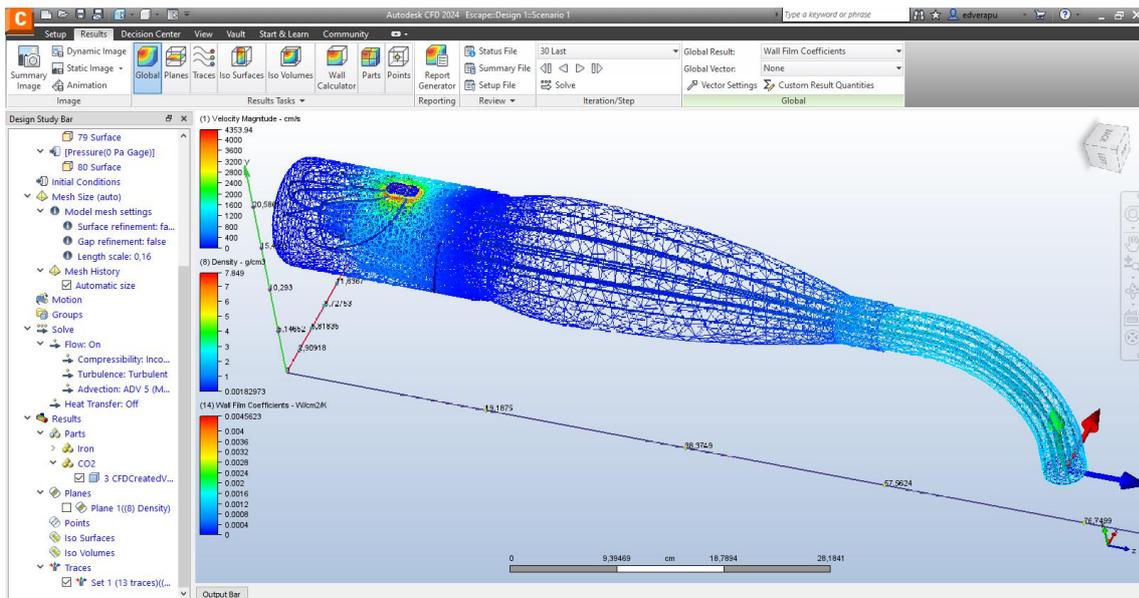
**4.1.3. Análisis de Coeficiente de Película de Pared de los Gases de Escape**

El análisis del coeficiente de película de pared revela un valor mínimo de  $0 \text{ W/cm}^2\text{K}$  en la sección intermedia del sistema de escape, lo que sugiere una ausencia o muy baja transferencia de calor desde los gases hacia las paredes en esa zona, posiblemente por un flujo laminar o una baja diferencia de temperatura. En contraste, el valor máximo de  $0.00456$

W/cm<sup>2</sup>K en la sección de salida indica una transferencia de calor más significativa, posiblemente debido a una mayor turbulencia y contacto térmico en esa área, esto se puede apreciar claramente en la figura 38.

**Figura 38**

*Análisis del Coeficiente de Película de Pared de los Gases de Escape*



## Conclusiones

Por medio del presente desarrollo del proyecto investigativo se identificó la distribución de la velocidad de los gases a lo largo del sistema de escape mostró una velocidad mínima de 0 cm/s en las paredes laterales internas y un máximo de 4353.94 cm/s en la salida, debido a la turbulencia causada por el orificio reducido. Estas diferencias identifican zonas críticas donde se podrían producir estrangulamientos del flujo, lo que podría llevar a sobrecalentamientos y afectar negativamente el rendimiento del motor.

Se logró realizar el proceso de modelado y simulación para de esta manera finalizar con una evaluación del diseño del sistema de escape en términos de geometría y su impacto en las pérdidas de presión. Con una presión inicial de 52314.7 dyne/cm<sup>2</sup> y una significativa caída hasta -1257.55 dyne/cm<sup>2</sup> en la salida, se evidencia la necesidad de optimizar el diseño del orificio de salida para reducir las pérdidas de energía, minimizar la contrapresión y, en consecuencia, mejorar el rendimiento general del motor.

Finalmente se evaluó los resultados de la simulación dentro de los parámetros de presión estática, coeficiente de película de pared y velocidad de flujo indican variaciones significativas a lo largo del sistema de escape. Con un coeficiente de película de pared que alcanza un máximo de 0.00456 W/cm<sup>2</sup>\*K en la salida, se confirma que esta zona es crítica para la transferencia de calor y requiere atención especial en el diseño para evitar ineficiencias y sobrecalentamientos, garantizando así un rendimiento óptimo del motor en diferentes condiciones de funcionamiento.

## Recomendaciones

Se recomienda rediseñar el orificio de salida del sistema de escape para reducir la turbulencia y la contrapresión observada en la simulación. Esto podría lograrse ampliando el diámetro del orificio o suavizando las transiciones en esa zona, lo que permitirá una evacuación más eficiente de los gases y mejorará el rendimiento general del motor.

Dado que se observó un valor de 0 cm/s en las paredes laterales internas, es recomendable realizar un análisis más detallado de estas zonas para identificar posibles mejoras en la superficie interna del escape. Reducir la fricción en estas áreas podría mejorar la eficiencia del flujo y reducir las pérdidas de energía por resistencia.

Considerando que el coeficiente de película de pared alcanzó su valor máximo en la sección de salida, se sugiere revisar los materiales y el diseño de esta área para mejorar la disipación del calor. El uso de materiales con mayor conductividad térmica o el aumento del área de contacto podría ayudar a manejar mejor las altas temperaturas y prevenir el sobrecalentamiento.

## Bibliografía

- Álvarez, J. (2005). *Motores alternativos de combustión interna*. España: UPC.
- Bernardi, M. (9 de Agosto de 2018). *Tkart*. Obtenido de <https://tkart.it/es/magazine/consejos-de-los-expertos/escape-de-60-mini-flexible-influyen>
- CADBIM. (6 de Junio de 2016). *Protocad3D*. Obtenido de <https://www.protocad3d.com/2016/06/analisis-termico-en-autodesk-inventor-con-nastran-in-cad.html>
- Camaño, A. (2021). *Estudio experimental y modelado CFD del proceso de combustión de mezclas combustibles de hidrógeno, metano y gas de síntesis en una bomba cilíndrica con acceso óptico*. Valladolid: UVA.
- Den. (8 de Octubre de 2020). *Autodoc club*. Obtenido de <https://club.autodoc.es/magazin/colector-de-escape-funciones-sintomas-parametros>
- Gómez, L., & García, J. (2020). *Análisis de la combustión en un quemador de turbina de gas mediante la aplicación del modelado CFD*. Valencia: UPV.
- González, J., & Gayubo, F. (2023). *Delimitación de zonas críticas mediante análisis CFD para sensorización de la calidad del aire*. Valladolid: UVA.
- Hangar. (16 de Enero de 2024). *Hangar 1*. Obtenido de <https://hangar1.com.mx/para-que-sirve-el-catalizador-de-mi-auto/>
- López, D. (6 de Julio de 2021). *Actualidad motor*. Obtenido de <https://www.actualidadmotor.com/funcion-de-la-sonda-lambda/>
- Ortmann, R. (2003). *Técnica de los gases de escape para motores de gasolina*. Alemania: Bosch.

- Quinga, J. (2021). *Análisis de la combustión de un quemador de gas tipo venturi con premezcla del laboratorio de energía de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica utilizando simulación CFD mediante el software Ansys Fluent*. Ambato: UTA.
- Sánchez, S. (2016). *Modelo de radiación de gases aplicable a simulaciones CFD en procesos de combustión*. Madrid: Universidad Politécnica del Madrid.
- Vera, E. (2017). *Propuesta de diseño ergonómico en butacas de vehículos monoplaça, para equipos ecuatorianos participantes de la Formula Student*. Quito: UISEK.
- Yamaha Motor Co., Ltd. (2023). *Facct Book 2023*. Shingai: HIDAKA.

