



**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO**

**ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS**

**INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**DISEÑO DEL SILENCIADOR PARA UN MOTOR**

**YAMAHA CP2**

**Alumno: D. ANDRÉS ALCALDE ARESO**

**Director: D. ÁNGEL ENRÍQUEZ DE SALAMANCA MULLER**

**JULIO 2023**

**TÍTULO:** DISEÑO DEL SILENCIADOR PARA UN MOTOR YAMAHA CP2

**AUTOR:** ANDRÉS ALCALDE ARESO

**DIRECTOR DEL PROYECTO:** ÁNGEL ENRÍQUEZ DE SALAMANCA MULLER

**FECHA:** 10 de julio de 2023

## RESUMEN

Este proyecto de fin de grado trata del diseño de un silenciador para el motor Yamaha CP2 para su utilización en el equipo de Formula Student de la Universidad Europea de Madrid. El equipo, llamado FUEM, desarrolla un monoplace para participar en dicha competición, para ello es necesario seguir la reglamentación propia de este campeonato.

La normativa incluye la necesidad de superar dos pruebas diferentes de ruido. La primera de ellas se realiza cuando el motor está al ralentí, el ruido generado no debe superar 103 dB (C). La segunda prueba se realiza cuando la velocidad media del pistón sea de 15,25 m/s, en esta prueba no se pueden superar 110 dB (C).

Se han realizado tres modelos diferentes de silenciador con el objetivo de escoger el diseño más acorde al motor Yamaha CP2 y al monoplace del equipo. Para escoger el silenciador y conocer si el vehículo cumplía las pruebas de ruido de la competición se han realizado simulaciones de flujo y simulaciones acústicas.

**Palabras clave:** silenciador, ruido, motor, Formula Student.

## ABSTRACT

This final degree project deals with the design of the Yamaha CP2 engine silencer to be used in the Formula Student team of the European University of Madrid. The team, called FUEM, develops a single-seater to participate in this competition, for which it is necessary to follow the regulation of this competition.

The regulations include the execution of two different noise tests. The first test is carried out when the engine is idling, the noise generated must not exceed 103 dB (C). The second test is carried out at an average piston speed is 15.25 m/s, this test must not exceed 110 dB (C).

Three different silencer models were made in order to choose the most suitable silencer for the Yamaha CP2 engine and the team's single-seater. Flow simulations and acoustic simulations were carried out in order to select the silencer and to find out if the vehicle complied with the competition noise tests.

**Key words:** muffler, noise, engine, Formula Student.

# Índice

RESUMEN.....	3
ABSTRACT.....	3
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 Planteamiento del problema .....	10
1.2 Objetivo.....	10
1.3 Estructura del proyecto.....	11
Capítulo 2. ANTECEDENTES.....	12
2.1 Formula Student.....	12
2.1.1 Pruebas estáticas .....	13
2.1.2 Pruebas dinámicas .....	13
2.2 Motor utilizado.....	14
2.3 Programas de cálculo y simulación utilizados.....	15
2.4 Soluciones propuestas .....	15
2.5 Estudio de materiales.....	16
2.5.1 Acero .....	16
2.5.2 Aluminio.....	17
2.5.3 Titanio 6Al-4V.....	17
2.5.4 Comparativa materiales.....	17
2.5.5 Material escogido .....	18
2.6 Tipos de silenciadores .....	18
2.6.1 Silenciador de cámara resonante .....	18
2.6.2 Silenciador de absorción.....	19
2.6.3 Silenciador de expansión: .....	19
2.6.4 Silenciador de resonador lateral.....	19
2.6.5 Silenciador de interferencia.....	19
Capítulo 3. REQUISITOS DEL DISEÑO .....	21
3.1 Especificaciones técnicas .....	21
3.2 Normativa aplicada .....	21

---

Capítulo 4. MODELADO Y SIMULACIONES .....	22
4.1 Cálculos previos a las simulaciones.....	22
4.1.1 Velocidad media del pistón .....	22
4.1.2 Flujo másico de aire de entrada al silenciador .....	24
4.2 Modelado 3D.....	26
4.2.1 Silenciador 1.....	26
4.2.2 Silenciador 2.....	27
4.2.3 Silenciador 3.....	29
4.3 Simulación de fluidos .....	30
4.3.1 Condiciones de la simulación.....	30
4.3.2 Silenciador 1.....	31
4.3.3 Silenciador 2.....	33
4.3.4 Silenciador 3.....	35
4.4 Simulación acústica .....	37
4.4.1 Silenciador 1.....	39
4.4.2 Silenciador 2.....	41
4.4.3 Silenciador 3.....	43
4.4.4 Comparación de la simulación acústica.....	46
Capítulo 5. SOLUCIÓN ESCOGIDA.....	47
5.1 Comparación de las soluciones analizadas .....	47
5.2 Selección de la solución .....	47
5.3 Desglose del silenciador seleccionado.....	48
5.3.1 Cubierta exterior.....	48
5.3.2 Tubo de entrada y tubo de salida.....	49
5.3.3 Tubo interior .....	50
5.4 Proceso de fabricación .....	51
Capítulo 6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO.....	53
6.1 Planificación .....	53
6.2 Presupuesto .....	53
Capítulo 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO .....	55
7.1 Conclusiones .....	55

---

7.2 Futuras líneas de trabajo.....	55
ANEXO 1. PLANOS.....	56
BIBLIOGRAFÍA.....	61

# Índice de Figuras

Figura 1. Cronograma del proyecto. ....	11
Figura 2. Vista isométrica del modelo 3D del silenciador 1.....	26
Figura 3. Alzado del modelo 3D del silenciador 1.....	27
Figura 4. Vista isométrica del modelo 3D del silenciador 2.....	28
Figura 5. Alzado del modelo 3D del silenciador 1.....	28
Figura 6. Vista isométrica del modelo 3D del silenciador 3.....	29
Figura 7. Alzado del modelo 3D del silenciador 1.....	30
Figura 8. Representación del movimiento de los gases de escape y sus presiones del silenciador 1. Simulación realizada en SolidWorks. ....	31
Figura 9. Representación de las presiones en el interior del silenciador 1. Simulación realizada en SolidWorks. ....	32
Figura 10. Representación de la velocidad de los gases de escape del silenciador 1. Simulación realizada en SolidWorks.....	32
Figura 11. Representación del movimiento de los gases de escape y sus presiones del silenciador 2. Simulación realizada en SolidWorks. ....	33
Figura 12. Representación de las presiones en el interior del silenciador 2. Simulación realizada en SolidWorks. ....	34
Figura 13. Representación de la velocidad de los gases de escape del silenciador 2. Simulación realizada en SolidWorks.....	34
Figura 14. Representación del movimiento de los gases de escape y sus presiones del silenciador 3. Simulación realizada en SolidWorks. ....	35
Figura 15. Representación de las presiones en el interior del silenciador 3. Simulación realizada en SolidWorks. ....	36
Figura 16. Representación de la velocidad de los gases de escape del silenciador 3. Simulación realizada en SolidWorks.....	36
Figura 17. Gráfica de las ponderaciones del nivel de presión sonora. Fuente: Wikipedia. ....	38
Figura 18. Modelado del motor Yamaha CP2 en AVL Boost. ....	39
Figura 19. Silenciador 1 realizado en AVL Boost 3D. ....	40
Figura 20. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 1 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.....	40
Figura 21. Resultado de la medición del ruido del silenciador 1 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.....	40
Figura 22. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 1 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.....	41
Figura 23. Resultado de la medición del ruido del silenciador 1 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost. ....	41

---

Figura 24. Silenciador 2 realizado en AVL Boost 3D. ....	42
Figura 25. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 2 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost. ....	42
Figura 26. Resultado de la medición del ruido del silenciador 2 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost. ....	42
Figura 27. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 2 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost. ....	43
Figura 28. Resultado de la medición del ruido del silenciador 2 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost. ....	43
Figura 29. Silenciador 3 realizado en AVL Boost 3D. ....	44
Figura 30. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 3 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost. ....	44
Figura 31. Resultado de la medición del ruido del silenciador 3 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost. ....	45
Figura 32. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 3 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost. ....	45
Figura 33. Resultado de la medición del ruido del silenciador 3 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost. ....	46
Figura 34. Cubierta exterior del silenciador escogido. ....	49
Figura 35. Tubo de entrada y salida del silenciador escogido. ....	50
Figura 36. Tubo interior del silenciador escogido. ....	51
Figura 37. Cronograma para la realización del proyecto. ....	53

# Índice de Tablas

Tabla 1. Propiedades del acero.....	16
Tabla 2. Propiedades del aluminio.....	17
Tabla 3. Propiedades del Ti 6Al - 4V. ....	17
Tabla 4. Comparativa de los posibles materiales. ....	18
Tabla 5. Comparativa de la simulación acústica de los silenciadores. ....	46
Tabla 6. Comparativa de los silenciadores analizados.....	47

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El silenciador es un dispositivo que tiene como objetivo reducir el ruido generado por otro dispositivo, en este proyecto se diseñará para reducir el ruido generado por un motor. El motor es un Yamaha CP2 utilizado en el coche del equipo del Formula Student de la Universidad Europea de Madrid.

El silenciador utiliza diferentes cámaras, conductos y materiales absorbentes para reducir el ruido expulsado al exterior. Además de reducir el ruido, este dispositivo también afecta al rendimiento del motor, debido a que se modifican los flujos de gases de escape.

## 1.1 Planteamiento del problema

La normativa por la que se rige la Formula Student exige a los monoplazas no superar un nivel máximo de ruido de los motores de combustión interna.

Como parte de la Inspección Técnica realizada en cada competición de Formula Student, los vehículos presentados a la competición deben de superar dos pruebas de ruido. La primera prueba de nivel de ruido se realiza con el motor al ralentí, siendo el límite máximo de ruido permitido de 103 dB (C). La segunda prueba se realiza cuando la velocidad media del pistón es de 15,25 m/s, en ese momento el ruido generado no debe de superar los 110 dB (C).

La medición del sonido se realiza en estático a 0,5 m de distancia desde el final del escape y a 45° con respecto al plano horizontal.

El motor Yamaha CP2 del FUEM, sin silenciador, genera un ruido de mayor intensidad que la exigida por el Reglamento, por lo que es necesario diseñar y fabricar un silenciador.

## 1.2 Objetivo

El principal objetivo de este proyecto es realizar el diseño de un silenciador que supere las pruebas de ruidos realizadas en las competiciones de Formula Student. Para ello, el vehículo no debe superar los 103 dB (C) cuando el motor está al ralentí y no exceder los 110 dB (C) cuando la velocidad media del pistón sea de 15,25 m/s, en nuestro caso, esto sucede cuando el motor gira a 6.500 rpm.

Además del objetivo principal, hay dos objetivos secundarios. El primero de ellos es la reducción del peso del silenciador y el segundo es minimizar el impacto en la potencia del motor.

### 1.3 Estructura del proyecto

El proyecto se dividirá según la siguiente estructura:

- Capítulo 1. Introducción: en este capítulo se plantea el problema a resolver en este proyecto y los objetivos a cumplir. Este capítulo se realizará a finales de febrero.
- Capítulo 2. Antecedentes: en este capítulo se explica la competición, el motor utilizado, los programas de cálculo utilizados, las soluciones propuestas, un estudio de los posibles materiales utilizados y los diferentes tipos de silenciadores. Este capítulo se realizará a lo largo de marzo.
- Capítulo 3. Requisitos del diseño: en este capítulo se exponen las especificaciones técnicas del silenciador y la normativa que se aplica. Este capítulo se realizará en la primera semana de abril.
- Capítulo 4. Modelado y simulaciones: en este capítulo se explican los cálculos previos a las simulaciones, se expone la creación de los modelos 3D, las simulaciones de fluidos y las simulaciones acústicas. Este capítulo se realizará a lo largo de abril.
- Capítulo 5. Solución escogida: en este capítulo se realiza una comparativa de los resultados de las simulaciones de los diferentes silenciadores, la elección de la solución, el desglose del silenciador escogido y su proceso de fabricación. Este capítulo se realizará en las dos primeras semanas de mayo.
- Capítulo 6. Planificación y presupuesto: en este capítulo se expone la planificación y el presupuesto del proyecto. Este capítulo se realizará en la tercera semana de mayo.
- Capítulo 7. Conclusiones y futuras líneas de trabajo: en este capítulo se exponen las conclusiones y las futuras líneas de trabajo. Este capítulo se realizará en la última semana de mayo y en junio.

	Febrero		Marzo				Abril				Mayo				Junio	
Semana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Introducción																
Antecedentes																
Requisitos del diseño																
Modelado y simulaciones																
Solución escogida																
Planificación y presupuesto																
Conclusiones y futuras líneas de trabajo																

Figura 1. Cronograma del proyecto.

## Capítulo 2. ANTECEDENTES

En este capítulo se describen las diferentes partes que influyen en el diseño y fabricación de un silenciador para un equipo de Formula Student. Se describe la competición, el motor para el cuál el silenciador debe estar diseñado, los programas de cálculo y simulación utilizados, las soluciones propuestas, así como un estudio sobre los posibles materiales utilizados y los diferentes tipos de silenciadores existentes.

### 2.1 Formula Student

En 1981 la Sociedad de Ingenieros de la Automoción (SAE) en Estados Unidos creó la Formula SAE, que es una competición entre estudiantes de universidades alrededor del mundo, empleando monoplazas desarrollados por los propios estudiantes. En Europa es conocida como Formula Student.

La Universidad Europea de Madrid tiene un equipo que compite en el programa Formula Student con un monoplaza diseñado por los alumnos integrantes del equipo. Por normativa, el monoplaza debe suponer un cambio sustancial respecto a los monoplazas presentados en los años anteriores. En el monoplaza de este año se ha cambiado el motor de combustión interna por uno de menor peso. Como consecuencia de este cambio es necesario desarrollar un nuevo sistema de escape adecuado al nuevo motor y que cumpla la normativa exigida por la competición Formula Student.

El objetivo de la competición consiste en diseñar, desarrollar y fabricar un monoplaza pequeño para competir.

La Formula Student es un proyecto educacional que permite a los estudiantes tener experiencia real en la competición de automóviles. Además, promueve todos los aspectos en la industria del automóvil, como la investigación, el diseño, la construcción, los ensayos, el desarrollo, las ventas, la administración y las finanzas.

El rendimiento del equipo y del monoplaza se mide en ocho pruebas, las cuales están agrupadas en pruebas estáticas y pruebas dinámicas.

### **2.1.1 Pruebas estáticas**

Los jueces de la competición evalúan los conocimientos técnicos y económicos y las habilidades comunicativas del equipo.

Las pruebas estáticas son: Engineering Design, Business Plan Presentation y Cost and Manufacturing

#### **1. Engineering Design:**

En esta prueba, se evalúan los diseños y las diferentes soluciones aplicadas, teniendo en cuenta las ventajas que generan. Para ello, se realizan preguntas al equipo participante sobre éstos, con el objeto de conocer los detalles técnicos y la justificación de la elección de las soluciones adoptadas por el equipo.

#### **2. Business Plan Presentation:**

El objetivo es desarrollar un potencial caso de negocio en el cual el monoplaza cumple con las necesidades del mercado.

#### **3. Cost and Manufacturing:**

Se incluyen los costes de la construcción del vehículo y el método de fabricación de las diferentes piezas son evaluados.

### **2.1.2 Pruebas dinámicas**

El rendimiento del monoplaza se evalúa en las pruebas dinámicas. Los pilotos de los vehículos son estudiantes de la propia universidad.

El objetivo de este apartado es completar las cinco pruebas en el menor tiempo posible.

### 1. Aceleración

Consiste en una aceleración en línea recta de 75 metros desde parado. Los monoplazas pueden llegar a alcanzar los 100 km/h al final de la recta.

### 2. Skidpad

El vehículo debe seguir el circuito en forma de 8. El objetivo es medir las aceleraciones laterales que son capaces de soportar.

### 3. Autocross

En esta prueba, el piloto compite en un circuito formado por rectas y curvas y que tiene una longitud aproximadamente de un kilómetro de distancia.

### 4. Endurance

Los monoplazas deben recorrer 22 kilómetros en un circuito. Las competencias que se miden durante esta prueba son la durabilidad del vehículo, además, del rendimiento.

### 5. Efficiency

Se realiza la medida del consumo del monoplaza. Esta medida se produce durante la realización de la prueba de Endurance. La puntuación obtenida en esta prueba es proporcional a la eficiencia del vehículo.

## 2.2 Motor utilizado

El nuevo motor utilizado en el equipo del Formula Student de la Universidad Europea es el motor de Yamaha CP2. La marca japonesa utiliza este motor para propulsar algunas de sus motocicletas, incluyendo la MT-07, la XSR700, la R7, la Ténéré 700 y la Tracer 700.

El Yamaha CP2 es un motor de cuatro tiempos bicilíndrico en línea de 689 centímetros cúbicos refrigerado por líquido. Los cilindros tienen una carrera de 68,6 mm y un diámetro de 80 mm y una relación de compresión de 11,5:1. Es capaz de generar 74 CV de potencia.

Cuenta con un doble árbol de levas en la cabeza y un cigüeñal a 270°, consiguiendo una respuesta lineal del par motor al acelerador.

Las características principales por las cuáles se ha elegido para el equipo son su bajo peso, su reducido tamaño y su gran potencia.

## **2.3 Programas de cálculo y simulación utilizados**

Para el análisis de las distintas alternativas de silenciador que se van a estudiar en este proyecto se precisa la utilización de programas de cálculo para simular el comportamiento de los diferentes diseños en los aspectos de mecánica de fluidos e impacto acústico.

Los programas utilizados han sido:

- SolidWorks: para la creación de los modelos 3D.
- SolidWorks Flow Simulation: para la simulación del flujo de gases de escape.
- AVL Boost 3D: para realizar los silenciadores en 3D y su comportamiento.
- AVL Boost: para realizar el modelado del motor y simular el comportamiento acústico del conjunto.

## **2.4 Soluciones propuestas**

En este estudio se han considerado distintos diseños internos del silenciador buscando la mayor adecuación a los requisitos del proyecto.

Se han analizado tres diseños diferentes de silenciador, los diseños y simulaciones correspondientes a las alternativas estudiadas se detallan en el capítulo 4.2 Modelado 3.

Gracias al estudio de materiales descrito en el apartado 2.5 se ha decidido que en todas las alternativas analizadas el material utilizado ha sido el titanio, debido a su bajo peso, a su alto punto de fusión y a su resistencia.

Con el fin de facilitar el proceso de fabricación del silenciador se han utilizado componentes normalizados, suponiendo también un impacto positivo en el coste de producción.

## 2.5 Estudio de materiales

Los silenciadores son componentes que trabajan con los gases de escape, cuando salen del motor, la temperatura de estos gases se encuentra entre 500 y 700 °C. El material debe de ser capaz de trabajar en ese rango de temperaturas para ser apto para su uso en un silenciador.

Otra de las características para tener en cuenta de los materiales es su resistencia y su densidad, ya que deben ser capaces de soportar las cargas mecánicas ejercidas con el menor peso posible.

Por los motivos expuestos anteriormente, los silenciadores se suelen fabricar en tres materiales distintos, acero, aluminio y titanio. Dependiendo de los requerimientos del vehículo y de la normativa sobre la que se rige el automóvil se escoge el material a utilizar en la fabricación.

### 2.5.1 Acero

El acero tiene grandes propiedades físicas como su resistencia o su alto punto de fusión, a cambio, tiene la densidad más elevada de los tres materiales analizados. Otra de las ventajas es que es el material que más facilita el proceso de fabricación, debido a su que su soldadura es la más sencilla.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades del acero.

<b>DENSIDAD</b>	7,9 g/cm <sup>3</sup>
<b>PUNTO DE FUSIÓN</b>	1.400 °C
<b>MÓDULO DE YOUNG</b>	200 · 10 <sup>3</sup> MPa

*Tabla 1. Propiedades del acero.*

### 2.5.2 Aluminio

La gran ventaja del aluminio es que posee la menor densidad de los tres materiales analizados. Por otro lado, la principal desventaja es su bajo punto de fusión, lo que provoca que solo se pueda utilizar en algunas partes del silenciador.

En la siguiente tabla se muestran las propiedades del aluminio.

<b>DENSIDAD</b>	2,7 g/cm <sup>3</sup>
<b>PUNTO DE FUSIÓN</b>	660 °C
<b>MÓDULO DE YOUNG</b>	65 · 10 <sup>3</sup> MPa

*Tabla 2. Propiedades del aluminio.*

### 2.5.3 Titanio 6Al-4V

El titanio es un material con buenas propiedades físicas para la fabricación del silenciador, posee una baja densidad, el punto de fusión más alto de la comparativa y una alta resistencia. Su principal desventaja es su alto precio y su difícil manejo a la hora de la fabricación.

El titanio escogido para la comparativa es el Ti 6Al - 4V. En la siguiente tabla se muestran las propiedades del Ti 6Al - 4V.

<b>DENSIDAD</b>	4,43 g/cm <sup>3</sup>
<b>PUNTO DE FUSIÓN</b>	1.600 °C
<b>MÓDULO DE YOUNG</b>	114 · 10 <sup>3</sup> MPa

*Tabla 3. Propiedades del Ti 6Al - 4V.*

### 2.5.4 Comparativa materiales

En la siguiente tabla se muestran las propiedades de los posibles materiales a utilizar en la fabricación del silenciador.

PROPIEDAD	ACERO	ALUMINIO	TI 6AL – 4V
DENSIDAD	7,9 g/cm <sup>3</sup>	4,43 g/cm <sup>3</sup>	4,43 g/cm <sup>3</sup>
PUNTO DE FUSIÓN	1.400 °C	660 °C	1.600 °C
MÓDULO DE YOUNG	200 · 10 <sup>3</sup> MPa	65 · 10 <sup>3</sup> MPa	114 · 10 <sup>3</sup> MPa

Tabla 4. Comparativa de los posibles materiales.

### 2.5.5 Material escogido

Uno de los objetivos principales del FUEM es obtener un monoplaza con el mínimo peso, por lo que la densidad es uno de los puntos más importantes a la hora de realizar la elección del material. Por este motivo, el acero deja de ser una de las opciones para fabricar este silenciador.

La principal ventaja del aluminio es su baja densidad y su bajo precio, por el otro lado, la gran ventaja del Ti 6Al – 4V es su alto punto de fusión y su alta resistencia.

El material escogido ha sido el Ti 6Al – 4V, se ha escogido este material por su alto punto de fusión en comparación con el aluminio y, aunque su precio es superior, la fabricación del silenciador solo se producirá una vez, por lo que el precio del silenciador tiene una menor importancia que su rendimiento.

## 2.6 Tipos de silenciadores

Según el diseño de los silenciadores, se clasifican en varios tipos ofreciendo ventajas en diferentes aspectos técnicos que van a ayudar en la selección del diseño más adecuado para el presente proyecto.

### 2.6.1 Silenciador de cámara resonante

La manera de reducir el ruido es por medio del empleo de cámaras resonantes. El diseño y dimensiones de las cámaras resonantes permiten definir las frecuencias que más atenuación van a sufrir.

### **2.6.2 Silenciador de absorción**

En este sistema los tubos se recubren con material absorbente, generalmente se utiliza lana de vidrio, para reducir el ruido generado por el motor. Además, se puede forzar a que el flujo del aire pase por diferentes conductos para conseguir una mayor reducción del ruido.

La principal ventaja de este tipo de silenciador es que, además de su función como aislante acústico, también funciona como aislante térmico. Por el contrario, tiene la desventaja de un más rápido desgaste.

### **2.6.3 Silenciador de expansión:**

En este tipo, el tubo de escape se realiza un ensanchamiento y posteriormente se estrecha.

Las ventajas del silenciador de expansión es su eficacia para reducir el ruido concentrado en un selectivo rango de frecuencias y su facilidad para combinarlo con otro tipo diferente de silenciador. La mayor desventaja es que produce una menor atenuación del ruido en comparación a los demás tipos.

### **2.6.4 Silenciador de resonador lateral**

El silenciador de resonador lateral está compuesto por el tubo de escape perforado, rodeado de otro tubo. Los gases de escape pasan por los orificios, provocando que las ondas de sonido reboten en las diferentes paredes y que el ruido pierda volumen.

La ventaja es su tamaño, ya que es más pequeño que los demás tipos. La desventaja es su menor eficiencia al reducir el ruido por lo que suele ser combinados con otros tipos de silenciadores.

### **2.6.5 Silenciador de interferencia**

Este tipo de silenciador es una cavidad que tiene placas perpendiculares a la dirección de los gases de escape, las placas tienen perforaciones. Las ondas sonoras rebotan sobre las paredes internas, disminuyendo el ruido generado. Es común combinarlo con los silenciadores de absorción.

La principal ventaja es la facilidad con la que se combina con otros tipos. La desventaja es su elevado volumen y con ello la necesidad de un mayor espacio que los demás silenciadores.

## Capítulo 3. REQUISITOS DEL DISEÑO

Para que el equipo de Formula Student sea competitivo, el silenciador necesita una serie de especificaciones. Además, debe cumplir con la normativa de Formula Student. A continuación, se detallan las especificaciones requeridas y la normativa aplicada en el diseño del silenciador.

### 3.1 Especificaciones técnicas

Los requisitos del diseño para adecuarse a las características del nuevo monoplaza y a la normativa aplicada en la competición son:

- **Generar menos de 103 dB (C)** en condiciones del motor al ralentí.
- **Generar menos de 110 dB (C)** cuando la velocidad media del pistón sea de 15,25 m/s, que en nuestro caso es cuando el motor gira a **6.500 rpm**.
- Tamaño del silenciador adecuado al espacio disponible en el monoplaza en la zona posterior. El espacio disponible es de 200 x 300 x 350 mm.
- Optimizar el diseño del silenciador para conseguir el **menor peso posible**.
- El flujo de gases del silenciador cree un **mínimo impacto en el rendimiento** del motor.

### 3.2 Normativa aplicada

La normativa por la que se rige la competición Formula SAE/Formula Student 2023 en su Sección IN.10.5, exige a los monoplazas un máximo de ruido de los motores de combustión interna.

La Sección IC.7.5 de la normativa exige superar dos pruebas diferentes de ruido para poder competir. La primera prueba se produce con el motor al ralentí y, según la sección IN.10.5 de la normativa, debe producir un máximo de 103 dB (C). La segunda cuando la velocidad media del pistón sea de 15,25 m/s y debe producir un máximo de 110 dB (C). Las revoluciones calculadas se redondean a las 500 rpm más cercanas.

En la sección IN.10.1.2 de la normativa Formula Student se indica que la medición del sonido se realiza en estático a 0,5 m desde el final del escape y a 45° con respecto al plano horizontal.

## Capítulo 4. MODELADO Y SIMULACIONES

En este capítulo se explican los cálculos realizados antes de las simulaciones, la creación los distintos silenciadores y la realización y resultados de las simulaciones de fluidos y las simulaciones acústicas.

### 4.1 Cálculos previos a las simulaciones

En la realización de este trabajo se han realizado dos cálculos diferentes con diferentes objetivos. Un primer cálculo para obtener las revoluciones a las que gira el motor cuando se mide el ruido generado y un segundo cálculo para obtener el flujo másico de aire expulsado de entrada al silenciador.

#### 4.1.1 Velocidad media del pistón

El movimiento del pistón tiene una gran variación en su velocidad y que conlleva una alta complejidad en su medición. Por otra parte, la medida de la velocidad puntal no es significativa en los cálculos relacionados con el ruido generado por el motor. Por esta razón la normativa, en su Sección IN.10.4.1, utiliza la velocidad media del pistón como referencia para el ruido máximo permitido.

La velocidad media del pistón es un parámetro de semejanza que establece la rapidez del motor desde el punto de vista fluidodinámico y en parte mecánico y se representa con la letra “ $u$ ”. Los motores se pueden dividir según este parámetro (cuando el motor está en su máximo régimen) en:

- Lentos:  $u < 10 \text{ m/s}$ , son motores muy fiables y de tecnología sencilla, se utilizan en la industria marítima.
- Normales:  $10 \text{ m/s} < u < 15 \text{ m/s}$ , industriales, de aviación y automoción.
- Rápidos:  $u > 15 \text{ m/s}$ , se utilizan en la competición de automóviles y en automóviles deportivos.

Los parámetros que determinan  $u$  son las revoluciones “ $n$ ” y la carrera “ $l$ ”. Para calcular la velocidad media del pistón se utiliza la siguiente fórmula:

$$u = 2 \cdot n \cdot l$$

La velocidad media del pistón es uno de los limitantes a la hora de generar potencia, ya que puede generar el bloqueo sónico de la válvula de admisión. Por este motivo, los motores de competición (como el Yamaha CP2) son súper-cuadrados a cuadrados, para lograr el mayor número de revoluciones y una mayor potencia, con la misma velocidad media.

#### **4.1.1.1 Velocidad media del motor Yamaha CP2**

La normativa de la Formula Student obliga a los motores de combustión interna a no generar un mayor ruido a dos regímenes diferentes del motor, cuando a el motor está al ralenti y cuando la velocidad media del pistón es de 15,25 m/s.

En este apartado se realizarán dos cálculos diferentes, el primero se realizará para calcular las revoluciones a las que el motor gira cuando se haga la medición del ruido y el segundo para calcular la velocidad media del pistón a las revoluciones máximas.

En el cálculo de las revoluciones, se utilizará la velocidad media del pistón (15,25 m/s) y la carrera del motor (68,6 mm).

$$u = 2 \cdot n \cdot l$$

$$n = \frac{u}{2 \cdot l}$$

$$n = \frac{15,25 \text{ m/s}}{2 \cdot 68,6 \text{ mm}} = \frac{15,25 \text{ m/s}}{2 \cdot 68,6 \cdot 10^{-3} \text{ m}} \cdot 60 \text{ s/min}$$

$$n = 6669,1 \text{ rpm}$$

El nivel de ruido generado cuando la velocidad media del pistón se medirá a 6.500 rpm, ya que se redondea las 500 revoluciones más cercanas.

En el cálculo de la velocidad máxima del pistón, se utilizarán las revoluciones máximas de motor CP2 (9.000 rpm) y la carrera (68,6 mm).

$$u = 2 \cdot n \cdot l$$
$$u = 2 \cdot \frac{9.000 \text{ rpm}}{60} \cdot 68,6 \text{ mm} \cdot \frac{1 \text{ m}}{10^3 \text{ mm}}$$
$$u_{m\acute{a}x} = 20,58 \text{ m/s}$$

#### 4.1.2 Flujo másico de aire de entrada al silenciador

El flujo másico de aire expulsada por el bloque motor es uno de los condicionantes cuando se escoge el diseño del silenciador.

Para realizar el cálculo, se debe calcular la suma del flujo másico de aire provocado por el aire que entra por la admisión y el flujo másico provocado por la inyección del combustible.

A continuación, se muestran las ecuaciones utilizadas para el cálculo.

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a + \dot{m}_{comb}$$
$$\eta_v = \frac{\dot{m}_a}{Q \cdot \frac{2 \cdot n}{T} \cdot \rho_a} \rightarrow \dot{m}_a = \frac{\eta_v \cdot Q \cdot 2 \cdot n \cdot \rho_a}{T}$$
$$F = \frac{\dot{m}_{comb}}{\dot{m}_a} \rightarrow \dot{m}_{comb} = F \cdot \dot{m}_a$$

En donde:

- $\dot{m}_T$  = flujo másico total (g/s)

- $\dot{m}_a$  = flujo másico de aire (g/s)
- $\dot{m}_{comb}$  = flujo másico de combustible (g/s)
- $Q$  = cilindrada total (mm<sup>3</sup>)
- $n$  = revoluciones por minuto
- $T$  = número de tiempos.
- $\rho_a$  = densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)
- $\eta_v$  = rendimiento volumétrico.
- $F$  = dosado

#### 4.1.2.1 Yamaha CP2

El motor Yamaha CP2 tiene una cilindrada total de 689 cm<sup>3</sup> y un dosado de 1/9,6, el cálculo se va a realizar a 6.500 rpm, con una densidad del aire de 1,29 kg/m<sup>3</sup> y un rendimiento del 0,9.

Flujo másico del aire:

$$\dot{m}_a = \frac{\eta_v \cdot Q \cdot 2 \cdot n \cdot \rho_a}{T} = \frac{0,9 \cdot 0,689 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot 2 \cdot \frac{6.500}{60} \text{ rpm} \cdot 1,29 \text{ kg/m}^3}{4}$$

$$\dot{m}_a = 0,04333 \text{ kg/s} = 43,33 \text{ g/s}$$

Flujo másico del combustible:

$$\dot{m}_{comb} = F \cdot \dot{m}_a = \frac{1}{9,6} \cdot 43,33 \text{ g/s}$$

$$\dot{m}_{comb} = 4,51 \text{ g/s}$$

Flujo másico total:1

$$\dot{m}_T = \dot{m}_a + \dot{m}_{comb} = 43,33 \text{ g/s} + 4,51 \text{ g/s}$$

$$\dot{m}_T = 47,84 \text{ g/s}$$

## 4.2 Modelado 3D

Se han realizado tres diseños diferentes de silenciadores para su posterior análisis y selección del diseño óptimo.

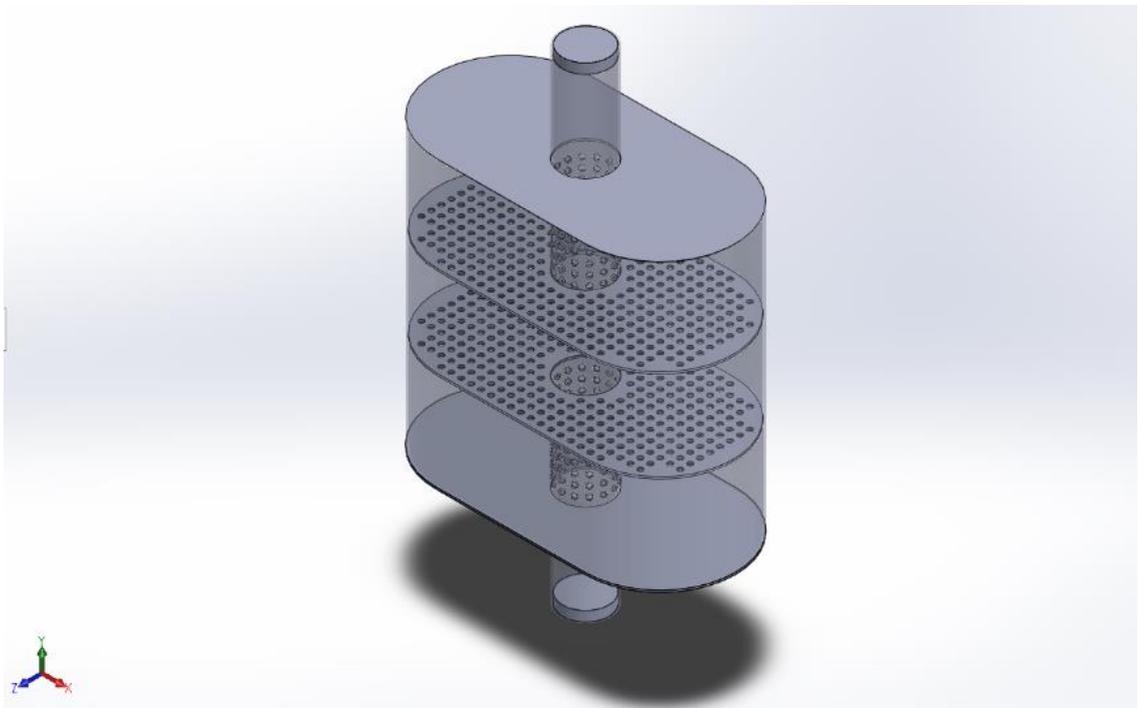
La creación de los modelos 3D se ha realizado mediante el software SolidWorks 2021.

### 4.2.1 Silenciador 1

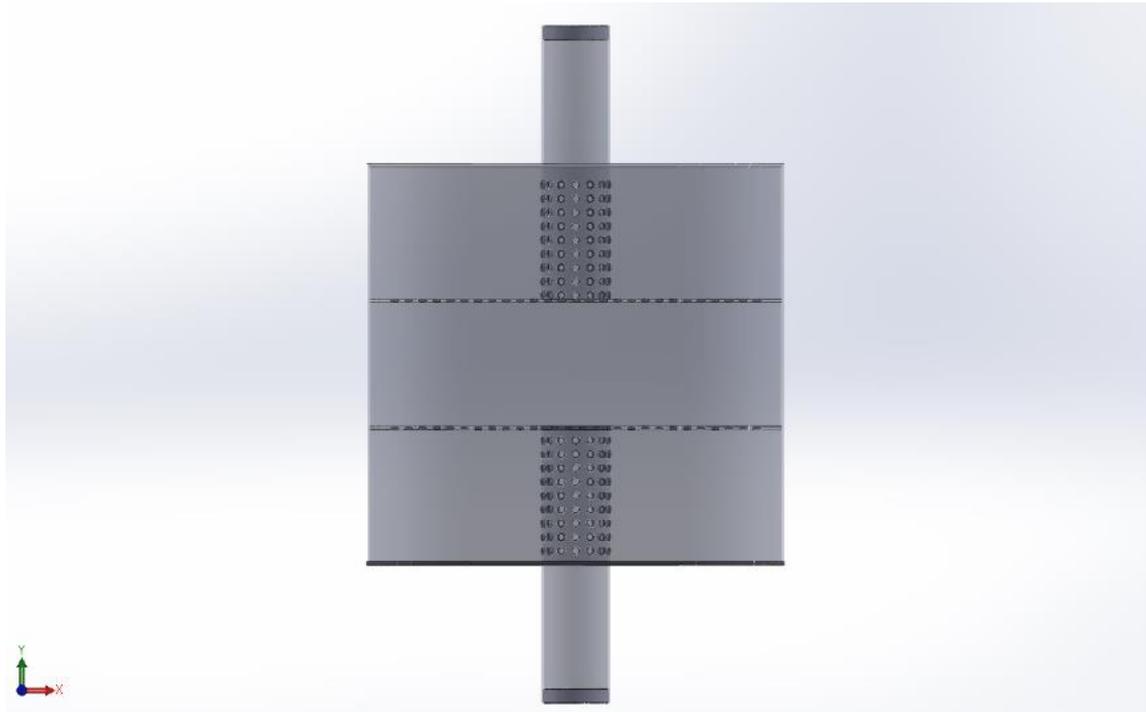
El silenciador 1 está diseñado con forma elíptica, su interior está dividido en tres cámaras separadas por placas perforadas. El tubo de entrada está perforado y al silenciador conecta con la cámara central. Así mismo, el tubo de salida está perforado y conectado a la cámara central.

La cámara de entrada y la de la salida utilizan el método de absorción para reducir el ruido, mientras que la cámara central utiliza el método de expansión.

El peso del silenciador 1, realizado en titanio, es de 2.000 g.



*Figura 2. Vista isométrica del modelo 3D del silenciador 1.*



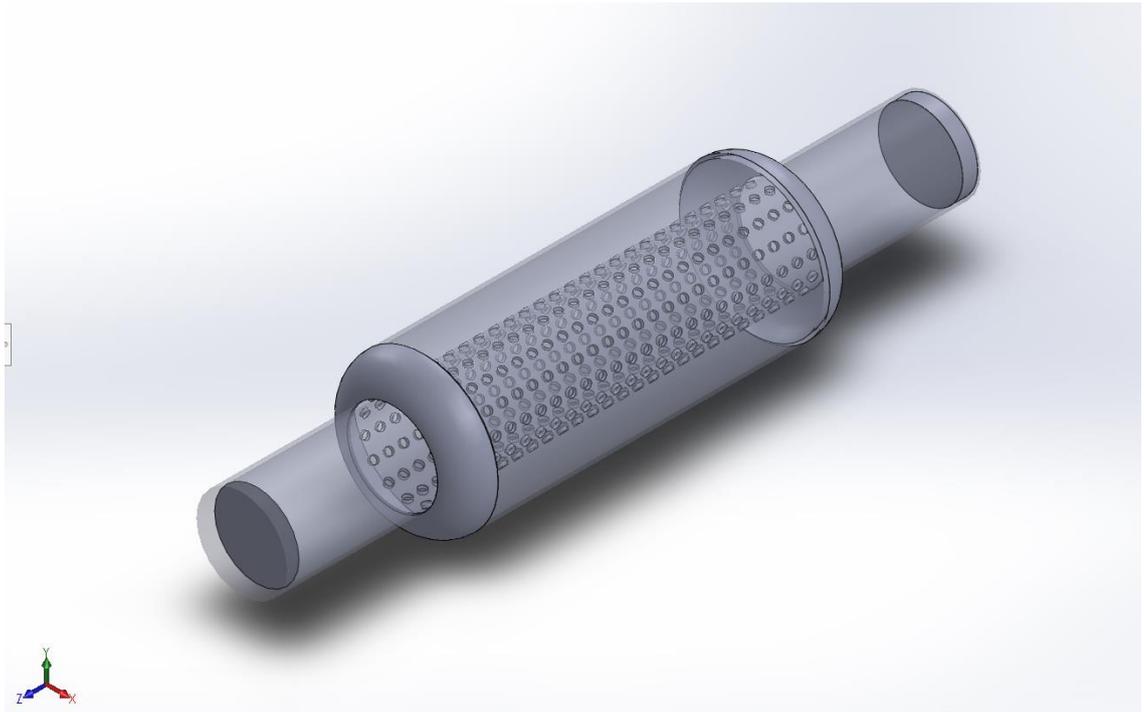
*Figura 3. Alzado del modelo 3D del silenciador 1.*

#### **4.2.2 Silenciador 2**

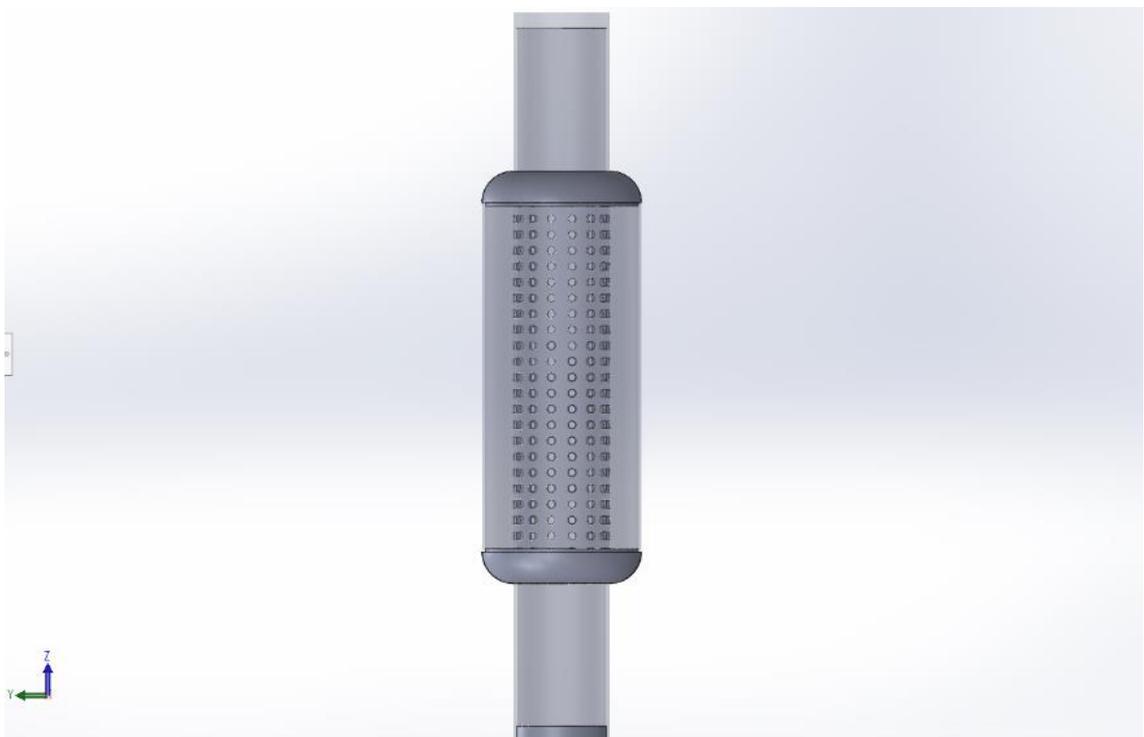
El silenciador 2 está compuesto por dos tubos concéntricos. El tubo interior es de entrada y salida de los gases de escape y está perforado en la zona que se encuentra en el interior del otro tubo.

Este silenciador es un silenciador de resonador lateral.

El silenciador 2, realizado en titanio, tiene un peso de 1.675 g.



*Figura 4. Vista isométrica del modelo 3D del silenciador 2.*



*Figura 5. Alzado del modelo 3D del silenciador 1.*

### 4.2.3 Silenciador 3

Este silenciador se basa en los modelos utilizados en la industria de la automoción. A través de los tubos y las cavidades, se fuerzan los gases de escape a realizar un recorrido concreto, lo que provoca la pérdida de fuerza y de ruido de los gases.

El interior del silenciador está dividido en tres cámaras, las cámaras exteriores son simétricas y utilizan el método de expansión para la reducción del sonido, mientras que la cámara central utiliza el método de absorción.

El tubo de entrada de los gases de escape se dirige a la cámara más lejana y está perforado en la zona que está en el interior de la cámara central. El tubo de escape es idéntico al de entrada, su diferencia es su posición, los gases entran desde la primera cámara y desde la cámara central a través de las perforaciones del tubo, para ser expulsados. En la cámara central se localiza un tubo que conecta las cámaras exteriores, además, está conectada a la cámara central a través de perforaciones.

El peso del silenciador 3, realizado en titanio, es de 2.283 g.

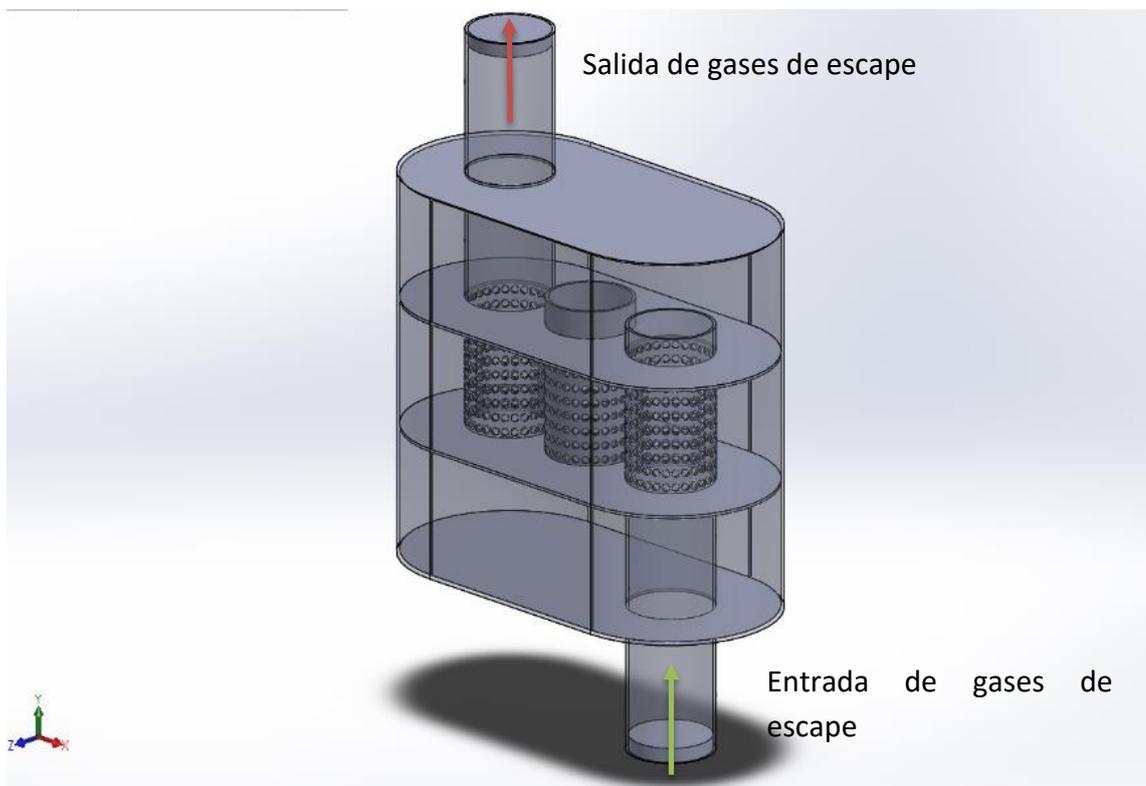
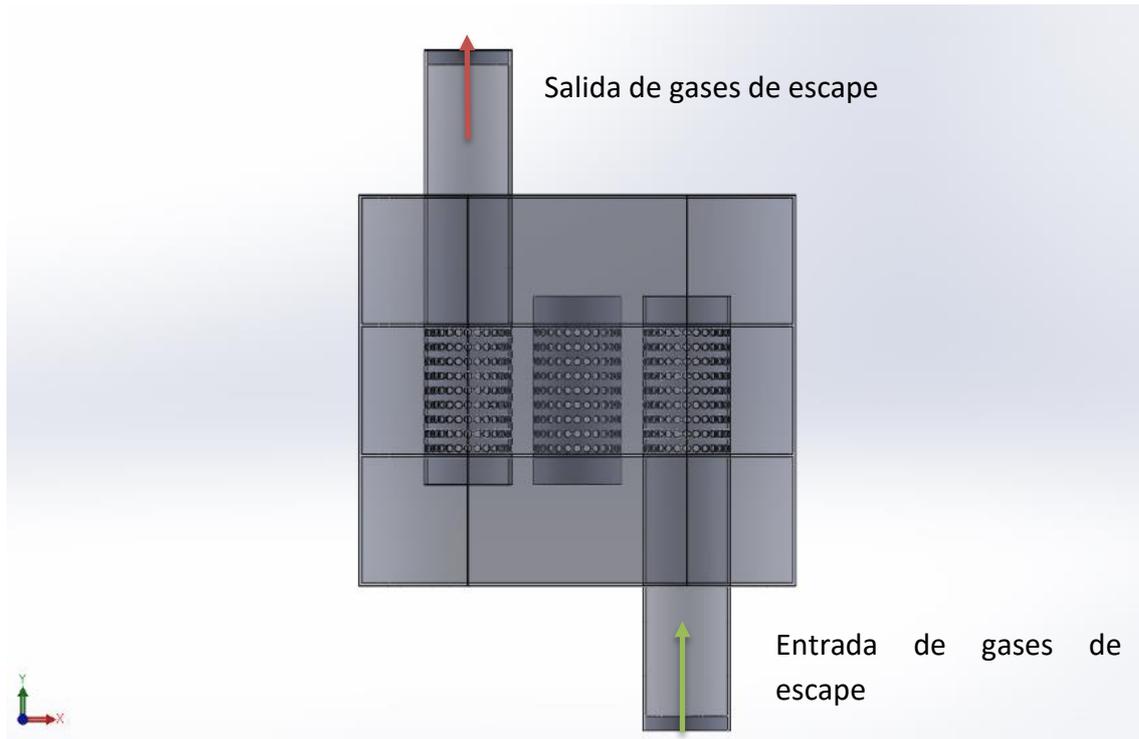


Figura 6. Vista isométrica del modelo 3D del silenciador 3.



*Figura 7. Alzado del modelo 3D del silenciador 1.*

### 4.3 Simulación de fluidos

El análisis del flujo del aire en el interior del silenciador es uno de los parámetros para tener en cuenta a la hora de elegir el silenciador óptimo para el FUEM. Las simulaciones se han realizado con el software SolidWorks Flow Simulation.

Gracias a la simulación de fluidos se puede observar las presiones, las velocidades y el flujo de los gases de escape en el interior del silenciador. Estos serán algunos de los parámetros que determinen cual será el silenciador escogido.

#### 4.3.1 Condiciones de la simulación

Todas las simulaciones de los silenciadores se han realizado en las mismas condiciones. La entrada de los gases de escape se realiza con flujo másico de 47,84 g/s a una temperatura de 600 °C.

La salida del silenciador da al exterior, por lo que se encuentra a presión ambiente (101.325 Pa).

### 4.3.2 Silenciador 1

En las Figura 8, Figura 9 y Figura 10, se representa el flujo de los gases de escape, sus velocidades y la presión en el interior del silenciador 1. En la Figura 8 se puede observar cómo los gases se mueven de manera circular en la cámara central, disminuyendo la energía y el ruido de estos. La cámara de entrada y la de salida consiguen atenuar en menor medida el ruido.

Uno de los problemas es el flujo de gases que son expulsados sin rebotar en el interior del silenciador, lo que genera una menor atenuación del ruido del motor.

En la Figura 9 se puede observar como la presión en el interior es constante, salvo en la salida, en donde se produce una reducción de la presión.

La presión de entrada es de 101.984 Pa, la velocidad de entrada de los gases de escape es de 68,7 m/s y la velocidad de salida es de 46,5 m/s.

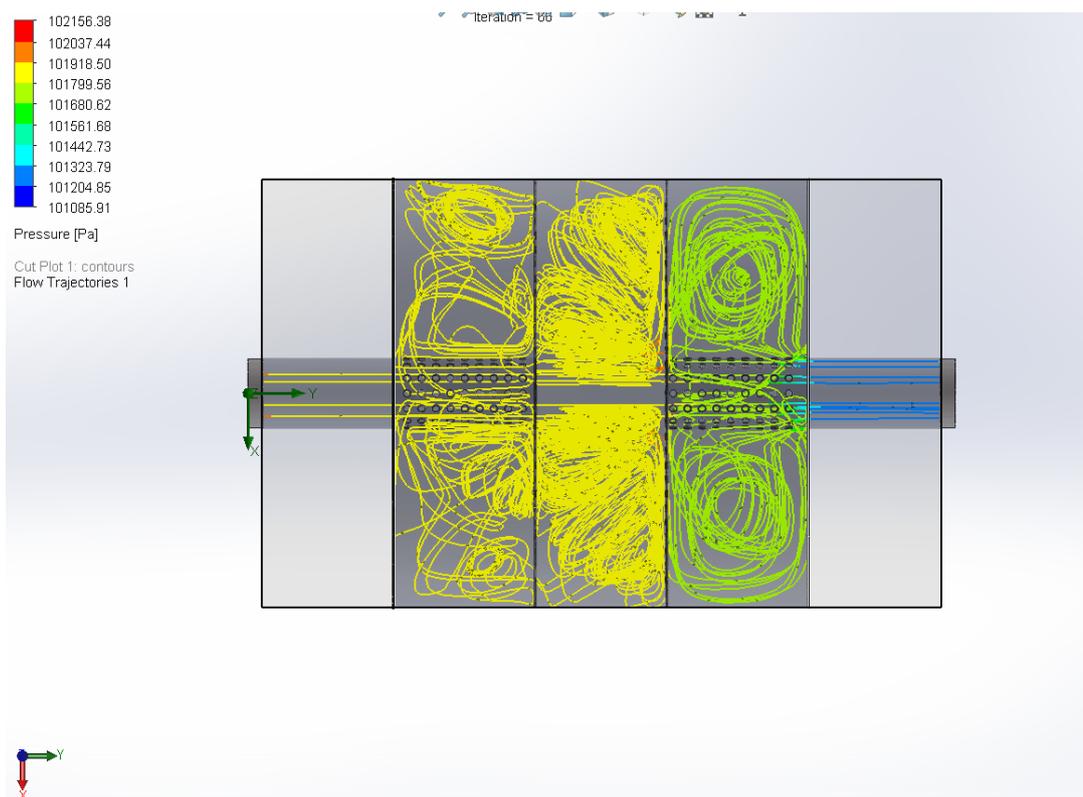


Figura 8. Representación del movimiento de los gases de escape y sus presiones del silenciador 1. Simulación realizada en SolidWorks.

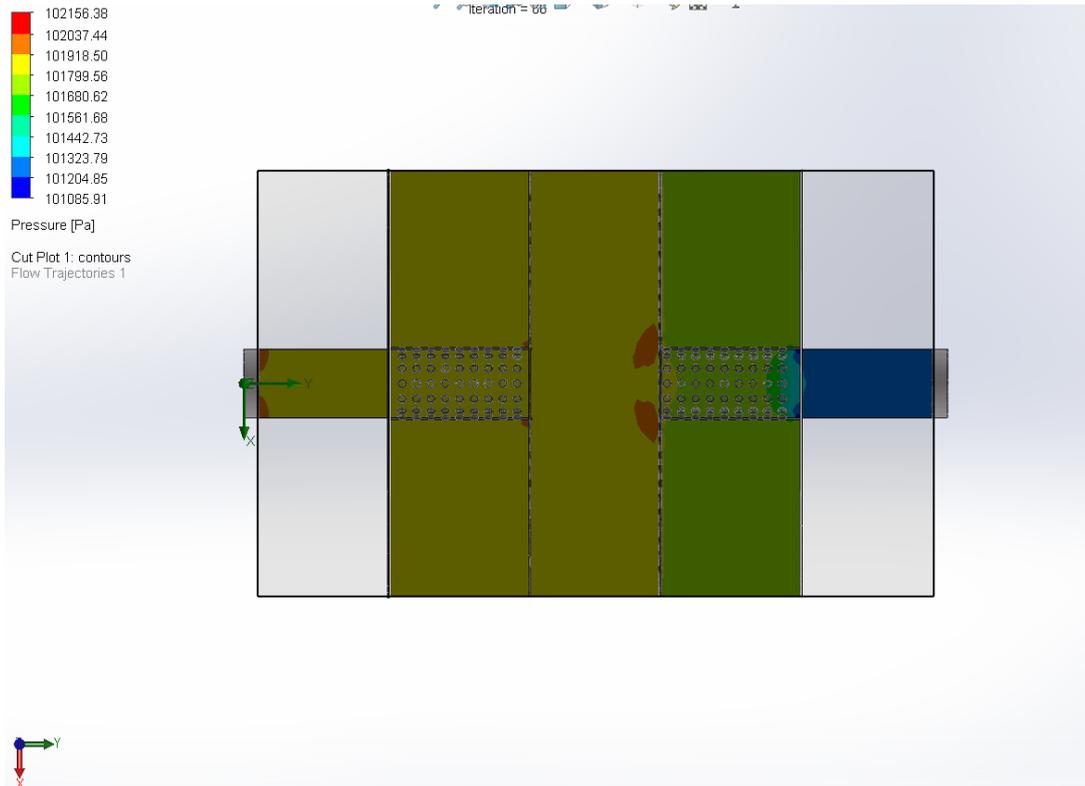


Figura 9. Representación de las presiones en el interior del silenciador 1. Simulación realizada en SolidWorks.

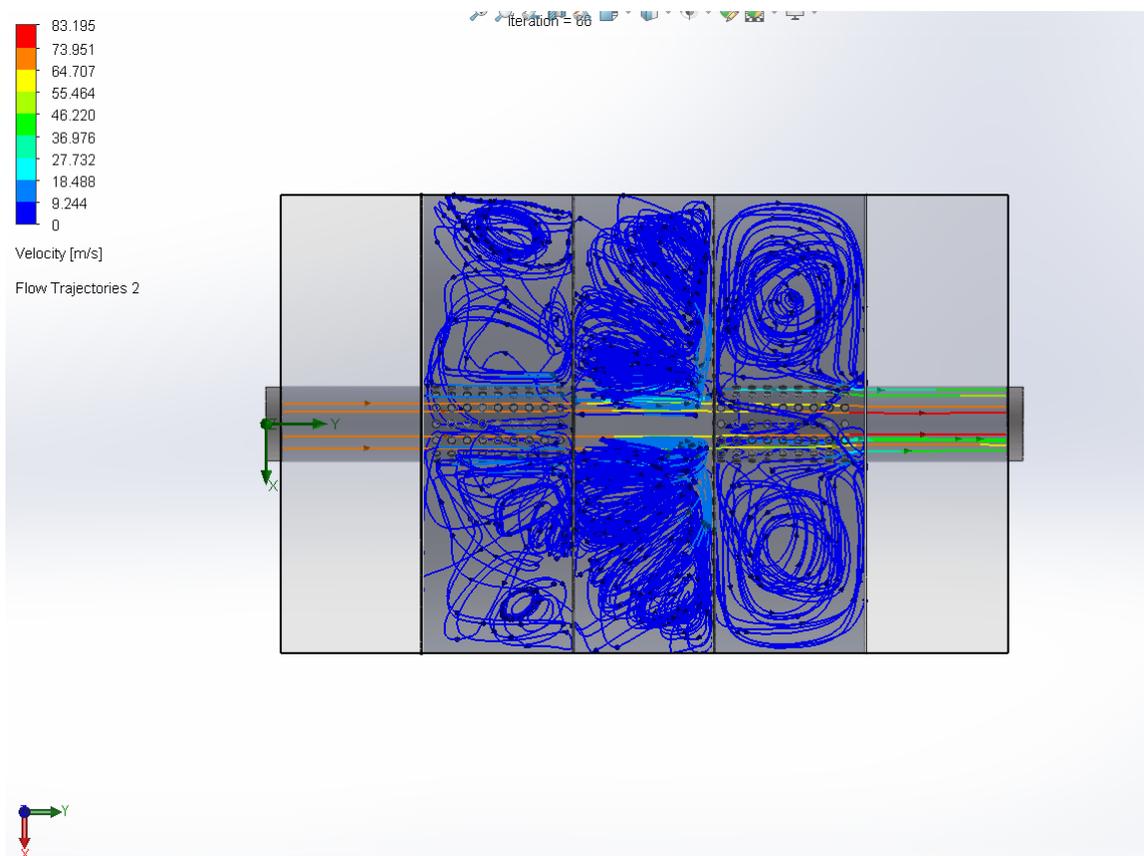


Figura 10. Representación de la velocidad de los gases de escape del silenciador 1. Simulación realizada en SolidWorks.

### 4.3.3 Silenciador 2

En las Figura 11, Figura 12 y Figura 13 se representa el flujo de los gases de escape, sus velocidades y la presión en el interior del silenciador 2. En la Figura 11 se puede observar los gases de escape que se desplazan entre los dos tubos, estos gases rebotan hasta que pierden energía y disminuyen el ruido generado. Este modelo presenta un gran inconveniente, los gases que son expulsados del silenciador sin que se atenúe el ruido generado, ya que no rebotan en el interior.

En la Figura 12 se puede observar como la presión varía poco en el interior, pero cuando los gases son expulsados se genera una gran diferencia de presiones.

La gran ventaja de este diseño que, de los tres modelos, es el que presenta el menor nivel de presión máxima en el interior del silenciador.

La presión de entrada es de 101.423 Pa, la velocidad de entrada de los gases de escape es de 16,4 m/s y la velocidad de salida es de 14,2 m/s.

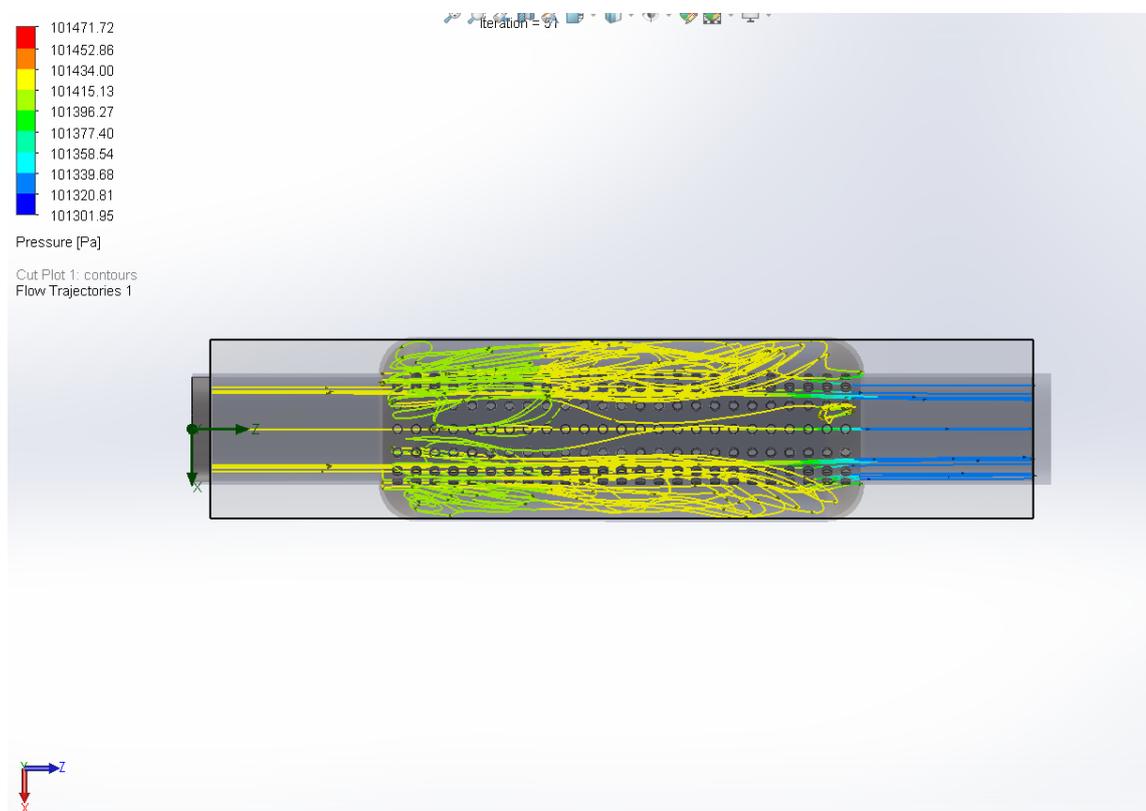


Figura 11. Representación del movimiento de los gases de escape y sus presiones del silenciador 2. Simulación realizada en SolidWorks.

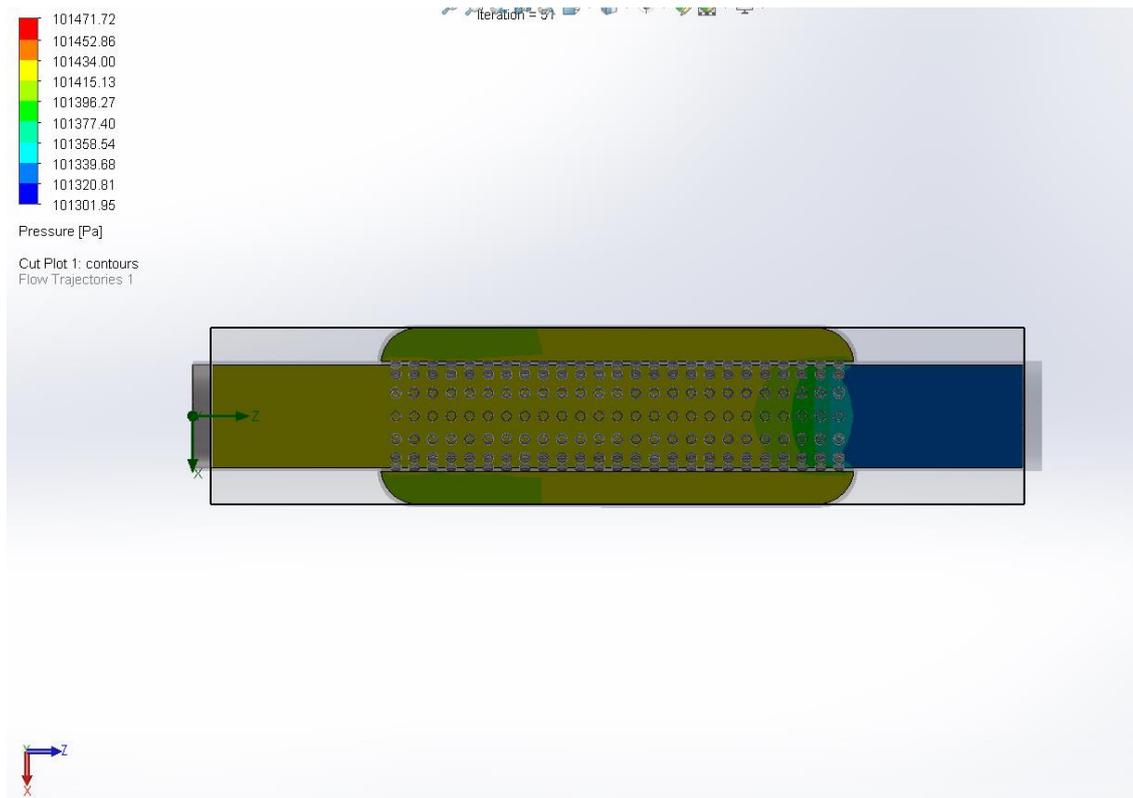


Figura 12. Representación de las presiones en el interior del silenciador 2. Simulación realizada en SolidWorks.

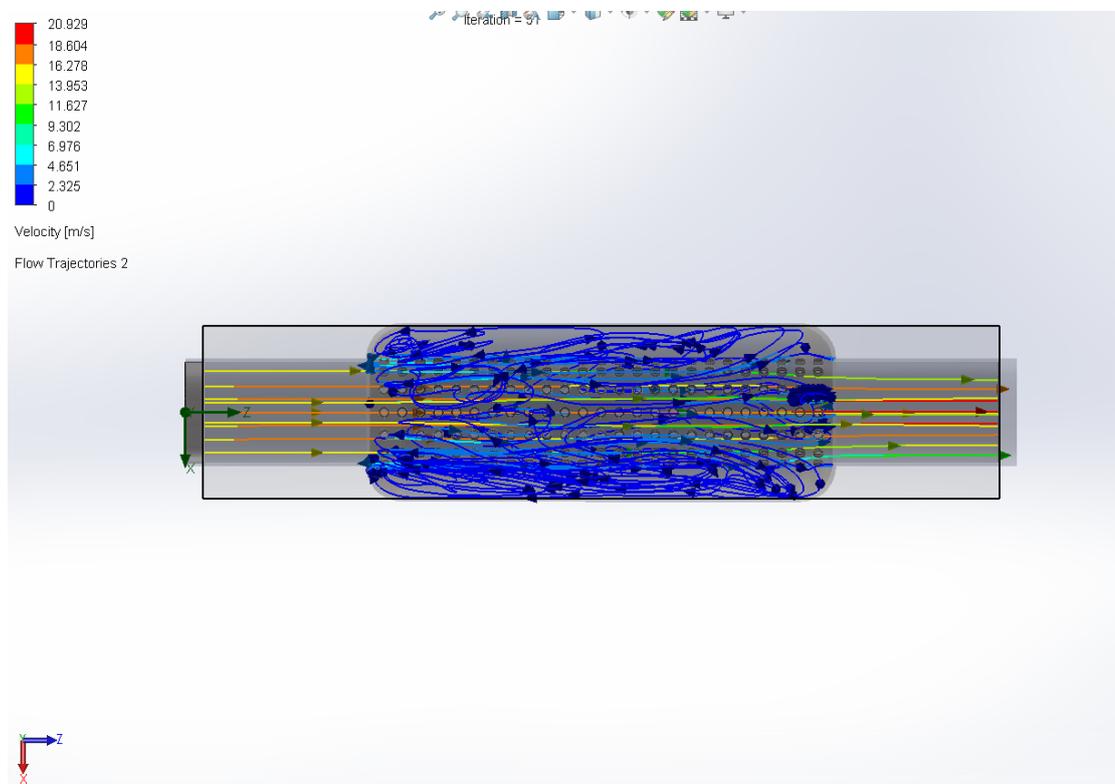


Figura 13. Representación de la velocidad de los gases de escape del silenciador 2. Simulación realizada en SolidWorks.

### 4.3.4 Silenciador 3

En las Figura 14, Figura 15 y Figura 16 se representa el flujo de los gases de escape, sus velocidades y la presión en el interior del silenciador 3. En la Figura 14 se puede observar el recorrido de los gases y como en las cámaras exteriores se genera que se muevan en circunferencias, lo que provoca una caída de la presión constante.

En la Figura 15 se observan las diferentes presiones en cada cámara del silenciador y la disminución progresiva de la presión en el tubo de salida de los gases de escape.

La presión de entrada es de 102.098 Pa, la velocidad de entrada de los gases de escape es de 45,1 m/s y la velocidad de salida es de 35,9 m/s.

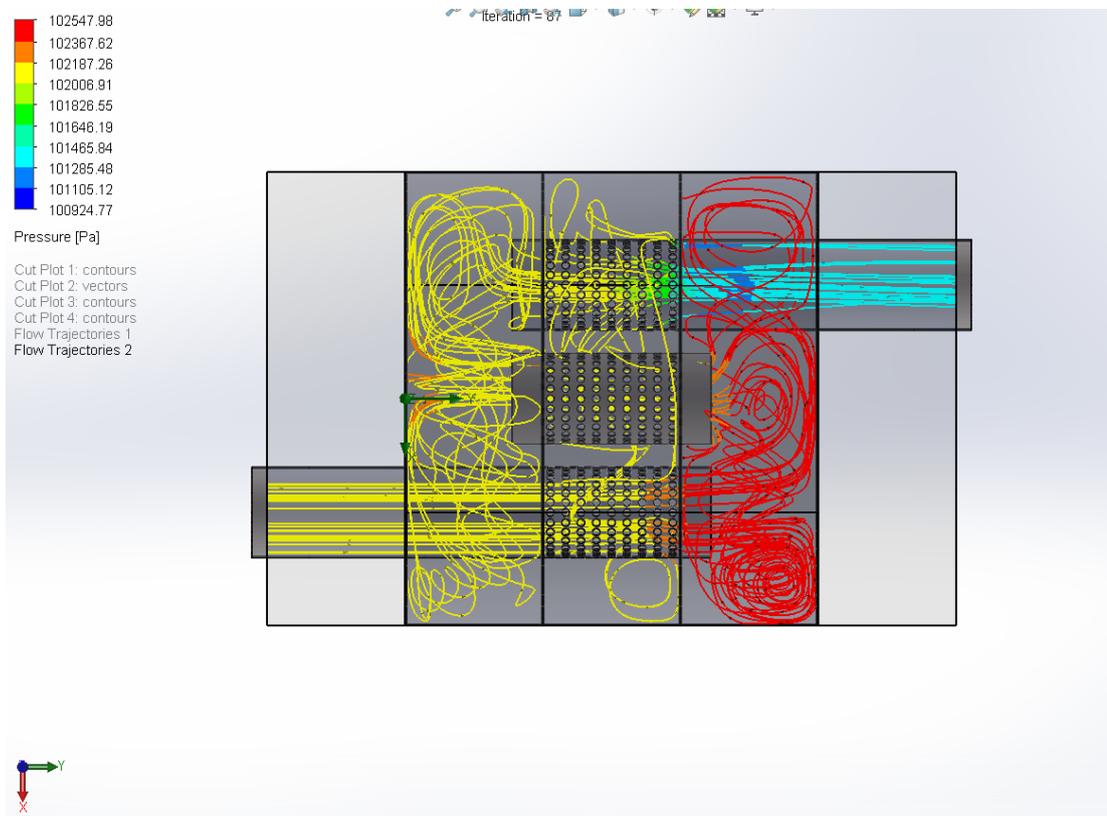


Figura 14. Representación del movimiento de los gases de escape y sus presiones del silenciador 3. Simulación realizada en SolidWorks.

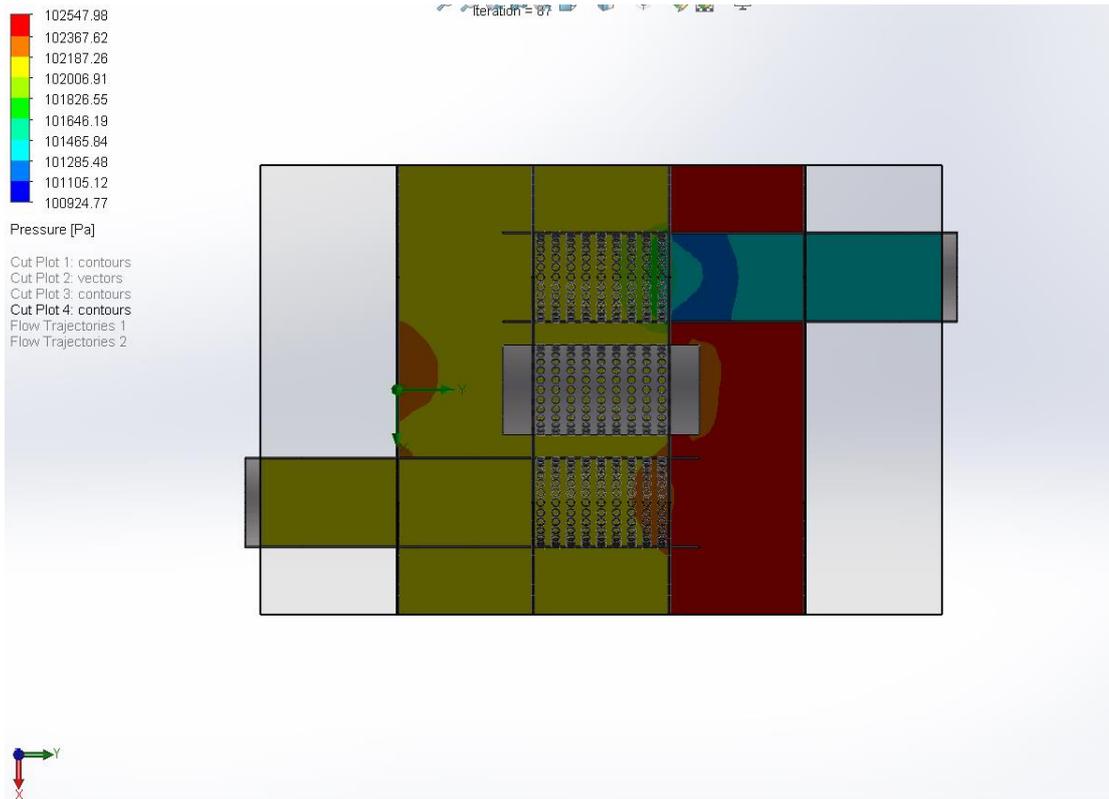


Figura 15. Representación de las presiones en el interior del silenciador 3. Simulación realizada en SolidWorks.

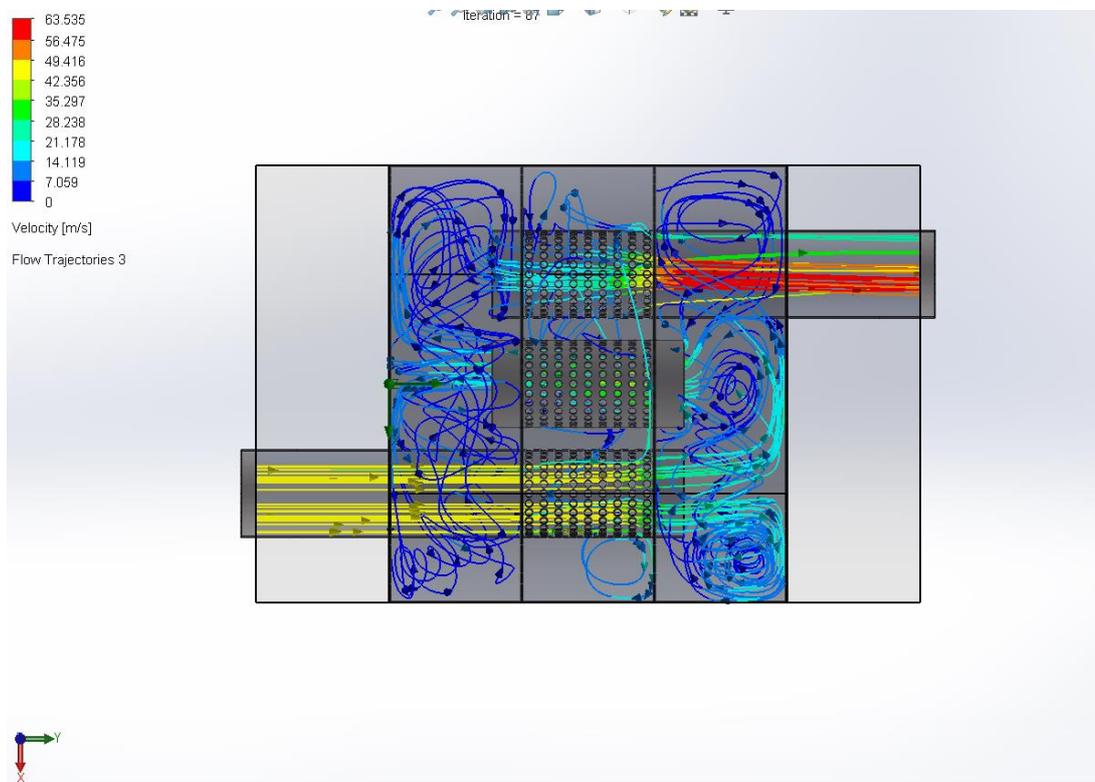


Figura 16. Representación de la velocidad de los gases de escape del silenciador 3. Simulación realizada en SolidWorks.

## 4.4 Simulación acústica

La simulación acústica consiste en modelar y predecir el comportamiento del ruido generado por conjunto motor-silenciador durante su funcionamiento. Las simulaciones se han realizado en el software AVL Boost.

El objetivo es conocer cuál de los tres tipos de silenciadores consigue atenuar el ruido generado por el motor y conseguir superar la normativa de las competiciones de Formula Student.

La presión sonora se refiere a las variaciones de presión que se producen en el aire u otro medio debido a la propagación de ondas sonoras. Es una medida de la intensidad o fuerza de una onda de sonido en un punto específico en el espacio.

El nivel de presión sonora se utiliza para cuantificar la intensidad del sonido y se mide en decibelios (dB). Las diferentes frecuencias del sonido afectan de diferente manera al oído humano, de esta manera, cuanto mayor proporción de altas frecuencias contenga el ruido, mayor será la molestia producida al humano. Con el objetivo de ajustar la presión sonora a la sensibilidad del oído, se aplican diferentes ponderaciones a las mediciones, estas ponderaciones se denominan A, B, C y D.

En las competiciones de Formula Student, el sonido se mide en decibelios "C", como se muestra en la Figura 17, la ponderación "C" es menor al nivel de presión sonora sin ponderar. En las simulaciones, se utilizará el nivel de presión sonora sin ponderar, y al ser más exigente que la ponderación "C" requerida por la normativa significa que, si la simulación entra en los niveles marcados por la normativa, entonces habrá no ningún problema para pasar las pruebas.

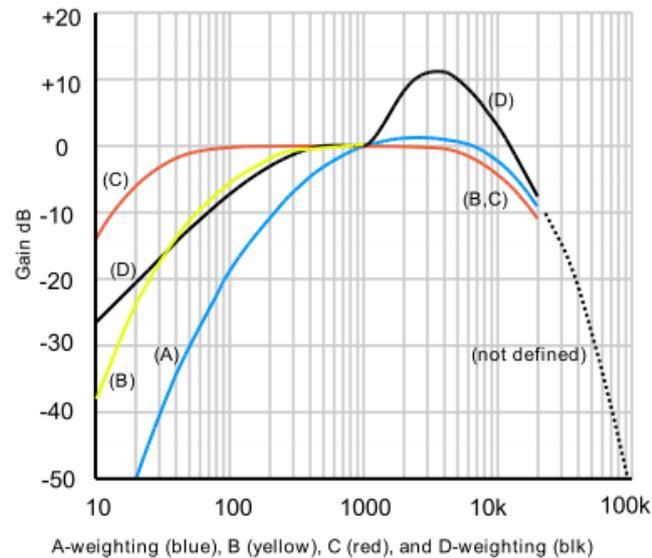


Figura 17. Gráfica de las ponderaciones del nivel de presión sonora. Fuente: Wikipedia.

Para la realización de las simulaciones, se ha modelado el motor utilizado por el equipo, el Yamaha CP2, junto con el sistema de escape y se han simulado los tres silenciadores por separado.

El modelado del motor consiste en recrear el sistema de propulsión del vehículo, desde la entrada de aire hasta su salida. Una vez creado el modelo del motor, el programa calcula el ruido generado a la distancia indicada, acorde a la normativa de Formula Student.

La simulación acústica genera dos resultados diferentes, una gráfica de la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz y el sonido captado por el micrófono. El micrófono capta el nivel de presión del sonido sin ninguna ponderación y con la ponderación "A", se utilizarán los resultados sin ninguna ponderación como resultado de las simulaciones, debido a que, como se ha explicado anteriormente, los decibelios con la ponderación "C" nunca superarán a los decibelios sin ponderar.

En este capítulo se ha modelado el motor Yamaha CP2 (Figura 18) y se han realizado las simulaciones acústicas de los tres silenciadores cuando el motor está al ralentí y cuando gira a 6.500 rpm. El micrófono se ha situado a la misma distancia de la salida del escape que se situaría en la prueba durante la competición, a 0,5 metros y a 45° con respecto al plano horizontal.

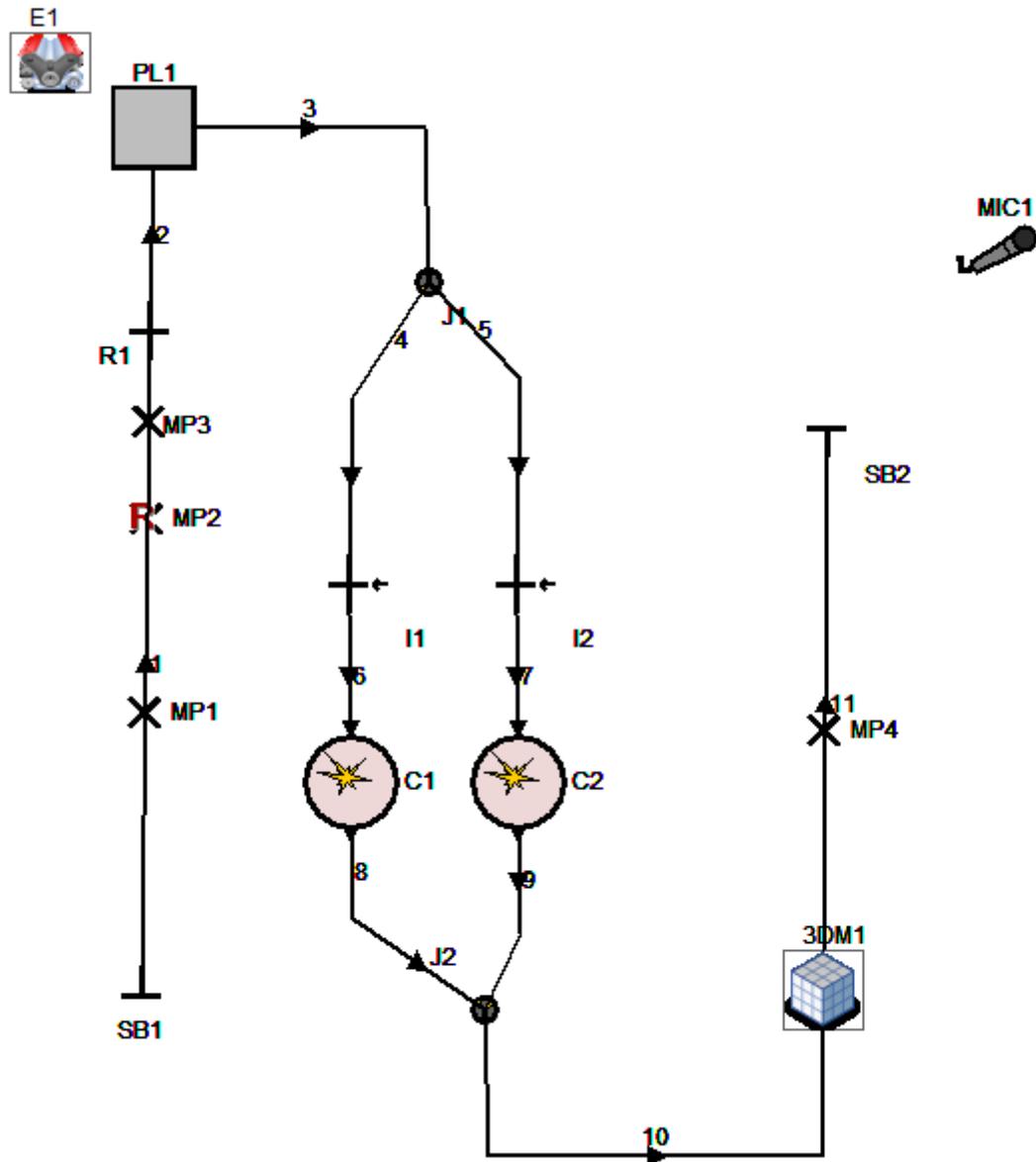


Figura 18. Modelado del motor Yamaha CP2 en AVL Boost.

#### 4.4.1 Silenciador 1

En la Figura 20 se observa la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz del silenciador 1 cuando el motor está al ralentí.

El nivel de presión sonora sin ponderar del silenciador 1 cuando el motor está al ralentí es de 102,09 dB, como se muestra en la Figura 21.

El ruido generado por el motor con el silenciador 1 supera por un reducido margen la normativa de Formula Student, debido a que genera menos de 103 dB (C) al ralentí.

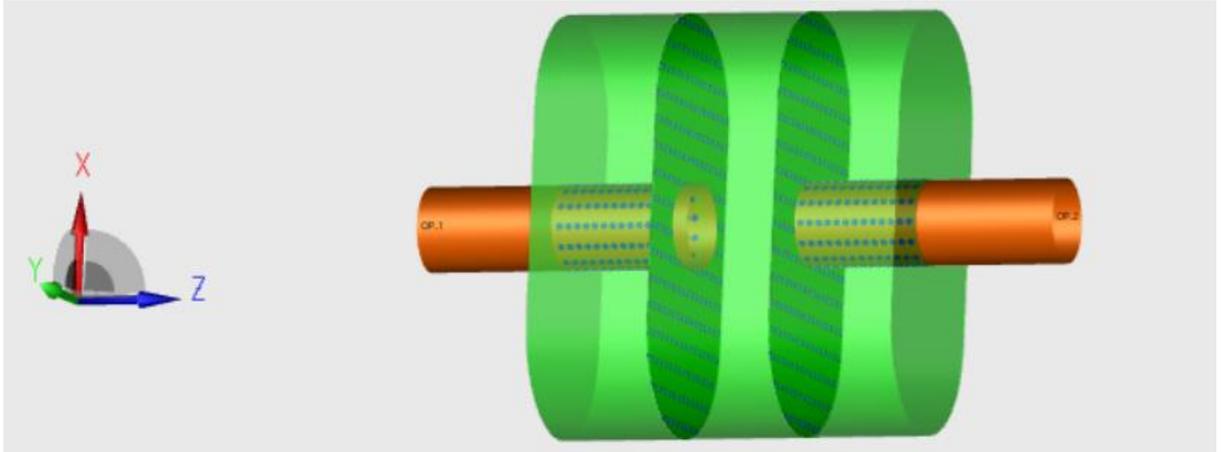


Figura 19. Silenciador 1 realizado en AVL Boost 3D.

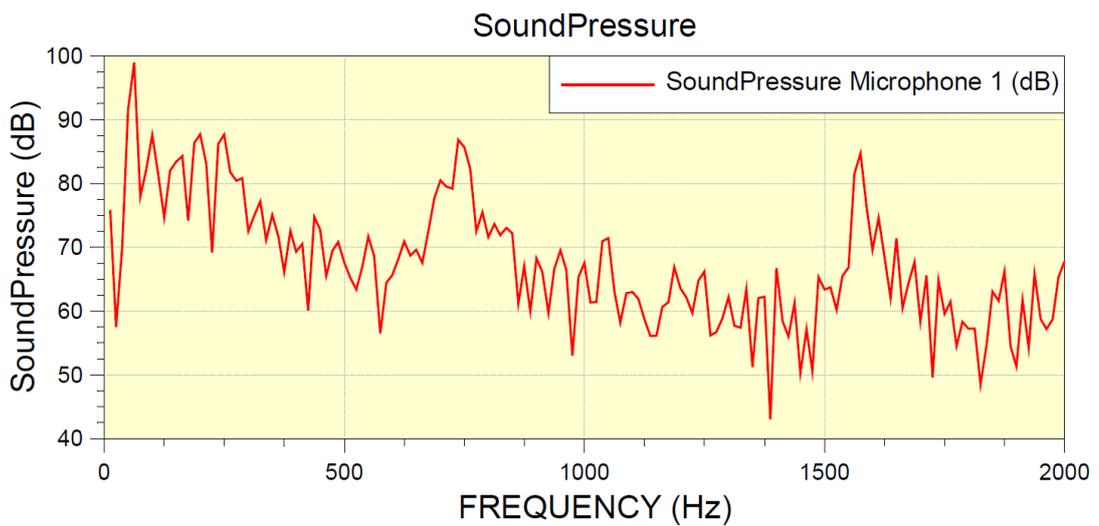


Figura 20. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 1 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.

**MICROPHONES**

Number	Distance [mm]	---Overall dB Level---	[dB(A)]	[db,lin]
1	499.22	94.063	102.090	

Figura 21. Resultado de la medición del ruido del silenciador 1 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.

En la Figura 22 se observa la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz del silenciador 1 cuando el motor está a 6.500 rpm.

El nivel de presión sonora sin ponderar del silenciador 1 cuando el motor está a 6.500 rpm es de 109,89 dB, como se muestra en la Figura 23.

El ruido generado por el motor con el silenciador 1 supera por un reducido margen la normativa de Formula Student, debido a que genera menos de 110 dB (C) a 6.500 rpm.

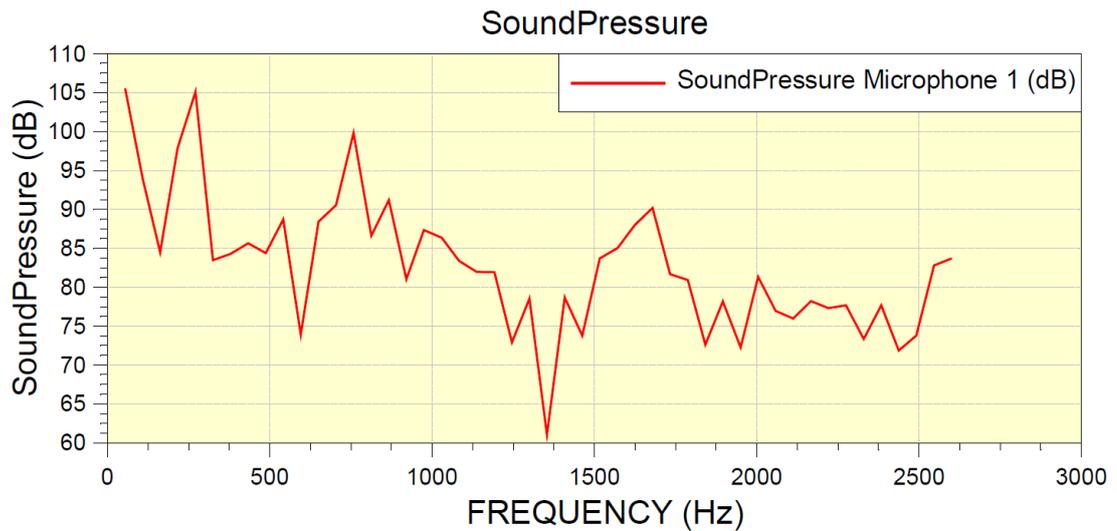


Figura 22. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 1 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.

#### MICROPHONES

Number	Distance [mm]	---Overall dB Level---	[dB(A)]	[db,lin]
1	499.22	103.727	109.894	

Figura 23. Resultado de la medición del ruido del silenciador 1 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.

#### 4.4.2 Silenciador 2

En la Figura 25 se observa la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz del silenciador 2 cuando el motor está al ralentí.

El nivel de presión sonora sin ponderar del silenciador 2 cuando el motor está al ralentí es de 107,04 dB, como se muestra en la Figura 26.

El ruido generado por el motor con el silenciador 2 no supera la normativa de Formula Student, debido a que genera más de 103 dB (C) al ralentí y por tanto no sería un diseño válido.

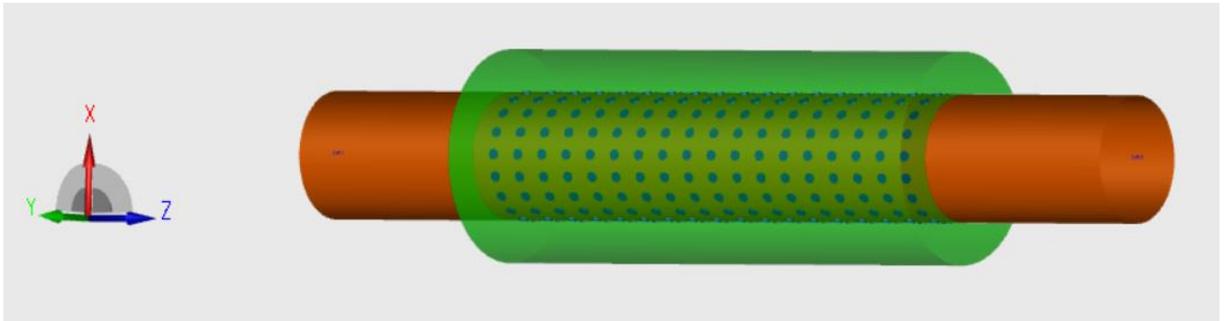


Figura 24. Silenciador 2 realizado en AVL Boost 3D.

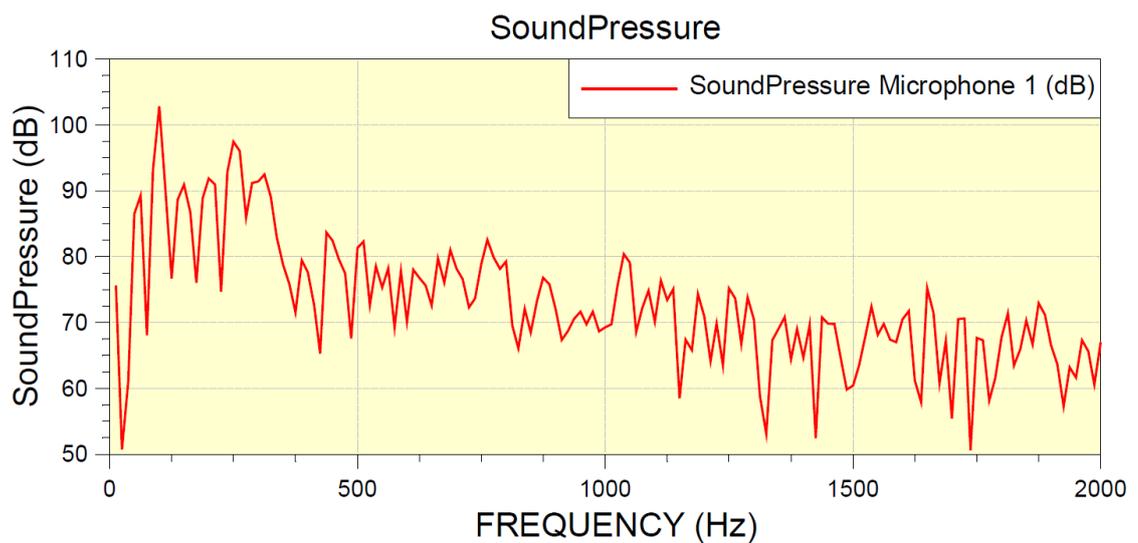


Figura 25. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 2 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.

MICROPHONES			
Number	Distance [mm]	---Overall dB Level---	
		[dB(A)]	[db,lin]
1	499.22	97.867	107.043

Figura 26. Resultado de la medición del ruido del silenciador 2 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.

En la Figura 27 se observa la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz del silenciador 2 cuando el motor está a 6.500 rpm.

El nivel de presión sonora sin ponderar del silenciador 2 cuando el motor está a 6.500 rpm es de 115,55 dB, como se muestra en la Figura 28.

El ruido generado por el motor con el silenciador 2 no supera la normativa de Formula Student, debido a que genera más de 110 dB (C) a 6.500 rpm y por tanto no sería un diseño válido.

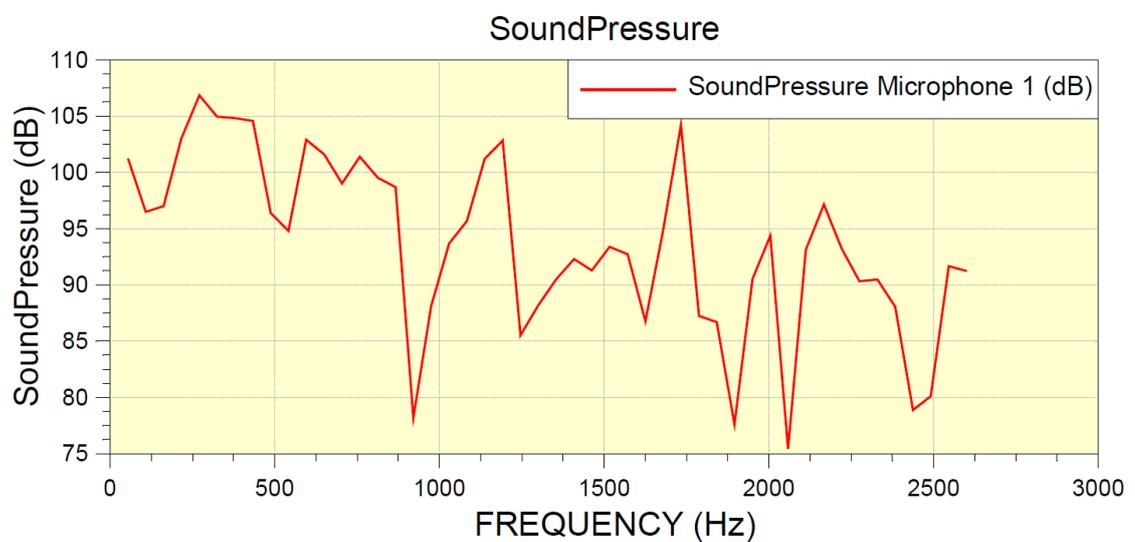


Figura 27. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 2 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.

MICROPHONES

Number	Distance [mm]	---Overall dB Level---	[dB(A)]	[db,lin]
1	499.22	113.264	115.551	

Figura 28. Resultado de la medición del ruido del silenciador 2 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.

### 4.4.3 Silenciador 3

En la Figura 30 se observa la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz del silenciador 3 cuando el motor está al ralentí.

El nivel de presión sonora sin ponderar del silenciador 3 cuando el motor está al ralentí es de 99,40 dB, como se muestra en la Figura 31.

El ruido generado por el motor con el silenciador 3 supera la normativa de Formula Student, debido a que genera menos de 103 dB (C) al ralentí.

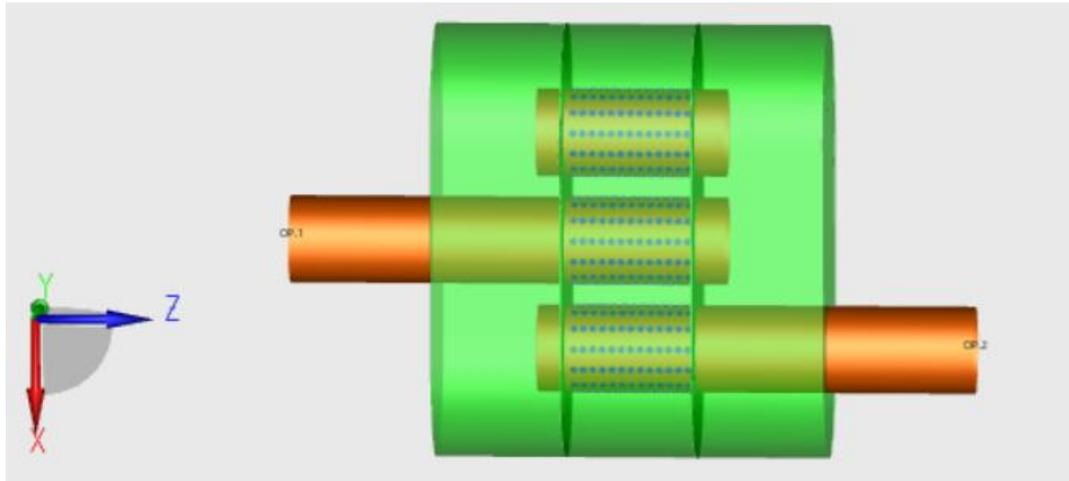


Figura 29. Silenciador 3 realizado en AVL Boost 3D.

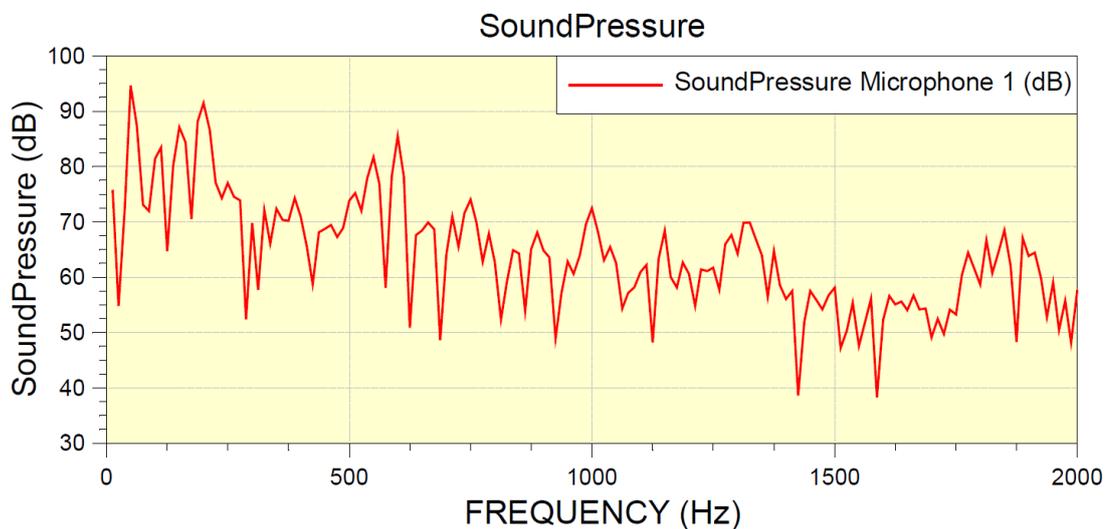


Figura 30. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 3 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.

MICROPHONES

Number	Distance [mm]	---Overall dB Level---	
		[dB(A)]	[db,lin]
1	499.22	90.308	99.405

Figura 31. Resultado de la medición del ruido del silenciador 3 al ralentí. Simulación realizada en AVL Boost.

En la Figura 32 se observa la presión del sonido en dB según la frecuencia en Hz del silenciador 3 cuando el motor está a 6.500 rpm.

El nivel de presión sonora sin ponderar del silenciador 3 cuando el motor está a 6.500 rpm es de 108,03 dB, como se muestra en la Figura 33.

El ruido generado por el motor con el silenciador 3 supera la normativa de Formula Student, debido a que genera menos de 110 dB (C) a 6.500 rpm.

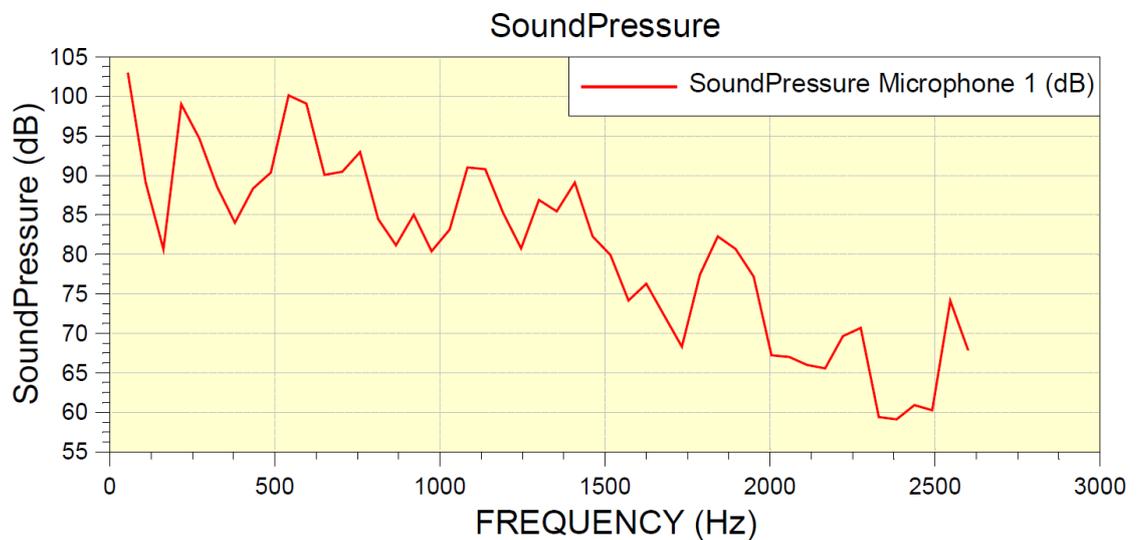


Figura 32. Gráfico de la presión sonora según la frecuencia del silenciador 3 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.

MICROPHONES			
Number	Distance [mm]	---Overall dB Level---	
		[dB(A)]	[db,lin]
1	499.22	103.580	108.031

Figura 33. Resultado de la medición del ruido del silenciador 3 a 6.500 rpm. Simulación realizada en AVL Boost.

#### 4.4.4 Comparación de la simulación acústica

En la Tabla 5 se muestran los resultados del nivel de presión sonora producido por los tres silenciadores cuando el motor está al ralentí y cuando está a 6.500 rpm.

	Silenciador 1	Silenciador 2	Silenciador 3	Máximo permitido
<i>Sonido al ralentí</i>	102,99 dB	107,04 dB	99,40 dB	103 dB
<i>Sonido a 6.500 rpm</i>	109,89 dB	115,55 dB	108,03 dB	110 dB

Tabla 5. Comparativa de la simulación acústica de los silenciadores.

## Capítulo 5. SOLUCIÓN ESCOGIDA

Los resultados de las simulaciones se han recogido en este capítulo y se han comparado, con el objetivo de realizar la elección del silenciador idóneo para el motor Yamaha CP2 y el equipo de Formula Student.

### 5.1 Comparación de las soluciones analizadas

La siguiente tabla muestra la comparación de los diferentes silenciadores.

	Silenciador 1	Silenciador 2	Silenciador 3
<i>Peso</i>	2.000 g	1.675 g	2.283 g
<i>Presión entrada</i>	101.984 Pa	101.423 Pa	102.098 Pa
<i>Presión salida</i>	101.325 Pa	101.325 Pa	101.325 Pa
<i>Velocidad entrada</i>	68,7 m/s	16,4 m/s	45,1 m/s
<i>Velocidad salida</i>	46,5 m/s	14,2 m/s	35,9 m/s
<i>Sonido al ralentí</i>	102,99 dB	107,04 dB	99,40 dB
<i>Sonido a 6.500 rpm</i>	109,89 dB	115,55 dB	108,03 dB

Tabla 6. Comparativa de los silenciadores analizados.

### 5.2 Selección de la solución

El silenciador 2 es mejor que los otros dos silenciadores en diferentes parámetros, como por ejemplo el peso. El gran inconveniente es que no cumple con la normativa de sonido de la competición Formula Student, ya que solo disminuye el sonido hasta 107,04 dB al ralentí, cuando el máximo permitido es de 103 dB (C) y 115,55 dB a 6.500 rpm, cuando el máximo permitido es de 110 dB (C). Por este motivo, el silenciador 2 queda descartado.

La comparativa final se realiza entre el silenciador 1 y el silenciador 3. El silenciador 1 tiene una ventaja en el peso de casi 300 gramos. La desventaja es el margen para cumplir los niveles de ruido de la competición, ya que es mínimo y si el piloto o el ralentí no son precisos, podrían superar los límites.

El silenciador 3 cumple con los requisitos de niveles de ruido, además, las mediciones están realizadas sin ponderar, por lo que las mediciones en la competición deberían ser aún menores. La principal desventaja es su peso, es el silenciador más pesado de los tres.

Existen mecanismos para reducir o compensar las desventajas del silenciador 1 y el silenciador 3. En el caso del silenciador 1 se podría hacer un proceso de mejora en la supresión del ruido, por ejemplo, incluyendo material absorbente dentro de las cavidades, mientras que para el silenciador 3 se podría llevar a cabo un proceso de optimización del peso.

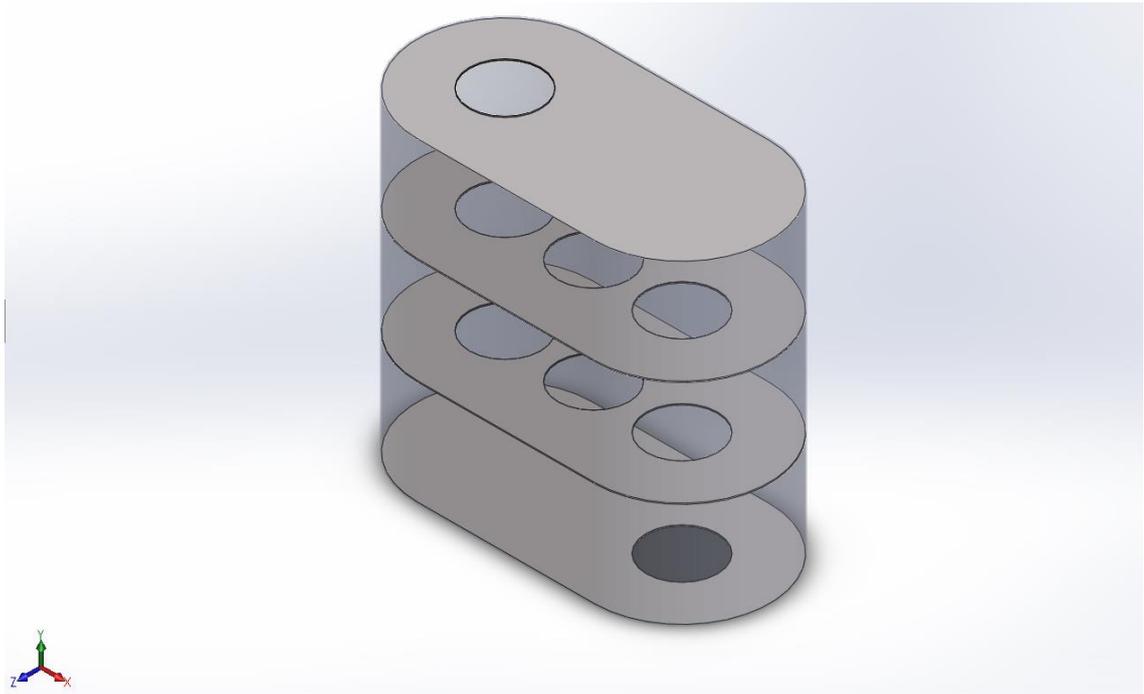
Según todo lo expuesto, la elección final es el silenciador 3, ya que el objetivo principal de este proyecto es superar la normativa y con el silenciador seleccionado se cumple con un margen más amplio. Además de que el peso es un objetivo secundario, 283 gramos en un vehículo que pesa 200 kilogramos no es significativo.

### **5.3 Desglose del silenciador seleccionado**

El silenciador se compone de varios elementos distintos. Una cubierta exterior, dos tubos idénticos, uno de entrada y otro de salida y un tubo interior.

#### **5.3.1 Cubierta exterior**

Es la parte exterior de la cavidad del silenciador en la cual se produce el intercambio de gases entre el tubo de entrada y el de salida. Incluye así mismo las placas divisoras de las cámaras internas.



*Figura 34. Cubierta exterior del silenciador escogido.*

### **5.3.2 Tubo de entrada y tubo de salida**

Son los tubos de entrada y de salida de los gases de escape. Uno de ellos está conectado a las válvulas de escape del motor y el otro está libre permitiendo la salida de gases al exterior. El diseño mecánico de ambos tubos es idéntico.

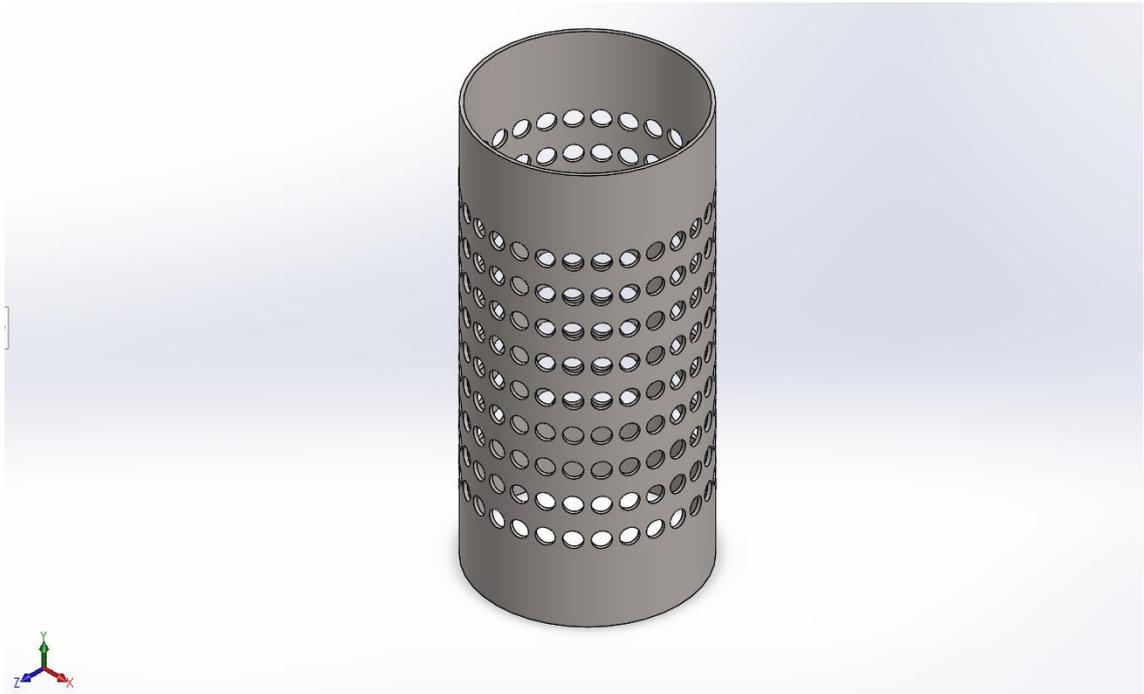
Cada tubo cuenta con perforaciones en el extremo que va dentro de la cámara central para facilitar la distribución de los gases dentro de la misma y reducir el ruido producido.



*Figura 35. Tubo de entrada y salida del silenciador escogido.*

### **5.3.3 Tubo interior**

Es el tubo interno del silenciador que conecta las dos cámaras externas. Tiene perforaciones a lo largo de toda su longitud para la distribución de los gases dentro de la cámara central.



*Figura 36. Tubo interior del silenciador escogido.*

## 5.4 Proceso de fabricación

El primer paso para la fabricación del silenciador es crear los componentes por separado y posteriormente unirlos mediante soldadura.

Los tubos de entrada y de salida son idénticos, el primer paso es cortar la longitud deseada de los tubos, teniendo en cuenta que estarán unidos a otros tubos. Una vez cortados se procederá al perforado en la zona deseada.

El tubo interior se realiza de la misma manera que los tubos de entrada y de salida, sus diferencias son el tamaño de las perforaciones y la longitud del tubo.

Las placas externas e internas se deben de cortar con la medida deseada. Posteriormente se realizarán los agujeros de los tubos, en las placas externas se realizará un solo agujero, mientras que en las placas internas se realizarán tres.

Para la realización de la cubierta se corta la placa de titanio con las medidas, una vez realizado el corte, la placa se dobla hasta conseguir la forma de la cubierta y se une mediante una soldadura.

Una vez realizadas los distintos componentes que componen el silenciador, se procede a unirlos, todas las uniones se realizan mediante soldadura. La primera unión es la de los tubos

con las placas internas. Posteriormente, se suelda el conjunto a la cubierta. Por último, se realiza una unión de soldadura de las placas externas a la cubierta y a los tubos de entrada y salida.

## Capítulo 6. PLANIFICACIÓN Y PRESUPUESTO

En este capítulo se expone la planificación a seguir para la construcción del silenciador objeto de este proyecto y el presupuesto necesario para ello.

### 6.1 Planificación

El siguiente diagrama muestra el cronograma de la planificación seguida para la construcción del silenciador objeto de este proyecto.

Semana	1	2	3	4	5	6	7	8
Pedido de los materiales	■	■						
Corte de las piezas			■					
Soldadura de las piezas				■	■			
Montaje en el vehículo						■		
Ensayos y comprobaciones							■	■

*Figura 37. Cronograma para la realización del proyecto.*

### 6.2 Presupuesto

El equipo del Formula Student de la Universidad Europea de Madrid es el encargado de la fabricación del silenciador, por lo que la mano de obra no se va a tener en cuenta en el presupuesto.

El silenciador está compuesto por tres tubos, una caja de resonancia y dos placas interiores. Los tubos poseen las mismas características, tienen un diámetro de 60 mm y un espesor de 1 mm, sumando los tres tubos, la longitud es de 540 mm. La caja de resonancia se divide en dos placas, idénticas a las placas interiores, y una placa exterior que irá curvada. La placa exterior tiene una longitud de 770 mm, un ancho de 270 mm y 1 mm de espesor. Las placas interiores y las de la caja de resonancia tienen una longitud de 150 mm, un ancho de 300 y 1 mm de espesor.

En total se necesita un tubo de Ti 6Al – 4V 540 mm de longitud, 60 mm de diámetro y 1 mm de espesor, el cual tiene un precio de 52 €.

---

Además, se necesita una placa de Ti 6Al – 4V con unas dimensiones mínimas de 0,26 m<sup>2</sup> y 1 mm de espesor. El precio de mercado de la placa es de 67 €.

Las soldaduras necesarias para la fabricación del silenciador tienen un coste aproximado de 100 €.

Por tanto, el presupuesto resultante para la fabricación del silenciador es de 219 €.

## **Capítulo 7. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO**

Tras la realización de las diferentes simulaciones, se han llegado a una serie de conclusiones. Además, se exponen las líneas de trabajo a seguir una vez terminada la fabricación del silenciador.

### **7.1 Conclusiones**

Tras la realización del presente proyecto se han llegado a las siguientes conclusiones:

- El material óptimo del silenciador es el Titanio 6Al – 4V, debido a su alto punto de fusión, su baja densidad y su resistencia. Las principales desventajas son su alto precio y su difícil manejo a la hora de la fabricación.
- El silenciador 1 es la segunda mejor opción, su principal ventaja es su bajo peso, a cambio, su desventaja es el mínimo margen sobre los límites en las simulaciones acústicas.
- El silenciador 2 no es opción de viable, ya que el monoplaza no superaría las pruebas de sonido de Formula Student para poder competir.
- El silenciador 3 es la opción óptima, ya que es el que más disminuye el sonido generado por el motor Yamaha CP2, sin aumentar el peso significativamente en el vehículo.

### **7.2 Futuras líneas de trabajo**

Una vez acabado este estudio se podrían realizar las siguientes actividades:

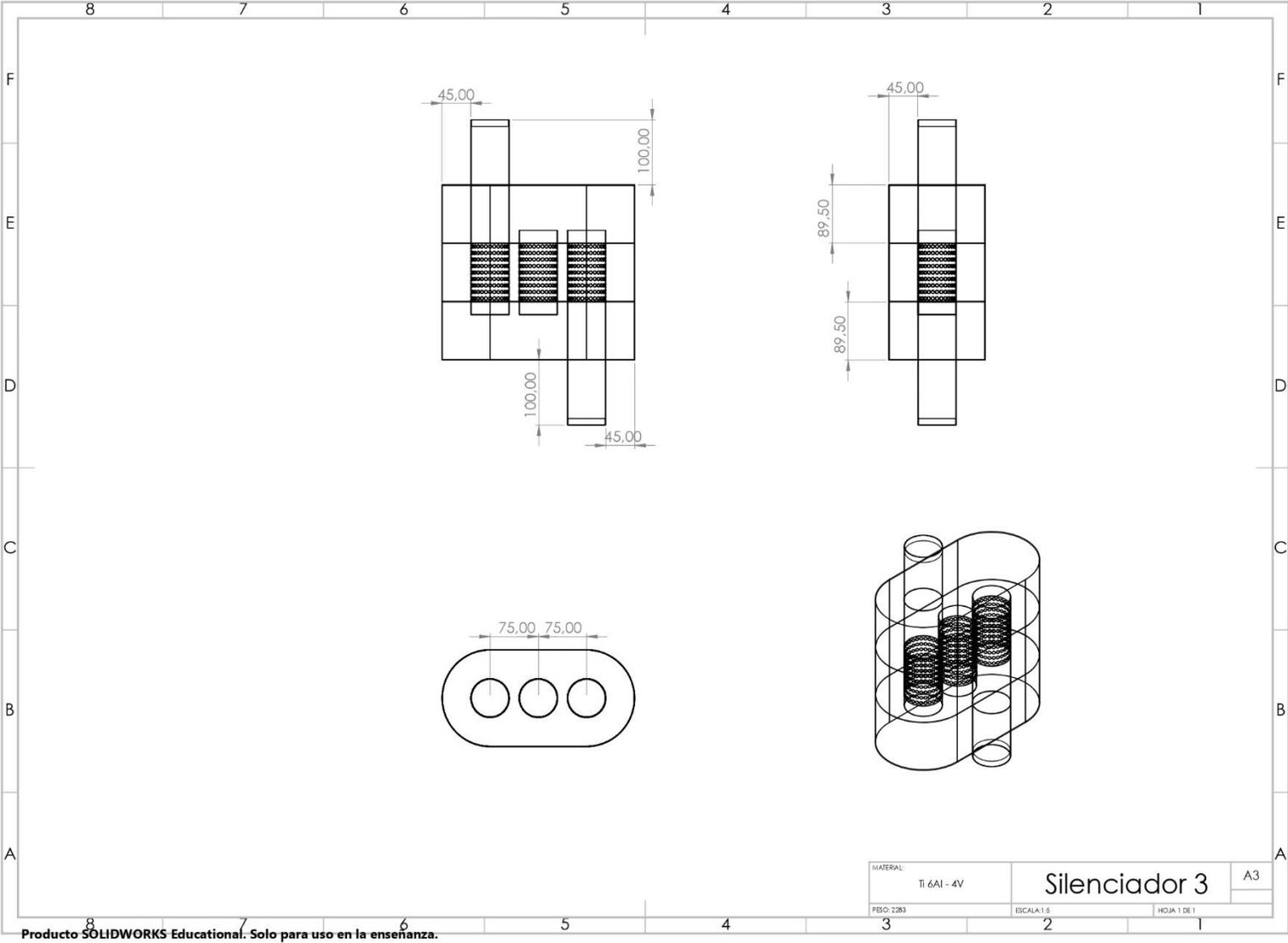
- Realización de ensayos para la comprobación de la correcta atenuación del sonido.
- Optimización del diseño del silenciador en conjunto con la optimización de la admisión.
- Diseño el colector de escape y optimizarlo en conjunto al silenciador.
- Optimización del diseño del silenciador con el objeto de mejorar la aerodinámica del monoplaza.
- Optimización del peso del silenciador.

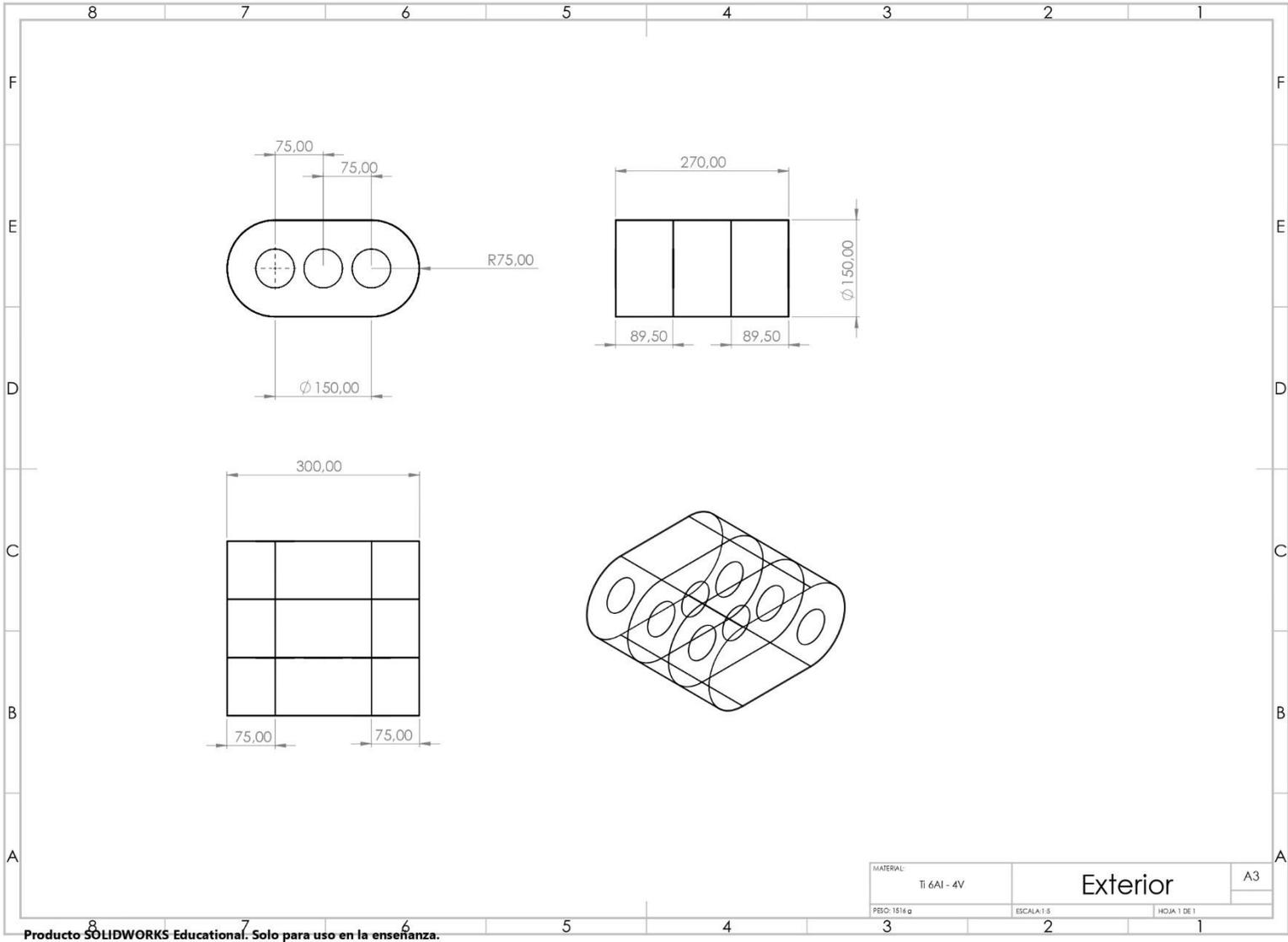
## **ANEXO 1. PLANOS**

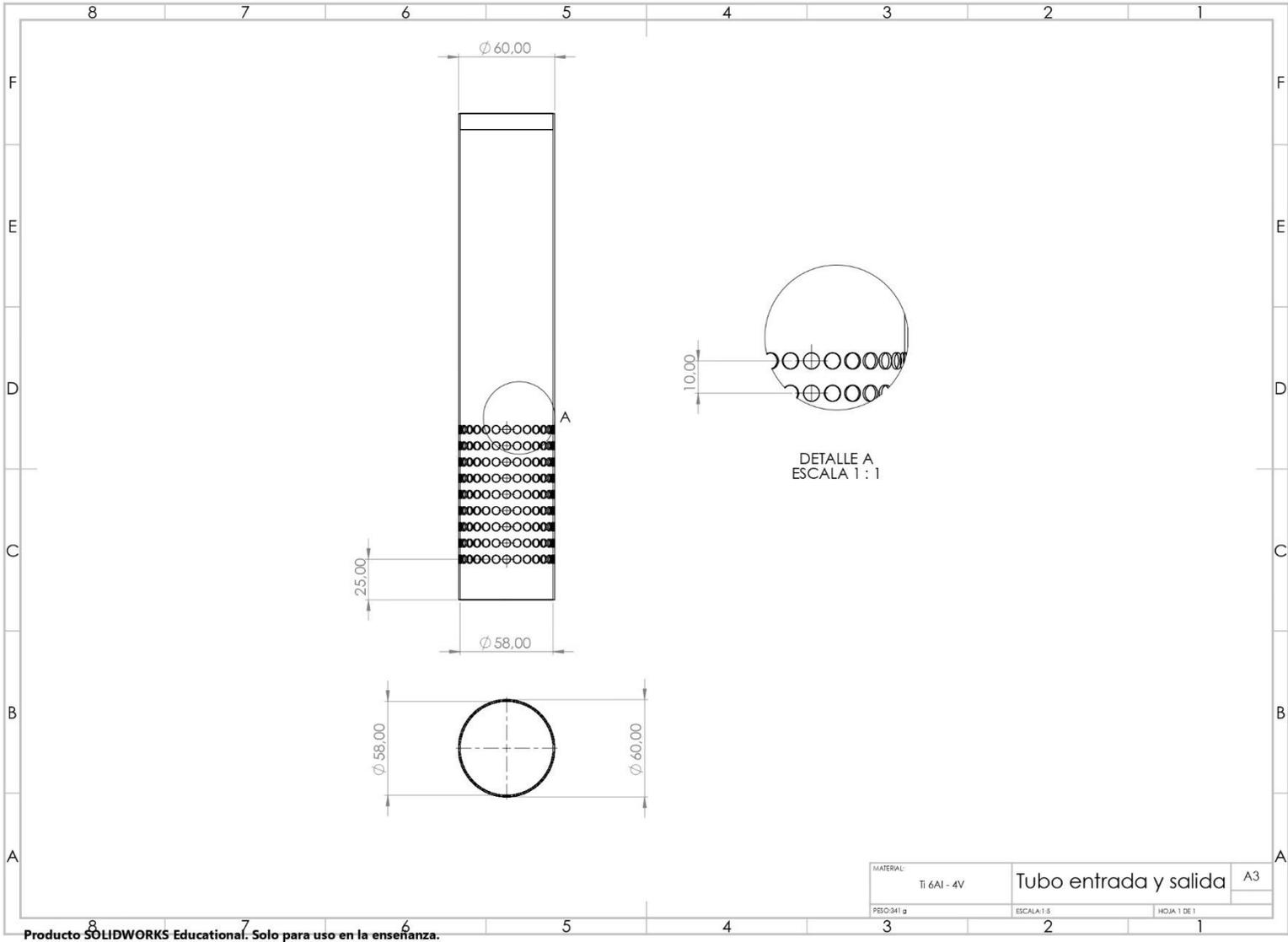
En este anexo se muestran los planos del silenciador seleccionado y sus componentes.

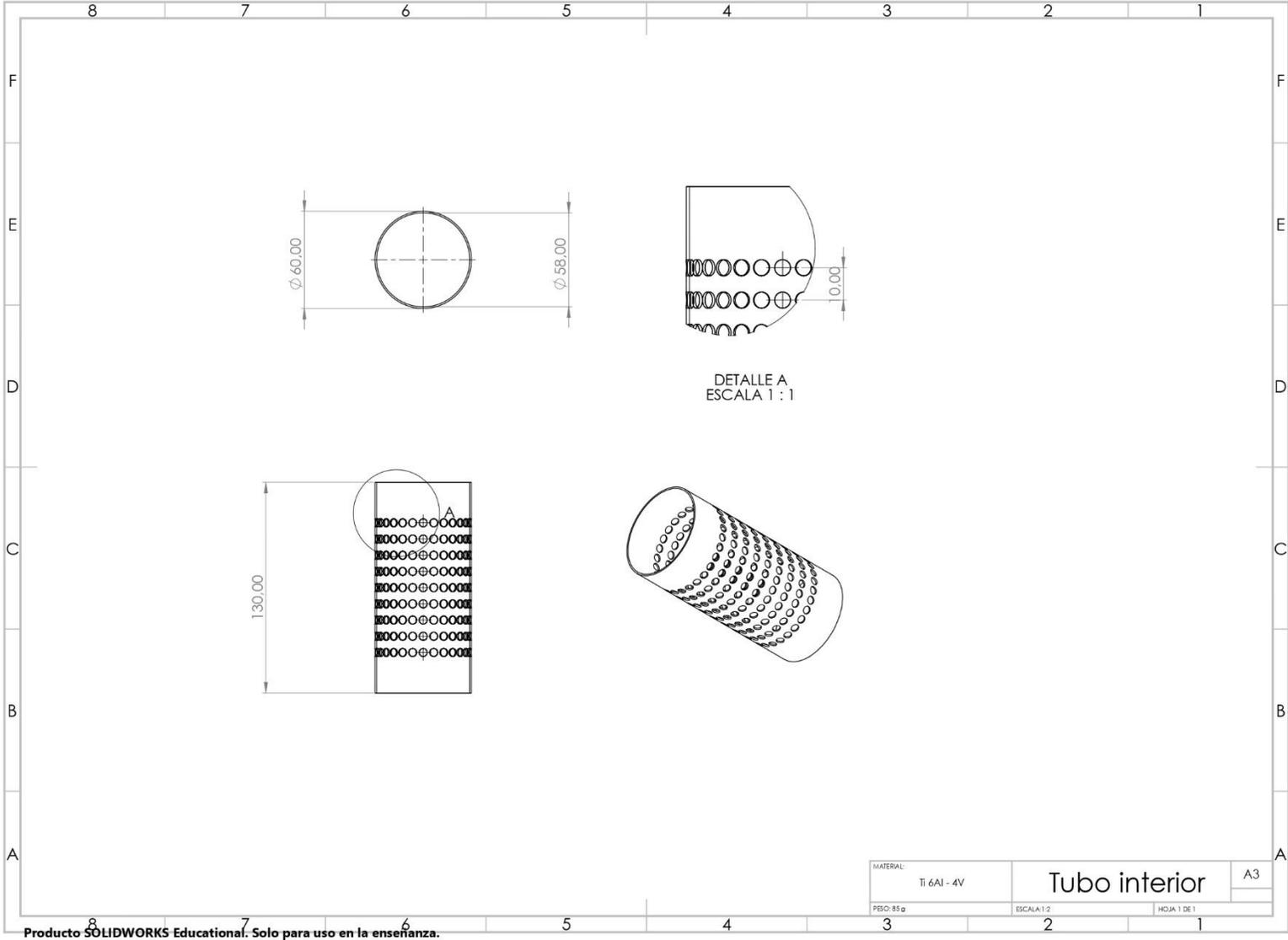
Los planos incluidos son:

- Plano general del silenciador completo.
- Plano de detalle de la cubierta exterior y las placas interiores.
- Plano de detalle del tubo de entrada/tubo de salida.
- Plano de detalle del tubo interior.









## BIBLIOGRAFÍA

Ang Kok Wye, A. (2008, January). Design of an exhaust system for the UTP formula SAE race car. UTP Electronic and Digital Intellectual Asset. <http://utpedia.utp.edu.my/id/eprint/1594>

Conoce Los 12 diferentes tipos de silenciadores de moto. 【NOTICIAS de Salamanca】 . (2023, April 13). <https://noticiassalamanca.com/ofertas/tipos-de-silenciadores-de-moto/>

CP2. the wonderful engine that powers the Yamaha ténéré 700-T7. Yamaha Tenere 700 Forum. (2018, October 5). <https://www.tenere700.net/news/articles/cp2-the-wonderful-engine-that-powers-the-yamaha-t%C3%A9n%C3%A9r%C3%A9-700-t7-r3/>

Cálculo de Flujo de Aire Al Motor. Widman International SRL. (2018). <https://www.widman.biz/Seleccion/cfm.html>

Conceptos basicos del ruido ambiental. (n.d.-a). <https://sicaweb.cedex.es/wp-content/uploads/2021/08/Conceptos-Basicos-del-ruido-ambiental.pdf>

Development and design of system - squarespace. (2020). [https://static1.squarespace.com/static/5e2a78aea2dc434ac475b5a4/t/60094a30b1398f3041cf5d37/1611221613487/mms+final+year+thesis+collection+-+development+and+design+of+a+formula+sae+exhaust+system+\(reece+day+-+2020\).pdf](https://static1.squarespace.com/static/5e2a78aea2dc434ac475b5a4/t/60094a30b1398f3041cf5d37/1611221613487/mms+final+year+thesis+collection+-+development+and+design+of+a+formula+sae+exhaust+system+(reece+day+-+2020).pdf)

Donaire, D. L. (2022, May 9). Silenciador de escape: Tipos y cuáles son sus ventajas y desventajas. Actualidad Motor. <https://www.actualidadmotor.com/diferentes-tipos-de-silenciadores/>

Díaz-Maroto, J. (2017). Cálculo y Diseño de un sistema de escape para un motor de Formula Student. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28204/TFG\\_Jose\\_Diaz-Maroto\\_Garcia-Vaquero.pdf?sequence=1](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/28204/TFG_Jose_Diaz-Maroto_Garcia-Vaquero.pdf?sequence=1)

Formula Student Germany Concept. FSG: Concept. (n.d.). <https://www.formulastudent.de/about/concept/>

Formula Student Germany Disciplines. FSG: Disciplines. (n.d.). <https://www.formulastudent.de/about/disciplines/>

Formula Student Germany. FSG: Formula student germany. (n.d.).  
<https://www.formulastudent.de/fsg/>

Formula Student Spain. (n.d.). <https://www.formulastudent.es/>

Formula Student UK. History of Formula Student. (n.d.).  
<https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>

Formula Student. Formula Student Spain. (n.d.).  
<https://www.formulastudent.es/home/formula-student/>

Garcia, A., Cendales, E. D., & Eslava, A. F. (2016, January 5). Motores de Combustión Interna (MCI) Operando con mezclas de Etanol Gasolina: Revisión. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. <https://www.redalyc.org/journal/911/91145342007/html/>

Hadden, C. (2022, July 21). 2022 Yamaha tenere 700 [specs, features, photos]: WBW. webBikeWorld. <https://www.webbikeworld.com/2022-yamaha-tenere-700/#:~:text=Advanced%20Twin%2DCylinder%20Engine,award%2Dwinning%20MT%2D07.>

Loudness, decibels, and balance. Chasing the Chords. (2021, September 7).  
<https://brianjump.net/2020/10/27/loudness-decibels-and-balance/>

Maia, B. (2023, April 3). Yamaha put the CP2 in pretty much everything. TopSpeed.  
<https://www.topspeed.com/why-yamaha-put-the-cp2-engine-in-everything/>

Miyara, F. (n.d.). Niveles Sonoros.  
<https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/niveles.htm#:~:text=Esta%20presi%C3%B3n%20es%20de%20alrededor,normalizado%20es%20de%20101.325%20Pa.>

Módulo de Young y resistencia de varios materiales resistencia. (n.d.).  
[https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/5/5479/Tabla\\_Modulos\\_de\\_Young\\_y\\_cizalladura.pdf](https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/5/5479/Tabla_Modulos_de_Young_y_cizalladura.pdf)

Narann, H., & Sharma, K. (2022, June 8). Design and Fabrication of Exhaust System of Formula Student Car. <https://www.ijraset.com/research-paper/design-and-fabrication-of-exhaust-system-of-formula-student-car>

O'Keeffe, J. (2018, September 4). Los Tipos de silenciadores de escape. Puro Motores.  
<https://www.puromotores.com/13176627/los-tipos-de-silenciadores-de-escape>

Propiedades del Acero. Total Materia - Propiedades del Acero. (n.d.).  
<https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=propiedadesdelacero&LN=ES>

Rodríguez, H., & Pinto, J. (2022, August 24). Propiedades del Aluminio (AL). [www.nationalgeographic.com.es](http://www.nationalgeographic.com.es).

[https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-aluminio-al\\_18221](https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/propiedades-aluminio-al_18221)

Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed. ASM material data sheet. (n.d.).

<https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641>

TI6AL4V. quimica.es. (n.d.). <https://www.quimica.es/enciclopedia/Ti6Al4V.html>

Umpiérrez, F. (2018, January). Silenciador Fórmula UEM [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad Europea de Madrid.

Wikimedia Foundation. (2023, June 12). A-weighting. Wikipedia. <https://en.wikipedia.org/wiki/A-weighting>

YouTube. (2015, March 19). Running AVL boost models in VeriStand. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=KjrFq2JrpDE>

YouTube. (2017, November 28). AVL FIRETM m - CFD in a multi-domain environment - software overview. YouTube.

[https://www.youtube.com/watch?v=ySKHsZvFSfM&list=PLUHGprUixGhX3In9TjFIF-Q\\_-RUkMzjpt&index=5](https://www.youtube.com/watch?v=ySKHsZvFSfM&list=PLUHGprUixGhX3In9TjFIF-Q_-RUkMzjpt&index=5)

YouTube. (2022, May 18). Tutorial Flow Simulation Solidworks muffler (KNALPOT)

Dengan FLOXPRESS. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=7RKniw7sCbW>

YouTube. (2023, March 29). Tutorial Flow Simulation Solidworks muffler (exhaust) with

FLOXPRESS. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PH7czykuM3E>

YouTube. (2021, October 15). Software | AVL simulation software download, installation and licensing. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=fqmMr72pGCg>

Yamaha MT-07 2020: 6 Claves para explicar su éxito. Motorbike Magazine. (2020, June 26). <https://www.motorbikemag.es/yamaha-mt-07-2020-claves-exito/>

¿Sabes qué es el silenciador de escape? Ventajas y desventajas de los distintos tipos que hay. (2022, May 13). <https://www.eurotaller.com/noticia/sabes-que-es-el-silenciador-de-escape-ventajas-y-desventajas-de-los-distintos-tipos-que-hay>

Sound - honeywell. (n.d.). <https://explore.honeywell.com/rs/510-REI-219/images/HON-SoundSource-AC-Weighted-Noise.pdf>