



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo integración Curricular previa a la
obtención del título de Ingeniería en Mecánica
Automotriz**

AUTORES:

Proaño Zevallos David Andrés
Villa Espín Josue Sebastián

TUTOR:

Ing. Juan Fernando Iñiguez

**Mejoramiento de la Eficiencia Volumétrica a Través de
la Teoría de Helmholtz Mediante CFD**

QUITO – ECUADOR | 2025

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **Josue Sebastián Villa Espín, David Andrés Proaño Zevallos**, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros 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, su reglamento y demás disposiciones legales.



Josue Villa

1724244122



David Proaño Z.

1751770114

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Juan Fernando Iñiguez** certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Firma profesor

DEDICATORIA

La presente es dedicada a todas personas que me han acompañado en este proceso académico, a todos aquellos que han velado e intervenido por mi tanto de manera directa como indirecta, estoy seguro que sin el apoyo de cada una de estas personas esto no hubiese sido posible. Este estudio busca retribuir a todas esas personas que han visto algo en mi y me han permitido seguir adelante, tanta familia, compañeros, amigos, pareja que sin su motivación no lo hubiera conseguido.

Estoy muy agradecido con cada uno de ustedes, me faltan palabras para expresar cuan gratificado me siento por tenerlos en mi vida, les debo el mundo entero.

Josué Villa.

DEDICATORIA

Le dedico este trabajo y tesis realizada a mi madre, la cual ha sido un pilar fundamental en mi vida profesional y personal, agradezco todo su sacrificio y confianza en mí de creer hasta el final en mí y en poder darme el ejemplo correcto con una educación completa y enseñanzas que me brindaron la fuerza necesaria para poder seguir siempre adelante. Cada meta cumplida siempre tendrá tu nombre por delante.

También le dedico este trabajo a mi tía la cual ha sido una segunda madre para mí y quien en mis momentos más vulnerables ha estado presente para mí con consejos prudentes y realistas los cuales me impulsaron a seguir siempre cada día y darme la motivación necesaria para nunca rendirme.

Este trabajo refleja todas sus enseñanzas y su confianza depositada en mi persona, la cual se ve reflejada en todo lo que yo soy ahora. A ustedes les dedico con profundo respeto y gratitud este logro académico esperando que logren sentirse orgullosas de mí como yo lo estoy de haberlas tenido dentro de mi vida

También le ofrezco un agradecimiento a mi compañero de trabajo ya que sin él nada de este trabajo hubiera sido posible de conseguir, con esfuerzo constante logramos culminar este trabajo de manera eficiente y demostrando que con organización y tiempo todo se puede lograr

Finalmente ofrezco un agradecimiento a nuestro tutor el cual nos guió de manera práctica y limpia durante toda nuestra carrera y nos enseñó los caminos correctos por los cuales ir para obtener nuestras metas y una de esas metas es la finalización de este trabajo

David Proaño

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo agradecer a esta prestigiosa institución por abrirme las puertas a pesar de las diferentes adversidades que la vida nos presenta, por velar de que mi estancia en este entorno sea el mas agradable y que no lo vea únicamente como un lugar de estudio si no como una extensión de mi hogar.

Agradezco a mis padres por sus consejos que definitivamente me esclarecieron el panorama cuando las cosas se tornaron difíciles, espero de todo corazón que sus consejos me sigan guiando a lo largo de mi vida.

Agradezco a todos aquellos que forman parte de la facultad de ciencias técnicas que con sus instrucciones y su impartición de conocimiento me han forjado como profesional, actos que son definitivamente invaluable.

Agradezco a toda mi familia por su apoyo moral y por permitirme dedicarle mi vida a esta hermosa carrera profesional, algo que personas realmente afortunadas como yo podemos y con afortunado me refiero por el hecho de tener esta familia, gracias.

Agradezco a mi tutor y compañero por permitirme el lujo de formar un equipo de trabajo con ellos, me queda claro que más allá de las formalidades como estudiantes y maestro somos colegas en el ámbito laboral.

Josué Villa.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a la Universidad Internacional del Ecuador por haberme acogido desde el inicio de mi formación profesional y brindarme una educación integral que ha sido fundamental para mi crecimiento personal y académico.

A la Facultad de Ingeniería Automotriz, mi reconocimiento por su permanente compromiso con la excelencia académica y por contar con un equipo docente y administrativo que siempre estuvo dispuesto a ofrecer su apoyo en cada etapa de este proceso.

Extiendo un agradecimiento especial a los docentes, quienes, además de compartir sus conocimientos, me inspiraron con su vocación, experiencia y entrega. Cada uno de ellos dejó una huella invaluable en mi preparación profesional.

David Proaño

Índice de contenido

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA.....	3
APROBACIÓN DEL TUTOR	4
DEDICATORIA	5
DEDICATORIA	6
AGRADECIMIENTO	8
AGRADECIMIENTO	9
Índice de contenido	10
RESUMEN	13
ABSTRACT	13
Introducción.....	14
Marco Teórico.....	16
Eficiencia Volumétrica	17
Volumen efectivo del cilindro	18
Efecto de Helmholtz	19
Frecuencia de resonancia	20
Aplicación de la resonancia de Helmholtz en los sistemas de admisión de aire	23
Flujometría.....	24
Flujo volumétrico (Caudal).....	25
Número de Reynolds.....	25
Ecuación de Bernoulli	26
Diagrama de Moody	28
Software de SolidWorks.....	29
ANSYS	29
Variables de estudio	29

Materiales y Métodos	31
Motor K7M de Renault.....	32
Representación del Conducto de admisión	38
Diseño CAD del múltiple con resonador Helmholtz	39
Simulación CFD mediante ANSYS	43
Resultados y Discusión.....	57
Conclusiones.....	61
Recomendaciones	62
Referencias	63

Índice de figuras

Figura 1. <i>Ejemplificación de resonador Helmholtz</i>	17
Figura 2. Diagrama de Moody.....	26
Figura 3. Representación teórica del conducto.....	36
Figura 4. Representación real del conducto.....	37
Figura 5. Diseño del múltiple de admisión	38
Figura 6. Modelo 3D del múltiple de admisión con geometría original del fabricante para el motor Renault K7M, elaborado en SolidWorks	39
Figura 7. Modelo 3D del múltiple de admisión optimizado mediante la teoría de resonancia de Helmholtz, ajustado para 5250 rpm.	40
Figura 8. Vista interna del múltiple de admisión con volumen generado.....	41
Figura 9. Interfaz de ANSYS con la herramienta Fluid Flow seleccionada	42
Figura 10. Interfaz de la herramienta Meshing en ANSYS	43
Figura 11. Interfaz de la herramienta Meshing en ANSYS	44
Figura 12. Refinamiento de paredes aplicado al diseño	45
Figura 13. Designación de la zona de entrada en el múltiple de admisión.....	46
Figura 14. Zonas de entrada y salida ya designadas en el múltiple de admisión.....	47
Figura 15. Designación de paredes del múltiple como condición frontera.....	48
Figura 16. Asignación de condiciones ambientales de Quito	49
Figura 17. Instalación del vacuómetro en el vehículo para medición.....	50
Figura 18. Medición de vacío en el rango de revoluciones de análisis del estudio	51
Figura 19. Aplicación de condiciones frontera para simulación en Set up.....	53
Figura 20. Designación de la velocidad de entrada de aire en el apartado de set up	54
Figura 21. Configuración para el cálculo de la simulación por parte del software	55
Figura 22. Módulo de visualización de resultados en el workbench	56

Figura 23. Visualización de los resultados obtenidos una vez culminada la simulación en ANSYS	57
Figura 24. Configuración para simulación de múltiple de admisión con Helmholtz	58
Figura 25. Visualización de los resultados obtenidos de la simulación del múltiple con Helmholtz	59
Figura 26. Resultados visuales de la velocidad en la salida del múltiple sin el fenómeno de Helmholtz.....	60
Figura 27. Resultados visuales de la velocidad en la salida del múltiple con el fenómeno de Helmholtz.....	60

Índice de tablas

Tabla 1. Especificaciones del motor K7M de Renault	27
Tabla 2. Grados de apertura y cierre de válvula motor K7M.	32
Tabla 3. Resultados obtenidos tras la simulación.....	61

Mejoramiento de la Eficiencia Volumétrica a Través de la Teoría de Helmholtz Mediante CFD

Ing. Juan Fernando Iñiguez. MSc¹, Josue Villa,² David Proaño.³

¹ *Ingeniería Automotriz- Universidad Internacional del Ecuador, email jiniguez@uide.edu.ec,
Quito - Ecuador*

² *Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, email jovillaes@uide.edu.ec
Quito – Ecuador*

³ *Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, email jovillaes@uide.edu.ec
Quito – Ecuador*

RESUMEN

Introducción: El presente trabajo analiza el comportamiento del flujo de aire en un múltiple de admisión optimizado mediante la aplicación del fenómeno de resonancia de Helmholtz, **Metodología:** Esto se llevara a cabo a través de simulaciones CFD, con un modelo base correspondiente al múltiple original del motor Renault K7M, comparándolo con un diseño que incorpora la frecuencia de resonancia calculada según la teoría de Helmholtz, A través de mediciones reales obtuvo parámetros clave como la velocidad de entrada, permitiendo determinar la eficiencia volumétrica en ambas configuraciones. **Resultados:** Los resultados mostraron que, en el diseño optimizado se aprecia una mejora significativa en la velocidad promedio del flujo en la salida del múltiple de admisión, la mejora de la velocidad corresponde al 59.83% desembocando en mejoras a la eficiencia volumétrica. **Conclusión:** Debido al acortamiento del múltiple de admisión a la longitud calculada en base a la teoría de Helmholtz se logró amplificar la velocidad de entrada de aire a los cilindros demostrando que a través de esta teoría se consigue una mejora en la eficiencia volumétrica del motor en mención en el régimen de revoluciones donde entrega su potencia máxima.

Palabras clave: resonancia, onda, flujo, simulación, fenómeno, Helmholtz.

ABSTRACT

Introduction: This study analyzes the behavior of airflow in an optimized intake manifold by applying the Helmholtz resonance phenomenon. **Methodology:** CFD simulations were carried out using a base model corresponding to the original intake manifold of the Renault K7M engine, and it was compared with an optimized design that incorporates the resonance frequency calculated according to Helmholtz theory. Real measurements were used to obtain key parameters such as inlet velocity, enabling the determination of volumetric efficiency in both configurations. **Results:** The optimized design showed a significant improvement in the average outlet velocity of the intake manifold flow. The velocity increased by 59.83%, which led to an improvement in volumetric efficiency. **Conclusion:** The shortening of the intake manifold to the length calculated using Helmholtz theory made it possible to amplify the air velocity entering the cylinders, demonstrating that this theory can be used to improve the volumetric efficiency of the engine at the RPM range where it reaches its maximum power output.

Keywords: resonance, wave, flow, simulation, phenomenon, Helmholtz.

Introducción

El presente estudio tiene como objetivo principal analizar el comportamiento del flujo de aire en un múltiple de admisión de motor de combustión interna a través de una simulación computacional, siendo la simulación CFD la herramienta de evaluación, haciendo uso de la teoría del resonador de Helmholtz. La cual plantea que, al aprovechar determinadas frecuencias de resonancia acústica, se puede mejorar la velocidad de ingreso del aire a las cámaras de combustión, incrementando así la eficiencia volumétrica del motor

En los motores de combustión interna atmosféricos, la eficiencia volumétrica se ve ampliamente limitada por la geometría del sistema de admisión, a partir de esto se debe considerar la condición de altitud de las diferentes ciudades, en el caso de Quito en la cual existe una gran altitud con respecto al nivel del mar se genera el fenómeno natural de reducción de densidad de aire lo que también reduce la cantidad de masa de aire disponible para que aspire el motor.

A partir de esto surge la necesidad de analizar si la aplicación de la teoría de Helmholtz mediante la modificación de la longitud del conducto de admisión y su evaluación por CFD permite evidenciar mejora en la velocidad de entrada a las cámaras de combustión y lo que esto conlleva.

De este modo el diseño original del múltiple de admisión puede ser optimizado para aprovechar el fenómeno acústico generado por un resonador de Helmholtz, a pesar que la teoría de resonancia de Helmholtz ya ha sido estudiada por el hombre, existen limitaciones para una aplicación practica por ello se opta por una simulación CFD.

La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite resolver numéricamente las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía para el análisis de flujos complejos. En aplicaciones de ingeniería, el uso de modelos de turbulencia basados en el promedio de Reynolds (RANS) constituye una aproximación eficiente y ampliamente validada para el estudio de flujos internos, como los presentes en conductos y sistemas de admisión.

En este contexto, los modelos de turbulencia de dos ecuaciones permiten representar de manera adecuada los efectos de la turbulencia sobre el comportamiento del flujo, manteniendo un balance entre precisión y costo computacional, lo que los hace apropiados para simulaciones de ingeniería aplicada. (Wilcox, 2006)

Para ello serán de utilidad los siguientes objetivos específicos, siendo el primero Determinar la variación de la velocidad y el caudal del aire en el múltiple de admisión a partir de simulaciones que incorporen la frecuencia de resonancia calculada según la teoría de Helmholtz. Una vez concluido este apartado podremos validar el diseño optimizado del múltiple de admisión mediante el análisis comparativo de la eficiencia volumétrica obtenida, frente a la configuración original del motor Renault K7M, no sin antes haber aplicado modelos matemáticos de resonancia acústica para calcular la frecuencia y longitud de conducto requeridas para maximizar el llenado de aire en el múltiple de admisión del motor Renault K7M y así validar o descartar la teoría en este caso.

El resonador de Helmholtz fue desarrollado por el médico y físico alemán Von Helmholtz a mediados del siglo XIX, este consiste en una cavidad rígida y un tubo que conecta el volumen interior con el exterior, esto es lo mismo a tener una masa unida a un resorte donde la masa sería el aire contenido en el tubo y el resorte sería el volumen de aire. (Sérgio de Morais Hanriot, 2019)

Durante décadas se ha venido trabajando en el diseño y funcionamiento del motor de combustión interna, con el fin de hacerlo cada vez más una máquina más eficiente. Hoy en día la mayor preocupación ronda en torno a la idea de la potencia y el consumo de combustible que se obtiene del motor de un vehículo. Uno de los procesos más importantes, que define qué tanta potencia y rendimiento es posible obtener del motor, es la cantidad de aire que se logra introducir a la cámara de combustión para cada revolución. (PULKRABEK, 1997).

Para el desarrollo de este estudio se utilizará como base el múltiple de admisión del motor Renault K7M, sobre el cual se realizará una simulación CFD por sus siglas en inglés

(Computational Fluid Dynamics). En primer lugar, se determinará la frecuencia de resonancia correspondiente al régimen de potencia máxima del motor y, a través de este dato, se calculará la longitud correspondiente al conducto del resonador, se analizará las velocidades que se puede alcanzar con diferentes longitudes de este ducto y se realizará el diseño hipotético del mismo. La CFD resulta atractiva para la industria ya que es más rentable que las pruebas físicas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que las simulaciones de flujo complejas son desafiantes y propensas a errores, y se requiere de una gran experiencia en ingeniería para obtener soluciones validadas. (Rajesh Bhaskaran, 2002)

El enfoque metodológico adoptado es de tipo experimental y simulativo computacional, basado en el uso de modelos matemáticos de resonancia, propiedades físicas del motor, y análisis de resultados obtenidos mediante software de simulación. La estructura del estudio incluye una revisión teórica de los fundamentos de la resonancia de Helmholtz, la formulación matemática necesaria para el cálculo de frecuencia y velocidad, el desarrollo del modelo CFD y la posterior interpretación de los resultados para validar el comportamiento del flujo. Se puede ahora dar un rápido recorrido por las diferentes ramas de la ciencia que intentan explicar el mundo material en que vivimos, para ver donde están ubicados los conocimientos correspondientes a Mecánica de Fluidos. (Pasinato, 2008)

El sustento de esta investigación es la de a través de dicha modificación es la de mejorar el flujo de aire hacia el interior de las cámaras de combustión. Se estima que, al incrementar el aire que ingresa, se logrará una mezcla aire-combustible más eficiente, lo cual podría favorecer a la reducción del consumo de combustible como se menciona en el estudio de Montero, siempre se ha buscado mejoras en los diferentes sistemas de los vehículos inclusive desde el primero que se tiene registro siendo el Benz Patent-Motorwagen. Los vehículos han cambiado mucho desde ese primer vehículo. (Montero, 2021)

Marco Teórico

En el estudio de motores de combustión interna, es fundamental comprender que una combustión eficiente depende de múltiples factores y existen elementos indispensables que

se requiere para dicha combustión, un suministro adecuado de aire y combustible a la cámara de combustión, así como una ignición efectiva mediante una chispa o detonante. En particular, la cantidad y velocidad del aire que ingresa al cilindro juegan un papel crucial en la formación de una mezcla aire-combustible óptima.

En condiciones geográficas como las de la ciudad de Quito, donde la altitud reduce la densidad del aire, se vuelve aún más importante maximizar el ingreso de aire al motor. Por esto el planteamiento de este estudio enfoca el diseño del múltiple de admisión en una configuración donde permita captar la mayor cantidad de aire posible y generar condiciones favorables de flujo que potencien su velocidad de entrada.

El presente estudio se justifica desde el punto de vista técnico y académico ya que permite analizar la aplicación del fenómeno de resonancia de Helmholtz como una alternativa a los sistemas de sobrealimentación y así mejorar la eficiencia volumétrica de una forma más simple. Su importancia radica en demostrar que es posible mejorar la eficiencia volumétrica de un motor atmosférico al aprovechar fenómenos acústicos naturales ajustando el diseño del múltiple de admisión sin incrementar sistemas mecánicos al motor y así aumentar su complejidad.

Con el fin de analizar y optimizar este fenómeno, el presente estudio se basa en el principio de resonancia de Helmholtz, que permite identificar condiciones acústicas que refuerzan el ingreso de aire. A partir del cálculo de la frecuencia de resonancia y su relación con la longitud del conducto, se hará uso de ANSYS para realizar simulaciones CFD que permitan analizar el comportamiento aerodinámico del flujo de aire dentro del múltiple, evaluando su velocidad y caudal volumétrico en distintas condiciones y según se obtenga el resultado de la longitud del conducto teórico de dicho fenómeno se realizará un modelo geométrico en el software SolidWorks.

Eficiencia Volumétrica

Durante décadas se ha trabajado en el diseño y funcionamiento del motor de combustión interna, con el fin de hacerlo cada vez más una maquina más eficiente. Hoy en día la mayor preocupación ronda entorno a la idea de la potencia y el consumo de combustible que se obtiene del motor de un vehículo. Uno de los procesos más importantes, que define que tanta potencia y rendimiento es posible obtener del motor, es la cantidad de aire que se logra introducir a la cámara de combustión para cada revolución (PULKRABEK, 1997).

La eficiencia volumétrica más conocida como EV, es la capacidad del motor de aspirar la mezcla aire-combustible en forma de volumen, la cual entra a los cilindros al momento de la carrera de admisión. Debido a las dimensiones de los conductos y el número de válvulas que posee el motor, se logra tener distintas eficiencias; la cantidad de volumen de aire que ingresa al motor en cualquier latitud es mucho menor comparada con la cantidad que ingresa a nivel del mar, siendo estas ideales, la relación del volumen ideal (VP) con el volumen real (VA) se denomina eficiencia volumétrica. (Carlos Jarro, 2020)

La eficiencia volumétrica de un motor de combustión interna es la proporción de aire que ingresa al cilindro respecto al volumen teórico disponible. Uno de los métodos más eficaces para mejorar dicha eficiencia, evidenciada principalmente en motores atmosféricos, es a través del aprovechamiento de fenómenos acústicos, como en este caso lo es la resonancia de Helmholtz.

Volumen efectivo del cilindro

El volumen efectivo del cilindro es un término usado en campos de estudio dinámicos los motores de combustión interna, este hace referencia al volumen de aire real que actúa dentro de una situación específica en el cilindro del motor, en esta ocasión como lo es la admisión de aire.

En general en materia de motores el volumen efectivo se lo denomina a aquel que el pistón barre desde el punto muerto inferior hacia el punto muerto superior, por inferencia de

la construcción de motores se obtiene la siguiente ecuación la que permite determinar dicho volumen, tal que.

$$V_d = \frac{\pi}{4} D^2 * C \quad [\text{Ec. 1.1}]$$

Dónde:

V_d = Volumen desplazado

D = diámetro del *cilindro*

C = Carrera del pistón

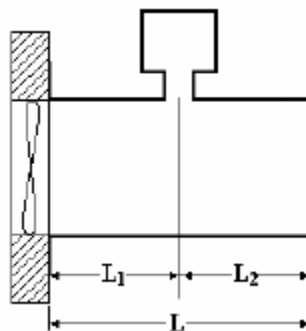
Esta fórmula no es más que el cálculo del volumen total que consigue empujar el pistón en función de su carrera.

Efecto de Helmholtz

Un sistema de masa resorte tiene la capacidad de oscilar en una única frecuencia por lo que esta frecuencia estará definida por el volumen de aire encerrado en la cavidad y las dimensiones del tubo, en forma general se tiene que mientras más grande sea el resonador más baja será su frecuencia de resonancia. (Sérgio de Morais Hanriot, 2019)

Figura 1.

Ejemplificación de resonador Helmholtz



Fuente: (Vásquez, 2006)

En los motores de combustión interna, los resonadores de Helmholtz se usan en los sistemas de admisión y escape para reducir el ruido generado por las ondas acústicas, especialmente cuando coinciden con su frecuencia natural. Estudios con resonadores de tubo variable han demostrado que no solo disminuyen el ruido en distintos rangos de RPM, sino que también mejoran el flujo másico de aire, lo que aumenta la eficiencia volumétrica del motor en un rango más amplio de funcionamiento.

El comportamiento del flujo de aire en el múltiple de admisión está influenciado por fenómenos dinámicos asociados a la propagación de ondas de presión generadas durante el proceso de admisión, las cuales dependen de la geometría del conducto y del régimen de operación del motor. La adecuada sintonización de la longitud del múltiple permite mejorar el llenado del cilindro y, por ende, la eficiencia volumétrica del motor (Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, 1988)

Frecuencia de resonancia

Se debe entender que el resonador Helmholtz se basa en un fenómeno acústico, el cual permite aprovechar las vibraciones que se generan en una cavidad cuando ingresa aire, de modo que se generan oscilaciones específicas las cuales permiten amplificar el efecto sonoro. En cuanto al tema automotriz este fenómeno permite aprovechar las ondas de presión que se generan durante la apertura y cierre de válvulas.

La fórmula básica de la resonancia de Helmholtz según el estudio realizado por (Vásquez, 2006) sería:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{L * V}} \quad [\text{Ec. 1.2}]$$

Fuente: (Vásquez, 2006)

Donde:

$f = \text{Frecuencia (Hz)}$
 $c = \text{velocidad del sonido (342.9 m/s)}$
 $S = \text{Área de la sección transversal del tubo (m}^2\text{)}$
 $L = \text{Longitud efectiva del cuello (m)}$
 $V = \text{Volumen de la cámara resonante (m}^3\text{)}$

Esta fórmula como tal debe de ser adecuada al ámbito automotriz donde es necesario hacer unas pequeñas consideraciones ya que se trata de un sistema dinámico. Para aplicar esta fórmula en el presente estudio hay que basarse en el volumen efectivo en el cilindro con una consideración. Dado que el volumen de resonancia en un motor no es constante no se puede hacer uso de la totalidad del volumen desplazado, la resonancia únicamente se dará en el tiempo de admisión, es decir cuando el pistón haya alcanzado su velocidad máxima lo cual es a mitad de carrera.

Por ello se debe aumentar el siguiente factor a la fórmula de frecuencia para adaptarlo al ámbito automotriz.

$$VD = \frac{2(CR-1)}{(CR+1)} \quad [\text{Ec. 1.3}]$$

Fuente: (PULKRABEK, 1997)

Donde:

$CR = \text{Relación de compresión del motor}$

$Vd = \text{Volumen desplazado}$

El factor detallado permite modelar de forma más precisa el comportamiento acústico del motor, ya que vincula el diseño del resonador con la dinámica de este estudio que es netamente en el tiempo de admisión.

El "2" multiplica el volumen a mitad de carrera para representar que el fenómeno de admisión ocurre en una fase más amplia, no solo en un instante. Ayuda a reflejar la dinámica real del aire entrando mientras el pistón baja y sube, dentro del rango efectivo de la válvula abierta.

De manera más simplificada la expresión $(CR-1)/(CR+1)$ se da porque el motor comprime el aire desde el volumen total es decir desde que empieza su carrera en la parte inferior hasta que sube al PMS y su volumen es mínimo.

$$CR = \frac{V_{maximo}}{V_{minimo}} = \frac{V_c + V_d}{V_c}$$

[Ec 1.4]

Donde:

CR = Relación de compresión del motor

V_{minimo} = Volumen de la cámara de combustión

V_{maximo} = Volumen desplazado + Volumen de la cámara de combustión

V_c = Volumen de la cámara de combustión

V_d = Volumen desplazado del cilindro

V_{maximo} hace referencia al volumen desplazado más el volumen de la cámara de combustión, no es más que la relación de compresión de un motor.

Con estas consideraciones se debe adecuar la ecuación de frecuencia hacia el enfoque de nuestra investigación.

Para definir el resonador de Helmholtz se debe emplear la fórmula de frecuencia de resonancia, la cual requiere de conocer el volumen del cilindro a media carrera ya que es donde el pistón alcanza su velocidad máxima. (Donoso, 2021).

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A * 2 * (CR - 1)}{L * Vd * (CR + 1)}}$$

[Ec 1.5]

Fuente: (Donoso, 2021)

Donde:

f = Frecuencia (Hz)

c = velocidad del sonido (342.9 m/s)

A = Área de la sección transversal del tubo (m^2)

L = Longitud del tubo (m)

Vd = Desplazamiento del motor (m^3)

CR = Relación de compresión

La teoría del resonador de Helmholtz dice que una cavidad interconectada a través de un conducto puede generar una resonancia acústica a una frecuencia determinada, esto genera ondas de presión las cuales se pueden aprovechar para incrementar tanto la velocidad de aire como la cantidad de aire que ingrese a la cámara de combustión. En el ámbito de motores automotrices el múltiple de admisión actúa como una cámara resonante en la cual si se encuentra la frecuencia se puede sincronizar las ondas de presión con la fase de admisión del motor.

Con esta aclaración y en referencia a la formula presentada con anterioridad y se debe realizar adecuaciones para determinar la frecuencia de resonancia en términos de las revoluciones por minuto del motor. Se adapta para calcular a qué velocidad del motor (rpm) ocurre la resonancia en el conducto de admisión, lo cual puede ser aprovechado para mejorar el llenado de aire y la eficiencia volumétrica del motor. De tal modo que se obtiene

$$N_t = \frac{955}{K} \times a \times \sqrt{\frac{A}{l \times \frac{Vd(CR + 1)}{2(CR - 1)}}} \quad [\text{Ec. 1.6}]$$

Fuente: (Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals., 1988)

Donde:

N_t = Velocidad de resonancia de afinación (r^{ev}/min)

a = velocidad del sonido (342.9 m/s)

A = Área efectiva del conducto de admisión (m^2)

l = Longitud efectiva del conducto de admisión (m)

K = Constante con valor 2 para la mayoría de motores

Vd = Desplazamiento del motor (m^3)

CR = Relación de compresión

Aplicación de la resonancia de Helmholtz en los sistemas de admisión de aire

La teoría de resonancia de Helmholtz describe un fenómeno acústico en cavidades cerradas, este ha podido ser llevado al ámbito automotriz de tal modo que permite optimizar

el funcionamiento de los sistemas de admisión de aire. Este principio busca mejorar la eficiencia volumétrica, es decir llenar los cilindros del motor con la mayor cantidad posible de aire posible durante la admisión.

Al diseñar un múltiple de admisión se puede ajustar su geometría de diferentes maneras, principalmente se puede variar el área de los conductos, longitud y el volumen total del sistema. Esto desembocaría en que la frecuencia de resonancia coincida con un régimen específico de revoluciones del motor. Esta resonancia permite aprovechar las ondas de presión generadas por el cierre de las válvulas, esto no causa interferencia con la entrada de aire si no refuerza el flujo de aire hacia los cilindros. En otros títulos se lo conoce como sobrealimentación dinámica.

El principal objetivo de la sobrealimentación nace en un intento de aumentar el rendimiento volumétrico del motor sin tener que aumentar la cilindrada del mismo, en el cual el tiempo de aspiración que resulta demasiado breve, sumado con los roces del aire en las paredes del múltiple de admisión, válvulas, filtros de aire y todo componente que pueda llegar a involucrarse en el sistema de admisión, suman una gran desventaja al motor debido a que el cilindro no alcanza el valor de la presión atmosférica y la potencia motor no alcanza en valor esperado. (Guaita, 2013)

Esta relación permite estimar la longitud del conducto que maximiza el efecto de resonancia a un determinado régimen de revoluciones, en este caso, 5250 rpm, correspondiente al punto de máxima potencia del motor Renault K7M. La correcta sintonización de esta geometría asegura un mejor aprovechamiento de las ondas de presión, lo que se traduce en un incremento de la eficiencia volumétrica y, por ende, del rendimiento del motor.

Flujometría

Los múltiples para el estudio están directamente influenciados por los fenómenos dinámicos, los cuales hacen referencia de un determinado fluido (aire – gases) que fluyen a través de un elemento. Para afianzar el tratamiento se hace en base a fórmulas de: caudal,

formula de Darcy, numero de Reynolds, perdidas: fricción, fluidos turbulentos, codos. (Mott, 1996)

Flujo volumétrico (Caudal)

El flujo volumétrico es el volumen de fluido que circula en una sección por una unidad de tiempo (Mott, 1996). La ecuación que describe este fenómeno se detalla a continuación.

$$Q=A*V \quad \text{[Ec. 1.7]}$$

Donde:

$Q = \text{caudal (m}^3/\text{s)}$

$A = \text{área de la sección transversal (m}^2\text{)}$

$V = \text{es la velocidad promedio del flujo (m/s)}$

Número de Reynolds

El Número de Reynolds, permite estudiar el comportamiento de un determinado fluido en movimiento cuando esta atraviesa por un conducto de diversas formas geométricas y diámetros donde hay pérdidas de energía por diversos factores que están detallados en la ecuación NR : velocidad promedio de flujo, diámetro del conducto, densidad del fluido, viscosidad dinámica del fluido. (Mott, 1996)

Un flujo lento y uniforme se conoce como flujo laminar, mientras que un flujo rápido y caótico se conoce como flujo turbulento. (Mott, 1996)

$NR < 2000$, flujo laminar

$2000 < NR < 4000$, región crítica

$NR > 4000$, flujo turbulento. (Mott, 1996)

$$N_r = \frac{V * D * P}{\mu} \quad [\text{Ec. 1.8}]$$

Donde:

NR = número de Reynolds

V = velocidad promedio de flujo (m/s, pie/s)

D = diámetro del conducto (m, pie)

P = densidad del fluido (kg/m³, slugs/pie³)

μ = viscosidad dinámica del fluido (*η*), (N.s/m²)

Los resultados permiten hallar datos numéricos de fricción más apegados a la realidad, dotando de factores para evaluar las características del material y sus dimensiones internas (diámetro y longitud). El diagrama requiere parámetros como: número de Reynolds, diámetro del conducto (obtiene la rugosidad de la tubería descrita por la letra épsilon (*ε*)). Los mismos que permite posicionar en los ejes de las abscisas y ordenadas.

Ecuación de Bernoulli

Al realizarse el análisis de fluidos, se debe considerar la ecuación de Bernoulli que es uno de los principios fundamentales que permite describir el comportamiento de un fluido en movimiento.

Esta ecuación surge del principio de la conservación de la energía, pero aplicado al volumen de un fluido que este fluye mediante una corriente lineal.

Existen variantes de esta ecuación para diferentes condiciones que puede presentar un fluido siendo la presentada a continuación su versión más general.

$$P + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{constante} \quad [\text{Ec. 1.9}]$$

Donde:

P = Presión estática del fluido (Pa)

ρ = densidad del fluido (kg/m³)

v = velocidad del fluido (m/s)

$g =$ aceleración de la gravedad
 $h =$ altura en relación con un plano de referencia (m)

El principio de Bernoulli establece que en situaciones donde no exista pérdidas de energía por fricción y con fluidos estacionarios la suma de sus presiones es constante a lo largo de toda la línea de análisis.

Esta ecuación surge de la aplicación de las leyes de Newton y el teorema de la energía cinética sobre fluidos en movimiento. Se deduce suponiendo un flujo que conserva la energía, estacionario (líneas de flujo suaves con velocidad, densidad y presión constantes en el tiempo) y un líquido incompresible. (Verónica Cecilia Delfosse, 2005)

Para su aplicación al presente estudio se deben realizar ciertas adecuaciones en esta ecuación a través de simplificaciones.

Dado que el análisis se hará en un elemento lineal es decir que su altura de desplazamiento no cambia tenemos que:

$$\rho gh_1 = \rho gh_2$$

[Ec. 1.10]

Donde:

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)
 $g =$ aceleración de la gravedad
 $h =$ altura en relación con un plano de referencia (m)

Por lo tanto, el término ρgh se elimina de la ecuación dado que su resolución tiene un valor de 0.

Ahora se analizan los siguientes términos de la ecuación donde:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2$$

[Ec. 1.11]

Donde:

$P1, P2 =$ Presión estática (Pa)

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

$v1, v2 =$ velocidad del fluido (m/s)

Se asume a P1 a la presión atmosférica y como P2 a la presión interna del múltiple, como v1 que es el flujo inicial el cual parte del reposo su valor es 0. Entonces la ecuación simplificada queda del siguiente modo.

$$P1 = P2 + \frac{1}{2}\rho v2^2$$

[Ec. 1.12]

Donde:

$P1, P2 =$ Presión estática (Pa)

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

$v1, v2 =$ velocidad del fluido (m/s)

Ahora con esta expresión se puede obtener una ecuación que permita determinar el valor de la velocidad del aire en el múltiple de admisión, la ecuación a utilizar sería.

$$v2 = \sqrt{\frac{2(P1 - P2)}{\rho}}$$

[Ec. 1.13]

Donde:

$P1, P2 =$ Presión estática (Pa)

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

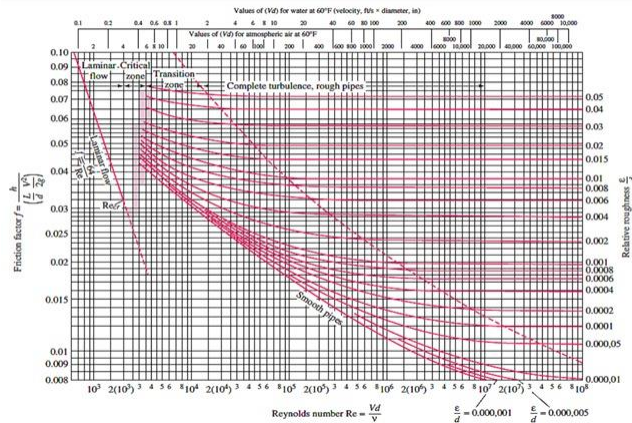
$v1, v2 =$ velocidad del fluido (m/s)

En resumen, se pasó de la fórmula general de Bernoulli a una forma simplificada, la cual permite calcular la velocidad del aire que ingresa al múltiple de admisión utilizando la diferencia de presión entre el ambiente y el interior del múltiple de admisión.

Diagrama de Moody

El diagrama de Moody es una herramienta grafica que permite determinar el coeficiente de fricción (f) que se requiere para calcular las perdidas por fricción en la fórmula de Darcy Weisbach. Este factor se obtiene del diagrama en mención únicamente en casos donde se trate de un fluido turbulento.

Figura 2.
Diagrama de Moody



Fuente: (Demarchi, 2025)

Software de SolidWorks

En la actualidad existen softwares computacionales que permiten el desarrollo de piezas, sistemas y mecanismos en un entorno virtual 3D, no limitado únicamente al sector automotriz. Esto por lo general se denomina software CAD, el cual permite analizar comportamientos y fenómenos directamente relacionados con el componente desarrollado aun cuando este no haya sido contruido.

Las soluciones de SOLIDWORKS® se centran en la forma en que se trabaja a diario, ofreciendo un entorno de diseño en 3D integrado e intuitivo que abarca todos los aspectos del desarrollo del producto y que contribuye a maximizar la productividad del diseño y la producción. (Moises, 2016)

La aplicación del software CAD en la ingeniería abarca la elaboración de cuadros sinópticos, diagramas de diversos tipos, gráficos estadísticos, representación normalizada de piezas para su diseño y fabricación, representación tridimensional de modelos dinámicos en

multimedia, análisis mediante el método de elementos finitos, aplicaciones en realidad virtual, robótica, etc. (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

ANSYS

A diferencia de los entornos CAD, que están orientados principalmente al diseño geométrico tridimensional, ANSYS se enfoca en la simulación de condiciones reales de operación, permitiendo predecir cómo responderá un componente ante esfuerzos, deformaciones, variaciones de temperatura o interacción con fluidos, incluso si este no ha sido fabricado. Esto lo convierte en una herramienta esencial para la validación virtual de productos, ayudando a optimizar diseños, reducir fallos en etapas posteriores y disminuir significativamente los costos de desarrollo. (Inc., 2025)

Variables de estudio

Variable independiente: Longitud del conducto de admisión, frecuencia de operación (en base a las RPM del motor), diseño geométrico del múltiple de admisión en sus dos versiones (modelo estándar vs modelo con la aplicación de la resonancia de Helmholtz)

Variables dependientes: Velocidad de ingreso de aire, eficiencia volumétrica. Presión dinámica en el múltiple de admisión, comportamiento del flujo (turbulencia y distribución)

Variables de control: Diámetro del conducto de admisión (28mm), área efectiva de entrada ($A=24.6 \text{ cm}^2$), relación de compresión (9.1:1), volumen desplazado del motor (1598.38 cm^3), material y motor seleccionado.

Estas variables, incluyendo como variable dependiente la velocidad y caudal del flujo de aire, como variables independientes las dimensiones geométricas del múltiple de admisión y la frecuencia de resonancia, y como variables de control las condiciones de contorno (presión y entrada de aire), serán evaluadas a través de simulaciones CFD desarrolladas en ANSYS Fluent con modelos geométricos generados en SolidWorks. Para validar la

confiabilidad de los resultados y determinar si los cambios geométricos tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la eficiencia volumétrica se realizará una comparativa entre las situaciones. Esto permite establecer una base cuantitativa sólida para justificar mejoras en el diseño del múltiple.

En el presente estudio la relación entre las variables se establece desde el análisis del comportamiento del flujo de aire dentro del múltiple de admisión del motor Renault K7M, considerando la influencia que tendrá el fenómeno de resonancia de Helmholtz en el comportamiento del flujo de aire buscando la optimización una mejor de velocidad de la entrada de aire a la cámara de combustión.

La longitud del conducto de admisión se define como la variable independiente la cual fue desarrollada en base de la frecuencia de resonancia calculada en el régimen de revoluciones del motor donde este genera la potencia máxima. Esta variación influye directamente en el comportamiento del flujo de aire en el múltiple de admisión.

Esta modificación de la longitud del conducto consigue afecta a las variables dependientes, siendo estas la velocidad de ingreso del aire, caudal volumétrico y consecuentemente la eficiencia volumétrica del motor. Esto teóricamente se conseguiría al reforzar las ondas de presión durante la fase de admisión.

Materiales y Métodos

Para el desarrollo de la presente investigación los materiales necesarios son los detallados a continuación que en su mayoría la componen:

- Computadora: Esencial para poder utilizar el software que se requiere para la simulación y análisis de datos
- Software de SolidWorks: Necesario para poder realizar el diseño del múltiple de admisión el cual será dirigido a otro software para la simulación.

- Software de ANSYS: Este software computacional es esencial con la finalidad de llevar a cabo el análisis de fluidos en ambos casos del múltiple de admisión.
- Diseño del Múltiple de admisión: Necesario como sujeto en el cual se va a llevar a cabo la simulación y se determinara las variaciones respectivas.
- Método: Simulación computacional

La investigación se desarrolló a través de un entorno virtual para lo que se empleó un computador con ciertos requisitos los cuales permitan la ejecución de los softwares respectivos para las simulaciones.

Para el desarrollo de esta investigación se hizo uso de herramientas de ingeniería asistida por computador las cuales permiten modelar y analizar con precisión el comportamiento del flujo de aire en el múltiple de admisión. El software SolidWorks será empleados para el diseño tridimensional del múltiple, permitiendo representar su geometría y realizar los ajustes necesarios en base a los parámetros de resonancia de Helmholtz que se vayan determinando. Posteriormente, los modelados generados se deben exportar hacia el software ANSYS, donde se llevará a cabo la parte más importante de la investigación que es la simulación CFD. Este análisis permitirá una visualización clara de la distribución del flujo, velocidades, presión y fenómenos de resonancia dentro del conducto y que a través de lo evidenciado se pueda validar el diseño propuesto en referencia al objetivo de mejorar la eficiencia volumétrica.

Esta investigación presenta un enfoque cuantitativo dada la naturaleza comparativa de la misma y dado que puede aplicarse a un entorno real. Se procederá con el diseño del múltiple en base a las especificaciones adquiridas de este motor obtenidas en la fuente de (MotorReviewer, 2014). Se desarrollará un múltiple de admisión y se someterá a una simulación tras las consideraciones del principio del resonador Helmholtz, de este modo se podrá establecer una comparativa entre los casos respectivos.

Motor K7M de Renault

El motor K7M fue desarrollado por la marca Renault, es una máquina de combustión interna de gasolina con una cilindrada de 1.6 Litros, de manera más específica son 1598 cm^3 de masa de aire que alcanzan sus 4 cilindros de aire dispuestos en línea. Para realizar los cálculos referentes a las simulaciones realizarse en el múltiple de admisión se debe obtener ciertos datos y especificaciones del motor las cuales fueron encontradas a través de un manual de compra.

Tabla 1.
Especificaciones del motor K7M de Renault.

Parámetro	Valor aproximado
Cilindrada	1598 cm^3
Diámetro de los cilindros	79.5 mm
Carrera de los pistones	80.5 mm
Relación de compresión	9.5:1
Diámetro válvula de admisión	33 mm
Diámetro válvula de escape	28 mm
Diámetro de conductos del múltiple de admisión	28 mm
Longitud conductos del múltiple de admisión	350 mm
Diámetro de entrada del cuerpo de aceleración	60 mm
Numero de cilindros	4
Material del múltiple de admisión	Plástico reforzado (polímero)

Fuente: (MotorReviewer, 2014)

Sin embargo, para dimensionar de manera adecuada el fenómeno asociado al efecto Helmholtz, en función de las revoluciones a las que se realiza la simulación, es necesario efectuar una serie de cálculos que permitan determinar, principalmente, la longitud equivalente del conducto relacionada con dicho fenómeno. Cabe señalar que estos cálculos se emplean con fines analíticos y de modelado, sin considerar la incorporación física de un resonador Helmholtz dentro del múltiple de admisión y más bien enfocándose en cómo sería el comportamiento del fenómeno anteriormente mencionado.

Primero se debe de determinar el tiempo que dura la admisión del motor en mención a determinadas revoluciones con el objetivo de establecer la frecuencia requerida para sintonizar el ingreso de aire de acuerdo con el comportamiento teórico del efecto Helmholtz.

El tiempo para determinada fase en el motor se da a través de una relación entre la distancia angular en la que se da dicho evento y la velocidad de este, dando de este modo la siguiente ecuación.

$$t = \frac{\text{Desplazamiento angular}}{\text{Velocidad angular}}$$

[Ec. 1.14]

Donde:

t = Tiempo donde la válvula de admisión está cerrada (s)

Para esto se debe de hallar la velocidad de dicha fase teniendo en cuenta las revoluciones del motor.

En este estudio es esencial la 5250 RPM como frecuencia objetivo de la resonancia con el motor K7M de Renault ya que es en este régimen donde el motor entrega su máxima potencia. Debe entenderse que esta condición es crítica porque según la teoría de resonancia de Helmholtz se puede optimizar el llenado de aire en los cilindros del motor cuando se consigue sintonizar el sistema de admisión a la misma frecuencia que las oscilaciones de presión generadas por el motor. Para diseñar esta geometría se tiene que considerar que para coincidir con esta frecuencia se logra una mayor eficiencia volumétrica en el momento de mayor potencia y consecuentemente mayor exigencia del motor, de este modo el funcionamiento en general del motor se ve beneficiado puesto que genera una mejor respuesta y aprovechamiento de aire sin la necesidad de recurrir a sistemas complejos de sobrealimentación.

Con lo cual se procederá a realizar el cálculo en el rango de revoluciones donde el motor entrega la máxima potencia, las cuales según su ficha técnica van de las 5000 a 5500

RPM (MotorReviewer, 2014), dado que este dato es variable, se hará uso del punto medio de estas revoluciones y por lo que se emplea un valor de 5250 RPM, como se sabe una revolución equivale a 360° entonces se pueden convertir estas revoluciones por minuto a grados por segundo, de este modo haciendo una analogía se obtiene la siguiente ecuación.

$$Velocidad\ angular = RPM \times \frac{360^\circ}{1\ rev} \times \frac{1\ min}{60s}$$

[Ec. 1.15]

Donde:

RPM = Revoluciones por minuto

A continuación, se procede con el despeje de esta fórmula con un régimen de funcionamiento del motor de 5250 RPM que es el valor de revoluciones donde el vehículo brinda su máxima potencia.

$$Velocidad\ angular = 5250 \times \frac{360}{60}$$

$$Velocidad\ angular = \frac{31500^\circ}{s}$$

Posteriormente, para determinar el desplazamiento angular se debe de realizar una inferencia en cuanto a los grados del cigüeñal en los que hace la apertura y cierre la válvula de admisión según el manual del motor K7M.

Tabla 2.

Grados de apertura y cierre de válvula motor K7M.

	Válvula de admisión	Valor de escape
Retraso apertura admisión	-8°	
Retraso cierre admisión	27°	
Avance apertura escape		29°
Avance cierre escape		-2°

Fuente: (Renault, 2004)

Esta tabla indica que la válvula de admisión se abre 8° antes de que el pistón llegue al punto muerto superior y de que comience el tiempo de admisión. Así mismo la tabla también indica que la válvula de admisión se cierra 27° después de que el pistón alcance el punto muerto inferior.

La carrera de admisión que realiza el motor es equivalente a 180° ya que corresponde a medio giro del cigüeñal, a esto se debe añadir los grados detallados en la tabla 2. De tal modo se obtiene el siguiente resultado.

$$180^\circ (\text{Carrera}) + 8^\circ + 27^\circ = 215^\circ$$

[Ec. 1.16]

Donde:

$180^\circ =$ *Ángulo que dura una carrera*

$215^\circ =$ *Ángulos que permanece abierta la válvula de admisión*

De este modo se establece que la válvula de admisión permanece abierta durante 215° en un ciclo completo de funcionamiento. Dado de que el fenómeno de resonancia de Helmholtz requiere de la presión interna que genera el cilindro cuando la válvula de admisión ya ha sido cerrada. La idea es que la onda de presión se refleje en el ducto del dispositivo, rebote y regrese justo antes de que la válvula de admisión vuelva a abrirse nuevamente.

Entonces como un ciclo completo del motor tiene 2 vueltas del cigüeñal se consideran 720° del cual se descontará el valor percibido con anterioridad.

$$720^\circ - 215^\circ = 505^\circ$$

Se establece que son 505° los que la válvula de admisión permanece cerrada, dato que será empleado para calcular la frecuencia en la que oscilará dentro de los cálculos para el fenómeno de Helmholtz. Primero se despeja el tiempo que dura la válvula cerrada a través de las referencias angulares.

$$t = \frac{505^\circ}{31500^\circ/s}$$

$$t = 0.016 \text{ s}$$

Donde:

t = Tiempo donde la válvula de admisión está cerrada en relación a las referencias angulares

[Ec. 1.16]

Ahora se obtiene que este tiempo dura 0.016 segundos, sin embargo, se empleará este dato para determinar la frecuencia de este evento durante el un ciclo del motor, despejando esta incógnita a través de la fórmula tradicional de frecuencia.

$$f = \frac{1}{t}$$

[Ec. 1.17]

Donde:

f = frecuencia del evento a analizar (Hz)

t = Tiempo donde la válvula de admisión está cerrada en relación a las referencias angulares (s)

$$f = \frac{1}{0.016 \text{ s}}$$

$$f = 62.5 \text{ Hz}$$

Ahora por su parte para hallar el valor de *A* que corresponde a la sección transversal de tubo la cual la se obtiene haciendo una relación con el diámetro de los conductos de admisión los cuales obtenemos de la tabla 1 calculando así el equivalente al área de los cuatro ductos que será el espacio que se debería abarcar para llenar el sistema.

De este modo se obtiene lo siguiente.

$$A = \frac{\pi * D^2}{4}$$

[Ec. 1.18]

Donde:

A = Área transversal (m²)

$D = \text{Diámetro del conducto (m)}$

$$A = \frac{\pi * (0.028)^2}{4}$$
$$A = 0.000615 \text{ m}^2$$

Este valor se debe multiplicar por cuatro dado que son 4 los conductos que posee este múltiple de admisión.

$$A = 0.000615 \text{ m}^2 \times 4$$

[Ec. 1.19]

Donde:

$A = \text{Área transversal (m}^2\text{)}$

$$A = 0.00246 \text{ m}^2$$

Ahora juntamente con las especificaciones del motor se procede a reemplazar estos datos en la fórmula de la frecuencia de resonancia de Helmholtz adaptada al ámbito automotriz que toma como referencia las revoluciones específicas donde se quiere encontrar esta coincidencia acústica.

$$N_t = \frac{955}{K} \times a \times \sqrt{\frac{A}{l \times \frac{Vd(CR + 1)}{2(CR - 1)}}}$$

[Ec. 1.6]

Donde:

$N_t = \text{Velocidad de resonancia de afinación (rev/min)}$

$a = \text{velocidad del sonido (342.9 m/s)}$

$A = \text{Área efectiva del conducto de admisión (m}^2\text{)}$

$l = \text{Longitud efectiva del conducto de admisión (m)}$

$K = \text{Constante con valor 2 para la mayoría de motores}$

$Vd = \text{Desplazamiento del motor (m}^3\text{)}$

$CR = \text{Relación de compresión}$

A través de esta ecuación, se logra determinar la longitud del conducto con la cual se dimensiona el resonador de Helmholtz desde un enfoque teórico, dado que se conocen las revoluciones a las cuales se busca beneficiar la velocidad de ingreso de aire.

$$5250 = \frac{955}{2} \times 342.9 \times \sqrt{l \times \frac{24.6}{\frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}}}$$

$$l = 24.02 \text{ cm}$$

La longitud del conducto de admisión $l = 24.02 \text{ cm}$ se obtuvo a través de la fórmula de resonancia de Helmholtz para el ámbito automotriz, en función del área efectiva de entrada del sistema de admisión y de la frecuencia donde se tiene como objetivo mejorar el rendimiento, siendo este régimen a las 5250 RPM donde brinda la potencia máxima este motor. El valor obtenido representa la longitud ideal que debería tener el conducto para generar el fenómeno de resonancia acústica que coincida con la frecuencia natural de la admisión de aire permitiendo así una sobrealimentación a los cilindros.

Este resultado permite aplicarlo a un diseño tridimensional en un software computacional para maximizar la eficiencia volumétrica mejorando el efecto de llenado del cilindro lo que representa una mejoría en el desempeño del motor.

Este valor teórico sirve como base para el diseño del modelo geométrico en SolidWorks, el cual será posteriormente evaluado mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) en ANSYS Fluent, con el objetivo de verificar su comportamiento real bajo condiciones dinámicas y validar la hipótesis de mejora en la eficiencia del sistema de admisión. “La simulación CFD permite analizar el comportamiento del flujo con alta precisión (Rajesh Bhaskaran, 2002)”

Representación del Conducto de admisión

Para tener una idea más clara de la geometría asociada con el cálculo de la longitud del conducto de admisión se presentan los siguientes esquemas siendo uno basado en un concepto más teórico y simplificado y el otro en un caso más real llevado a un aspecto similar a un múltiple de admisión.

Figura 3.

Representación teórica del conducto



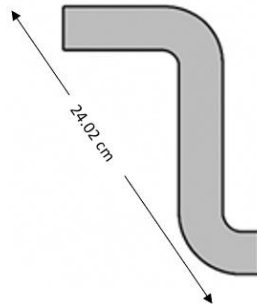
$$l = 24.02 \text{ cm}$$

Fuente: (Autores)

El siguiente esquema corresponde a la representación simplificada del conducto ideal, utilizado para el cálculo teórico de la longitud de resonancia. En este modelo, el conducto se considera recto y de sección constante, este modelo proporciona un punto de partida matemáticamente manejable y permite validar el diseño real mediante comparación con los resultados obtenidos por simulación CFD. A pesar de su simplicidad, el modelo idealizado es esencial para entender la fundamentación teórica y justificar el diseño final del sistema de admisión.

Figura 4.

Representación del conducto aplicado el fenómeno de Helmholtz



Fuente: (Autores)

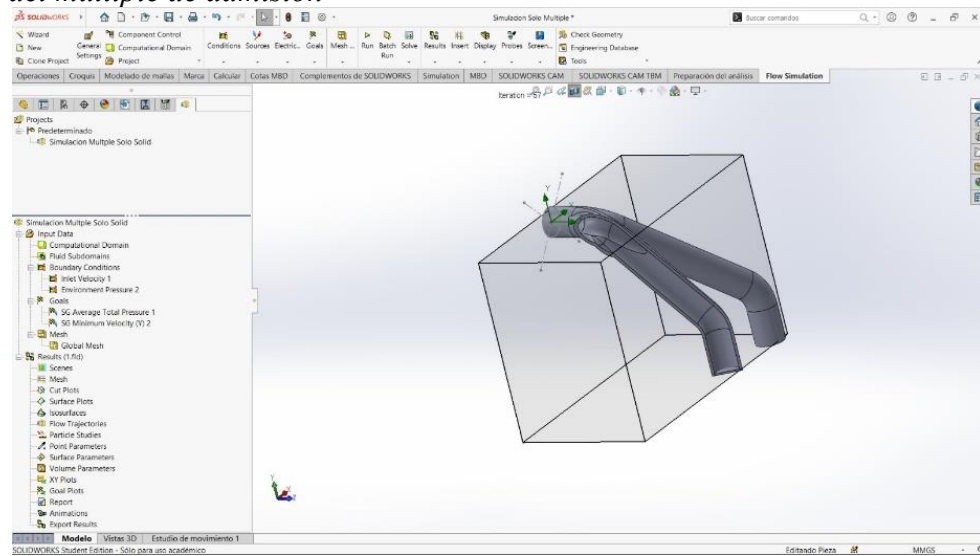
El siguiente esquema representa el diseño real aproximado del conducto de admisión del motor Renault K7M, por su parte el modelo real del múltiple de admisión posee una longitud de 35 cm y el calculado con el fenómeno de Helmholtz es de 24.02 cm. Este conducto presenta múltiples curvaturas y transiciones geométricas adaptadas al espacio disponible en el compartimiento del motor. El diseño calculado mantiene una longitud efectiva (l) de aproximadamente 24.02 cm, valor clave que coincide con la longitud de resonancia calculada. Esta coincidencia permite que el conducto aproveche el fenómeno de resonancia de Helmholtz para mejorar la eficiencia volumétrica del motor, particularmente en el régimen de 5250 RPM, donde se entrega la potencia máxima. La geometría se modelará en SolidWorks y se someterá a simulación CFD en ANSYS Fluent para observar el comportamiento del flujo en condiciones reales de operación.

Diseño CAD del múltiple con resonador Helmholtz

Para el diseño del múltiple de admisión se consideran los datos técnicos del motor previamente definidos, así como los parámetros obtenidos del análisis del efecto Helmholtz, los cuales se emplean como referencia para la definición de la longitud equivalente del conducto. Cabe destacar que dichos parámetros se utilizan exclusivamente con fines de diseño y simulación, sin contemplar la incorporación de un resonador Helmholtz como dispositivo físico dentro del múltiple de admisión.

Asimismo, se considera que el material seleccionado para este conjunto es plástico, con el fin de aproximar el modelo lo más posible a las condiciones reales de fabricación. El diseño del múltiple de admisión se desarrolla mediante el software SolidWorks, obteniéndose hasta el momento un resultado preliminar que servirá como base para las etapas posteriores de simulación y análisis.

Figura 5.
Diseño del múltiple de admisión

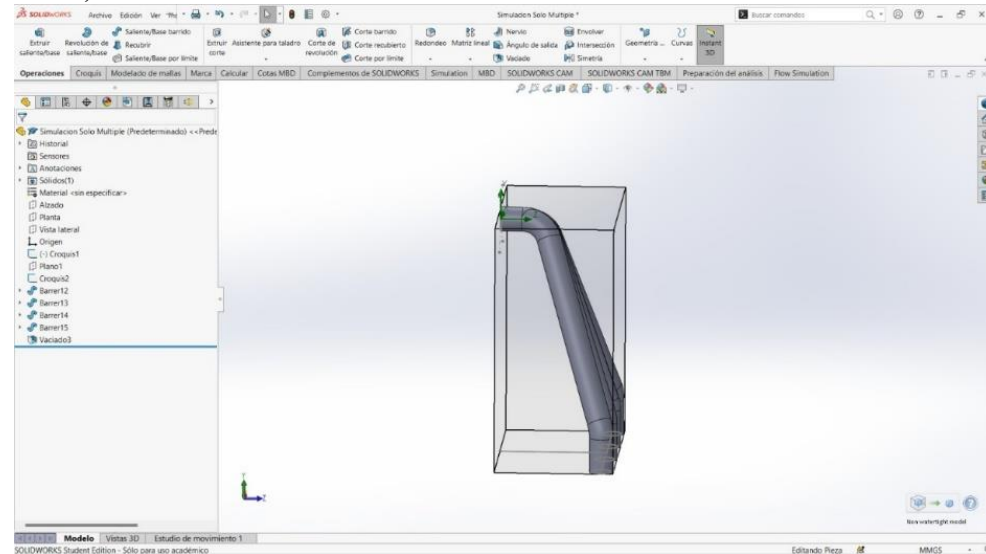


Fuente: (Autores)

Con el objetivo de evaluar el efecto de la resonancia en el comportamiento del aire en la admisión, se desarrollaron dos diseños de conducto: uno teórico, basado en las especificaciones obtenidas del motor según el fabricante, es decir que simula un caso real de funcionamiento en dicho motor y otro basado optimizado, basado en los principios de la resonancia de Helmholtz. Ambos fueron elaborados en SolidWorks para su posterior simulación CFD.

Figura 6.

Modelo 3D del múltiple de admisión con geometría original del fabricante para el motor Renault K7M, elaborado en SolidWorks



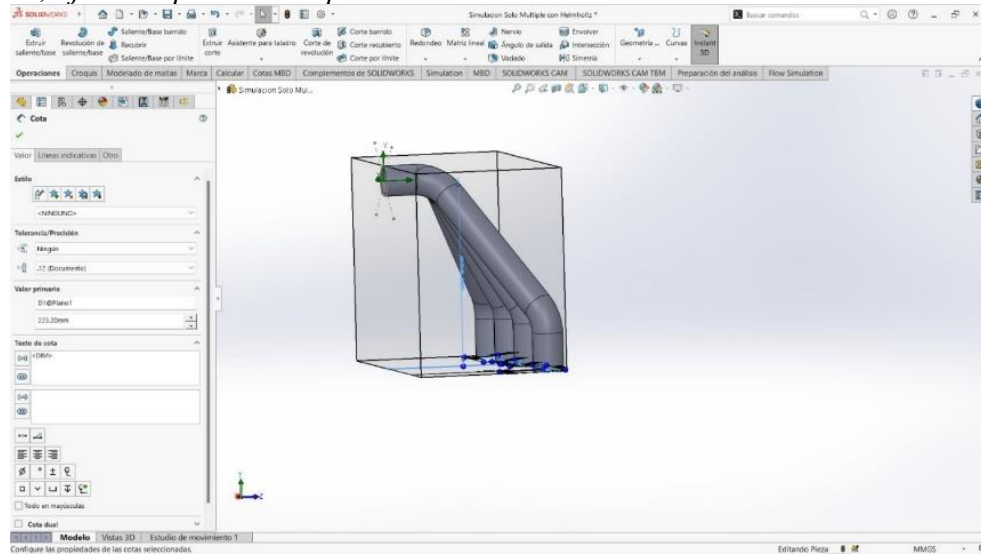
Fuente: (Autores)

Este primer modelo corresponde al diseño original del múltiple, basado en las especificaciones geométricas proporcionadas por el fabricante del motor Renault K7M, simulando el comportamiento real bajo condiciones nominales.

Por otro lado, se desarrolló un segundo diseño optimizado del múltiple de admisión, basado en el principio de resonancia de Helmholtz que en teoría busca optimizar el ingreso de aire hacia las cámaras de combustión. Este diseño busca maximizar la eficiencia volumétrica en el régimen de 5250 rpm, frecuencia a la cual el motor K7M alcanza su potencia máxima.

Figura 7.

Modelo 3D del múltiple de admisión optimizado mediante la teoría de resonancia de Helmholtz, ajustado para 5250 rpm.



Fuente: (Autores)

A partir de la ecuación de resonancia, se calculó una longitud óptima del conducto de 24.02 cm, la cual fue utilizada como base para la geometría del nuevo diseño. Este modelo fue elaborado también en SolidWorks, procurando mantener características geométricas compatibles con el sistema de admisión original, pero con un enfoque funcional orientado al aprovechamiento del efecto de resonancia.

Una vez finalizados los modelos 3D de los diseños del múltiple de admisión en el software Solid Works se debe dar paso a la simulación computacional de dinámica de fluidos (CFD) respectivas en ambas situaciones haciendo uso del software ANSYS. Este tipo de simulación no permite visualizar y cuantificar el comportamiento del flujo de aire dentro de los conductos bajo las condiciones específicas de operación del motor como en este caso lo será el régimen de revoluciones.

Mediante este proceso se busca realizar una comparativa del desempeño aerodinámico interno entre el diseño estándar y el optimizado por la resonancia considerando la velocidad del flujo y presión estática. Una simulación CFD es una herramienta fundamental para evaluar de manera virtual la eficiencia de un diseño antes de su

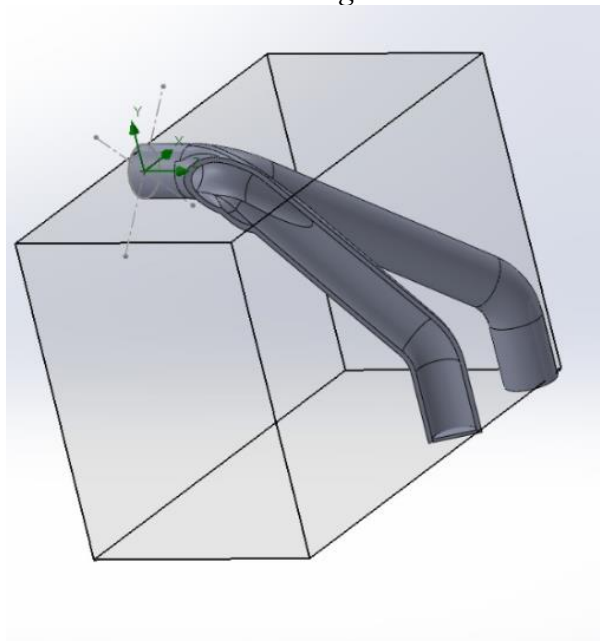
implementación real, de este modo se puede garantizar un enfoque experimental más preciso y con menor margen de error que se traduce a una reducción en costos.

Simulación CFD mediante ANSYS

Para empezar con la simulación de los diseños del múltiple de admisión que fueron desarrollados en Solid Works se debe exportar los archivos en un formato compatible con ANSYS en este caso siendo el formato STEP. Se debe considerar que los diseños deben ser huecos es decir debió haberse usado la herramienta de vaciado para simular las cavidades puesto que es el comportamiento interno que se quiere analizar además de generar el sellado del sistema con la herramienta “Create Lids” y así poder generar un volumen interior que será nuestro sujeto de prueba.

Figura 8.

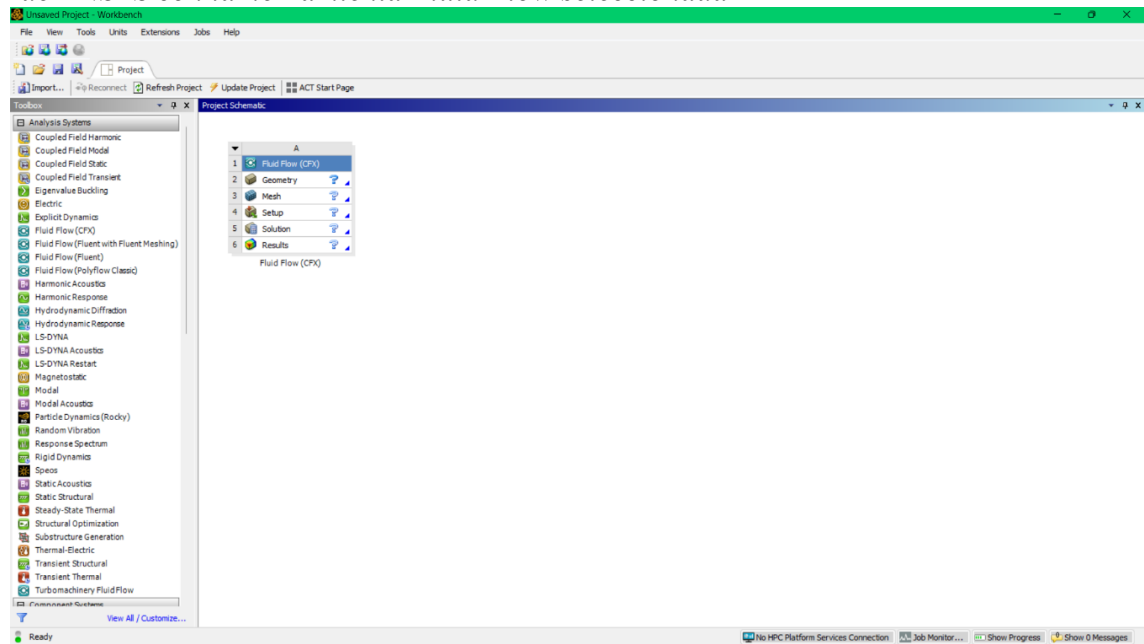
Vista interna del múltiple de admisión con volumen generado



Fuente: (Autores)

Una vez realizados estos pasos se pasa al software ANSYS, en donde para dar paso a la simulación inicialmente se debe de preparar la pieza para dicho efecto. Se hará uso de la herramienta Fluid Flow (CFX) tal como se muestra en la siguiente imagen.

Figura 9.
Interfaz de ANSYS con la herramienta Fluid Flow seleccionada

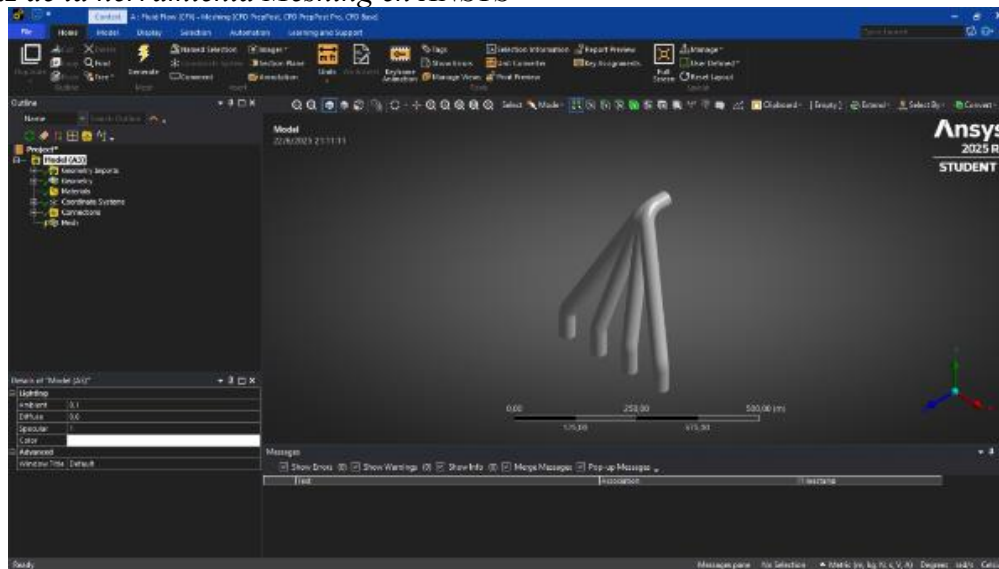


Fuente: (Autores)

A través de esta interfaz se puede realizar la importación de los archivos en la sección denominada “Geometry”. De este modo el diseño ya se encontrará habilitado para usarse en ANSYS.

De igual manera para proceder con la preparación de la pieza ay que situarse sobre “Mesh” para realizar los procesos de limpieza y simplificación geométrica y mallado del elemento.

Figura 10.
Interfaz de la herramienta Meshing en ANSYS

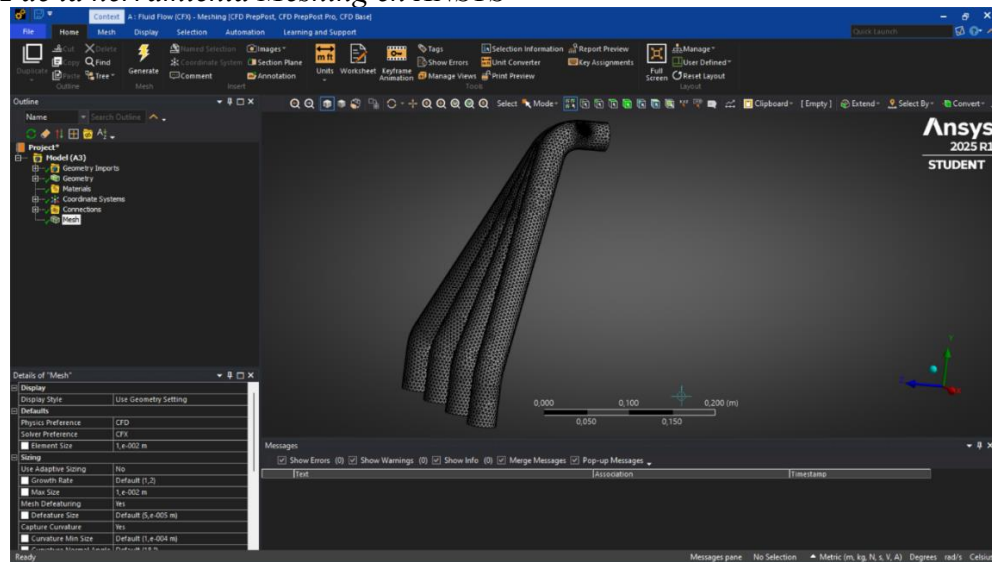


Fuente: (Autores)

En la figura se muestra la interfaz del módulo Meshing del software ANSYS, donde se realiza la generación de la malla para el análisis CFD del múltiple de admisión. Esta etapa es fundamental para obtener resultados precisos, ya que de la calidad de la malla depende en gran medida la estabilidad numérica y la fidelidad de la simulación. El modelo geométrico importado desde SolidWorks fue sometido a un mallado tipo tetraédrico no estructurado, con refinamientos en las zonas curvas y en las áreas de entrada y salida del conducto, garantizando una adecuada resolución del comportamiento del flujo en el interior del múltiple.

A continuación, se lleva a cabo el mallado del elemento con un valor nominal de 0,01m por cada hexágono de malla. Esta medida se la da para tener la mayor precisión posible al momento de ejecutar la simulación.

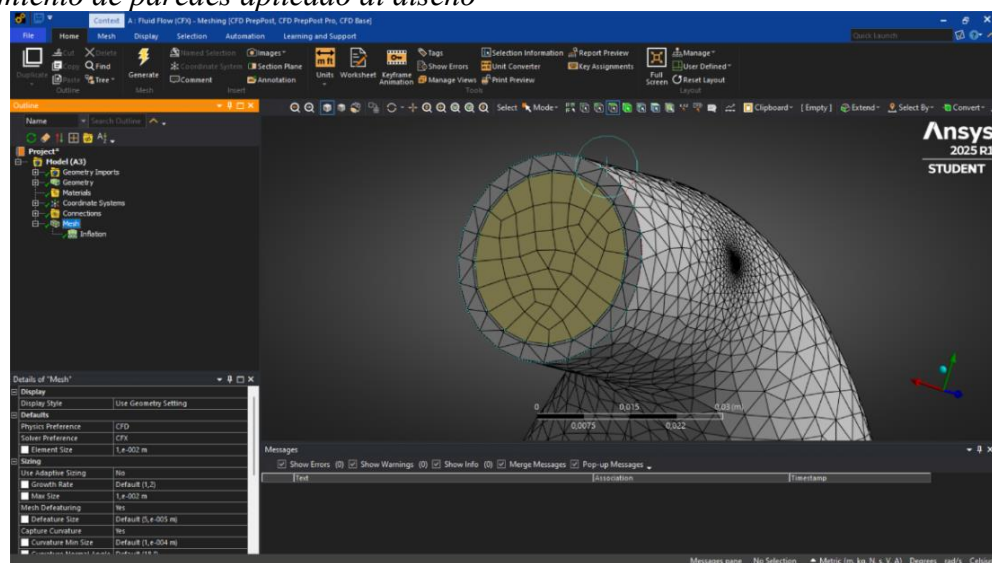
Figura 11.
Interfaz de la herramienta Meshing en ANSYS



Fuente: (Autores)

Ahora se requiere realizar el proceso de refinamiento de paredes la cual acerca la simulación a un caso aún más real puesto que esto permite una distribución más uniforme de las velocidades asignadas al fluido. De igual forma esto se lo realiza en el apartado de “Meshing” pero con la herramienta “Inflation”.

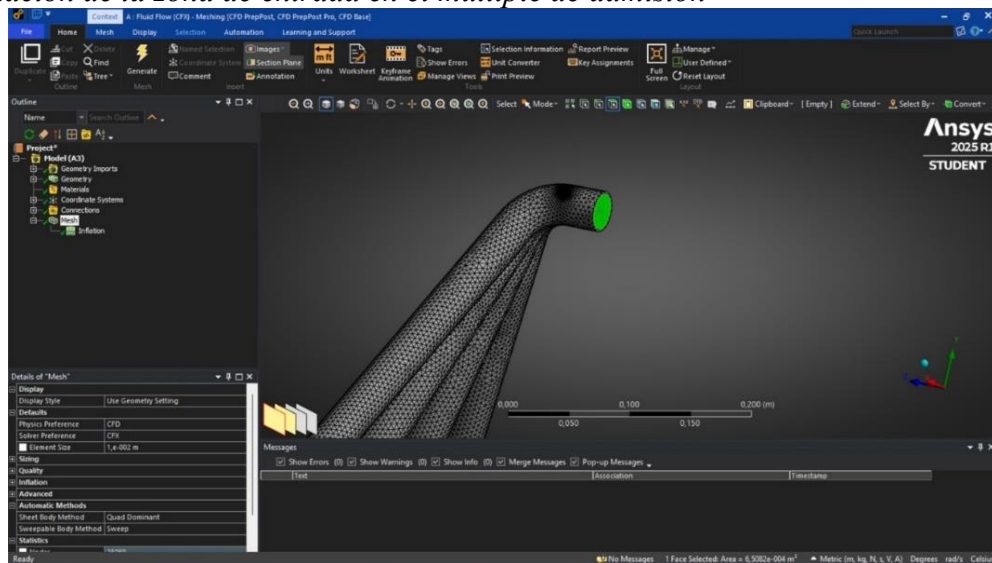
Figura 12.
Refinamiento de paredes aplicado al diseño



Fuente: (Autores)

Una vez se obtiene la pieza con los refinamientos respectivos para un comportamiento más real en cuanto a su comportamiento durante la simulación se debe de asignar las condiciones de frontera que básicamente es la designación de las zonas de entrada y salida del fluido a la par que el conducto por el dónde se dirigirá el fluido.

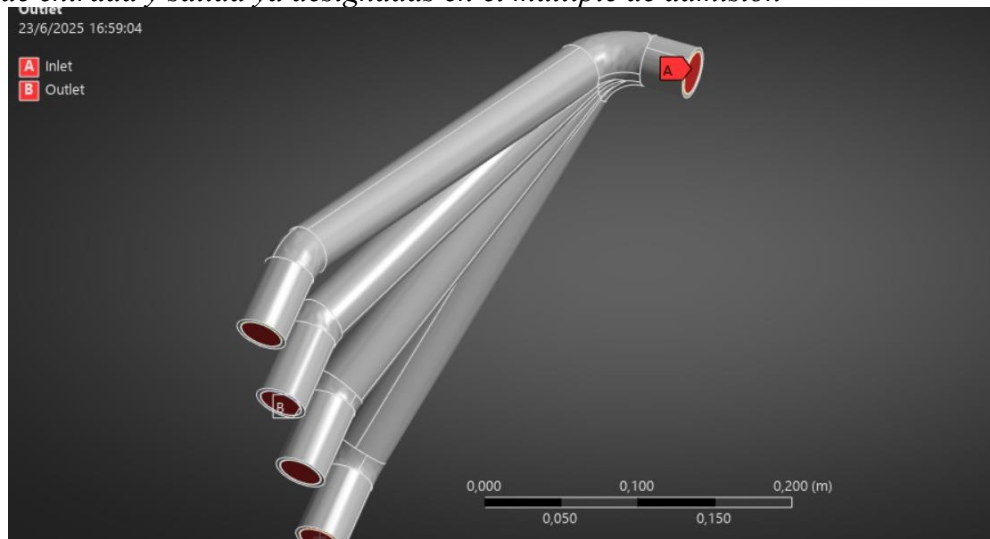
Figura 13.
Designación de la zona de entrada en el múltiple de admisión



Fuente: (Autores)

A través de este apartado se designa la zona de entrada del aire, es decir por donde la simulación permitirá el ingreso de aire para analizar el comportamiento del fluido en el diseño.

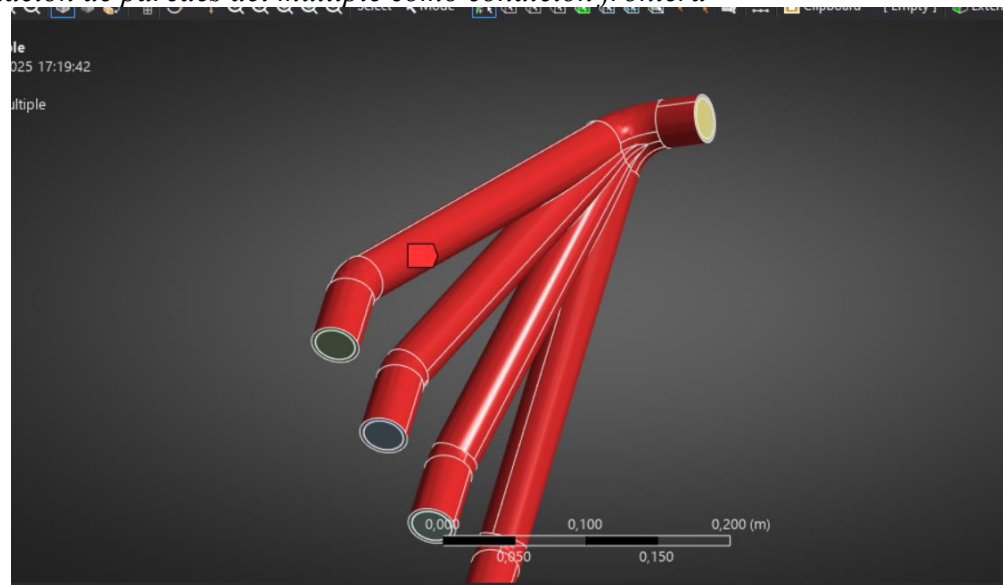
Figura 14.
Zonas de entrada y salida ya designadas en el múltiple de admisión



Fuente: (Autores)

De igual manera se debe seleccionar las caras respectivas correspondientes a las salidas del múltiple de admisión, las que serán direccionadas a cada uno de los cilindros del motor.

Figura 15.
Designación de paredes del múltiple como condición frontera

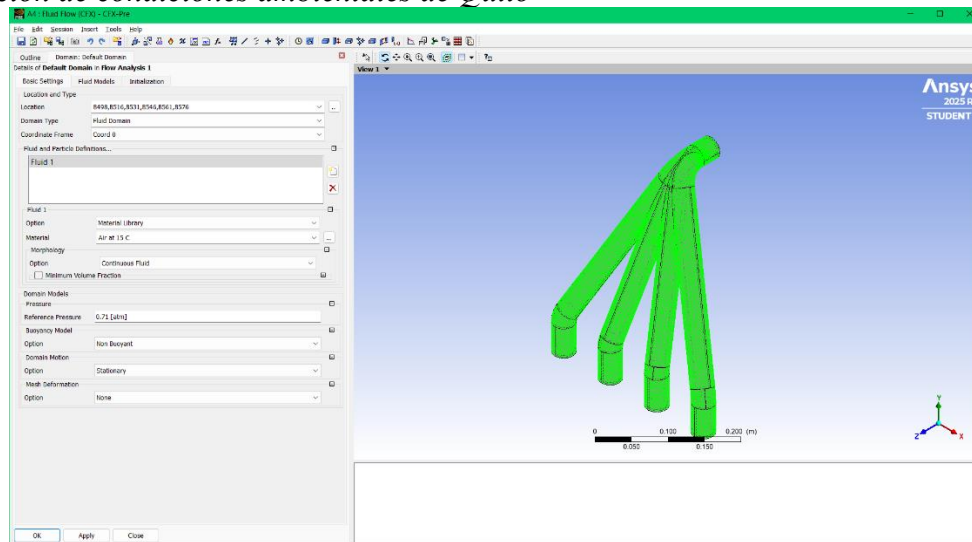


Fuente: (Autores)

Este proceso también se debe realizar a la par con las paredes del múltiple de admisión para que estas sean designadas como el envase que contendrá el volumen del fluido que circulara internamente.

Ahora en el apartado de “Set Up” se debe designar las condiciones ambientales con las que se dará paso a la simulación para lo que se tomará valores referenciales de condiciones de presión atmosférica y temperatura del aire en la ciudad de Quito.

Figura 16.
Asignación de condiciones ambientales de Quito



Fuente: (Autores)

Se asignan los valores ambientales que el software permite modificar como lo es la temperatura del aire y presión atmosférica que tenemos presentes en la ciudad de Quito.

La siguiente condición que se debe de asignar es la velocidad del aire en la entrada del múltiple de admisión, velocidad la cual se debe calcular en base a las especificaciones del motor y en base a las revoluciones de funcionamiento para este caso.

Posterior a este proceso existe otro dato fundamental que se requiere para la simulación, este es la velocidad de entrada de aire para lo cual se hará uso de datos reales del vehículo del cual se está haciendo referencia su múltiple de admisión. Con el objetivo de aumentar la precisión de las condiciones frontera en el software computacional se va a obtener un dato directamente del vehículo. Se hará uso del vacuómetro, el cual es un

instrumento que permite medir la presión en el múltiple de admisión en condiciones reales de funcionamiento del motor. La presión medida en el colector o también conocida como vacío nos permite calcular la velocidad de ingreso del aire aplicando la ecuación de Bernoulli mediante la diferencia de presiones entre ambiente y el interior del múltiple.

Adicionalmente se menciona que en esta sección del software también se designa el número de interacciones que va a tener la simulación, es decir el número de veces que la simulación se repetirá para obtener un resultado valido, está por demás mencionar que mientras más alto sea el valor de las interacciones más precisión tendrá el resultado.

A continuación, las medidas de vacío generadas por el múltiple se realizarán de manera dinámica en un vehículo que posee el múltiple de admisión que se está analizando.

Figura 17.
Instalación del vacuómetro en el vehículo para medición



Fuente: (Autores)

Aquí se aprecia el vacuómetro ya instalado en el múltiple de admisión del vehículo, se procedió a registrar la lectura de vacío en condiciones reales de operación, la prueba fue

dinámica es decir el vehículo estuvo en movimiento en el rango de revoluciones donde se está analizando en comportamiento del vehículo que es 5250RPM. Y allí se realizó la medición de presión del múltiple de admisión en la unidad de medida que permite este vacuómetro que es (inHg). Esta lectura dentro del estudio corresponde al valor de P2.

Además, es necesario acotar que se harán algunas condiciones referentes a las condiciones ambientales de la ciudad de Quito la cual está situada a una altura superior a los 2000msn debido a esto la presión ejercida por la atmosfera es menor a 1atm. Se hará uso del mismo valor usado en el software que es 0.71atm lo que equivale a 71940.75 Pa.

Adicionalmente se requiere el valor de la densidad la cual dado que este factor depende de varios fenómenos ambientales se tomará en cuenta la densidad estándar a nivel del mar siendo este valor el de $1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$.

Figura 18.

Medición de vacío en el rango de revoluciones de análisis del estudio



Fuente: (Autores)

Una vez realizada la medición la cual se asumirá como -18 inHg dada la leve inclinación de la aguja se debe de transformar este valor al sistema internacional para utilizarla en la ecuación de Bernoulli que se empleara en este estudio la cual es la siguiente.

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

[Ec. 2.1]

Donde:

$P_1, P_2 =$ Presión estática (Pa)

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

$v_2 =$ velocidad del fluido (m/s)

Con los valores respectivos de cada variable ya es posible determinar la velocidad de entrada de aire a través de la diferencia de presiones medida directamente en vehículo bajo condiciones reales teniendo un valor de velocidad más significativo lo cual mejorara la condición frontera en mención en el software haciendo más realista el resultado.

$$P_1 = 0.71 \text{ atm} = 71940.75 \text{ Pa}$$

[Ec. 2.2]

Donde:

$P_1 =$ Presión estática ambiental

$$P_2 = 10985.77 \text{ Pa}$$

[Ec. 2.3]

Donde:

$P_2 =$ Presión estática en el múltiple de admisión

$$\rho = 1.225 \text{ kg}/\text{m}^3$$

[Ec. 2.4]

Donde:

$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

Con estos valores se procede con el cálculo de la velocidad en la ecuación de Bernoulli.

$$v2 = \sqrt{\frac{2(P1 - P2)}{\rho}}$$

[Ec. 2.1]

Donde:

$P1, P2 =$ Presión estática (Pa)

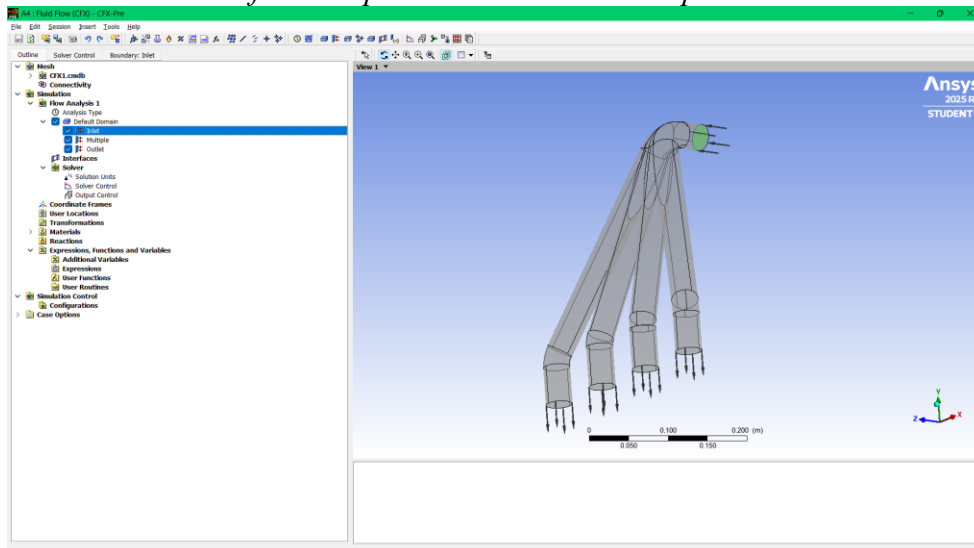
$\rho =$ densidad del fluido (kg/m^3)

$v2 =$ velocidad del fluido (m/s)

$$v2 = 315.60 \text{ m/s}$$

Ahora se establece que la velocidad de entrada del aire corresponde a 315.60 m/s, dato que funciona como condición de frontera para la simulación CFD en el software.

Figura 19.
Aplicación de condiciones frontera para simulación en Set up

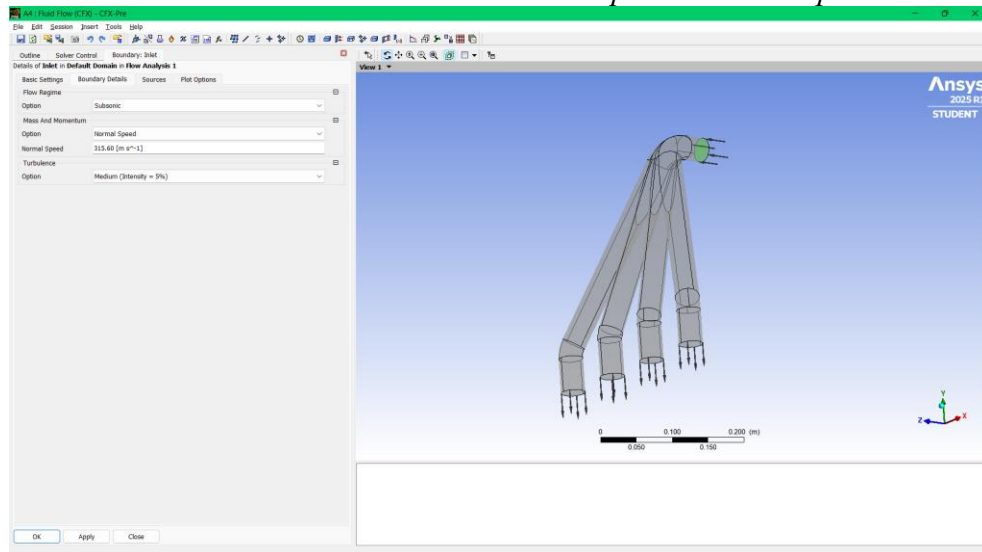


Fuente: (Autores)

De este modo con toda la información ya recabada ahora en el apartado de set up se procederá a aplicar directamente las condiciones fronteras en el proceso de la simulación

juntamente con las condiciones ambientales a lo cual se le sumará el dato de la velocidad de entrada que ahora ya conocemos.

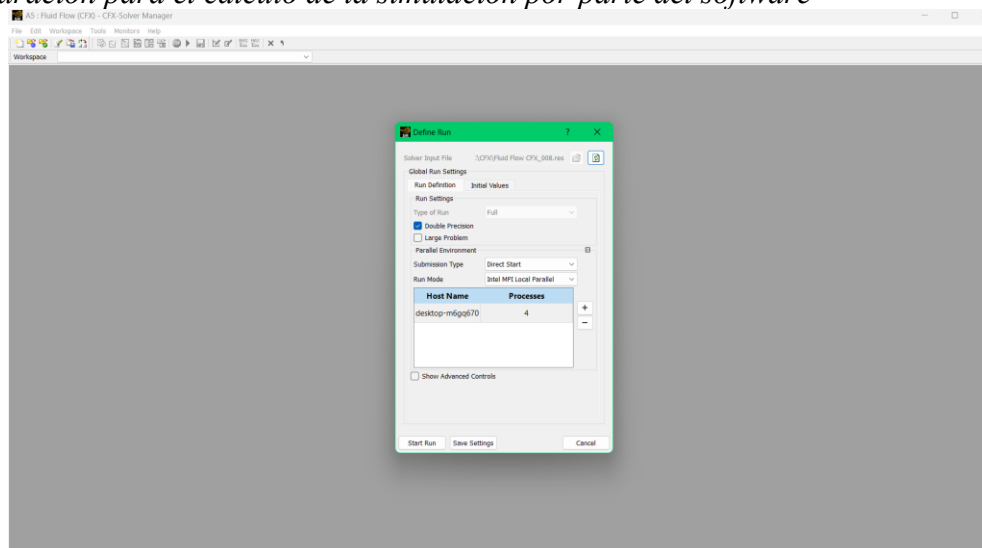
Figura 20.
Designación de la velocidad de entrada de aire en el apartado de set up



Fuente: (Autores)

Ahora se procederá con la designación de la velocidad de entrada la cual se calculó en base a las condiciones reales de funcionamiento, aplicamos esta variable y se procede con la ejecución de los cálculos por parte del programa.

Figura 21.
Configuración para el cálculo de la simulación por parte del software

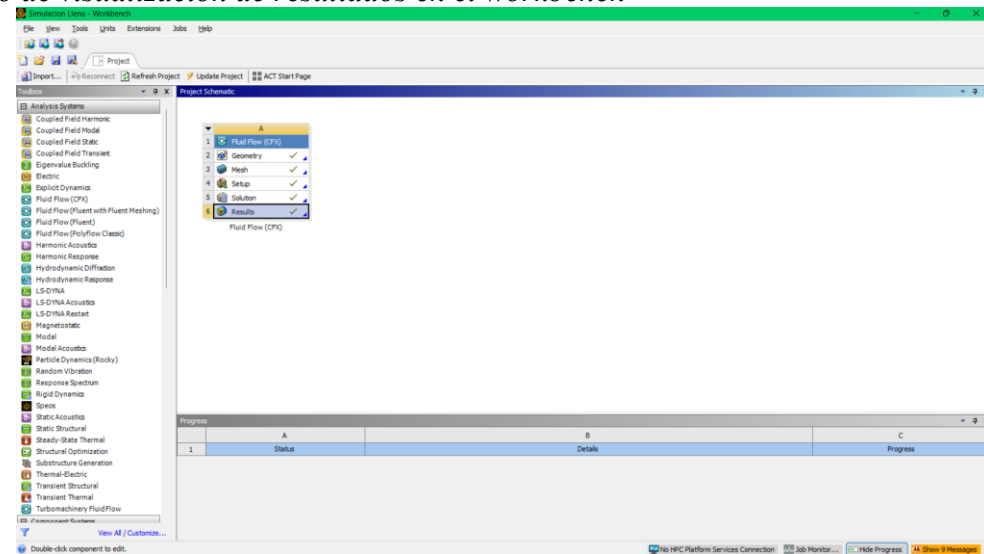


Fuente: (Autores)

El apartado de solver manager es el encargado de la ejecución de los cálculos respectivos para obtener los resultados de la simulación. En esta configuración se selecciona el archivo correspondiente en la simulación y el tipo de ejecución la cual será en base a las características de nuestro ordenador y la licencia del software que tenemos.

En este caso particular existe limitaciones por parte de la licencia educativa la cual únicamente permite hacer uso de únicamente cuatro núcleos del procesador de modo que los resultados requerirán de más tiempo. Esta etapa es crucial para iniciar la solución del modelo previamente definido en el Pre-Solver, resolviendo las ecuaciones de flujo y obteniendo los resultados numéricos del fenómeno simulado.

Figura 22.
Módulo de visualización de resultados en el workbench



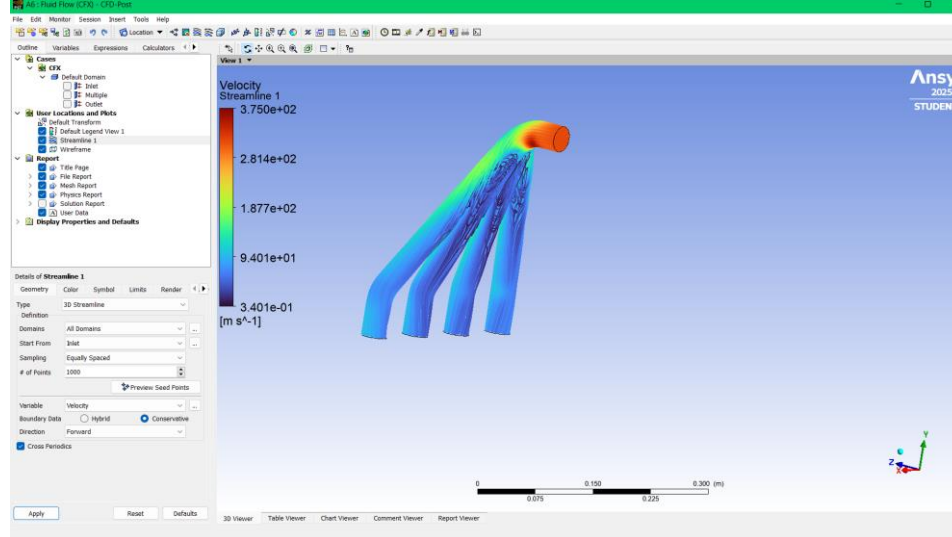
Fuente: (Autores)

Una vez completado el cálculo por parte del software se aprecian los resultados utilizando el módulo resulta.

En esta etapa, se visualizan y analizan las variables de interés, tales como la velocidad del flujo de aire, así como la turbulencia generada dentro del múltiple de admisión. Estas variables se representan mediante gráficos de vectores, líneas de corriente, cortes transversales y perfiles de presión o velocidad, según los objetivos del estudio.

Figura 23.

Visualización de los resultados obtenidos una vez culminada la simulación en ANSYS



Fuente: (Autores)

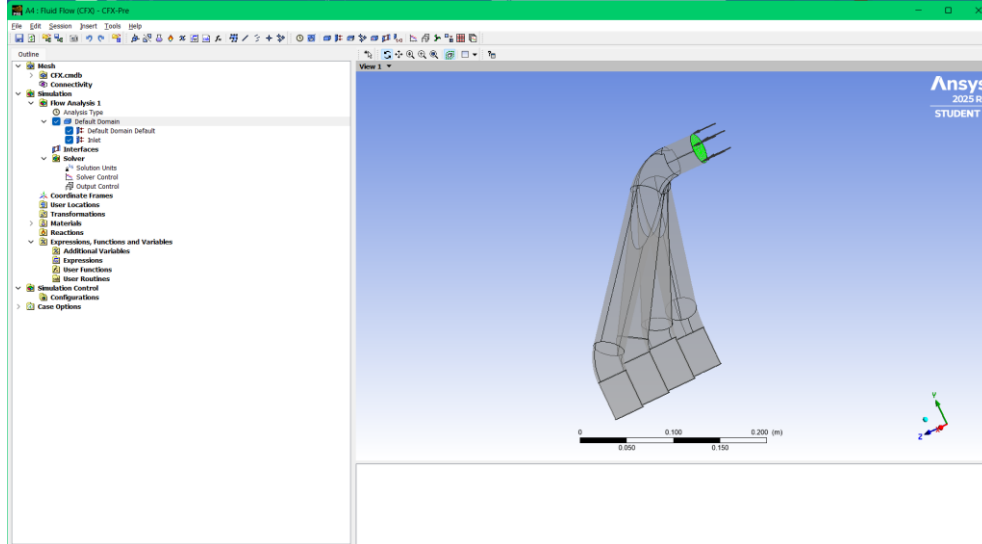
En la presente figura se muestra el campo de velocidades del flujo de aire dentro del múltiple de admisión tras realizar el descarte del sólido mediante las herramientas del software. Este ejemplo es la visualización correspondiente al múltiple de admisión con medidas estándar. Este proceso también debe repetirse para el múltiple que se desarrolló aplicando el fenómeno de resonancia de Helmholtz.

De este modo se replicó el mismo procedimiento de simulación para el diseño modificado del múltiple de admisión, el cual fue optimizado considerando los principios de resonancia de Helmholtz. Este diseño busca aprovechar los efectos de resonancia acústica para mejorar el llenado de aire en el cilindro en el régimen de revoluciones correspondiente al pico de potencia del motor.

La configuración del dominio, condiciones de frontera, malla, y parámetros de solución fueron ajustados según las dimensiones específicas del nuevo diseño y del mismo modo puesto que las entradas y salidas son las mismas, pero manteniendo el mismo enfoque metodológico descrito previamente. De este modo, se asegura una comparación válida entre ambos modelos.

Figura 24.

Configuración para simulación de múltiple de admisión con Helmholtz



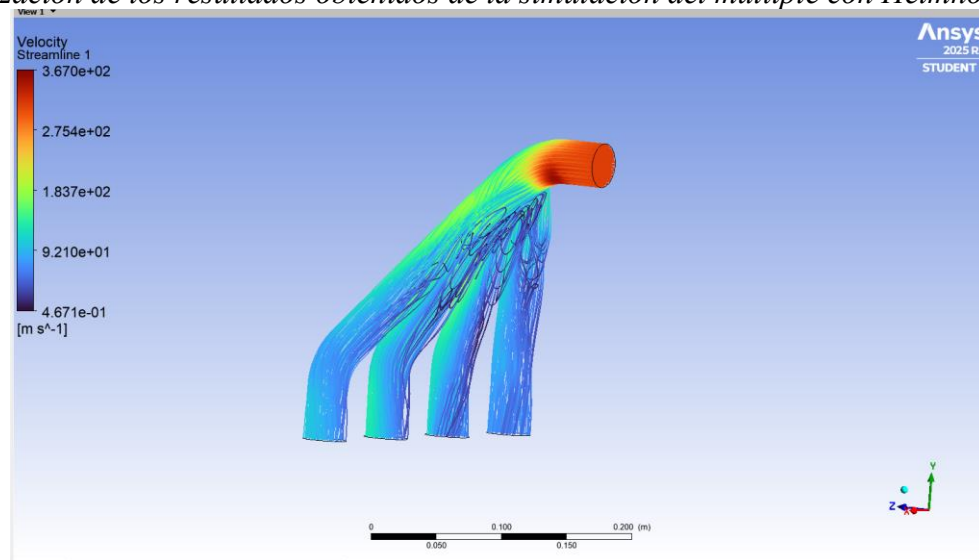
Fuente: (Autores)

Como se mencionó el mismo proceso se aplica con el múltiple de admisión que este sujeto a la medición en base al fenómeno de resonancia de Helmholtz. Se asignan las mismas variable y condiciones sin embargo los resultados deben ser diferentes.

Del mismo modo, para el múltiple en el que se aplicó el principio de Helmholtz se procedió a obtener los resultados de la simulación utilizando el mismo procedimiento descrito previamente. Se establecieron las condiciones de frontera con base en la presión medida con el vacuómetro y la presión atmosférica local, calculando la velocidad de entrada del flujo mediante la ecuación de Bernoulli.

Figura 25.

Visualización de los resultados obtenidos de la simulación del múltiple con Helmholtz



Fuente: (Autores)

Aquí se puede apreciar que los resultados obtenidos en la simulación donde se busca mejorar la velocidad de entrada del aire hacia los cilindros del motor, los resultados serán analizados en el apartado respectivos donde se validara si dicha modificación es óptima o no en base a los objetivos buscados.

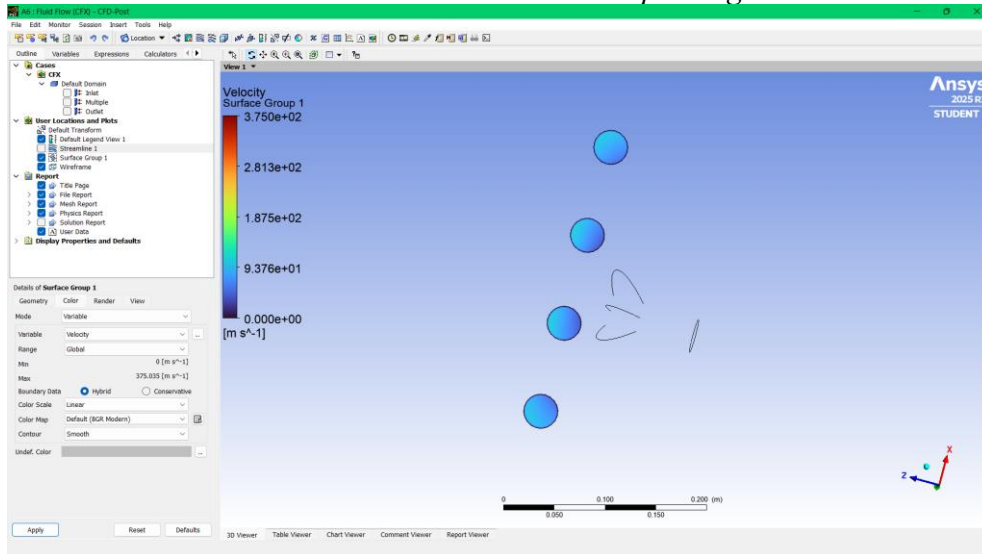
Resultados y Discusión

Las simulaciones CFD realizadas permitieron comparar el comportamiento del flujo de aire en el múltiple de admisión original y en el diseño optimizado mediante la teoría de resonancia de Helmholtz. Los resultados muestran un incremento significativo en la velocidad promedio del flujo en la salida del múltiple de admisión, pasando de 97.1 m/s en la configuración original a 155.2 m/s en el diseño optimizado, esto representa una mejora del 59.8%.

Este aumento de velocidad se puede traducir en un incremento del caudal volumétrico, el cual dada la mejora de velocidad del aire pasa de $0.3955 \text{ m}^3/\text{s}$ a $0.6318 \text{ m}^3/\text{s}$, este al ser un factor directamente proporcional de la eficiencia volumétrica esta se ve incrementada de 67.1% a 107.2% en el régimen de 5250 rpm. Gráficamente se aprecia que el flujo en el diseño optimizado presenta mayor uniformidad y alineación de las líneas de

corriente, lo que indica un mejor aprovechamiento del fenómeno de resonancia durante la fase de admisión.

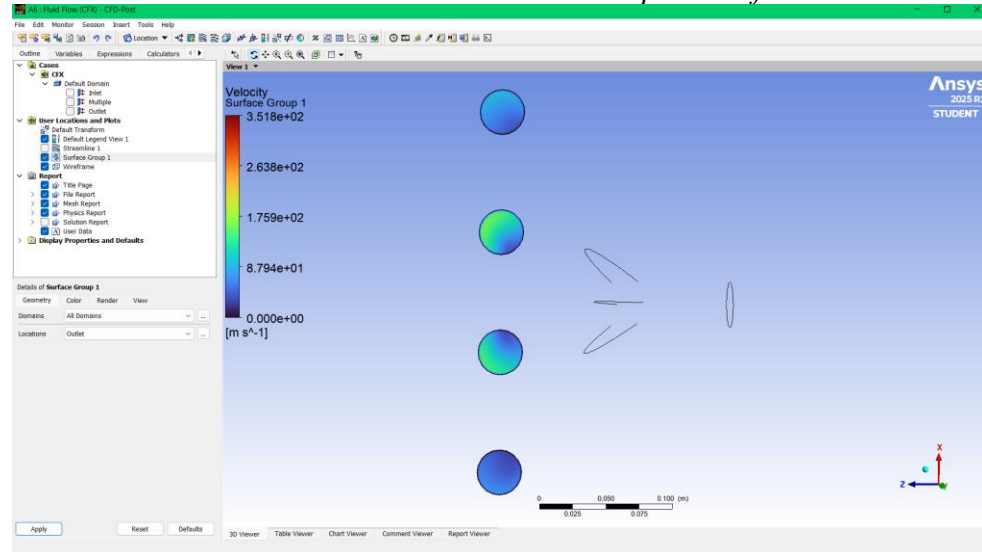
Figura 26.
Resultados visuales de la velocidad en la salida del múltiple original



Fuente: (Autores)

En la figura presentada se realiza un análisis de velocidad en los tramos finales del múltiple de admisión sin la aplicación del fenómeno de Helmholtz donde se aprecia las velocidades reducidas en comparación al diseño optimizado. De este modo se puede inferir que la eficiencia volumétrica del sistema se ve limitada.

Figura 27.
Resultados visuales de la velocidad en la salida del múltiple modificado



Fuente: (Autores)

La figura presentada corresponde al múltiple optimizado mediante el fenómeno de Helmholtz, se puede observar una distribución más eficiente y homogénea de la velocidad, se maneja una velocidad promedio de 155.2 m/s en los tramos finales de salida, así como una velocidad considerablemente más elevada especialmente en las salidas central y superior, lo cual sugiere un mejor aprovechamiento de la onda de presión resonante para inducir mayor ingreso de aire.

Tabla 3.
Resultados obtenidos tras la simulación

Parámetro	Original (350 mm)	Optimizado (240.2 mm)	Porcentaje de mejora
Velocidad en la entrada	315.60 m/s	315.60 m/s	
Velocidad promedio en la salida	97.1 m/s	155.2 m/s	
Caudal Volumétrico	0.3955 m ³ /s	0.6318 m ³ /s	
Eficiencia Volumétrica	67.1 %	107.2 %	59.8%

El diseño optimizado muestra una mejora notable a la velocidad del flujo. Aunque la velocidad de entrada se mantiene constante en ambos casos, la velocidad promedio a la salida se incrementa en más de 59%, lo que indica una mayor aceleración del flujo de aire dentro del múltiple optimizado.

Los resultados confirman que la reducción de la longitud del conducto de admisión, calculada según la teoría de Helmholtz, favorece el refuerzo de las ondas de presión y mejora el llenado del cilindro, validando la aplicación del fenómeno como una alternativa de funcionamiento pasivo para incrementar la eficiencia volumétrica del motor Renault K7M.

Los resultados obtenidos mediante simulación CFD demuestran que la reducción de la longitud del conducto de admisión, calculada a partir de la teoría de resonancia de Helmholtz, genera un incremento significativo en la velocidad del flujo de aire y en la

eficiencia volumétrica del motor analizado, el cual se explica por la sincronización entre la frecuencia de resonancia de resonancia del sistema de admisión y el régimen de 5250 rpm, lo que favorece el llenado del cilindro dado el refuerzo de las ondas de presión.

El incremento del caudal y eficiencia volumétrica obtenidos en el diseño modificado es coherente con lo mencionado en la literatura técnica, donde se establece que la sintonización acústica del sistema de admisión actúa como un mecanismo de sobrealimentación dinámica en condiciones atmosféricas. Como es de esperarse los resultados obtenidos no igualan a los sistemas de sobrealimentación activa, se puede confirmar que el fenómeno de resonancia de Helmholtz puede considerarse una alternativa pasiva, viable para mejorar el desempeño volumétrico del motor en su régimen de potencia máxima el cual sería ideal para condiciones de gran altitud.

Estos resultados permiten realizar inferencias y consideraciones para aplicaciones prácticas, como lo es el caso de los motores de competición los cuales al ser motores con altos regímenes de giro o altas revoluciones se opta por múltiples de admisión con reducidas longitudes. A altas revoluciones, el tiempo que se dispone para la admisión de aire es corto por lo que los conductos cortos permiten que las ondas de presión recorran el sistema en menor tiempo y coincidan con la apertura de la válvula de admisión favoreciendo el llenado del cilindro. La reducción de la longitud del conducto desplaza la frecuencia de resonancia hacia los regímenes de altas revoluciones, esto confirma que la optimización geométrica del múltiple de admisión basada en la teoría de resonancia de Helmholtz corresponde a un criterio de sintonización acústica aplicable para motores en general sin embargo habrá aquellos que podrán sacar más provecho.

Conclusiones

A partir de las simulaciones CFD realizadas, se analizó el comportamiento del flujo de aire en el múltiple de admisión tanto en la configuración original como en el múltiple optimizado bajo la teoría de resonancia de Helmholtz, de este modo podemos concluir que el diseño optimizado no solo mejora la dinámica del flujo, sino que también tiene un impacto

directo en el rendimiento potencial del motor al elevar su capacidad de llenado, lo que puede traducirse en un mejor desempeño térmico y mayor potencia. La velocidad paso de 97.7 m/s a 155.2 m/s.

Tras la incorporación de la longitud del conducto calculada mediante la teoría de resonancia de Helmholtz permitió una variación positiva en la velocidad promedio a la salida del múltiple de admisión, pasando de 97.1 m/s en el diseño original a 155.2 m/s en el diseño optimizado.

El análisis comparativo entre el múltiple original y el desarrollado en base al fenómeno de Helmholtz afirma una mejoría no solo de la velocidad si no de la eficiencia volumétrica, el múltiple de admisión optimizado logra una mejora notable. La eficiencia pasó de 67.1% en el modelo original a 107.2% en el optimizado, lo que representa un incremento del 59.8%. Este resultado valida la efectividad del rediseño basado en resonancia acústica como una herramienta viable para mejorar el desempeño volumétrico del motor Renault K7M, especialmente a regímenes de potencia máxima.

Los modelos matemáticos aplicados en el presente estudio nos permitieron determinar una longitud adecuada del conducto de admisión (240.2 mm) considerando con la frecuencia de resonancia para los 5250 rpm del motor donde es el régimen que más potencia nos brinda el motor. Esta configuración aprovecha el fenómeno de sobrealimentación dinámica (efecto RAM) generado por las ondas de presión, optimizando así el llenado del cilindro sin necesidad de componentes mecánicos adicionales, como turbocompresores.

Bajo los resultados obtenidos con el múltiple de admisión optimizado donde se evidencio un incremento del 59.83% de la velocidad del flujo de aire lo que es proporcional a la mejora de la eficiencia volumétrica. Como se menciona el incremento de la eficiencia volumétrica asciende a 107.2% la cual si bien es cierto no llega a compararse con la ganada con sistemas de sobrealimentación la cual oscila entre 120% y 180%, esta ganancia nos permite pensar en la aplicación del principio de resonancia de Helmholtz como una solución

alternativa más económica y más sencilla frente a sistemas activos de sobrealimentación como lo son los turbocompresores al mejorar el llenado de los cilindros sin elementos adicionales, permitiendo más casos de investigación a futuro. Sin embargo, este resultado corresponde al caso del motor Renault K7M y la eficacia de este fenómeno puede variar con otras configuraciones por lo que se recomienda investigar su comportamiento en otros motores y así ampliar este tema de estudio y relacionarlo con los sistemas de sobrealimentación.

Recomendaciones

A futuro, es aconsejable explorar más a fondo simulaciones transitorias que tomen en cuenta la variación temporal de las ondas de presión para medir con mayor exactitud el efecto de resonancia de Helmholtz. Además, sería útil probar con diversas longitudes y volúmenes del múltiple para mejorar el caudal, además de confirmar los resultados a través de pruebas experimentales en un banco de motores. Por último, se recomienda fusionar estos estudios con modelos de combustión para entender el verdadero efecto en la eficiencia total del motor y investigar alternativas de diseño y materiales que disminuyan las pérdidas de carga.

Referencias

PULKRABEK, Willard W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. 1th Edition. Platteville: University of Wisconsin, Prentice Hall, 1997.

Wilcox, D. C. (2006). Turbulence modeling for CFD (3rd ed.). DCW Industries.

Jarro Pineda, C. A., & Oviedo Duran, D. J. (2020) Análisis de la eficiencia de flujo volumétrico en tapas de cilindros de 8 y 16 válvulas para un block Toyota 4AGE. [Proyecto de técnico de titulación, Universidad Politécnica Salesiana]

Colector de admisión: qué es y sus características. (s. f.). RO-DES. <https://www.ro-des.com/mecanica/que-es-el-colector-de-admision-y-sus-caracteristicas/>

Aranda, M., & Reverte, J. P. (2017). Sistemas de admisión y escape [Proyecto final de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional La Plata]. <https://ria.utn.edu.ar/bitstreams/a217dbd6-d5b6-444c-b61b-984a1b660fb9/download>

Kumar, S., Patil, A., & Singh, A. (2021). Effect of intake swirl on combustion and emission characteristics in direct injection diesel engines: A review. *Fuel*, 285, 119121. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119121>

Mott, R. L. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada* (4ª ed., M. Chacón Paz, Rev. Téc.; C. R. Cordero Pedraza, Trad.). Prentice Hall Hispanoamericana. <https://deymerg.files.wordpress.com/2013/07/mecanica-fluidos-mott.pdf>

González, H. Á., Vásquez, G. A., & Arroyave, D. M. (2006). *Modelado, simulación y diseño de un filtro resonador de Helmholtz para un sistema de ventilación mecánico*. *Scientia et Technica*, 12(30), 167–172. Universidad Tecnológica de Pereira. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84920491041>

Espinoza Cabrera, D. M. (2016). Análisis de flujo de aire en el conducto de admisión y válvula de admisión de una motocicleta suzuki de 125cc mediante dinámica de fluidos computacional (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Rojas Lazo, O., & Rojas Rojas, L. (2006). Diseño asistido por computador. *Industrial Data*, 9(1), 7–14. https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol9_n1/a02.pdf

MotorReviewer. (s.f.). *Renault K7M 1.6L Engine (8V)*. MotorReviewer.com. https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=49

Donoso Peñaherrera, M. A. (2021). *Diseño y validación mediante CFD de un múltiple de admisión variable para el motor BAH 1.6L 8V de Volkswagen* (Trabajo de fin de carrera, Universidad Internacional SEK). Universidad Internacional SEK.

Hanriot, S.d., Queiroz, J.M. & Maia, C.B. Effects of variable-volume Helmholtz resonator on air mass flow rate of intake manifold. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 41, 79 (2019). <https://doi.org/10.1007/s40430-019-1566-5>

Renault. (s.f.). Manual de servicio motor K7M [Manual técnico]. Scribd. <https://es.scribd.com/document/380171145/Manual-de-servico-motor-K7M-ESP-pdf>

Thaynara D. (2025) *Diagrama de Moody*. Academia.edu. https://www.academia.edu/40988828/Diagrama_de_Moody

Ansys Inc. (n.d.). *Release highlights*. Ansys. <https://www.ansys.com/products/release-highlights>

Guaita Barahona, J. E., & Sarango Tene, J. A. (2013). Selección e implementación de un sistema de sobrealimentación, para un vehículo Hyundai H100 motor diésel 2.6 [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. ESPOCH.

Automotriz Raan. (2014, enero 8). *Colector de admisión: ¿Qué es y sus características?* <https://automotrizraan.wordpress.com/2014/01/08/colector-de-admision-que-es-y-sus-caracteristicas/>

Idoneo. (s.f.). *¿Qué es y dónde se encuentra la Cámara de Combustión?* Recuperado el 14 de mayo de 2025, de <https://idoneo.es/motorpedia/camara-combustion>

X-Engineer. (s.f.). *Engine combustion process explained*. Recuperado el 14 de mayo de 2025, de <https://x-engineer.org/engine-combustion-process/>

Merkulov, S. (2017). *4 stroke internal combustion engine diagram* [Ilustración]. Shutterstock. <https://www.shutterstock.com/es/image-vector/4-stroke-internal-combustion-engine-diagram-555576940>

Gil, M. (2004). El motor de combustión interna (1ª ed., pp. 1–147). Marcombo.

https://lopezva.wordpress.com/wp-content/uploads/2019/11/343564272-motores-de-combustion-interna.pdf?utm_source=

Ansys, Inc. (2025). *Ansys: Engineering simulation software*.

<https://www.ansys.com/>

Montero, C., & Paguay, F. (2021). *Estudio e Implementación de un Sistema de Inyección Electrónica Programable para el Aumento del Rendimiento y Disminución de Gases de Escape Contaminantes en un Vehículo Suzuki forsaga*. Cuenca: Trabajo de Titulación Previa a la Obtención del Título de Ingeniero en Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana

Moreno-Brieva, F. J., y Peñaherrera-Patiño, D. D. (2020). El secreto financiero como factor de la inversión directa extranjera. *INNOVA Research Journal*, 5(2), 51-66.

<https://doi.org/10.33890/innova.v5.n2.2020.1205>

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method (2nd ed.)*. Pearson Education.

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics (7ª ed.)*. McGraw-Hill Education.

<https://archive.org/details/FluidMechanics7thEdFrankM.WhiteMcGrawHill2011>

Delfosse, V. (2005). *Estudio Experimental de la ecuación de Bernoulli*. [Estudio, Universidad de Gral. San Martín]. UNSAM

ANEXOS

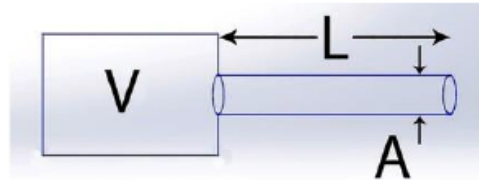
Anexo 1

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Teoría del resonador Helmholtz

El resonador de Helmholtz fue desarrollado por el médico y físico alemán Von Helmholtz a mediados del siglo XIX, este consiste en una cavidad rígida y un tubo que conecta el volumen interior con el exterior, esto es lo mismo a tener una masa unida a un resorte donde la masa sería el aire contenido en el tubo y el resorte sería el volumen de aire. Un sistema de masa resorte tiene la capacidad de oscilar en una única frecuencia por lo que esta frecuencia estará definida por el volumen de aire encerrado en la cavidad y las dimensiones del tubo, en forma general se tiene que mientras más grande sea el resonador más baja será su frecuencia de resonancia. (Morais et al., 2019)

Figura 2.
Resonador de Helmholtz



En los motores de combustión interna encontrados en la industria automotriz son ampliamente utilizados los resonadores de Helmholtz tanto en los sistemas de admisión como de escape ya que ayudan a disminuir el ruido generado por el funcionamiento del motor gracias a que ayudan a reducir la respuesta de las cavidades acústicas y más aún cuando se encuentran en su frecuencia natural, por esto varios estudios que se realizaron con resonadores de Helmholtz con tubos variables buscando que las frecuencias naturales se den en varias Rpm, esto no solo dio el resultado de una reducción de ruido en diferentes frecuencias, también se observó que el flujo masico del sistema de admisión aumento dando así una mejor eficiencia volumétrica al motor en diferentes rangos de Rpm. (Potul et al., 2014)

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Para realizar el diseño del múltiple de admisión con la teoría del resonador de Helmholtz se deberá aplicar sus fórmulas en donde el volumen efectivo será considerado el volumen del cilindro con el pistón a mitad de la carrera, ya que en ese punto su velocidad será la máxima.

Ecuación:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A * 2 * (CR - 1)}{L * Vd * (CR + 1)}}$$

(2)

Donde:

f= Frecuencia (Hz)

C=Velocidad del sonido (342.9 m/s.)

A=Área de la sección transversal del tubo (m^2)

L=Longitud del tubo (m)

Vd=Desplazamiento del motor (m^3)

CR=Relación de compresión

Lotus engine simulation

Lotus engine simulation es un software de simulación 1D creado por LOTUS CARS, este software permite realizar modelos de motores dos tiempos y cuatro tiempos tanto a gasolina como Diesel, naturalmente aspirados o sobrealimentados, este simulador modela la dinámica de fluido tanto en el múltiple de admisión como de escape, así como los distintos factores que afectan el desempeño de un motor y nos da como resultado datos tanto de forma numérica como gráfica, para este estudio los resultados analizados serán la potencia, torque y eficiencia volumétrica.(Cars, 2001)

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Para realizar los cálculos del múltiple de admisión variable, así como las distintas simulaciones se debe tener los datos del motor los cuales se detallan en la Tabla 1, los mismos se obtuvieron del manual del fabricante y medidas realizadas al motor físicamente.

Tabla 1.

Especificaciones motor 1.6l 8v BAH de Volkswagen

Cilindrada	1598 cm ³
Diámetro de los cilindros	76,5 mm
Carrera de los pistones	87 mm
compresión	10,8:1
Potencia @ 5500 rpm	74 KW
Torque @ 3250 rpm	140 Nm
Diámetro válvula de admisión	34,5 mm
Diámetro válvula de escape	28 mm
Distancia vástago válvula inicio múltiples	120 mm
Diámetro conductos múltiple de escape	30 mm
Diámetro salida múltiple de escape	45 mm
Longitud conducto escape cilindro 1	380 mm
Longitud conducto escape cilindro 2	290 mm
Longitud conducto escape cilindro 3	260 mm
Longitud conducto escape cilindro 4	340 mm
Configuración múltiple de escape	4>2>1
Diámetro conductos múltiple de admisión	28 mm
Longitud conductos múltiple de admisión	350 mm
Volumen plenum	8428 cc

(AG, 2011)

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Otros datos esenciales que se obtienen del manual del fabricante son los grados de apertura y cierre de las válvulas los cuales se observan en la Tabla 2.

Tabla 2.

Grados de apertura y cierre de válvulas motor 1.6l 8v BAH de Volkswagen

	Válvula de admisión	Válvula de escape
Abre después de PMS	13°	---
Cierra después de PMI	38°	---
Abre antes de PMI	---	49°
Cierra antes de PMS	---	4°

(AG, 2011).

Una vez obtenidos todos los datos necesarios del motor se procede a realizar los cálculos, los cuales serán de la longitud del tubo del múltiple de admisión mediante la teoría RAM de Chrysler y la teoría del resonador de Helmholtz, los cálculos se realizan para tres diferentes rangos de revoluciones por minuto, los cuales serán: 2500 rpm, 4000 rpm y 5500 rpm, ya que de esta forma se podrá diseñar un múltiple de admisión variable que mejore la eficiencia volumétrica tanto en un rango bajo, medio y alto de rpm.

Calculo con teoría RAM de Chrysler a 2500 rpm.

Primero pasaremos las rpm a rps.

$$\text{Rps} = 2500/60 = 41.666$$

Ahora pasamos las rps a grados por segundo(°/s).

$$\text{°/s} = 41.666 * 360 = 15000$$

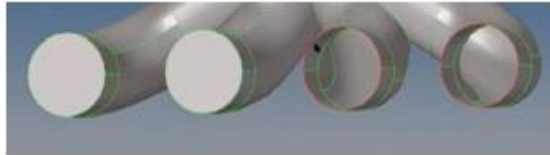
DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Simulación CFD mediante Acusolve de Altair.

Para la simulación CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) se procede a importar el ensamble previamente realizado en Inventor, al mismo se le debe eliminar la parte sólida y dejarlo como lamina, ya que lo que se busca con este estudio es ver el comportamiento del fluido dentro del múltiple de admisión para esto se debe sellar la lámina generada y así poder tener el volumen interior del múltiple como se ve en la Figura 16.

Figura 16.

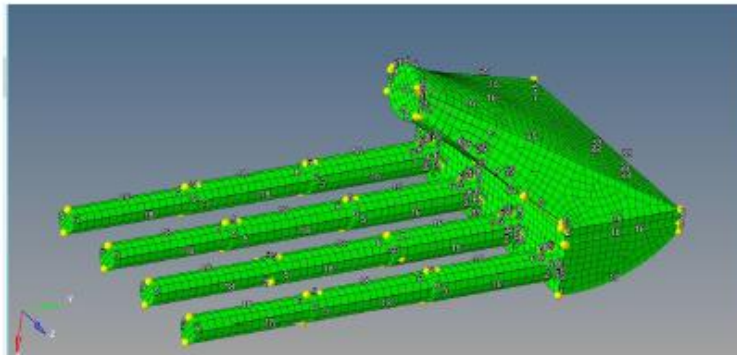
Volumen del múltiple de admisión generado para simulación CFD.



Una vez listo el volumen se procede a mallas la lámina con Automesh, dada la geometría y dimensiones del múltiple se realiza un mallado pequeño de 1 y de forma mixta cuadrado triangular, obteniendo así un mejor resultado y datos lo más cercanos a la realidad como se observa en la Figura 17.

Figura 17.

Mallado lamina múltiple de admisión variable 57cm.

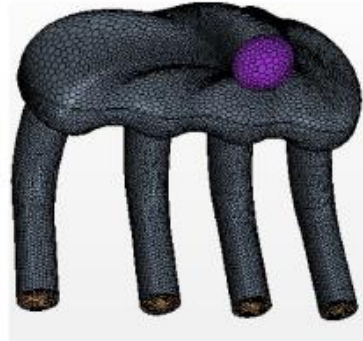


Una vez mallada la lámina se tiene que generar las entradas y las salidas CFD del múltiple de admisión en este caso 1 entrada y 4 salidas, una vez generadas se las designa en el modelo como se observa en la Figura 18.

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Figura 18.

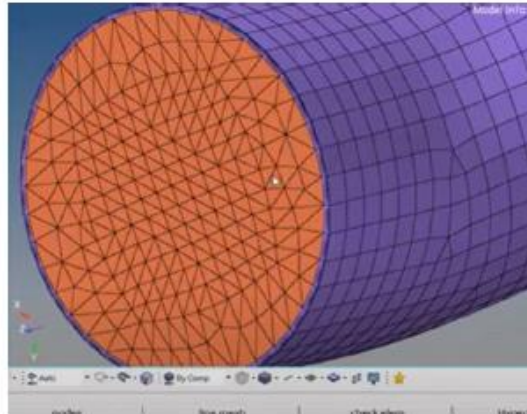
Designación entrada y salidas múltiple de admisión variable 57cm.



Con el modelo designado se realiza el mallado CFD el cual realiza la malla del volumen por el cual se desplaza el fluido, al generar este mallado se genera la capa limite y el volumen interno como se aprecia en la Figura 19.

Figura 19.

Mallado CFD múltiple de admisión variable 57cm.

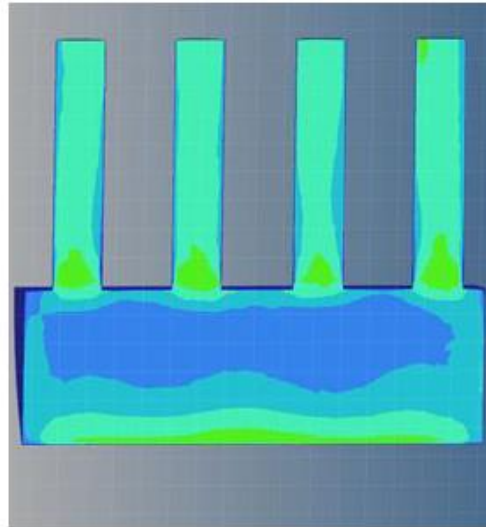


Finalmente se debe asignar el tipo de simulación que se realiza, en este caso estática, también se debe asignar los valores ambientales en este caso la temperatura, humedad y presión atmosférica de la ciudad de Quito, se designa los valores a la entrada del múltiple los cuales serán los flujos de aire según el rango de rpm que se está analizando ah este parámetro se le debe incluir la gravedad ya que esta afecta al flujo y finalmente el fluido en este caso aire húmedo que se encuentra en el software por defecto, cargados los parámetros se puede realizar la simulación y posteriormente analizar los resultados obtenidos como se observa en la Figura 20.

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Figura 31.

Velocidad del aire al interior del múltiple de admisión variable.

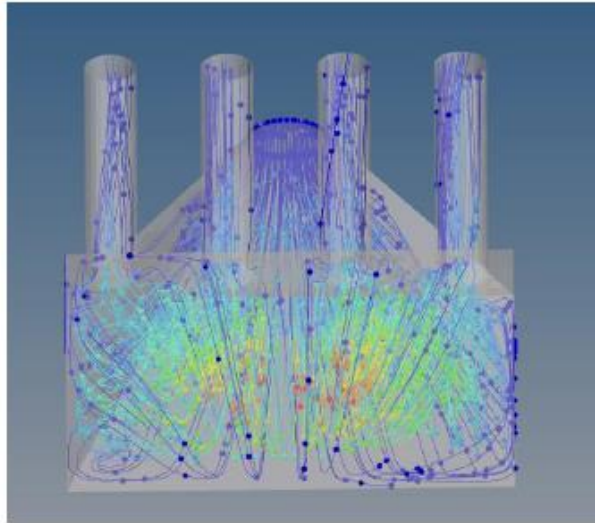


Analizando el flujo al interior del múltiple de admisión variable se puede observar que es un flujo bastante laminar con muy pocas zonas turbulentas lo que ayuda al aumento de la velocidad de salida y que no se creen zonas de vacío como se puede observar en la Figura 32. Como indica la investigación “Trucaje de cabezote para competición” (Carrera, 2016), el aumento de la velocidad de alrededor de 22 m/s contribuye a un aumento del volumen de llenado en el cilindro, así como el tener un flujo laminar en el múltiple de admisión permite utilizar otros acabados en las toberas de admisión como dimple ports, para así obtener el efecto swirl al momento de que la mezcla entre al cilindro teniendo la mayor eficiencia posible y una mayor potencia.

DISEÑO Y VALIDACIÓN MEDIANTE CFD DE UN MÚLTIPLE DE ADMISIÓN VARIABLE PARA EL MOTOR BAH 1.6L 8V DE VOLKSWAGEN

Figura 32.

Flujo del aire al interior del múltiple de admisión variable.



El otro parámetro analizado mediante CFD es la presión ya que como se muestra la literatura una mayor diferencia entre la presión de entrada y la presión en los ductos de admisión resulta en un mejor llenado de los cilindros como se puede observar en la Figura 33, algunos factores que afectan a este cambio son la geometría del ducto y su medida, por lo que esta selección afecta a las ondas depresivas y de expansión dentro del múltiple. (Ali,Kantchev y Salah,2011).

Anexo 2

2.6 Concepto de número de Reynolds

El comportamiento de un fluido depende de que el flujo sea laminar o turbulento. Por esta razón Osborne Reynolds fue el primero en demostrar mediante el conocimiento de un número adimensional al cual se le conoce hoy como número de Reynolds (Re) el cual se expresa de la siguiente manera:

$$Re = \frac{vD\rho}{\eta} \quad (2)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds.

v = Velocidad promedio del flujo. [m/s]

η = La viscosidad dinámica. [Pa.s] o [kg/(m.s)]

D = Diámetro del tubo. [cm]

ρ = Densidad. [g/cm³]

- Si el número de Reynolds es mayor que 4000, el flujo es turbulento.
- En el rango de números entre 2000 y 4000 el flujo se encuentra en una etapa crítica

forman un volumen el cual va a ser llenado por la masa de aire que ha sido aspirada. Se parte de la fórmula de la densidad de un fluido la misma que dice que la densidad es directamente proporcional a la masa e inversamente proporcional al volumen:

$$\delta = \frac{m}{v} \quad (9)$$

Donde:

δ = Densidad del aire. [Kg/m³]

m = Masa de aire. [Kg]

v = Volumen de aire. [m³]

2.16 Método de elementos finitos para el análisis de flujo de aire

2.16.1 *Origen y naturaleza del flujo dentro de un motor de combustión interna.* El funcionamiento del motor es claramente no estacionario. En consecuencia, los procesos de flujo que tienen lugar en los conductos de admisión y de escape de los motores tienen un carácter intrínsecamente no estacionario.

Por lo tanto, se trata de un fenómeno cuasi-periódico ("oscila" una y otra vez mostrando cada cierto tiempo un aspecto similar al que tuvo el sistema previamente.) (PAYRI, y otros, 2011)

2.17 Plataforma de diseño SolidWorks

Figura 10. SolidWorks logotipo



Fuente: http://www.aiaaucf.com/solidworks_workshops.html

El software de diseño de SOLIDWORKS es tan sencillo como potente y permite que cualquier empresa pueda hacer sus ideas realidad y hacerse con mercados globales.

Las soluciones de SOLIDWORKS® se centran en la forma en que trabaja a diario, con un entorno de diseño en 3D integrado e intuitivo que abarca todos los aspectos del desarrollo del producto y que ayuda a maximizar la productividad del diseño y la producción.

Más de 2 millones de diseñadores e ingenieros de todo el mundo usan SOLIDWORKS para hacer realidad sus diseños, desde los dispositivos más innovadores hasta innovaciones para conseguir un futuro mejor. (DASSAULT SYSTEMS)

2.18 Plataforma de simulación ANSYS Workbench

Figura 11. Ansys Logotipo



Fuente: <http://www.ansys.com/>

La plataforma Ansys Workbench es la columna vertebral para ofrecer un sistema de simulación global e integrada. Da acceso a datos multi-físicos y a nivel de sistema que antes no podrían alcanzarse. Los departamentos de tecnologías de la información hacen realidad una mayor fiabilidad, menores costes de soporte y un coste total de propiedad.

A menudo, el comportamiento de los fluidos es poco intuitivo, por lo que es difícil, si no imposible, predecir el impacto de los flujos de fluidos en su producto. Las tecnologías de simulación ANSYS CFD permiten a los ingenieros optimizar el rendimiento de los productos que tienen que ver con los flujos de reacción de (hornos, reformadores, motores de combustión interna, turbinas de gas, etc.). (ANSYS)

2.19 Método de elementos finitos

El método de los elementos finitos es una herramienta numérica para determinar soluciones aproximadas a una amplia clase de problemas de ingeniería y en la industria debido a su diversidad y flexibilidad como herramienta de análisis. A menudo es necesario obtener soluciones numéricas aproximadas para problemas industriales complejos, en los que las soluciones exactas de forma cerrada son difíciles de obtener. (ROLAND W, y otros, 2004)

Anexo 3

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.

2.1. Motor de combustión interna

Los motores de combustión interna son máquinas fluido mecánicas térmicas en las que, mediante la combustión de una mezcla de combustible y aire, se genera energía mecánica. Todos los procesos de trabajo tienen lugar en un área de trabajo, en el cilindro. Como la fuerza/energía dentro del cilindro se transmite a través de un volumen variable, los motores de combustión interna pertenecen a las máquinas motrices de desplazamiento positivo. (Gunt, 2017)

Los motores habitualmente sirven para accionar vehículos, barcos o locomotoras. También se utilizan motores de combustión interna para accionamientos que deben trabajar de forma fiable en todo momento independientemente de la red eléctrica como, por ejemplo, en sistemas de alimentación eléctrica de emergencia, máquinas de construcción o en la agricultura. (Gunt, 2017)

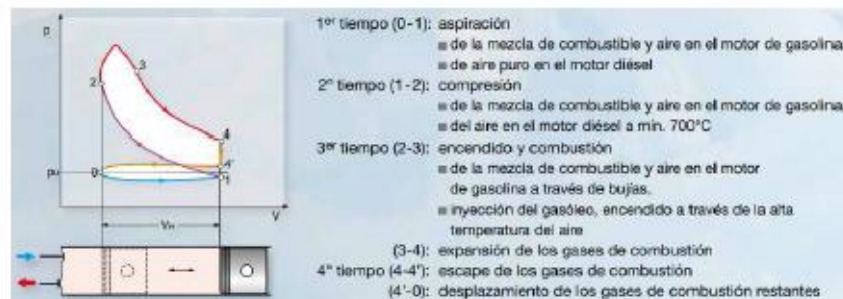


Figura 1-2: Ciclo de trabajo de un motor de 4 tiempos

Fuente: (Gunt, 2017)

2.1.1. Funcionamiento de las válvulas

Para comprender el funcionamiento del motor de combustión interna debemos tener en mente los procesos que ocurren dentro del mismo. En un motor de 4 tiempos al terminar

el periodo de admisión la válvula de entrada comienza a cerrarse mientras que el pistón cambia el sentido de movimiento y se dirige hacia la parte superior del cilindro.

Dicho recorrido es conocido como fase de compresión en el cual se reduce el volumen dentro del cilindro y aumenta la presión. (Argumedo, 2010)

Momentos después la mezcla aire-combustible se hace explotar mediante una chispa o debido a la alta temperatura propia de los motores diésel, es así como un proceso de expansión ocurre dentro del cilindro, a este evento se le conoce como etapa de potencia. Hacia el final de la etapa de potencia se abre la válvula de escape para evacuar los gases de combustión cuando el pistón retorna al PMS. (Argumedo, 2010)

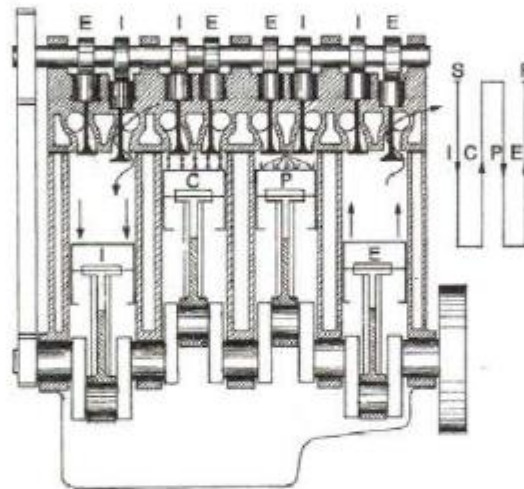


Figura 2-2: Diagrama de un motor 4 tiempos
Fuente: (Argumedo, 2010)

2.1.2. Solape de válvulas

El movimiento angular que describe el cigüeñal cuando la apertura de la válvula de admisión o de escape ocurre antes del PMS o PMI, se define como ángulo de apertura adelantado. Así mismo el ángulo de rotación que describe el eje del cigüeñal cuando la válvula de admisión o de escape se cierra después del PMS o PMI se denomina ángulo de retardo de cierre de válvula. El movimiento angular total cuando ambas válvulas de escape y admisión se encuentran simultáneamente abiertas, en la región PMS, se denomina periodo de solape o cruce de válvulas. (Argumedo, 2010)

2.1.3. Válvula de salida

Para maximizar la expulsión de los gases de combustión del cilindro, la válvula de escape se comienza a abrir cuando el pistón experimenta una desaceleración antes de llegar al PMI. Al comenzar la apertura los gases contenidos a una presión de 3 a 4 bar son expulsados debido a su propia energía cinética a través del sistema de escape hacia el ambiente. (Argumedo, 2010)

La válvula de escape se mantendrá abierta durante toda la carrera de salida de gases y una pequeña parte del recorrido de admisión. Este retardo provoca que los gases que salen del cilindro dejen a su paso un vacío parcial en el puerto de escape y en la cámara de combustión. (Argumedo, 2010)

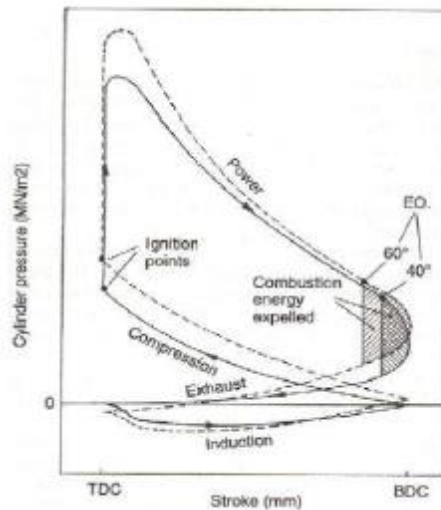


Figura 3-2: Curvas de presión de ciclos con avance de válvulas 60° y 40°
Fuente: (Argumedo, 2010)

2.1.4. Válvula de entrada

Para introducir la mayor cantidad posible de aire fresco al interior del cilindro, la válvula de entrada comienza su apertura cuando el pistón está por terminar la carrera de potencia. En dicho momento los gases de combustión forman al salir una depresión en el interior del cilindro. Si la apertura se adelanta aún más, los gases de combustión pueden salir hacia el Medio Ambiente a través de la válvula de entrada. (Argumedo, 2010)

La eficiencia volumétrica en el proceso de admisión es una característica que varía con la velocidad de giro del motor. Cuando el motor gira a altas revoluciones se puede maximizar la cantidad de flujo de trabajo capturado en el cilindro mediante el cierre de la válvula de admisión al inicio de la carrera de compresión. (Argumedo, 2010)

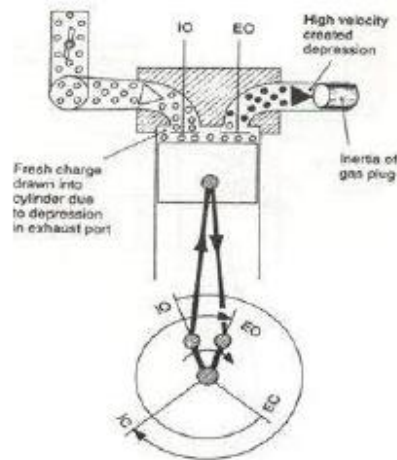


Figura 4-2: Efecto de solape a altas revoluciones.
Fuente: (Argumedo, 2010)

Sin embargo, a bajas revoluciones la densidad del flujo a la entrada es insuficiente para retener totalmente la mezcla aire-combustible dentro del cilindro, entonces cierta cantidad es forzada a salir por el múltiple de admisión afectando en la capacidad de compresión del motor. (Argumedo, 2010)

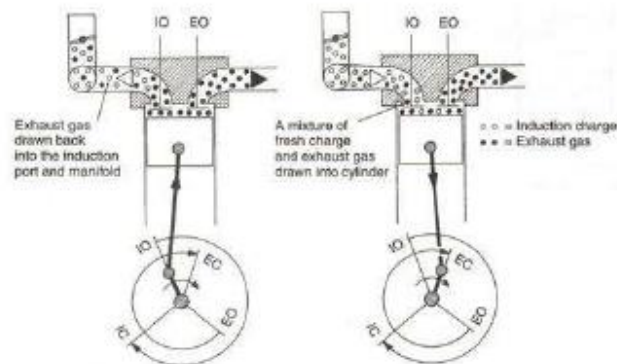


Figura 5-2: Efecto de solape a bajas revoluciones.
Fuente: (Argumedo, 2010)

2.2. Sistema de admisión.

El colector de admisión es el conducto a través del cual accede el aire hacia las canalizaciones de la culata. El colector se sujeta a la culata del motor por medio de unos pernos y su diseño condicionará la forma en la que se llenan los cilindros. Generalmente suelen ser fabricados en aluminio o similares y también en materiales plásticos de considerable resistencia. (Rodes, 2014)

El múltiple de admisión se encarga de entregar aire limpio y filtrado hacia las cámaras de combustión del motor, aquí se mide la temperatura del aire que ingresa, se retienen las partículas de polvo y suciedad que pudieran dañar el interior del motor. (Rodes, 2014)

2.2.1. Pasajes de Admisión de Aire

El múltiple de admisión también interviene en la mezcla y atomización de la gasolina. Su función principal es distribuir la mezcla aire combustible en forma equitativa a cada cilindro. No toda la gasolina que suministra el carburador es atomizada adecuadamente. Parte de ella se desliza en forma líquida adherida a la superficie de los ductos. Un buen múltiple de admisión ayuda a vaporizar y atomizar la gasolina. (Reverte, 2018)



Figura 6-2: Múltiple de escape
Fuente: (Argumedo, 2010)

2.2.2. Eficiencia del Múltiple de Admisión

El largo y la forma del múltiple de admisión influyen en el desempeño de un motor. La eficiencia de admisión depende en buena parte de los pasajes del múltiple. Utilizando fenómenos naturales, cuando un gas se desplaza velozmente dentro de un tubo, el múltiple de admisión termina por homogeneizar la mezcla que llega al cilindro. (Reverte, 2018)

Un múltiple de admisión con pasajes de poco diámetro permite generar alta potencia de motor a bajas revoluciones, en cambio, si al mismo motor se le instala un múltiple con pasajes de mayor diámetro la misma potencia se obtendrá a mayor número de revoluciones. (Reverte, 2018)

2.2.3. Diseño de los Caños de Alimentación

Se desea disponer de la mayor superficie posible dentro del múltiple, de manera que la gasolina que se adhiere a los pasajes exponga su masa de la forma más extendida posible al flujo de aire y al calor. (Lema, 2010)

Un tubo de diámetro circular presenta menos superficie interior que uno de sección cuadrada del mismo ancho y largo. Los múltiples de admisión eficientes combinan en sus ductos secciones circulares y cuadradas. (Lema, 2010)

Al contrario de lo que se piensa, las superficies extremadamente lisas y pulidas no favorecen la distribución homogénea de la mezcla. La gasolina líquida se adhiere con fuerza a esta clase de superficie. (Lema, 2010)

2.2.4. Curvas del Múltiple de Admisión

La presión del combustible aumenta en la parte externa de las curvas del tubo de alimentación. Esto genera acumulación de combustible en el exterior de la curva. La medida del radio de curvas de un múltiple de admisión no debe ser menor al 75% del diámetro máximo del ducto. (Lema, 2010)

2.2.5. Tipos de colectores de admisión

Existen dos tipos distintos de colectores de admisión: los colectores convencionales y los colectores de admisión variable, aunque en la actualidad los más utilizados son los últimos. (Rodes, 2014)

2.2.6. Colectores de admisión convencionales

Los colectores de admisión convencionales no cuentan con la flexibilidad con la que están dotados los colectores de admisión variable, de modo que no se adapta igual de bien a los distintos regímenes del motor. (Rodes, 2014)

Así pues, los colectores de admisión convencionales logran un par motor elevado con un bajo número de revoluciones o bien, una potencia elevada con un número de revoluciones también elevado; pero no llega a combinar nunca estos dos beneficios. Por ello, se crea la necesidad de encontrar un sistema que sea igual de eficaz en todos y cada uno de los regímenes del motor: el colector de admisión variable. (Rodes, 2014)

El sistema de colector convencional sí que sigue empleándose en motores gasolina que cuentan con carburador o con sistema de inyección monopunto, pues es imprescindible que la mezcla de gasolina y aire sea uniforme, además de que los tubos de los cilindros sean de igual longitud para cada uno de ellos. (Rodes, 2014)

2.2.7. Colectores de admisión variables

La principal función de un sistema de admisión variable es la de facilitar la entrada de aire a los cilindros en función del régimen al que esté funcionando el motor en ese preciso momento, de forma que éste se adapte y logre aumentar sus prestaciones. (Rodes, 2014)

Por lo general, los sistemas variables de admisión son empleados en motores de cuatro válvulas por cilindro, de modo que se compensa la falta de par motor a un número bajo de revoluciones. (Rodes, 2014)

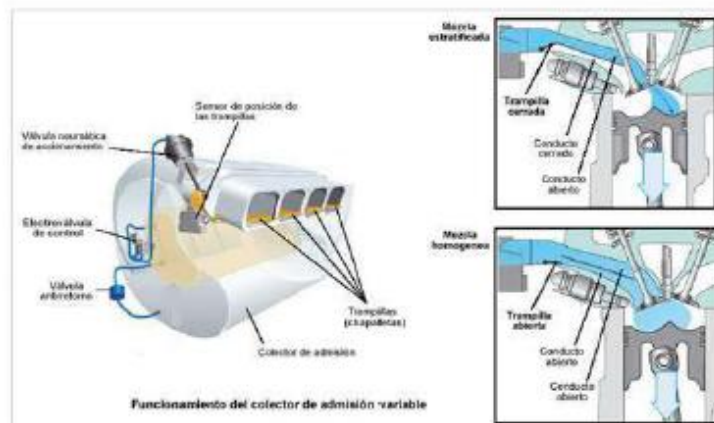


Figura 7-2: Colectores de admisión variables
Fuente: (Rodes, 2014)

Estos sistemas son los denominados de inyección multipunto y en ellos la inyección del combustible se realiza por medio del tubo de admisión o en la cámara de combustión, en

aquellos sistemas que utilizan la inyección directa, por delante de la válvula de admisión. Estos tubos de admisión tan solo transportan aire, de modo que el diseño de los mismos está configurado en base a mejorar esa admisión de aire. (Rodes, 2014)

Además, el colector de admisión variable dispone de un sistema de aletas, también llamadas mariposas, que se controla de forma electrónica y que es el encargado de canalizar el aire por el colector de admisión corto en regímenes bajos de potencia y por la sección larga cuando se circula a regímenes más elevados. (Rodes, 2014)

2.2.8. *Flujo de aire.*

El aire que ha sido tomado dentro y limpiado por el purificador de aire, fluye hacia el tanque de compensación de acuerdo con el ángulo de abertura de la válvula del acelerador, luego es distribuido a los cilindros a través de la admisión. En motores con sistema de alimentación a inyección, la cantidad de aire de admisión es detectada por un medidor del flujo de aire ó sensor de vacío a fin de hacer la apropiada mezcla de aire-combustible. El ordenador envía luego señales de inyección de combustible para el sistema de combustible de acuerdo con el volumen de aire de admisión. (FRANCISCA, 2011)

2.2.8.1. *Características del flujo en el múltiple de admisión*

Las líneas del aire, que se extienden desde el motor hasta el exterior, deben diseñarse para velocidades del aire de 50 a 100 pie/s (15 a 30 m/s). Los filtros para aire, para eliminar las partículas de suciedad, reducen el desgaste de los pistones, los anillos y los cilindros. Los silenciadores, que se utilizan a la entrada de las líneas del aire, se combinan con los filtros, con fines automotrices. (FRANCISCA, 2011)

Es recomendable precalentar el aire que llega al carburador y controlar su temperatura, ya que se reduce la variación en la densidad del aire y, en consecuencia, tener un mejor control de la relación de la mezcla, respecto a la economía de combustible y el control de emisiones; asimismo, se minimiza el congelamiento del carburador y se reduce la necesidad de una válvula de traspaso en el múltiple de escape. Debe suministrarse algo de calor para vaporizar el combustible; su precalentamiento es indeseable porque reduce la eficiencia volumétrica, se calienta el carburador y se evapora el combustible en la cámara del flotador; del mismo modo es indeseable, ya que se perderán por vaporización las fracciones ligeras del combustible. (FRANCISCA, 2011)

La energía química contenida en el combustible se libera bajo forma de calor cuando el combustible se quema por causa de la presencia del oxígeno del aire. La mezcla comprimida en la cámara de combustión se transforma, en vapor de agua (H₂O), bióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂). El nitrógeno, gas inerte contenido en el aire, no interviene en la combustión. El vapor de agua producido en la combustión se mantiene por debajo de su temperatura crítica y se comporta como un gas permanente. Entre los productos de la combustión se encuentran también porciones alicuotas de otros gases: monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H₂), metano (CH₄) y oxígeno (O₂), en especial cuando la combustión es incompleta. (FRANCISCA, 2011)

La cantidad de oxígeno que participa en el proceso está en razón directa del exceso de aire introducido con respecto al necesario para la combustión. En consecuencia, el fluido operante está formado inicialmente por el aire y el combustible y, después, por el conjunto de gases producidos durante la combustión. Como es natural y evidente, su composición química varía en el curso del ciclo operativo. (FRANCISCA, 2011)

2.2.8.2. Aire atmosférico

Una masa de aire seco, está a groso modo, compuesto de 77 partes de nitrógeno y 23 partes de oxígeno. Contiene además pequeñas cantidades de otros gases, pero se comparten en la combustión, como un gas y puede ser considerado desde el punto de vista automotriz como nitrógeno. (FRANCISCA, 2011)

2.3. Potencia

El concepto de potencia expresa cuantas veces está disponible el par motor en el tiempo, es decir, con qué velocidad se puede disponer del par. La potencia desarrollada por un motor depende de la relación de compresión y de la cilindrada, ya que a mayores valores de estas le corresponde mayor explosión y más fuerza aplicada al pistón; también depende íntimamente de las revoluciones por minuto a las que gira el motor. (Jairo, y otros, 2017)

$$P = T * w = \frac{T * n}{\frac{60}{2\pi}} \quad (1)$$

P: Potencia del motor (kW)

T: Torque o par motor (N.m)

w: Velocidad angular del eje del cigüeñal (rad/s)

n: Revoluciones por minuto (rpm)

2.3.1. *Dinamómetro de chasis*

Este dinamómetro se utiliza para realizar pruebas dinámicas en vehículos ligeros (no más de 3800 kg, o 37,278 N de peso bruto vehicular). El vehículo de prueba se coloca en los rodillos de acuerdo a su transmisión, delantera o trasera. (CIBIM, 2010)

Los vehículos de prueba se colocan sobre los rodillos, los cuales simulan condiciones reales de operación en las calles, incluyendo pendiente, rozamiento con el pavimento y peso del automotor. En el ambiente controlado del Laboratorio Dinámico de Emisiones Vehiculares, donde se encuentra el equipo, diversos sensores se ponen en contacto con los gases de escape. Dado que se cuenta con protocolos estandarizados que garantizan la repetitividad de los experimentos, es posible comparar el desempeño de distintos vehículos sometidos a las mismas condiciones. El Dinamómetro de Chasis también es útil para verificar que los nuevos que entran en circulación cumplen con las normas establecidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Olivera, 2013)

2.3.2. *Corrientes parásitas*

Las corrientes parásitas son corrientes que circulan en el interior de conductores como consecuencia de campos magnéticos variables con el tiempo. Estas corrientes circulares crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético aplicado. Cuanto más fuerte sea el campo magnético aplicado o mayor la conductividad del conductor o mayor la velocidad relativa de movimiento, mayores serán las corrientes parásitas y los campos opositores generados. (Pinto, 2017)



Figura 8-2: Freno de corrientes parásitas
Fuente: (Pinto, 2017)

2.4. Torque de un motor

El torque no es más que una unidad de medida que mide la fuerza que se ejerce sobre un cuerpo para girarlo o torcerlo. Aunque te suene un poco extraño el concepto, lo puedes ver en acción todos los días en la fuerza que aplicas al atornillar un tornillo, al pedalear una bicicleta o apretar una tuerca. (Alicvar, 2015)

En el caso del motor de un auto, el torque, expresados en Newton metros (Nm), mide la fuerza que es capaz de producir el motor para mover los pistones, la biela y el cigüeñal y con ellos las llantas del automóvil. (Alicvar, 2015)

2.4.1. Diferencia entre torque y caballos de fuerza

Ambas son unidades de medida, pero el torque, cómo ya se mencionó, mide la fuerza de torsión, mientras los caballos de fuerza miden la potencia de un vehículo. (NEXU, 2016)

La potencia es el resultado de multiplicar la fuerza, es decir el torque que produce el motor, por las Revoluciones Por Minuto (RPM), que no es más que las vueltas que dio el cigüeñal en minuto. Resumiendo, un poco, la potencia es, “cuántas vueltas dan los pistones en un minuto y a qué fuerza”. (NEXU, 2016)

Potencia = Torque X RPM

El torque es parte de la potencia, por eso cuando una persona dice que su auto tiene 300 HP, sólo cuenta la mitad de la historia, para saber su potencia real, habría que saber el torque. (NEXU, 2016)

2.4.2. Potencia, torque y rendimiento

Para entender cómo es que el torque afecta el rendimiento del combustible, debemos recordar cómo es que funciona un motor de combustión.

Un motor de combustión funciona en cuatro tiempos. En el primero la mezcla de aire y combustible entra al cilindro de combustión, en un segundo paso el pistón comprime la mezcla, en el tercer paso la bujía crea una chispa y explota la mezcla lo que produce que el pistón baje (momento en que se produce el torque) y en el cuarto paso, los residuos son desechados por el escape. (Castillo, 2017)

2.4.3. Punto máximo de torque

Este punto se conoce como rango útil de par motor, otra forma de llamar al torque. Se produce cuando el proceso de combustión se realiza de forma óptima, obteniendo la mayor potencia con el menor consumo de combustible. (Castillo, 2017)

El punto máximo de torque se relaciona con las RPM, es decir de lo rápido que se realice el proceso de combustión. Cuando las RPM son demasiado lentas, no llega suficiente combustible a los cilindros y la potencia es baja, conforme este proceso se acelera más combustible llega al cilindro y aumenta la fuerza en los pistones, es decir aumenta el torque y la potencia hasta llegar a un punto óptimo. (Castillo, 2017)

2.5. Múltiple de escape

Llamamos colector de escape al entramado de tubos que se unen a los conductos de escape del vehículo y que se encargan de recibir del motor los gases que resultan de la combustión para expulsarlos al exterior. (Jimenez, 2014)

Esta pieza es algo más que un conjunto de conductos que hacen converger los gases quemados a un tubo único dotado de un platillo de acople donde se une el tubo de escape. Lo primero que debe cumplir el múltiple de escape es tener suficiente resistencia a la corrosión para ser duradero a las altas temperaturas de funcionamiento, lo que generalmente se logra con un proceso de aluminación, silicación, cromización o la combinación de estos procesos sobre un tubo de acero, o bien utilizando hierro fundido aleado, además debe impedir un elevado enfriamiento de los gases calientes, por eso, es común que sean de paredes metálicas gruesas. (ARGUMEDO, 2012)

La forma y longitud de los tubos del múltiple de escape pueden jugar un papel notable a la hora de favorecer la limpieza del cilindro, y su diseño en particular está relacionado con las características del motor. (ARGUMEDO, 2012)

Cuando se abre la válvula de escape, los gases en el interior del cilindro aún están a elevada presión, por lo que se expanden en forma de una onda mecánica de choque dentro del espacio más amplio del tubo al que desembocan, esta onda mecánica debe viajar por los tubos que componen el múltiple de escape con libertad, si durante su trayectoria, la onda de expansión tropieza contra una superficie, por ejemplo con un codo muy pronunciado, puede rebotar en él (reflexión) y tomar un movimiento en reversa que se

opone al libre paso del resto de los gases, por lo que el cilindro no se limpiará adecuadamente. (ARGUMEDO, 2012)

Incluso, si se da el caso, la onda de retorno puede llegar a la válvula de escape abierta cuando el pistón está casi en el punto muerto superior y ya no realiza empuje de los gases, con la consecuencia de que entran gases quemados por esa válvula a alimentar la cámara de combustión. No hay que explicar que esto es muy nocivo para la eficiencia del motor. (ARGUMEDO, 2012)



Figura 9-2: Múltiple de escape junto al motor
Fuente: (ARGUMEDO, 2012)

2.5.1. Tipos de múltiples de escape

1. Driver side
2. Colector de escapes optimizado (Rivas, 2014)

2.5.1.1. Configuraciones de los múltiples de escape

Generalmente hay tres tipos de múltiples de escape:

1. Configuración 4 – 2 – 1

Este tipo de configuración consiste en la unión de dos pares colectores y sus salidas se juntan en un solo conducto, también se la conoce como 3Y. En esta configuración se crean dos ondas de presión lo cual obtiene la máxima potencia a media revolución. (Rivas, 2014)

2. Configuración 4 – 1

En la disposición los cuatro tubos primarios de los colectores se encuentran en una forma cónica y convergen con el diámetro del silenciador. En esta configuración se crea una

sola onda de presión con mayor amplitud, es común en motores de competencia. (Rivas, 2014)

3. Escape doble

Consiste en que la unión de cada par de colectores de salida hacia el silenciador, es decir se tienen dos silenciadores uno para cada uno de los dos colectores. (Rivas, 2014)

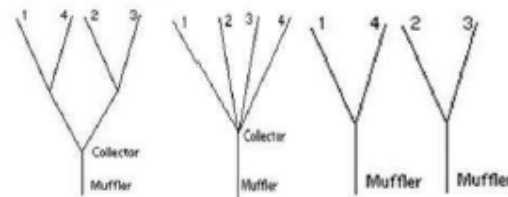


Figura 10-2: Tipos de configuraciones de múltiples de escape
Fuente: (Rivas, 2014)

2.5.2. Partes del sistema de escape

En algunos automóviles que no poseen control de emisiones su sistema de escape consta de los elementos nombrados a continuación:

- Colector de escape.
- Silenciador.
- Conductos de evacuación.
- Sujetadores de la tubería. (Banegas, 2014)

Por otro lado, los automóviles que vienen equipados con un sistema de control de emisiones tienen los siguientes elementos:

- Colector de escape.
- Conductos de evacuación.
- Convertidor catalítico.
- Silenciadores.
- Sujetadores de la tubería. (Banegas, 2014)

2.5.3. Fórmulas del múltiple de escape.

1. Longitud del conducto o colector primario p

$$p = \frac{850 * ED}{rpm} - 3 \quad (2)$$

Dónde:

P = longitud del colector primario

ED = 180° más los grados de apertura de la válvula de escape

Rpm = número de revoluciones por minuto.

Para determinar la longitud de p1 y p2 se debe cumplir que p1 sea mayor o igual a 15 pulgadas.

$$p2 = p - p1$$

2. Diámetro del colector

$$ID = \sqrt{\frac{cc}{(p+3)} * 2.1} \quad (3)$$

Dónde:

ID = diámetro de colector

cc = volumen del cilindro en centímetros cúbicos

p = longitud primaria (pulg)

3. Longitud del colector secundario

$$Ls = p + 3$$

Dónde:

Ls = longitud del colector secundario

p = longitud del colector primario

3 = valor en pulgadas

4. Diámetro del colector secundario

$$IDS = \sqrt{ID^2 * 2} + 0.93 \quad (4)$$

Dónde:

IDS = diámetro del conducto secundario

ID = diámetro del primario calculado

2.5.4. Conductos de evacuación

Dentro del sistema de escape, los conductos de evacuación son los encargados de conducir los gases de combustión que van desde el múltiple del colector hasta la salida a la superficie que por lo general va ubicada en la parte posterior del auto. (Banegas, 2014)

Por esta razón estos conductos de evacuación son fabricados de acero inoxidable, para de esa manera evitar la oxidación producida por el agua dentro del sistema. Todo esto se hace para evitar que se corra el sistema, ya que, si se generan perforaciones dentro de sí se generan altos niveles de ruido en todo el sistema de escape. (Banegas, 2014)

Por otro lado, en autos que vienen equipados con sistemas de inyección electrónica donde el sistema de escape posee sensores ECM (módulo de control electrónico) que son activados por sensores de oxígeno que le envían señales para realizar correcciones en la medida correcta de la mezcla de aire-combustible. (Banegas, 2014)

Dentro de la configuración del sistema de escape, se encuentran varios tipos de conductos, a continuación, los nombramos:

1. Etapa o conducto inicial: Desde el múltiple son recibidos los gases de combustión y son transportada por este conducto que se encuentra ubicado corriente abajo dentro del sistema de escape. (Banegas, 2014)
2. Etapa o conducto intermedio: Esta etapa viene a conectar el tubo de escape con el silenciador en el sistema de escape. El propósito de esta etapa es transportar los gases hasta el silenciador y de esa manera silenciar el sonido que se produce dentro del sistema. Es importante señalar que no todos los autos poseen esta etapa. (Banegas, 2014)
3. Etapa o conducto final: Dentro de todo el sistema de escape, completa el diseño, finalmente a través de esta etapa se dirigen los gases de combustión hacia el exterior del auto. De manera general, un conducto de escape final posee una longitud mayor a 35 cm. (Banegas, 2014)

2.5.5. Ubicación del colector de escape de un coche

El colector de escape se encuentra ubicado en un lateral de la culata y va anclado a ésta con una junta de escape que asegure su perfecto acople. Ambos elementos deben estar diseñados para aguantar las elevadas temperaturas de los gases de combustión por lo que habitualmente se fabrican en fundición de hierro para prevenir posibles escapes que disminuyan el rendimiento del motor. (Jimenez, 2014)

2.5.6. Funcionamiento de un colector de escape

Los gases de escape salen a través de los cilindros y el colector de escape va unido a ellos por medio de varios tubos con el mismo largo y diámetro. Se compone de tantos tubos como cilindros posea el motor y en el otro extremo van unidos entre sí. Desde ahí los gases son canalizados hacia el catalizador, que actuará como filtro y luego los deslizará por el tubo de escape y el silenciador antes de que lleguen de nuevo a nuestra atmósfera. (Jimenez, 2014)

En el colector de escape van alojados el turbo y la válvula EGR, siempre que se trate de vehículos que incorporen estos dispositivos:

- El turbo aprovecha la velocidad de salida de los gases quemados para impulsar su turbina y la de admisión, que va unida a éste por un eje solidario. (Jimenez, 2014)
- La válvula EGR, se encarga de admitir un porcentaje de gases de escape hacia la admisión para empobrecer la mezcla y mantener la combustión dentro de los límites medioambientales permitidos. (Jimenez, 2014)

2.5.7. Finalidad del colector de escape

El colector de escape está diseñado para que la salida de los gases de combustión sea guiada por el sistema de escape desde los distintos cilindros por un único conducto, ahorrando espacio y permitiendo el uso de una sola serie de filtros acústicos (silenciosos). (Jimenez, 2014)

Además, este sistema ayuda a controlar los niveles de fuerza y presión con que los gases son expulsados, mejorando el desplazamiento del vehículo en altas revoluciones. Si la calidad del colector de escape no fuese la adecuada, las posibles fugas o desgastes provocarían pérdidas en el rendimiento propulsor del motor. (Jimenez, 2014)

2.5.8. Características del múltiple de escape.

1. Todas las bocas de unión a los cilindros están montadas en una pieza común, lo que le permite a través de pernos acoplarse de manera segura y apretada al motor. (ARGUMEDO, 2012)
2. Todos los codos de los tubos son de curvatura alargada para facilitar el flujo de las ondas de presión sin rebote. (ARGUMEDO, 2012)
3. Los tubos convergen dos a dos en una "Y" hasta terminar en el tubo final de salida.
4. Los diámetros de los tubos crecen a medida que se acoplan más de ellos, la segunda sección después de la primera "Y" es de diámetro más grande que los tubos que entran a la "Y", lo mismo sucede en la segunda convergencia. Esto se debe a que más de un cilindro puede estar aportando volumen de flujo al conducto y por tanto se necesita más diámetro para reducir las pérdidas por rozamiento. (ARGUMEDO, 2012)
5. Finalmente termina en un platillo con orificios para pernos a fin de acoplarse al tubo de escape.



Figura 11-2: Múltiple de escape moderno
Fuente: (Sabelotodo, 2014)

La convergencia en "Y" se usa porque tiene ventajas con respecto a otras formas, las cuales son:

1. Se produce un cambio de dirección suave y poco pronunciado en la trayectoria de los gases, lo que introduce pocas pérdidas por rozamiento y evita además la posibilidad de rebote de las ondas de presión. (ARGUMEDO, 2012)

2. La alta velocidad de los gases que circulan por la "Y" desde uno de los tubos, pueden hacer trabajo de succión a modo de tubo Venturi en el otro conducto del par, lo que es un factor de limpieza adicional del cilindro del segundo tubo, si en ese momento se está produciendo el final de la carrera de escape del pistón correspondiente. Note en la figura 4 que los tubos que se llevan a una "Y" no corresponden siempre a cilindros vecinos, se hacen converger aquellos en los que el efecto de succión se puede aprovechar, es decir, aquellos cuyos pistones tengan las posiciones relativas adecuadas para que se cumpla lo descrito arriba. (ARGUMEDO, 2012)

2.5.9. Flujo compresible

La cámara de combustión y conjuntamente con cabeza biela, cilindro forman parte esencial de la combustión en este conjunto recibe su fluido principal aire-comustible al final de este proceso se genera la expulsión de gas: los fluidos antes mencionados ingresan y desplazan al exterior a velocidades infinitamente rápidas a los denominadas flujos compresibles.

2.5.10. Número de Mach

Número de Mach, Mac, llamado así en honor al físico austriaco Ernst Mach 1838-1916. es la relación de la velocidad real del fluido (o el de un objeto en aire en reposo) y la velocidad del sonido en el mismo fluido en el mismo estado. (Yungus A. Cengel, 2007). Se describe la siguiente ecuación a continuación:

$$Ma = v/c$$

Donde;

V= velocidad real del fluido

C= velocidad del sonido

Los regímenes del flujo de fluidos a menudo se describen en términos del número de flujo de Mach. El flujo se llama sónico cuando $Ma=1$, subsónico cuando $Ma<1$, supersónico cuando $Ma>1$, hipersónico cuando $Ma \gg 1$ y transónico cuando $Ma \approx 1$. (Yungus A. Cengel, 2007)

2.6. Software CAD/CAE

2.6.1. *Diseño asistido por computador (CAD).*

El CAD es una técnica de análisis, una manera de crear un modelo del comportamiento de un producto aun antes de que se haya construido. (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

Una de las herramientas de análisis más estudiado y aplicado son los cálculos con elementos finitos que permiten predecir con gran precisión y simplicidad los esfuerzos y deformaciones que soportará internamente una pieza o conjunto de piezas al ser sometidas a un sistema de cargas. (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

La aplicación del software CAD en la ingeniería abarca la elaboración de cuadros sinópticos, diagramas de diversos tipos, gráficos estadísticos, representación normalizada de piezas para su diseño y fabricación, representación tridimensional de modelos dinámicos en multimedia, análisis con elementos finitos, aplicaciones en realidad virtual, robótica, etc. (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

2.6.2. *Ingeniería asistida por computador (CAE)*

CAE simula bajo condiciones aparentemente reales el efecto de variables sobre el elemento diseñado, con el fin de llegar a una forma geométrica optimizada para ciertas condiciones. Es un modelado interactivo tridimensional en tiempo real con análisis mediante pruebas no destructivas.

Diseñadores, ingenieros, industriales, arquitectos, etc. utilizan los programas CAE para verificar la factibilidad de distintas alternativas de diseño. Cuando el CAE se utiliza correctamente, se pueden obtener en poco tiempo soluciones eficientes con un alto grado de confianza. La repercusión más importante es que posibilita el diseño mediante ciclos de prueba ya que las primeras informaciones obtenidas por el CAE es sólo la base para la discusión de factibilidad en la que intervendrán la experiencia y la evolución futura. (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

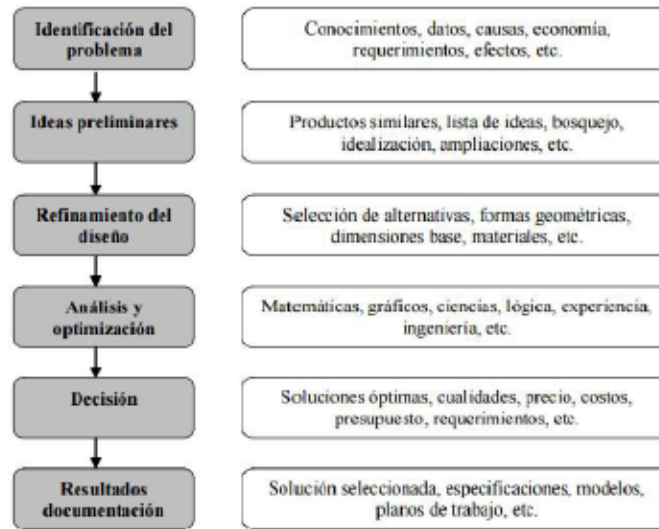


Figura 12-2: Proceso de diseño CAE.
Fuente: (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

Las características generales que deben tener el software CAD/CAE son:

- Simulaciones dinámicas con características especiales de visualización de procesos y resultados (representaciones foto realistas, tabulaciones, diagramas, giros, sonido, etc.).
- Capacidad del software de generar soluciones óptimas según los tipos de aplicación.
- Desarrollo de sistemas virtuales dentro de un entorno, permitiendo en muchos casos eliminar los prototipos físicos.
- Ingeniería concurrente on-line (trabajo multidisciplinario vía red, con niveles de acceso y con geoprocesamiento referenciado).
- Arquitectura abierta del software (posibilidad de personalizar y generar programas complementarios - "glue functions").
- Ingeniería inversa (obtener un modelo CAD a partir del escaneado tridimensional de una pieza real). (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

Tabla 1-2: Tipos de modelos computarizados.

Modelo	Características
Geométrico con cortes virtuales	Representación volumétrica del objeto en el cual se pueden aplicar rotaciones y secciones.
Animación de ensamble y funcionamiento	Movimiento, tiempo, interferencias y algunas características generales del sistema propiedad espacio-temporal
Simulación de procesos	Movimiento, tiempo y las variables importantes del sistema
Recorrido virtual	Movimiento, tiempo y escena.
Entorno paisajista	Movimiento, tiempo, luminiscencia, paisaje del entorno, sonidos naturales.
Ergonómico	Medidas, formas y movimientos ergonómicos
Aleatoriedad y transformación	Formas, tiempo, movimiento, sonido, transformaciones

Fuente: (Oswaldo Rojas Lazo, 2006)

Realizado por: Autores

2.1.1. Técnicas de mallado.

La generación numérica de mallas juega un papel fundamental en cualquier problema computacional científico en el cual la geometría de una región sea compleja o cuando la solución tiene una estructura muy complicada. (Ingenierodelacrisis, 2012)

Una malla generada numéricamente es pensada como el conjunto organizado de puntos formado por las intersecciones de las líneas de un sistema de coordenadas. La característica esencial de un sistema tal es que alguna línea coordenada (o en tres dimensiones, alguna superficie coordenada) sea coincidente con cada segmento de la frontera de la región física. (Ingenierodelacrisis, 2012)

El uso de intersecciones de líneas coordenadas para definir los puntos de la malla proporciona una estructura organizacional que permite que todos los cálculos sean realizados en una malla cuadrada fija cuando las ecuaciones diferenciales que se estén resolviendo hayan sido transformadas de tal manera que las coordenadas curvilíneas replacen a las coordenadas cartesianas como variables independientes. (Ingenierodelacrisis, 2012)

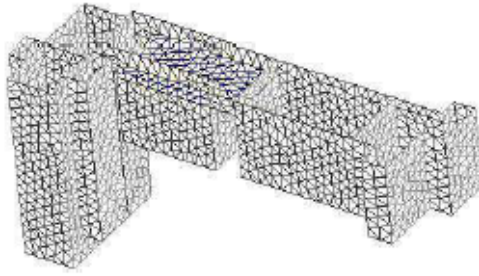


Figura 13-2: Modelo de mallado.
Fuente: (ingenierodelacrisis, 2012)

2.1.1.1. *Propiedades que deben tener las mallas.*

a) **Tipo geométrico**

- La variación de tamaño entre los elementos adyacentes debe ser progresiva.
- La densidad de elementos en algunas regiones de la malla debe ser más altas. Esto sucederá en aquellas zonas que necesitemos un elevado gradiente de soluciones.
- En las mallas de elementos triangulares se deben evitar los ángulos obtusos.
(Ingenierodelacrisis, 2012)

b) **Tipo físico**

Puede haber aspectos físicos del problema que condicionen la geometría de los elementos: anisotropía, formas de los elementos impuestas. (Ingenierodelacrisis, 2012)

2.1.1.2. *Técnicas o algoritmos de mallado*

Existen distintas técnicas o algoritmos para definir una malla:

- Manual o semi-automático.
- Métodos basados en la transformación de un dominio con geometría simple.
- Métodos basados en la solución de un sistema de ecuaciones en derivadas parciales.
- Métodos basados en la deformación y modificación local de una malla sencilla.
- Métodos basados en la composición de mallados de subconjuntos del dominio a mallar, obtenidos por métodos del tipo 2 o 3. (Ingenierodelacrisis, 2012)

2.1.1.3. *Mallado adaptativo.*

La importancia de disponer de un medio para evaluar que se comete en el cálculo radica en que permite el refinamiento de los mismos. (Valero, 2013)

Método H. Consiste en la reducción del error actuando directamente sobre el tamaño del elemento y manteniendo constante la función de forma. Presenta dos inconvenientes, es el método más lento, desde el punto de vista de velocidad de convergencia; y se pierde el control sobre el mallado pudiendo generarse mallas distorsionadas. (Valero, 2013)

Método P. consiste en ir aumentando progresivamente el grado de los polinomios de interpolación (funciones de forma), manteniendo fijo el tamaño de los elementos. Tiene mayor velocidad de convergencia que el método H, pero presenta el problema de que requiere acotar el grado máximo del polinomio. (Valero, 2013)

Método HP. Consiste en el uso secuencial de ambas técnicas. En primer lugar, se optimiza el mallado a la geometría, y posteriormente se modifica el grado del polinomio hasta alcanzar el error deseado. (Valero, 2013)

Anexo 4

Cálculo de la longitud del conducto con el que se dimensionaría el teórico resonador de Helmholtz.

$$N_t = \frac{955}{K} \times a \times \sqrt{\frac{A}{l \times \frac{Vd(CR + 1)}{2(CR - 1)}}$$

$$5250 = \frac{955}{2} \times 342.9 \times \sqrt{\frac{24.6}{l \times \frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}}$$

$$\left(\frac{5250}{\frac{955}{2} \times 342.9}\right)^2 = \frac{24.6}{l \times \frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}}$$

$$\left(\frac{5250}{\frac{955}{2} \times 342.9}\right)^2 = \frac{24.6}{l \times \left(\frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}\right)}$$

$$l = \frac{24.6}{\left(\frac{5250}{\frac{955}{2} \times 342.9}\right)^2 \times \left(\frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}\right)}$$

$$l = \frac{24.6}{\left(\frac{5250}{163781.625}\right)^2 \times \left(\frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}\right)}$$

$$l = \frac{24.6}{(0.03205)^2 \times \left(\frac{1598.38(9.1 + 1)}{2(9.1 - 1)}\right)}$$

$$l = \frac{24.6}{(0.03205)^2 \times \left(\frac{1598.38 \times 10.1}{2 \times 8.1}\right)}$$

$$l = \frac{24.6}{(0.03205)^2 \times \left(\frac{16138.638}{16.2}\right)}$$

$$l = \frac{24.6}{(0.03205)^2 \times 996.22}$$

$$l = \frac{24.6}{1.024}$$

$$l = 24.02 \text{ cm}$$

Anexo 5

Cálculo de la presión interna a través de la diferenciación de presiones considerando el valor de vacío obtenido en la medición

$$P_1 = 0.71 \text{ atm} = 71940.75 \text{ Pa}$$

$$\text{Lectura del vacuómetro} = -18 \text{ inHG} = -60954.98 \text{ Pa}$$

$$P_2 = P_1 + (-60954.98 \text{ Pa}) = 10985.77 \text{ Pa}$$

Anexo 6

Cálculo de la velocidad de la entrada del aire en base al vacío generado por el motor con la simplificación de la ecuación de Bernoulli.

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2$$

$$P_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{2(71940.75 - 10985.77)}{1.225}}$$

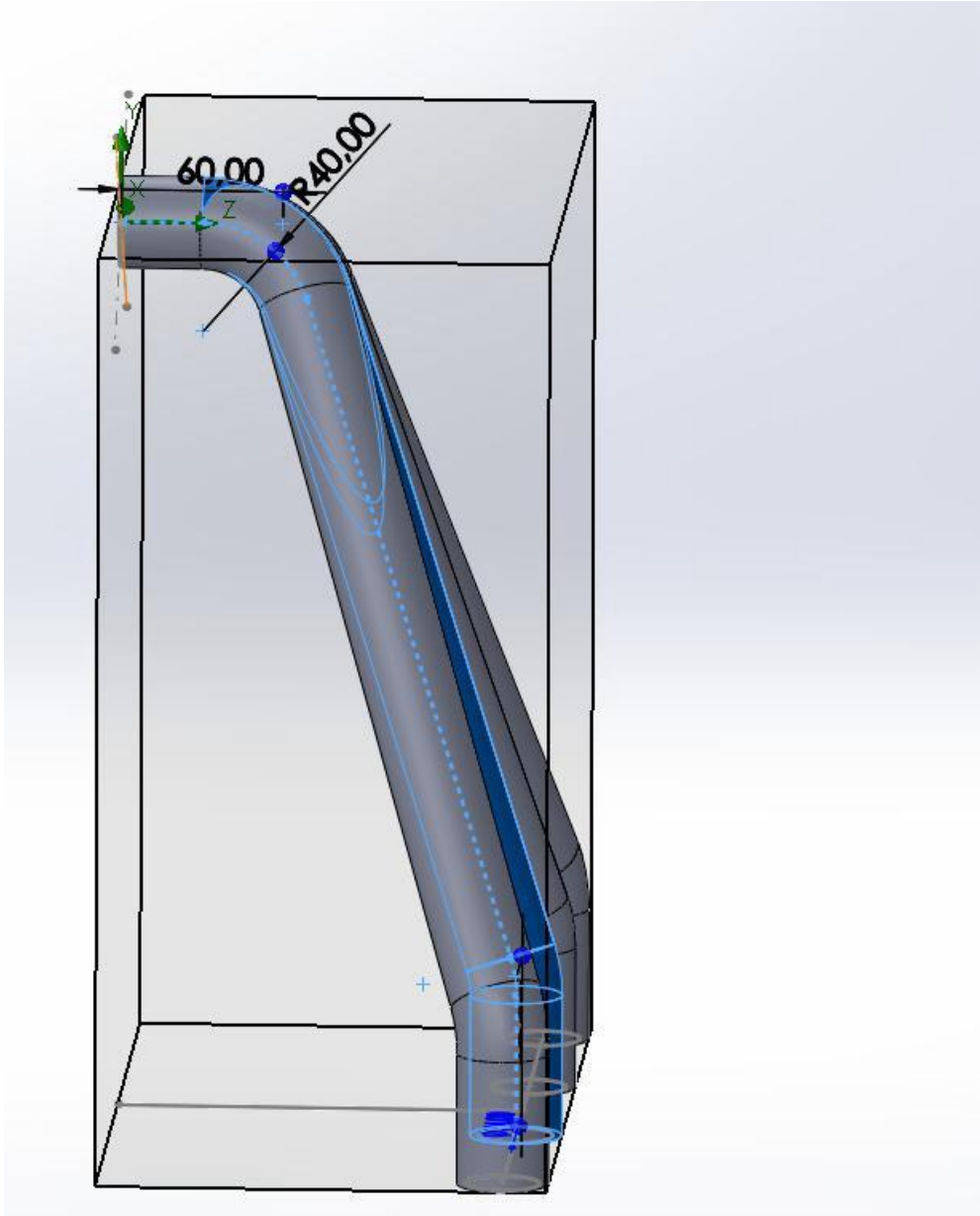
$$v_2 = \sqrt{\frac{2(60954.98)}{1.225}}$$

$$v_2 = \sqrt{\frac{121909.96}{1.225}}$$

$$v_2 = \sqrt{99599.96}$$
$$v_2 = 315.60 \text{ m/s}$$

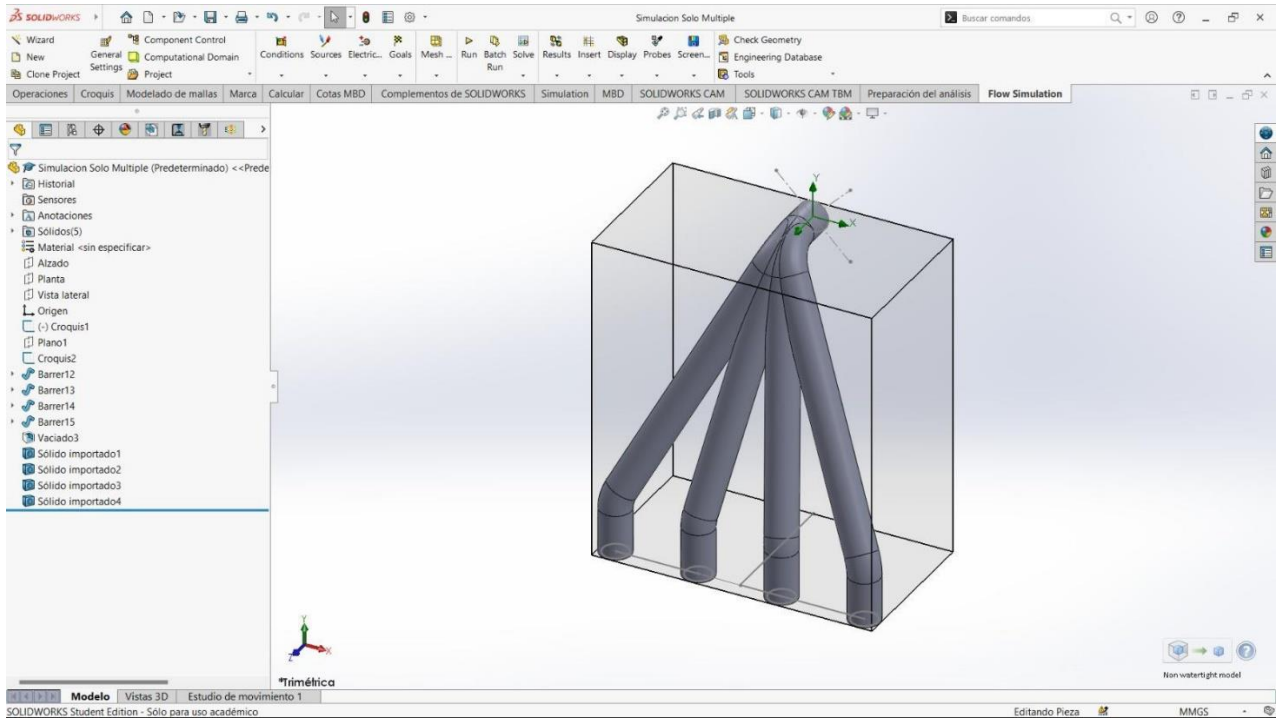
Anexo 7

Desarrollo y diseño del múltiple de admisión en Solid Works



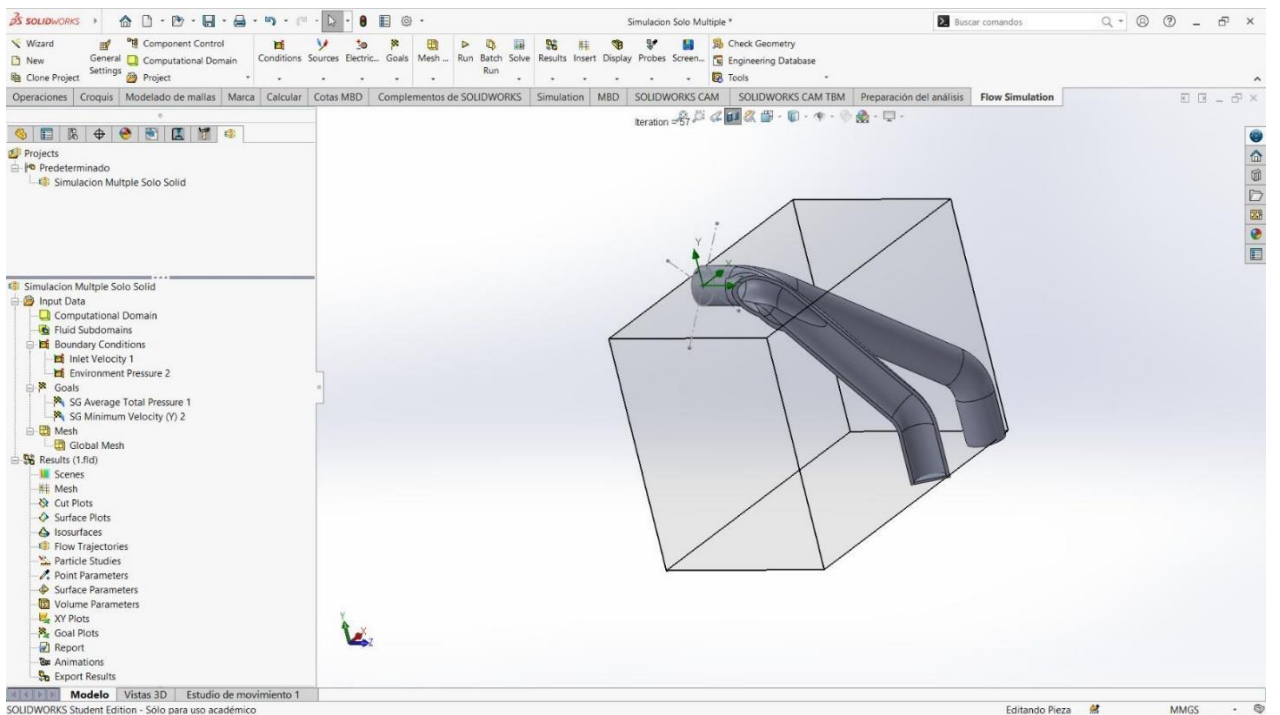
Anexo 8

Vista Isométrica del diseño del múltiple de admisión



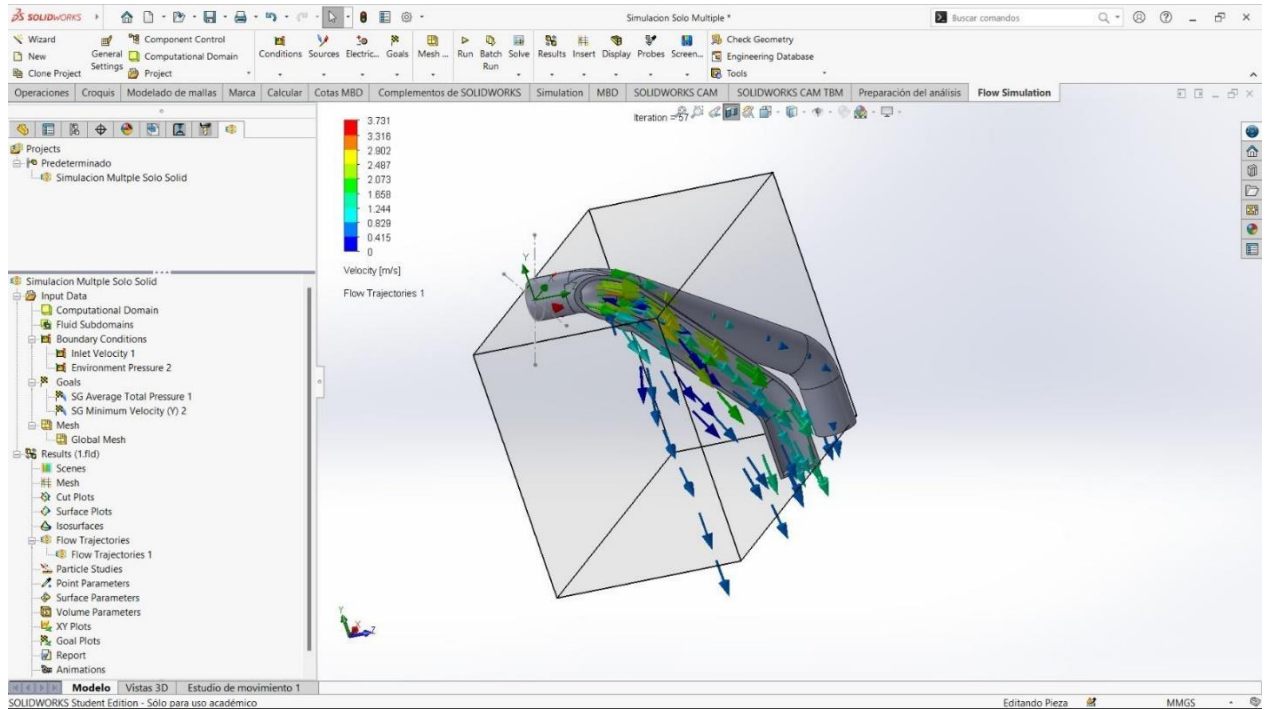
Anexo 9

Vista de corte del múltiple de admisión desarrollado en Solid Works



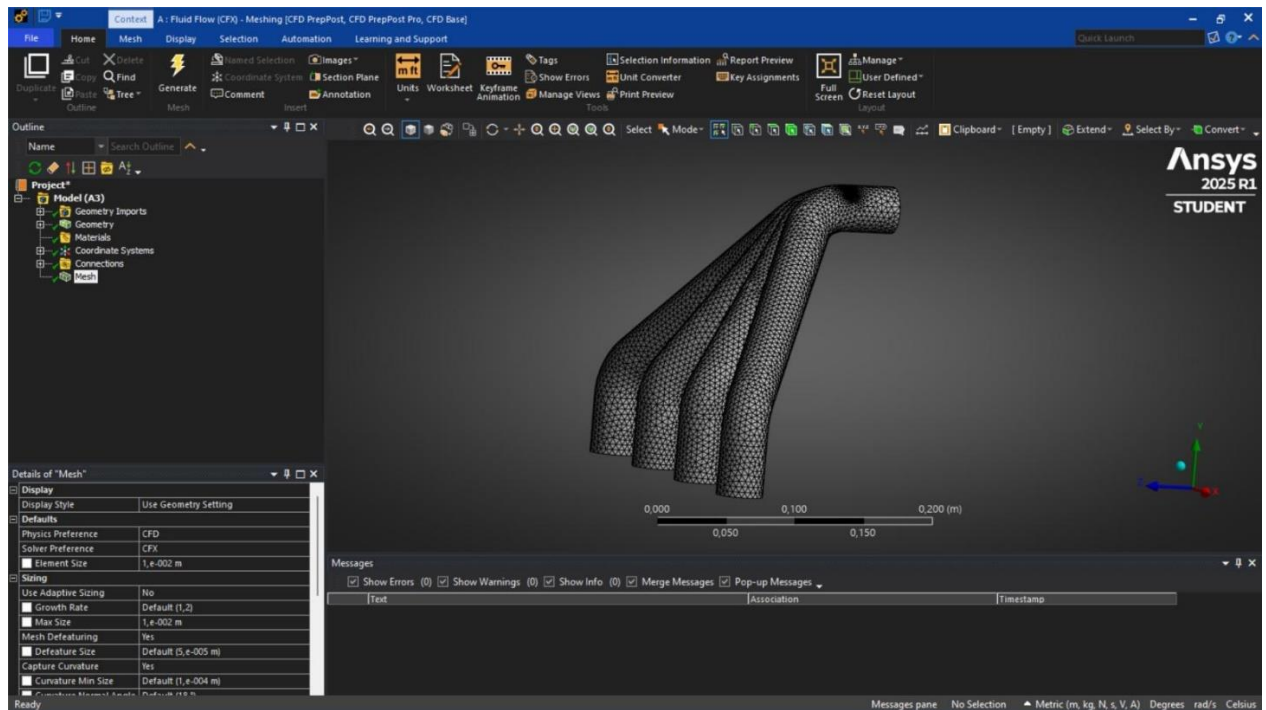
Anexo 10

Comprobación de flujometría del múltiple de admisión en Solid Works



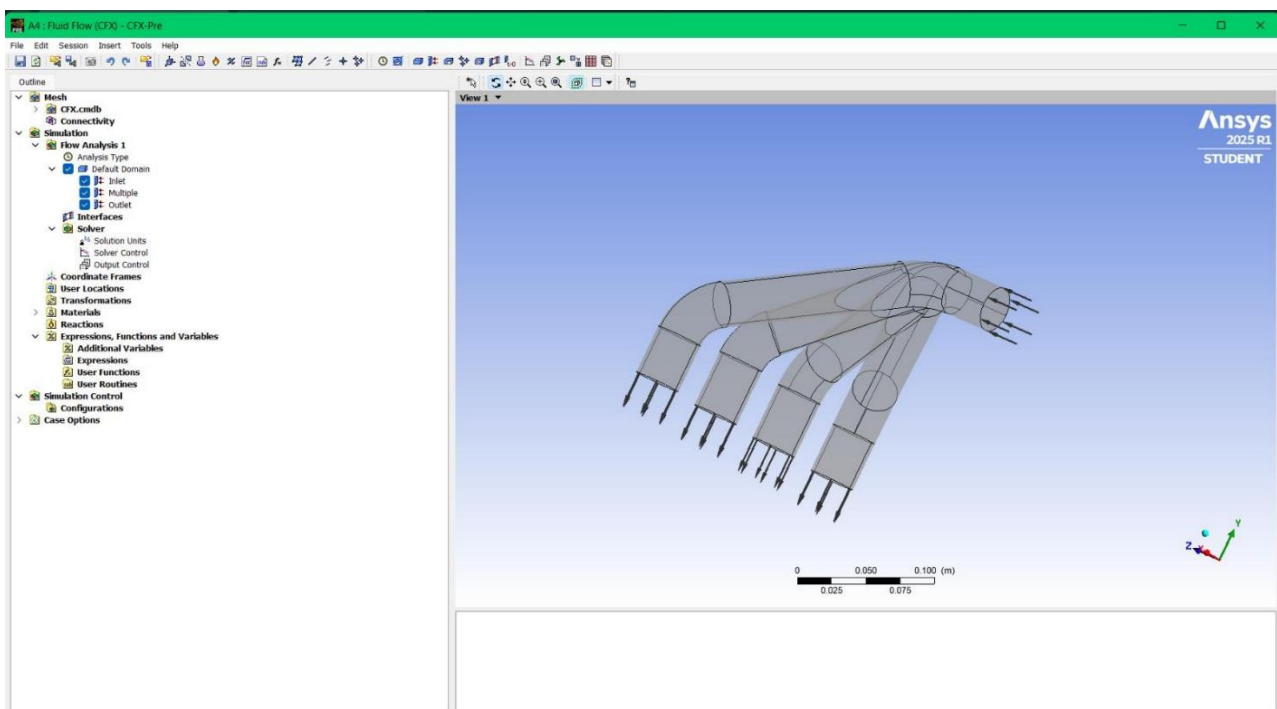
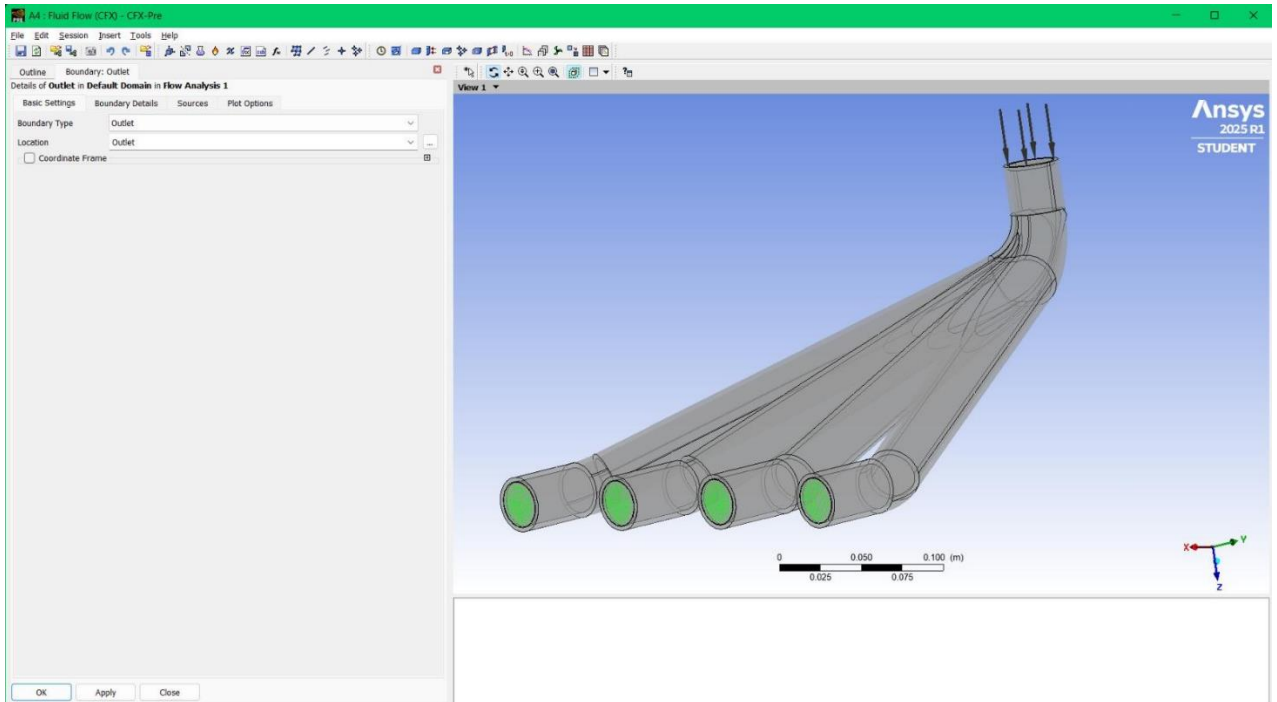
Anexo 11

Importación y mallado de múltiples de admisión en ANSYS



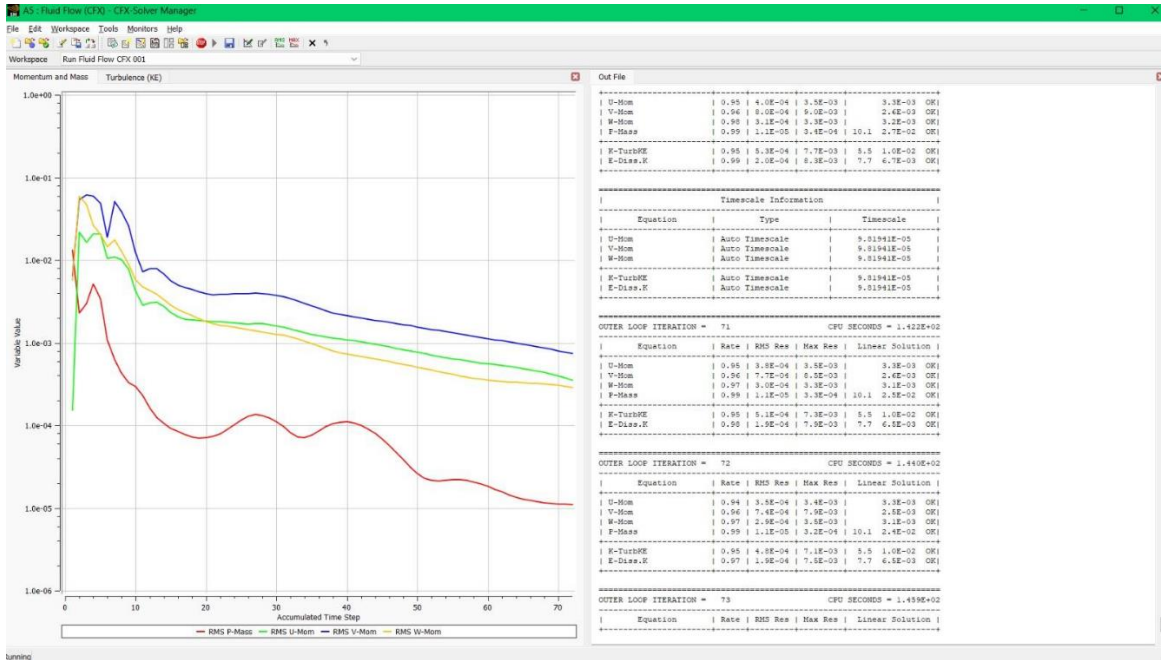
Anexo 12

Designación de condiciones de frontera de múltiples de admisión en ANSYS



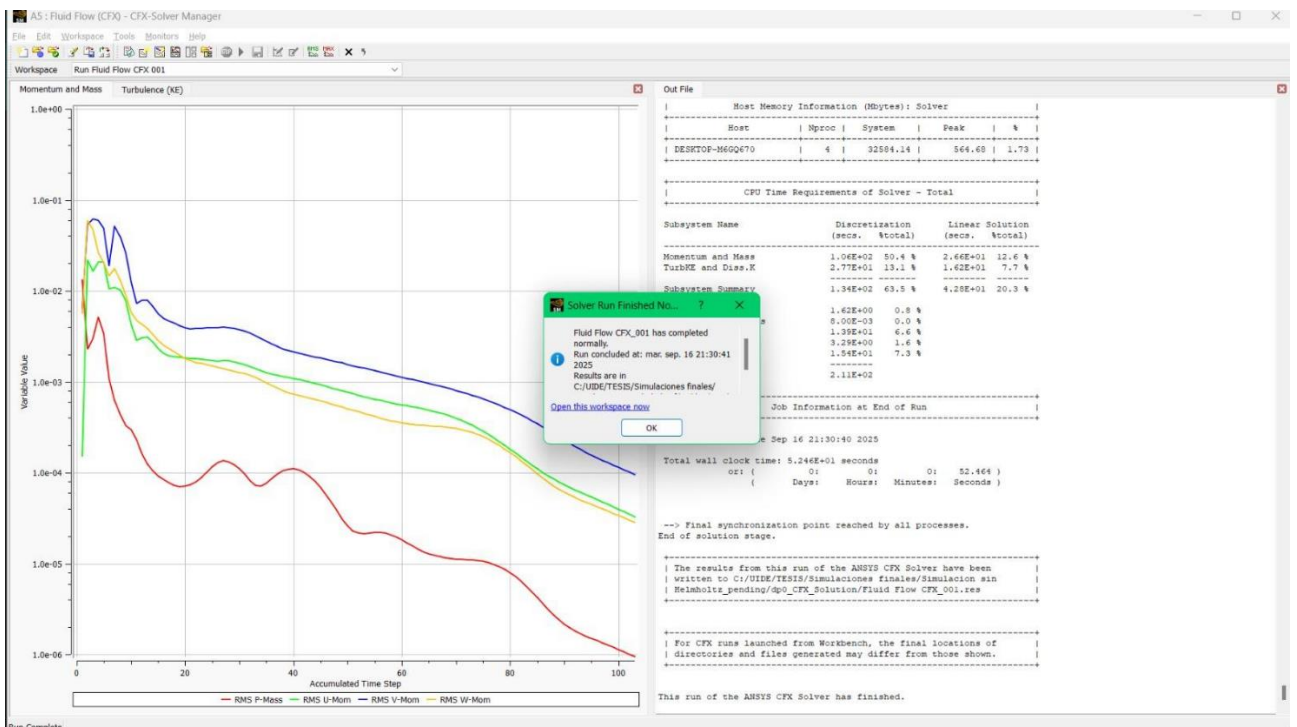
Anexo 13

Previsualización de cálculo computacional de las simulaciones por parte de ANSYS



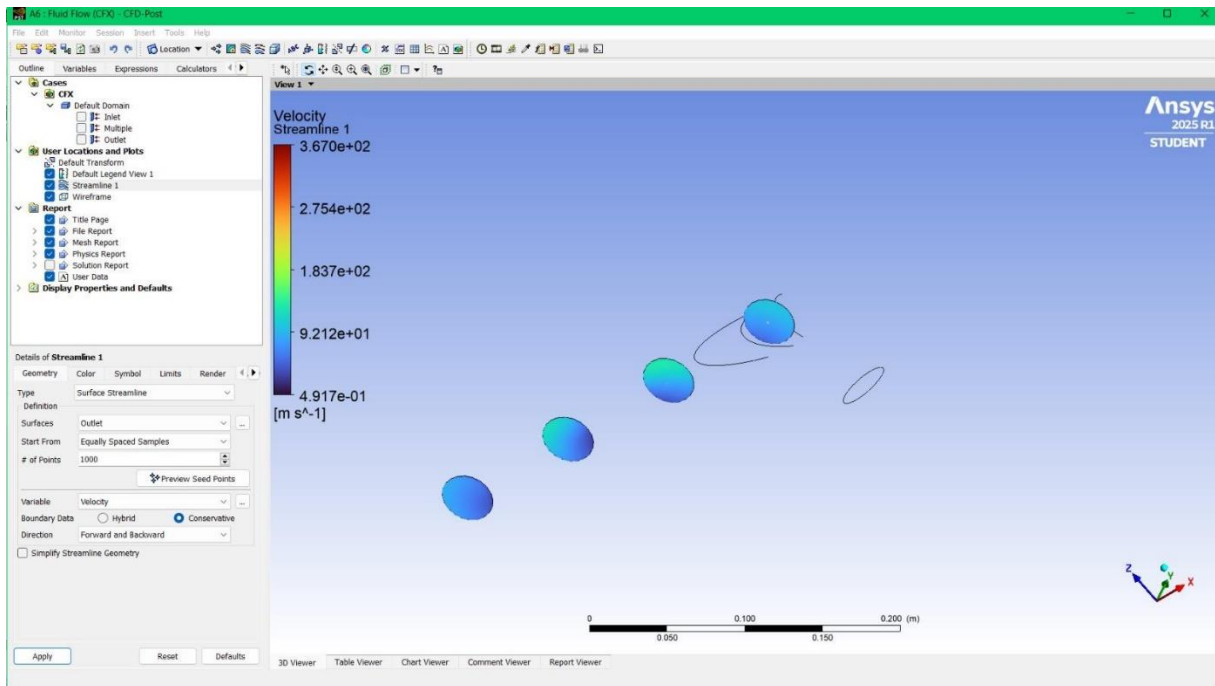
Anexo 14

Culminación de cálculos computacionales por parte de ANSYS con resultados validos y correctos de las simulaciones



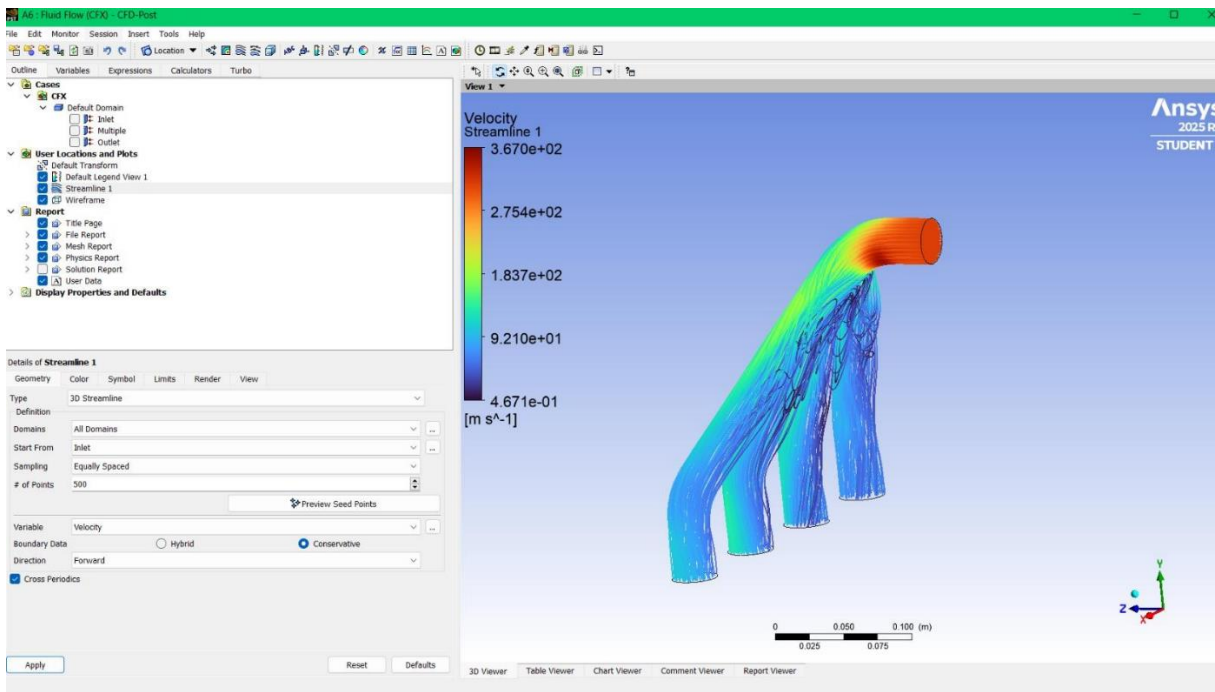
Anexo 15

Visualización de resultados obtenidos de uno de los múltiples sometidos a simulaciones



Anexo 16

Visualización general del comportamiento del fluido en las simulaciones



Anexo 17

Vehículo designado en el cual se realizará la toma de vacío para determinar la velocidad de entrada de aire.



Anexo 18

Toma de datos de vacuómetro instalado en el vehículo en situación estática del vehículo (referencial)

