



ING. AUTOMOTRIZ

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

AUTOR:

Axel Fabricio Tapia Aimacaña
Stalin Genaro Masabanda Acosta
Tupari Zandino Montalvo Mendoza

DIRECTOR:

PhD. Guillermo Gorky Reyes Campaña

**Análisis de turbulencia inducida en la zona squish,
según la altura de la cámara.**

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Axel Fabricio Tapia Aimacaña, Tupari Zandino Montalvo Mendoza y Stalin Genaro Masabanda Acosta, 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.



Axel Fabricio Tapia Aimacaña



Tupari Zandino Montalvo Mendoza



Stalin Genaro Masabanda Acosta

APROBACIÓN DEL TUTOR

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

**GUILLERMO
O GORKY
REYES
CAMPAÑA**

Firmado
digitalmente por
GUILLERMO
GORKY REYES
CAMPAÑA
Fecha:
2025.07.28
09:37:59 -05'00'

Firma profesor

DEDICATORIA

Este artículo se lo dedico a mis padres y a mi hermano, cuyo amor y apoyo incondicional han sido mi fuente de inspiración para poder alcanzar cada meta en el transcurso de mi vida. A mis profesores y director de tesis quienes han sido parte fundamental en mi desarrollo personal y académico.

AXEL FABRICIO TAPIA AIMACAÑA

Dedico el siguiente artículo en primer lugar a Dios, por darme fortaleza, sabiduría y paciencia en este recorrido. Este logro definitivamente es una prueba de su guía en mi vida. A mis pilares los cuales, con su amor incondicional, sacrificio y apoyo constante me han enseñado el valor del esfuerzo y dedicación, su ejemplo ha sido mi mayor inspiración en este trayecto de vida, así mismo a mi director de tesis el cual supo motivarme para culminar con mi proceso estudiantil.

TUPARI ZANDINO MONTALVO MENDOZA

Este trabajo está dedicado a quienes han sido el fundamento silencioso pero firme de cada uno de mis logros. A Dios, por brindarme la claridad mental y la serenidad necesaria para perseverar incluso en los momentos de mayor incertidumbre; Su presencia ha sido un faro constante en este proceso académico. A mis padres, cuyo compromiso, ejemplo de vida y apoyo incondicional han sido esenciales para mantenerme enfocado y motivado.

STALIN GENARO MASABANDA ACOSTA

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiar mi camino y darme la valentía necesaria para alcanzar esta meta. También a mi familia quienes constantemente me han brindado su valioso respaldo. A la Universidad Internacional del Ecuador, por ofrecerme las herramientas para crecer académicamente, y a mis docentes, por su compromiso y orientación. Finalmente, valoro el apoyo de mis compañeros de estudios, quienes fueron parte fundamental en esta etapa académica.

AXEL FABRICIO TAPIA AIMACAÑA

Mi agradecimiento principal es para Dios, por permitirme alcanzar este anhelo y sostenerme en cada etapa del camino. A mis padres, por su amor, su apoyo constante y por inculcarme el valor de la perseverancia. También a mis hermanas por sus ánimos en los momentos difíciles. Y a personas allegadas gracias por sus palabras de aliento y recordarme siempre que, con Dios, estamos llamados a avanzar con firmeza y dignidad.

TUPARI ZANDINO MONTALVO MENDOZA

Agradezco, en primer lugar, a Dios por brindarme la fortaleza y claridad necesarias para completar este trabajo. Expreso mi reconocimiento a mi familia por su constante apoyo y motivación a lo largo de este proceso. Asimismo, agradezco a la Universidad Internacional del Ecuador y a los docentes que contribuyeron a mi formación académica. Finalmente, extendiendo mi gratitud a quienes, de manera directa o indirecta, ofrecieron su colaboración para el desarrollo de este estudio.

STALIN GENARO MASABANDA ACOSTA

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	8
Introducción.....	9
Marco Teórico	11
Cámara de combustión	11
Flujo de admisión	11
Turbulencia	12
Características de la turbulencia	12
Generación de turbulencia en MCI.....	12
Swirl.....	13
Squish	14
Rangos de Temperatura y su Importancia en MCI.....	15
Estado del arte.....	15
Materiales y Métodos	16
Método.....	16
Materiales	16
Resultados y Discusión.....	18
Discusión	25
Conclusiones.....	26
Bibliografía.....	27
Anexos	28
Anexo 1. Tabla de medidas del motor Ecotec 1.8 l.....	28
Anexo 2. Medidas y modelado de los elementos del motor.....	29
Anexo 3. Geometría de válvulas tanto para admisión y escape.	32
Anexo 4. Figura de análisis de presión.....	32
Anexo 5. Figura de simulación de propagación de presión por la cámara y el pistón	33
Anexo 6. Simulación de propagación de la temperatura por la cámara y el pistón.....	33
Anexo 7. Figuras de resultados de gases	34
Pruebas Realizadas	40

Análisis de la turbulencia inducida en la zona squish, según la altura de la cámara.

Ing. Gorky Reyes.¹, Tupari Montalvo.², Stalin Masabanda.³ Axel Tapia.⁴

¹ ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, gureyesca@uide.edu.ec,

²Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, axtapiaai@uide.edu.ec

³Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, tumontalvome@uide.edu.

⁴ ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, stmasabandaac@uide.edu.ec

RESUMEN

Introducción: Aunque los pistones están diseñados para generar turbulencia que favorece la mezcla aire-combustible, existe incertidumbre sobre cómo modificaciones mínimas en la geometría, como la reducción del volumen en la zona squish debido a la rectificación, alteran la distribución térmica y la eficiencia en motores, donde el control de emisiones sí es relevante. Este estudio busca analizar esos efectos, especialmente en aplicaciones donde el balance entre rendimiento y emisiones es crucial. **Metodología:** Se evaluaron dos configuraciones geométricas: una cámara de combustión estándar y otra rectificada con una reducción de 0.2 mm en su altura, lo que modifica la relación de compresión y la dinámica del flujo. La metodología se basó en simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) mediante el software Ansys, complementadas con un modelo paramétrico que permitió predecir la concentración de gases contaminantes (CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x y HNC) en función a los grados de giro del cigüeñal y temperatura. **Resultados:** Los resultados mostraron que la reducción de la cámara incrementó la temperatura máxima y la intensidad de la turbulencia, especialmente en los componentes swirl y squish. Sin embargo, esta turbulencia no se distribuyó de manera homogénea, lo que generó zonas de mezcla deficiente y combustión incompleta. **Conclusión:** Se observó un incremento en la turbulencia swirl de un 26% dentro de la cámara con el cabezote con la geometría modificada lo que incrementó también la relación de compresión, sin embargo, se obtuvieron valores mayores de concentraciones de CO, NO y HC en la cámara rectificada con un incremento del 5%. Indicándonos que, aunque intensificó la turbulencia, su efecto no fue favorable para la eficiencia térmica ni para la reducción de emisiones, destacando la importancia de un diseño optimizado de la cámara para lograr una combustión más limpia y eficiente.

Palabras Clave: Simulación CFD, cámara de combustión, flujo de entrada, gases contaminantes, turbulencia

Abstract

Introduction: Although pistons are designed to generate turbulence that favors the air-fuel mixture, there is uncertainty about how minimal modifications in geometry, such as the reduction in volume in the squish zone due to grinding, alter heat distribution and efficiency in engines where emissions control is relevant. This study seeks to analyze these effects, especially in applications where the balance between performance and emissions is crucial. Two geometric configurations were evaluated: a standard combustion chamber and a rectified one with a 0.2 mm reduction in height, which modifies the compression ratio and flow dynamics. The methodology was based on computational fluid dynamics (CFD) simulations using Ansys software, complemented by a parametric model that allowed predicting the concentration of polluting gases (CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x and HNC) based on crankshaft rotation speeds and temperature. **Methodology:** Two geometric configurations were evaluated: a standard combustion chamber and a rectified one with a 0.2 mm reduction in height, which alters the compression ratio and flow dynamics. The methodology was based on computational fluid dynamics (CFD) simulations using Ansys software, complemented by a parametric model that allowed the prediction of pollutant gas concentrations (CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x, and HNC) as a function of crank angle and injection temperature. **Results:** The results showed that the chamber reduction increased the maximum temperature and intensity of turbulence, especially in the swirl and squish components. However, this turbulence was not distributed homogeneously, resulting in zones of poor mixing and incomplete combustion. **Conclusion:** A 26% increase in swirl turbulence was observed inside the chamber with the modified geometry of the head, which also increased the compression ratio. However, higher concentrations of CO, NO, and HC were obtained in the rectified chamber with a 5% increase. This indicates that although turbulence was intensified, its effect was not favorable for thermal efficiency or emissions reduction, highlighting the importance of an optimized chamber design to achieve cleaner and more efficient combustion. **Keywords:** CFD simulation, combustion chamber, intake flow, pollutant gases, turbulence.

INTRODUCCIÓN

A pesar del creciente interés en nuevas tecnologías alternativas, los motores de combustión interna (MCI) siguen siendo la principal fuente de propulsión en el sector automotriz en especial en nuestro país donde los vehículos impulsados con algún tipo de

motor a combustión interna son alrededor del 99.8% hasta el 2024 según el reporte anual de matriculación de la ANT. Sin embargo, su eficiencia térmica y emisiones contaminantes continúan siendo desafíos críticos (ScienceDirect, 2017). En este contexto, la turbulencia generada dentro de la cámara de combustión juega un papel fundamental en la optimización del proceso de combustión, ya que influye directamente en la mezcla aire-combustible, la velocidad de propagación de la llama y la homogenización de la temperatura (Acthydrogen, 2024). Una de las características geométricas clave que promueve la turbulencia es la zona squish, región estrecha entre el pistón y la culata que genera flujos de alta velocidad cerca del punto muerto superior (PMS), mejorando la combustión (Scielo, 2023)

Pese a su importancia, existe una brecha en la comprensión detallada de cómo la turbulencia inducida por el squish afecta los rangos de temperatura y, consecuentemente, el rendimiento térmico y las emisiones. Estudios previos se han centrado en motores diésel o de inyección directa, dejando un vacío en aplicaciones con inyección multipunto (MPFI), como el motor Chevrolet Cruze 1.8L (ScienceDirect, 2024). Además, la falta de métodos estandarizados para medir la temperatura en tiempo real dentro de la cámara limita la validación experimental de modelos computacionales (SAE INTERNATIONAL, 1990)

En este trabajo se busca estudiar el comportamiento de la turbulencia y su impacto en el proceso de combustión en motores con cámara de combustión que incorporan la característica squish, mediante simulaciones computacionales, con el fin de mejorar el rendimiento térmico y reducir gases contaminantes. Para ello, se plantean tres objetivos específicos: (1) investigar los factores que generan turbulencia mediante el análisis de rangos de temperatura en motores con squish, (2) desarrollar y validar modelos computacionales mediante pruebas experimentales, y (3) identificar métodos precisos para medir la temperatura dentro de la cámara y su relación con el flujo squish. (International Journal of Automotive , 2019)

Esta investigación pretende aportar información valiosa para el campo automotriz, buscando estrategias para optimizar diseños de cámaras de combustión, aun después de la rectificación en la reparación de motores, así como fundamentos científicos para reducir emisiones. Los resultados podrían aplicarse en motores existentes, contribuyendo a la mejora de los mismos, que en la actualidad están montados en vehículos convencionales sin requerir modificaciones radicales, para tratar de optimizar su funcionamiento. (Optimization of Combustion Chamber Geometry for a Direct Injection , 2013)

MARCO TEÓRICO

Un motor es un dispositivo que transforma una forma de energía en otra. Sin embargo, al transformar esta energía, la eficiencia de conversión juega un papel importante.

Normalmente, la mayoría de los motores convierten la energía térmica en trabajo mecánico, por lo que se denominan “máquinas térmicas”.

Aunque los motores de combustión interna alternativos parecen bastante simples, son máquinas muy complejas. Constan de cientos de componentes que deben realizar sus funciones eficazmente para generar potencia. Existen dos tipos de motores: los de encendido por chispa (SI) y los de encendido por compresión (CI) (Ganesan, 2012).

En el funcionamiento del motor es crucial analizar el movimiento del aire, el combustible y los gases de escape que se produce dentro de los cilindros durante sus diferentes ciclos. Este movimiento es importante para acelerar la evaporación del combustible, mejorar la mezcla aire-combustible y aumentar la velocidad y la eficiencia de la combustión.

Además de la turbulencia deseada, se genera un movimiento rotacional llamado swirl en la mezcla aire-combustible durante la admisión. Cerca del final de la compresión, se generan dos movimientos de masa adicionales: squish “aplastamiento” y tumble “volteo”.

Cámara de combustión

La evolución de la cámara de combustión interna ha logrado cambios significativos en la ingeniería moderna, donde la fusión entre flujometría avanzada y principios termodinámicos permiten ahora diseñar cámaras de combustión más pequeñas pero extraordinariamente eficientes, esta transformación se sustenta en relaciones de compresión precisamente calculadas que equilibran potencia y rendimiento, mientras que la incorporación de materiales avanzados permiten que estas cámaras soporten condiciones extremas de operación.(Kumari et al., 2021)

Los vehículos han ido evolucionando y esta evolución implica que tengamos motores altamente eficientes y como tenemos motores altamente eficientes tenemos motores de inyección directa con relaciones de compresión de 9:1, 10:1 y 11:1, esto implica que las cámaras de combustión en la parte de relación de compresión tienden a disminuir por lo cual las cámaras juegan un papel importante para tratar de compensar y que se genere una combustión ideal.(MDPI, 2024)

Flujo de admisión

El proceso de admisión del motor regula muchos aspectos importantes del flujo dentro del cilindro. En los motores de cuatro tiempos, la válvula de admisión constituye el área mínima para el flujo (Rashid et al., 2024), por lo que las velocidades del gas en la válvula son

las más altas establecidas durante el proceso de admisión. El gas sale de la abertura de la válvula hacia el cilindro como un chorro cónico, y las velocidades radial y axial en el chorro son aproximadamente diez veces la velocidad media del pistón.

Turbulencia

La turbulencia en un MCI es resultado de múltiples fenómenos: el diseño de puertos de admisión, el levantamiento de válvulas, el efecto swirl generado por el flujo tangencial, y especialmente el efecto squish, que se manifiesta en el acercamiento entre el pistón y la culata en el PMS (Ganesan, 2012). Este efecto es más relevante en motores de encendido por chispa con diseño hemisférico o de cámara compacta, donde se busca mejorar la mezcla y reducir la variabilidad de la combustión.

Características de la turbulencia

Los procesos de flujo en el cilindro del motor son turbulentos donde, las tasas de transferencia y mezcla son varias veces mayores que las tasas debidas a la difusión molecular. Esta "difusión" turbulenta resulta de las fluctuaciones locales en el campo de flujo, lo cual da resultado a mayores tasas de transferencia de momento, calor y masa, y es esencial para el funcionamiento adecuado de los motores de encendido por chispa y diésel. (Kurchatkin et al., 2017). Una fuente común de energía para las fluctuaciones de velocidad turbulentas es la cizalladura en el flujo medio. La turbulencia es rotacional y se caracteriza por una alta vorticidad fluctuante: estas fluctuaciones de los vórtices solo pueden persistir si las fluctuaciones de velocidad son tridimensionales.

Generación de turbulencia en MCI

Los mecanismos principales incluyen el diseño de puertos y válvulas que inducen swirl (rotación axial) o tumble (rotación transversal) (X. Zhao et al., 2022). Además, la compresión del fluido en la zona estrecha entre pistón y el cabezote cerca del PMS, llamado también efecto squish generando vórtices de alta energía (TEMÍZER et al., 2023). Y la inyección de combustible principalmente la interacción spray-aire en motores diésel o GDI (García et al., 2025).

Una característica importante de un flujo turbulento es su irregularidad o aleatoriedad. Por lo tanto, se utilizan métodos estadísticos para definir dicho campo de flujo. Los métodos que se utilizan normalmente son: la velocidad media, la velocidad fluctuante con respecto a la media y varias escalas de longitud y tiempo. En una situación de flujo turbulento estacionario, la velocidad local instantánea del fluido U (en una dirección específica) se expresa como:

$$U(t) = U + u'(t)$$

Donde:

- U : Velocidad media.
- $u'(t)$: Fluctuación turbulenta.

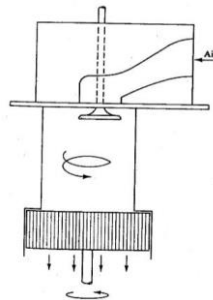
De acuerdo con esto los parámetros de cuantificación son: la intensidad de turbulencia (u'): Raíz cuadrada de la energía cinética turbulenta (TKE), típicamente entre 1–5 m/s en MCI (Heywood, 2018). Así también las escalas de longitud como las macros que van alrededor de un 10% del diámetro del cilindro y las micro aproximadamente de 0.1 mm (donde la energía se disipa en calor).

Swirl

El swirl se define generalmente como la rotación organizada de la carga alrededor del eje del cilindro. Se crea al introducir el flujo de admisión en el cilindro con un momento angular inicial. Si bien durante el ciclo del motor se produce cierta disminución del remolino debido a la fricción, el remolino generado por la admisión suele persistir durante los procesos de compresión, combustión y expansión. (ScienceDirect, 2013), figura 1.

Figura 1

Swirl al ingreso de la mezcla aire combustible



Este tipo de turbulencia es inducida estratégicamente para mejorar la mezcla aire combustible, especialmente en motores de inyección indirecta o diésel, acelerar la propagación de la llama en motores de gasolina, reduciendo tiempos de combustión y optimizar la combustión al distribuir uniformemente la energía térmica y minimizar zonas de mezcla pobre. (Cylinder Head Intake Port Design & In-Cylinder Air-flow Patterns, , 2013) Esta característica se puede calcular de la siguiente forma:

- Swirl ratio (R_s)

$$R_s = \frac{\omega * r}{V_p}$$

Donde:

ω : Velocidad angular del flujo.

r: Radio del cilindro.

V_p : Velocidad media del pistón.

Dentro los valores que puede tomar el swirl son:

Bajo: $R_s < 1$ (motores gasolina convencionales).

Alto: $2R_s > 2$ (motores diésel con pre-cámaras).

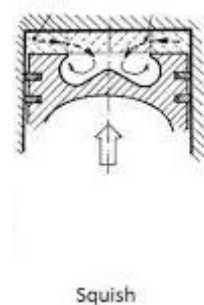
Se necesita un alto grado de turbulencia para lograr una alta velocidad del frente de llama. La turbulencia se induce mediante la configuración del flujo de entrada o squish. En los motores de encendido por chispa, el squish se puede inducir mediante una cavidad en el pistón o una cámara hemisférica en el cabezote (Enginelabs, 2019).

Squish

Se denomina squish al movimiento radial hacia adentro o transversal del gas que ocurre hacia el final de la carrera de compresión cuando una porción de la cara del pistón y la culata se aproximan estrechamente. Su función principal es generar turbulencia controlada mediante un flujo radial de alta velocidad ($>50\text{m/s}$) dirigido hacia el centro de la cámara de combustión. (International Journal of Automotive , 2019)

Figura 2

Movimiento squish dentro de la cámara de combustión



Los parámetros de diseño dentro de los motores de combustión interna son típicamente 20–30% del área total de la cámara y la velocidad del flujo depende del gas y la velocidad del pistón ($V_p = 2 \cdot \text{Stroke} \cdot \text{RPM} / 60$).

En la cámara de combustión de un motor existen pequeñas grietas que se llenan de aire, combustible y gases de escape durante el ciclo del motor. Estas grietas incluyen la holgura entre el pistón y las paredes del cilindro (aproximadamente el 80 % del total), un ajuste imperfecto en las roscas de la bujía o el inyector de combustible (5 %), holguras en la junta entre la culata y el bloque (10-15 %) y esquinas no redondeadas en el borde de la cámara de combustión y alrededor de los bordes de las caras de las válvulas. Aunque este volumen representa solo entre el 1 % y el 3 % del volumen total de la holgura, el flujo que entra y sale de él afecta considerablemente el ciclo general del motor.

Rangos de temperatura y su importancia en MCI

Los rangos de temperatura en un MCI son parámetros críticos que determinan su eficiencia, rendimiento y emisiones. Su control óptimo influye directamente en:

Tabla 1

Rangos de temperatura dentro del motor

Componente/Proceso	Rango de Temperatura	Importancia
Cámara de combustión	700–1200°C (pico)	Temperaturas >900°C favorecen la formación de NO _x , mientras que <700°C aumentan CO y HC. Indicador de eficiencia térmica y pérdidas energéticas.
Gases de escape	400–900°C	
Paredes del cilindro	150–300°C	Temperaturas excesivas generan knocking; bajas temperaturas aumentan fricción.
Aceite lubricante	80–120°C	Mantenerlo en este rango evita degradación y asegura lubricación óptima.

Nota. Valores obtenidos de diferentes autores (García et al., 2025) (Doppalapudi & Azad, 2024)

Los rangos de temperatura influyen directamente en la eficiencia térmica y las emisiones contaminantes del motor. Temperaturas elevadas en la combustión (700 - 1200°C) mejoran el rendimiento termodinámico como un incremento de 50°C puede aumentar la eficiencia aproximadamente el 2%, pero exceder 1800°K (1527°C) promueve la formación de NO_x, mientras que temperaturas bajas (<600°C) elevan CO y HC por combustión incompleta (Ganesan, 2012) Por lo tanto, el diseño de la cámara juega un rol importante debido a que el flujo squish homogeniza la temperatura al reducir gradientes locales, mientras que los canales de refrigeración en el cabezote mantienen las paredes entre 200 - 250°C, equilibrando durabilidad y emisiones (Punukollu et al., 2024). Este funcionamiento dual entre turbulencia controlada y el control térmico es clave para optimizar motores, como se evidencia en estudios que vinculan patrones de swirl con reducciones del 15% en variabilidad cíclica de presión.

Estado del arte

Los estudios previos sobre turbulencia en cámaras con squish destacan su impacto crítico en la eficiencia de combustión y la reducción de emisiones. Investigaciones como las de (TEMÍZER et al., 2023), demuestran que geometrías asimétricas en pistones incrementan la energía cinética turbulenta (TKE) en un 4.2%, mejorando la mezcla aire-combustible y reduciendo hollín en motores diésel, aunque con un ligero aumento de NO_x. Por otro lado, (Doppalapudi & Azad, 2024), compararon cámaras de combustión modificadas (BTCC, SCC), revelando que diseños poco profundos (SCC) optimizan la distribución de temperatura y presión, alcanzando 63.2 bar, lo que sugiere una correlación entre turbulencia inducida por squish y homogenización térmica. En cuanto a estrategias de optimización, (Punukollu et al., 2024) emplearon algoritmos genéticos multiobjetivo (MOGA) para equilibrar turbulencia (swirl/tumble) y emisiones, destacando que inyecciones tardías reducen hollín en un 450%,

mientras que las temperaturas minimizan NOx. Para el control de rangos de temperatura, (Ikpe & Bassey, 2024), identificaron que mayores valve lifts incrementan vectores de velocidad y TKE, mejorando la eficiencia de combustión, pero requieren gestionar gradientes térmicos para evitar hot spots. Estos hallazgos subrayan la sinergia entre diseño geométrico (squish), modelos CFD (ANSYS Fluent/Forte) y estrategias de inyección para optimizar turbulencia y estabilidad térmica, como se aplica en motores. Para más referencias se muestra una tabla de trabajos consultados en el anexo 9.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método

Esta investigación empleó un método analítico-experimental basado en simulaciones numéricas con el módulo IC Engine de ANSYS Fluent para evaluar el rendimiento térmico de la cámara de combustión de un motor de 4 cilindros en línea, centrándose en el efecto de la geometría squish en la distribución de temperatura y eficiencia energética.

El estudio siguió en su primera etapa, los lineamientos de la normativa SAE J2715, asegurando la precisión del modelo mediante la validación con datos teóricos y estándares de motores similares.

En segunda etapa se diseñó la geometría del motor, incluyendo la zona swirl y squish, tanto en su geometría normal como en la modificada.

Finalmente se configuraron condiciones de borde (presión, temperatura y rpm) para las simulaciones. Se utilizaron modelos de turbulencia y combustión (Partially Premixed) para capturar la interacción entre flujos turbulentos y transferencia de calor, mientras que la validación se realizó comparando los resultados con curvas de presión y temperatura reportadas en literatura técnica. Este enfoque permitió analizar la influencia del squish en la homogenización térmica y las emisiones sin requerir pruebas físicas, proporcionando insights replicables para optimizar diseños de cámaras de combustión en motores de 4 cilindros.

Materiales

La presente investigación se desarrolló mediante simulación numérica utilizando el módulo IC Engine de ANSYS Fluent para analizar el comportamiento térmico y fluidodinámico del motor Chevrolet Cruze 1.8L (4 cilindros en línea, 4 válvulas por cilindro) como se indica en la tabla del anexo 1, con enfoque en la influencia de la geometría en la distribución de temperatura y eficiencia de combustión. (Km77, 2009)

Este tipo de motores generalmente presentan un problema con la temperatura más que nada los motores que tienen una cilindrada alta de 1.8 l, en su versión de 1.2 l turbo no

presentan mayormente este problema. La presión de la bomba de combustible generalmente se encuentra en el rango de 30 a 50 PSI. Se evalúa la distribución de la temperatura en la cámara de combustión de un motor de cuatro tiempos mediante análisis de elementos finitos (FEA). El análisis de par se lleva a cabo para calcular las tensiones y la deflexión debida a cargas térmicas y la presión del gas. (Motores, 2020)

El motor analizado presenta una configuración típica de la familia GM Ecotec 1.8L, con una carrera de 86.4 mm y un diámetro de 80.5 mm, lo que da lugar a una relación de compresión de 10.5:1. La longitud de la biela es de 144.2 mm y el radio del cigüeñal es de 43.2 mm. Las válvulas de admisión tienen un diámetro de cabeza entre 33.0 y 33.5 mm, mientras que las de escape miden entre 28.0 y 28.5 mm, ambas con un vástago de 5.5 mm y una longitud total de aproximadamente 105 mm. El ángulo del asiento de válvula es de 45°, y el lift máximo varía entre 9.0 y 9.5 mm para admisión y entre 8.5 y 9.0 mm para escape. El desfase del pistón es de 0.75 mm hacia el lado de empuje, y el mínimo lift de válvula considerado para simulaciones CFD es de 0.3 mm. En cuanto al tiempo de apertura, las válvulas de admisión abren entre 10° y 15° antes del punto muerto superior (PMS), y las de escape entre 45° y 50° antes del PMS. Finalmente, el cierre de la válvula de admisión (IVC) ocurre entre 40° y 50° después del punto muerto inferior (PMI), y la apertura de la válvula de escape (EVO) entre 50° y 55° antes del PMS, lo que permite un análisis detallado del comportamiento dinámico del motor. Ver anexo 2.

Los materiales utilizados en este proyecto son una aleación de aluminio como muestra la ficha técnica y se evaluó un material de aleación de aluminio. Mediante diseño asistido por computadora (CAD) y el software, se desarrolló el modelo estructural de la cámara de combustión utilizando únicamente un cilindro para el estudio, el cual validará los datos de los demás cilindros del motor. Además, el análisis de elementos finitos se realizará con el software ANSYS.

Los valores de emisiones fueron obtenidos mediante simulaciones CFD en ANSYS Fluent, utilizando el modelo de combustión ‘Partially Premixed’. Las concentraciones de CO, NO y HC se extrajeron en función de los grados de giro del cigüeñal y las condiciones térmicas. Para validar estos resultados, se compararon con curvas estándar reportadas en literatura para motores con características geométricas similares.

Software

Para realizar el análisis de los diferentes parámetros de funcionamiento de un motor de combustión interna se ha tomado en cuenta a tres softwares que tienen la capacidad de trabajar con dinámica de fluidos computacional, como se muestra en la tabla cuatro se ha realizado

una comparación para poder decantarse por una en específico, y se eligió a Ansys Fluent por ser un programa más amigable y más completo en simulaciones CFD (ANSYS, 2009)

Tabla 4
Características comparativas de tres softwares.

Característica	Ansys Fluent		Autodesk CFD		SolidWorks CFD	
Configuración de materiales	Amplia biblioteca y opciones avanzadas	5	Opciones configurables, pero menos extensas	3	Integrado con SolidWorks, pero menos flexible	4
Flujometría	Precisión en flujos turbulentos y multifásicos	5	Herramientas intuitivas, pero menos detalladas	4	Adecuado para simulaciones básicas	3
Análisis de temperatura	Modelado detallado con múltiples mecanismos	5	Simulación térmica adecuada	4	Integrado con CAD, pero menos avanzado	3
Análisis de presión	Cálculo preciso en sistemas complejos	5	Adecuado, pero menos especializado	3	Útil para análisis estructural, pero menos detallado en CFD)	4
Mallado	Refinamiento automático y opciones avanzadas	5	Mallado estructurado y no estructurado	3	Mallado automático, pero con menos opciones avanzadas	4
		25		17		18

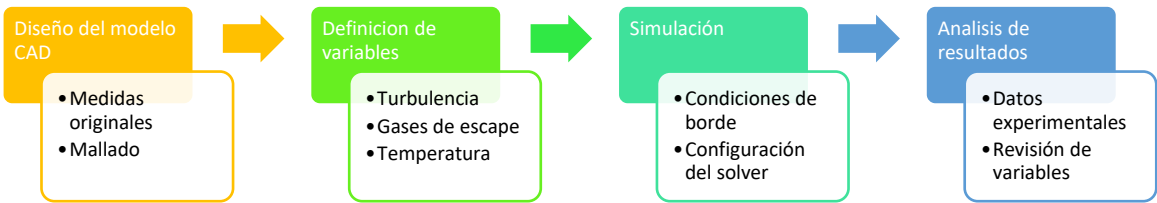
Nota: Descripción de las capacidades e inconvenientes de softwares (Software de Simulación de Ingeniería, 2024)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos de entrada

Para el diseño propuesto se realizaron dos tipos de pruebas dentro del análisis del flujo de un motor de combustión interna, donde se establecieron las condiciones de frontera establecidos para el software, que nos indicó como es el comportamiento del gas en las diferentes etapas del ciclo del motor. La geometría del modelo para el análisis se generó utilizando el Solidworks para un cilindro, con dos puertos de succión, dos puertos de escape y dos válvulas tanto para admisión y escape. Ver anexo 3

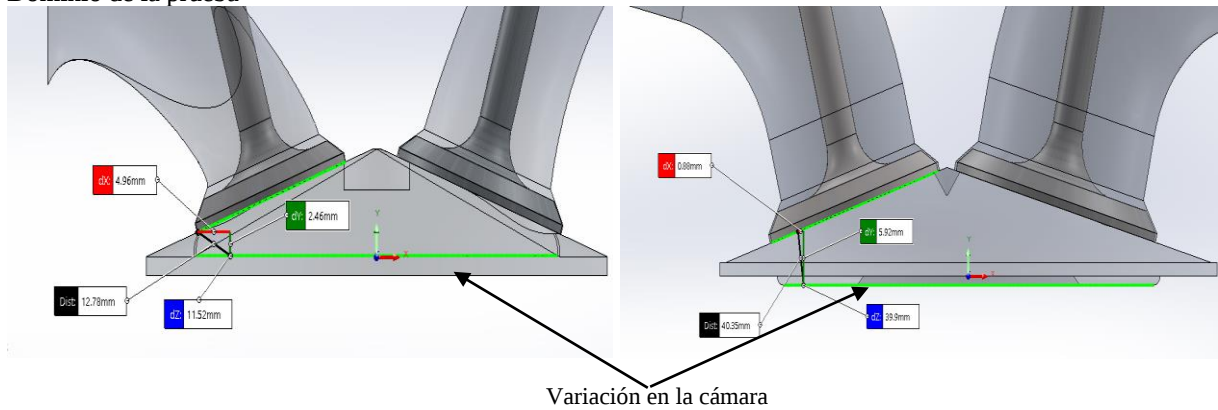
Figura 3
Flujo de la investigación



Modificación de la Geometría

Como se aprecia en la figura 4, dentro de la propuesta se muestra como varia la cámara de combustión en su zona squish con parte de la cámara sobre la cabeza del pistón, lo que hace que su volumen cambie.

Figura 4
Dominio de la prueba



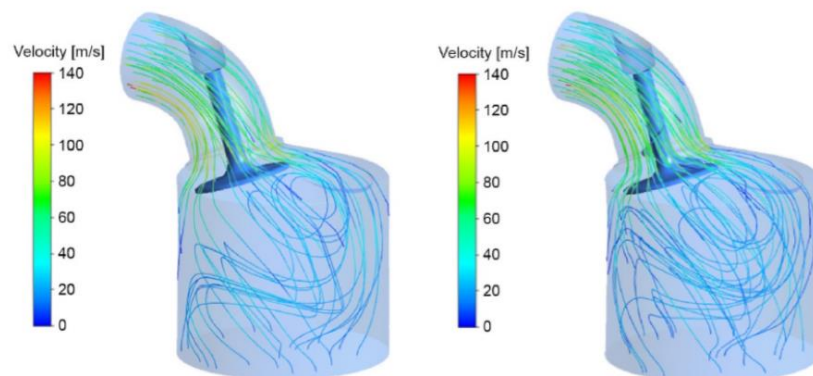
Condiciones iniciales de la simulación

Las condiciones de frontera: caudal másico de entrada: 0,18 kg/s; presión de entrada (ice-inlet-inplenum1) = 0; presión de salida (ice-outlet) = -5000 Pa; temperatura total de reflujo: 300 °K; temperatura de todas las superficies: 300 °K. Estado; viscoso, k-omega estándar.

Análisis de energía cinética de la turbulencia TKE

La TKE se refiere a la energía cinética promedio por unidad de masa relacionada con un vórtice en flujo turbulento. El rendimiento de la mezcla de aire y combustible es proporcional a la TKE en el cilindro del motor, y cuanto mayor sea la TKE, mejor será la eficiencia de la combustión. La figura 5 muestra la línea del flujo del aire aspirado y el color refleja la magnitud de la velocidad en estos puntos. El aire que entra en el puerto de admisión gira hacia el cilindro a través de la válvula en espiral. Después de que este movimiento de aire entra en el cilindro, sus características continúan apareciendo.

Figura 5
Variación de la geometría de la cámara de combustión

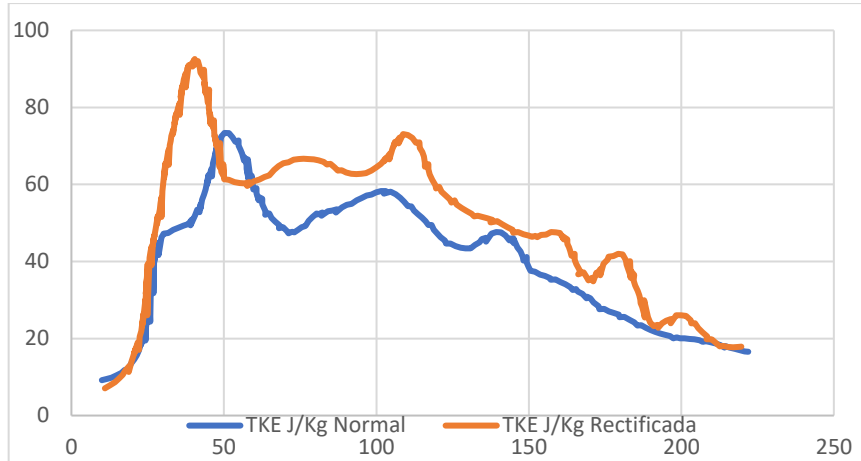


El lado izquierdo es la cámara normal y el lado derecho es la cámara rectificada. Aquí se aprecia que el swirl y el tumble son los más intensos, lo que indica el cambio en el movimiento de rotación del fluido en la línea central del cigüeñal y la línea central del orificio

de la válvula. Esto se debe a la variación en la geometría de la cámara lo que convierte el flujo de aire que entra por el puerto de admisión en un movimiento de rotación más intenso, en comparación con la cámara original.

Figura 6

Comparación del TKE dentro del cilindro en admisión.

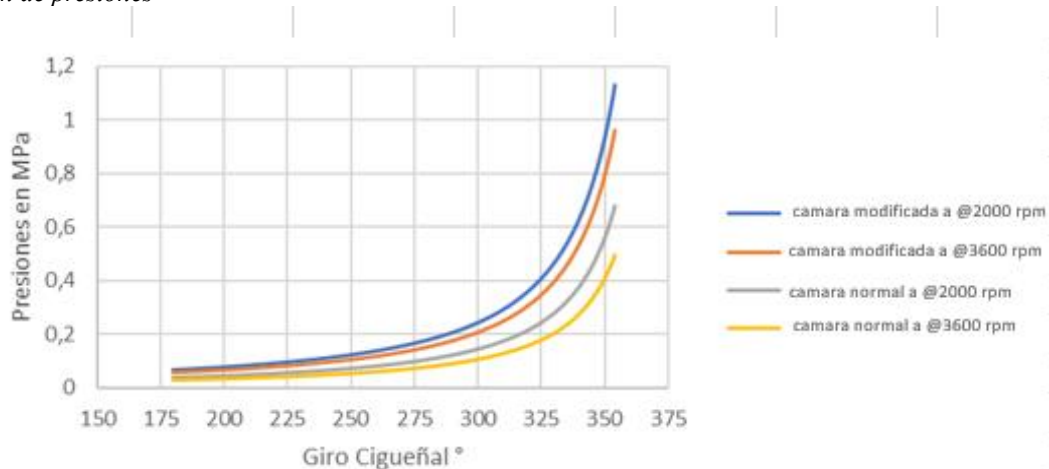


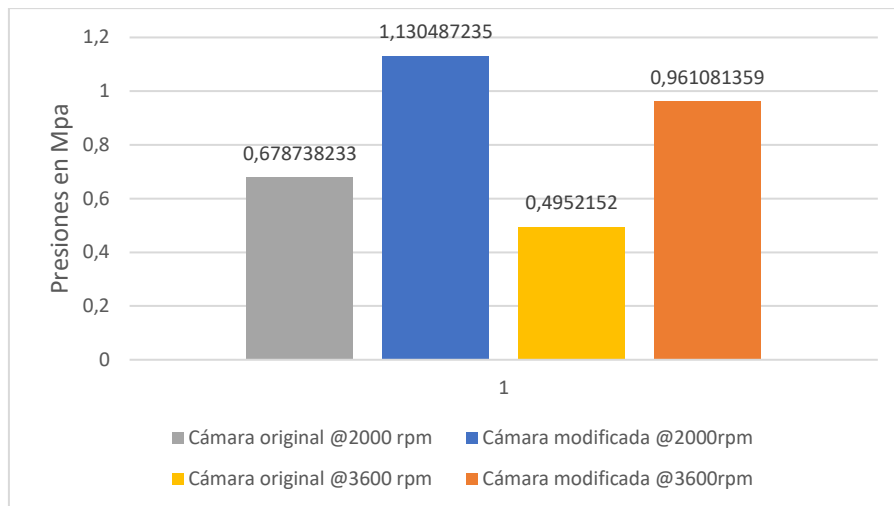
Análisis de presión

La combustión inicia a los 720° del cigüeñal con una duración de 10°, completándose a los 730°. Figura 4 (Anexo 4), muestra la propagación de la llama desde la ignición. El Anexo 5, presenta la simulación de distribución de presión desde la ignición (720°) hasta la apertura de la válvula de escape (880°). La variación de la presión dentro de la cámara de combustión va cambiando a medida que se va comprimiendo la mezcla lo cual es afectado directamente por la relación de compresión que existe tanto con la geometría original de la cámara como cuando se ha realizado la modificación al cabezote. En la siguiente figura se puede observar cómo cambian los valores a las diferentes revoluciones del motor.

Figura 7

Variación de presiones





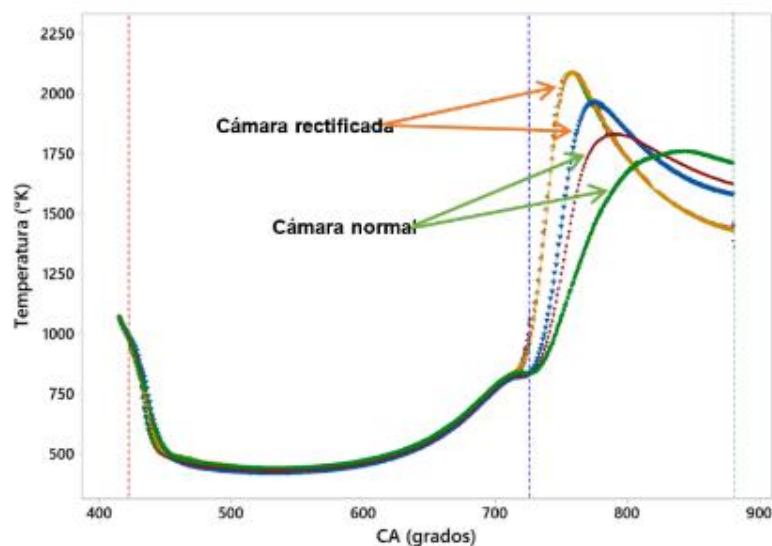
Los datos indican que la cámara modificada altera el perfil de presión durante el ciclo de compresión, aumentando la presión máxima hasta un 1.2 MPa, lo que indica una mejora en la eficiencia o potencia del motor. A mayores revoluciones como se indica en la gráfica de 3600 rpm, se esperaría una mayor variabilidad en las presiones, donde una cámara bien diseñada debería mantener un perfil estable. Esta comparación es crucial para determinar si las modificaciones en la geometría de la cámara justifican su implementación, más adelante se complementa con datos de emisiones y rendimiento térmico para una evaluación integral.

Análisis de flujometría

La flujometría es un valor importante para que se ejecute una relación aire combustible y mezcla adecuada lo que determina que en estas condiciones se considera el desplazamiento del pistón desde la ignición a los 720 CA. hasta los 880 CA donde se abre la válvula de escape y se obtenga unas temperaturas máximas en cada una de las cámaras. Ver anexo 6

Figura 8

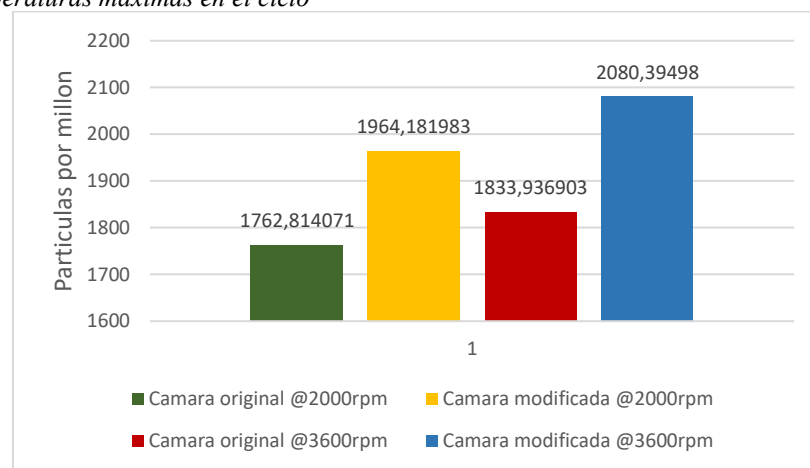
Variación de la temperatura en la cámara de combustión



Al revisar los datos obtenidos, la temperatura varía en ambas configuraciones de la cámara de combustión, especialmente en las regiones centrales y cercanas al punto de ignición. Esto indica un aumento en la temperatura máxima alcanzada durante la combustión, comparando a 2000 rpm entre la original y la modificada existe un aumento en la temperatura máxima de 11.4% lo cual es coherente con el incremento en la relación de compresión generado por la reducción del volumen de la cámara; el comportamiento se mantiene a las 3600 rpm debido a que existe un incremento del 13.4%. En contraste, la cámara normal muestra una distribución térmica más contenida y homogénea, con menores gradientes de temperatura.

Figura 9

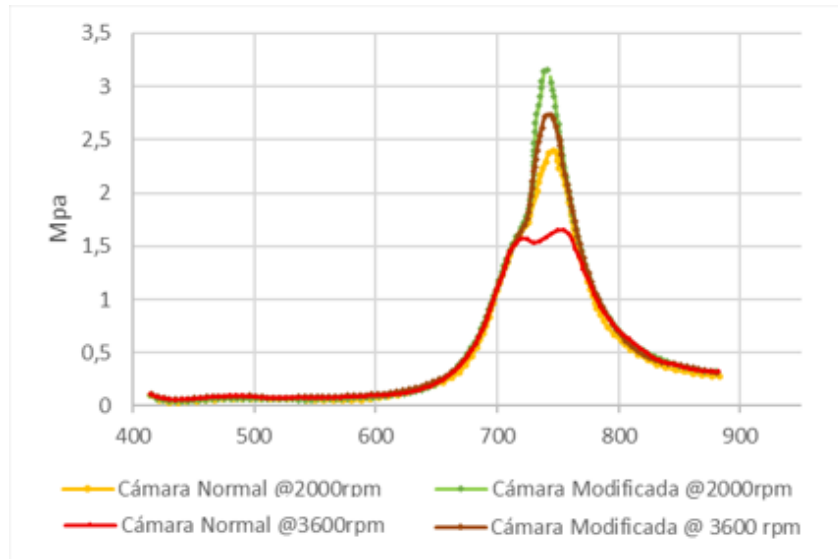
Comparación de temperaturas máximas en el ciclo



Este aumento de temperatura en la cámara rectificada puede favorecer la eficiencia térmica del ciclo, pero también conlleva riesgos como la formación de puntos calientes, mayor generación de NO_x en un 5% y posibles daños térmicos en componentes si no se controla adecuadamente. Al analizar la variación de la presión durante todo el ciclo de funcionamiento del motor se encuentran algunas lecturas donde se puede observar los beneficios en presión que se encuentran con la cámara modificada en contraste con la cámara original.

Figura 10

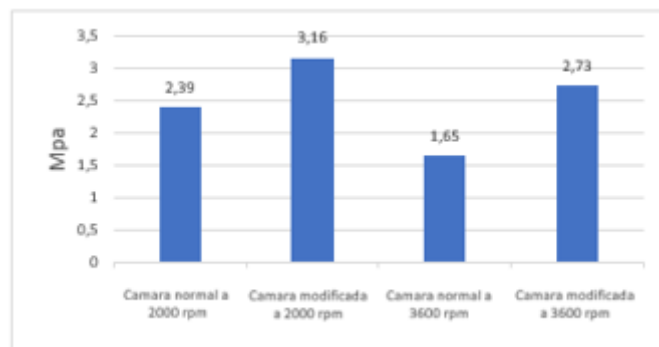
Variación de presiones durante todo el ciclo



Se observa que a 2000 rpm hay un aumento de la presión de un 21% mientras que a 3600 rpm se muestra un aumento del 65% de la presión con respecto a la cámara original

Figura 11

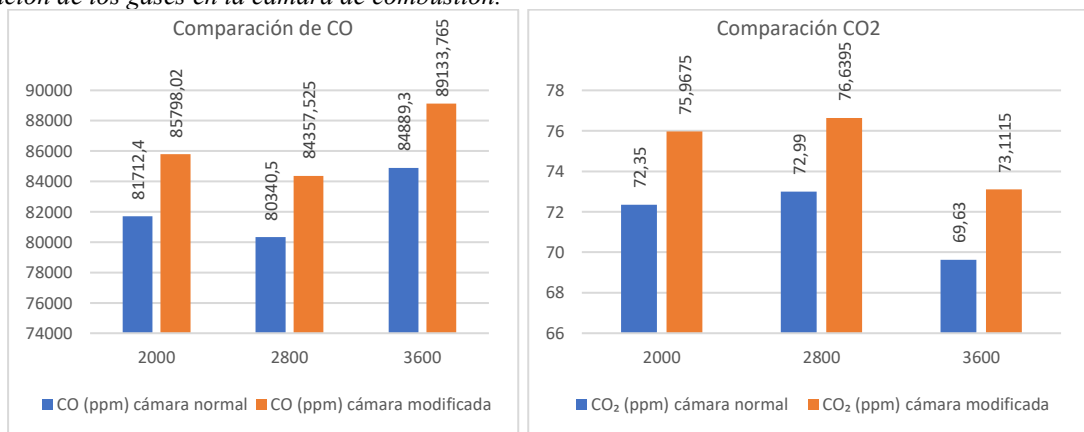
Comparación de las presiones máximas del ciclo



Análisis de gases

Figura 12

Comparación de los gases en la cámara de combustión.

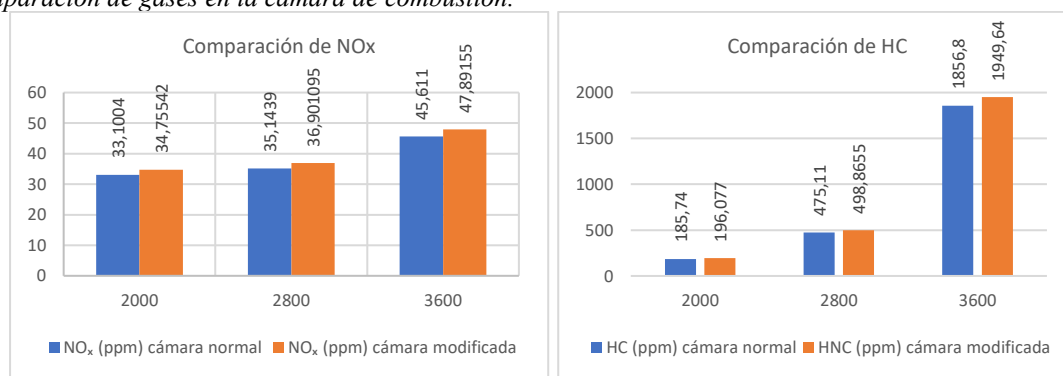


Las reacciones químicas se producen unos cuantos grados más adelante del desplazamiento del pistón. El valor más alto de concentración de CO se da con una cámara de combustión modificada. En la mayoría de los casos, la cámara rectificada como se observa en

el Anexo 7 muestra zonas más intensas en rojo, lo que resulta una mayor concentración que está en un 5% de CO en comparación con la cámara normal. Esto puede deberse a una combustión menos completa o a un aumento en la formación de CO por mayor presión y temperatura local. La reducción del volumen de la cámara aumenta la relación de compresión, lo que puede elevar la temperatura y presión del ciclo, aunque esto puede mejorar la eficiencia térmica, también puede favorecer la formación de contaminantes como el CO si la mezcla no se quema completamente. De la misma manera sucede con el CO₂ en la cámara de combustión normal, se observa una distribución más dispersa del CO₂. En cambio, en la cámara con la geometría de la cámara modificada, afecta el flujo y la eficiencia de la combustión, generando acumulaciones más marcadas alrededor de un 6% de CO₂ en ciertas regiones del sistema

Figura 13

Comparación de gases en la cámara de combustión.



Análisis de material

Tabla 5

Comparación de materiales del cabezote con relación a gases y turbulencia.

Parámetro	Cabezote Original (A356)	Cabezote Reforzado SiC o Al ₂ O ₃	Diferencia (%)	Interpretación
CO (ppm)	Alto - 68673 a 350°K/2000 rpm	+5% 72106	↑	Combustión menos completa por posible enfriamiento rápido.
NO _x (ppm)	Mayor en altas RPM 95.62 a 2600 rpm	Reducción notable 76.16 a 2600 rpm	↓ 20–50% en altas RPM	Mejor control térmico evita picos de temperatura locales.
HC (ppm)	Moderado 85.43 a 2000 rpm	Aumento significativo 89.70	↑ 25–50%	Turbulencia reducida y combustión incompleta.
CO ₂ (ppm)	Estable 80.06	Ligera disminución 84.06	↓ ~3–5%	Correlación con aumento de CO/HC.
Turbulencia (m ² /s ²)	Alta (0.8–1.7)	Muy baja (0.1–0.5)	↓ 80–90%	Diseño/material afecta el flujo de gases.
Temperatura (K)	Estable (307–450°K)	Mayor en alta carga (ej: 1641°K)	↑ 300–500% en altas RPM	Nanocompuestos soportan mejor el estrés térmico, pero transfieren más calor al sistema.

Nota: Información apoyada de repositorios y ScienceDirect Fuente. (ScienceDirect, 2022) (ScienceDirect, 2020)

Un estudio reciente (2023) publicado en el Journal of Materials Engineering and Performance evaluó el reemplazo de aleaciones tradicionales de aluminio-silicio (como la A356) en cabezotes de motores por aleaciones de aluminio reforzadas con nanocompuestos (Al-Si-Mg con nanopartículas de SiC o Al₂O₃). Los resultados mostraron que estos materiales innovadores incrementan el límite de fluencia hasta 250–300 MPa (frente a los 185–220 MPa de la A356 convencional), mejorando la resistencia a la fatiga térmica en un 20–30% bajo condiciones de operación extremas (turbo alimentación o altas RPM). (Springer Nature, 2022).

En comparación con el aluminio tradicional del cabezote del Ecotec 1.8L, estos materiales avanzados ofrecen mejoras significativas en resistencia específica (resistencia/peso) y disipación térmica, pero aun costosos para ser implementados en vehículos de serie. El cambio de material en el cabezote, pasando de un aluminio convencional a una aleación reforzada, influye significativamente en las variables analizadas en esta investigación. En primer lugar, un material con mayor conductividad térmica puede disipar el calor más eficientemente, lo que reduce los picos de temperatura en la cámara de combustión. Esta disminución puede ser beneficiosa para limitar la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x), ya que estos se generan principalmente en condiciones de alta temperatura. En cuanto a la turbulencia, el material no afecta directamente su generación, pero un material más resistente permite diseñar geometrías más precisas en la cámara, lo que sí puede mejorar los efectos de swirl y squish, favoreciendo una mejor mezcla.

Discusión

De todos estos resultados obtenidos, indica que la modificación geométrica ha afectado negativamente la eficiencia de la combustión, posiblemente debido a una alteración en la propagación de la llama, lo que resulta en una mayor cantidad de combustible que no llega a quemarse completamente. En contraste, la cámara normal muestra una distribución más contenida y homogénea de los hidrocarburos, lo que refleja una combustión más completa y eficiente bajo las mismas condiciones operativas.

Basándonos en los análisis realizados, al reducir 0.2 mm la altura de la cámara de combustión, se incrementa la relación de compresión pasando de un 10.5 a un 10.7:1, lo que puede generar un aumento en la velocidad del flujo y en los gradientes de presión y temperatura. Esto, en principio, aumentó el swirl en un 26% (pasa del 73.377 a 92.562 J/kg)

en el cilindro del motor puede mejorar la eficiencia de la combustión y reducir los gases de escape.

Pero de acuerdo a los resultados visuales de las simulaciones (en los anexos) indican que, aunque la rectificación podría haber mejorado el rendimiento volumétrico, la turbulencia durante la compresión no se distribuye de manera homogénea ni necesariamente mejora la mezcla. De hecho, se observa una mayor concentración de contaminantes (CO, NO y HC) lo que crea un incremento de estos gases de entre el 5% al 6%.

Esto puede deberse a que la geometría modificada alteró los patrones de flujo, generando zonas muertas o de recirculación donde la mezcla no se quema eficientemente.

Este comportamiento se debe a que el aumento del número de remolinos está relacionado con una disminución de la componente axial del flujo y un incremento de su componente tangencial, lo que provoca una expansión radial del mismo y una distribución más uniforme de la temperatura dentro de la cámara de combustión.

CONCLUSIONES

La reducción de 0.2 mm en la altura de la cámara de combustión incrementó la relación de compresión de 10.5:1 a 10.7:1, generando un aumento de la temperatura máxima y del swirl en aproximadamente 26%. Sin embargo, estos cambios no se tradujeron en una mejora eficiente del proceso de combustión, ya que las simulaciones indicaron una distribución térmica no homogénea y una propagación de la llama desfavorable, provocando combustión incompleta en zonas localizadas.

Los resultados mostraron un incremento entre el 5% y 6% en las concentraciones de CO, NO y HC en la cámara rectificada, evidenciando que la turbulencia inducida no fue suficientemente efectiva ni bien distribuida para favorecer una mezcla aire-combustible óptima. Estas emisiones aumentadas reflejan la aparición de zonas muertas o de recirculación, asociadas a la alteración de los patrones de flujo por la geometría modificada. Las simulaciones CFD confirmaron que los gases de escape como el NO y HC aumentaron indicando que la mezcla no es homogénea.

El análisis de la energía cinética turbulenta evidencia que la cámara de combustión con geometría rectificada presenta un nivel de TKE superior en la mayoría del ciclo respecto a la cámara normal. Este incremento, sugiere que la modificación generó un aumento en la intensidad de los remolinos dentro del cilindro, lo cual puede favorecer la velocidad inicial de combustión. Sin embargo, dado que este aumento de turbulencia no se tradujo en una reducción de emisiones ni en una mayor eficiencia térmica (como lo indican los resultados de

CO, NO_x y HC), se concluye que una mayor TKE por sí sola no garantiza una combustión más eficiente, especialmente si la distribución del flujo no es homogénea. Aunque el rediseño geométrico pretendía mejorar el rendimiento volumétrico mediante un fortalecimiento del efecto squish, no se logró una mejora cuantificable en la eficiencia térmica ni una reducción de emisiones. Por el contrario, se observaron cargas térmicas más elevadas en los componentes, lo cual podría comprometer la durabilidad del motor y demanda en futuras evaluaciones estructurales y termo mecánicas más detalladas.

BIBLIOGRAFÍA

Acthydrogen. (2024). Obtenido de <https://acthydrogen.com/>

ANSYS. (2009). Obtenido de <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node400.htm>

AVTOAD. (2023). Obtenido de <https://avtoad.com.ua/en/base/internal-combustion-engine-piston-function-temperature>

Combustion end flame. (2020). Obtenido de <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/73950/1-s2.0-S0010218020304107-main.pdf?sequence=1>

CVEL. (2008). Obtenido de <https://cecas.clemson.edu/cvel/auto/sensors/air-flow.html>

Cylinder Head Intake Port Design & In-Cylinder Air-flow Patterns, . (2013). *International Journal of Engineering Research & Technology*, 5.

EngineCruz. (2000). Obtenido de <https://enginecruz.com/chevrolet-1-8l-ecotec-engine-specs-issues-and-reliability/>

Enginelabs. (2019). Obtenido de <https://www.enginelabs.com/engine-tech/quench-unlocking-performance-squished-between-the-piston-and-head/>

International Journal of Automotive . (2019). Obtenido de <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/812785>

International Journal of Automotive . (2019). Obtenido de <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/812785>

MDPI. (2024). Obtenido de <https://www.mdpi.com/2571-6255/7/2/35>

Motorba. (2007). Obtenido de <https://motorba.com.ar/que-es-un-motor-ecotec/>

Numerical Analysis of the effects of squish Geometry. (2008). Obtenido de https://www.jsme.or.jp/esd/uploads/sites/28/2022/05/C98_P227.pdf

- Optica*. (julio de 2023). Obtenido de https://www.optica.org/about/newsroom/news_releases/2023/july/new_high-speed_imaging_method_captures_3d_details/
- Optimization of Combustion Chamber Geometry for a Direct Injection* . (Noviembre de 2013). Obtenido de <https://www.ijert.org/research/optimization-of-combustion-chamber-geometry-for-a-direct-injection-diesel-enginea-review-IJERTV2IS110212.pdf>
- Optimization of Combustion Chamber Geometry for a Direct Injection* . (2013). *International Journal of Engineering Research & Technology*, 10.
- petrolheadgarage*. (2021). Obtenido de <https://petrolheadgarage.com/cursos-automocion/turbulencia-combustion-motor-combustion-interna/>
- ResearchGate*. (2017). Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/320611792_A_Review_Paper_on_Effect_of_Intake_Manifold_Design_on_CI_Engine_Performance_and_Soot_Formation
- SAE INTERNATIONAL*. (1992). Obtenido de <https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/920519/>
- Sage Journals*. (2021). Obtenido de <https://journals.sagepub.com/home/pid>
- Scielo*. (julio de 2023). Obtenido de http://scielo.senescyt.gob.ec/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1390-860X2023000200090
- ScienceDirect*. (2013). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0196890413003087>
- ScienceDirect*. (2017). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1540748916304850>
- ScienceDirect*. (Noviembre de 2024). Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667134424000828>

ANEXOS

Anexo 1. Tabla de medidas del motor Ecotec 1.8 l

Tipo	ECOTEC 1.8l
Propósito	Impulsar el vehículo
Combustible	Gasolina
Potencia máxima	141 CV / 104 kW
Par máximo	176 Nm
Revoluciones par máximo	3.800 rpm
Situación	Delantero transversal
Número de cilindros	4
Disposición de los cilindros	En línea
Material del bloque	Hierro
Material de la culata	Aluminio

Diámetro	80,5 mm
Carrera	88,2 mm
Cilindrada	1.796 cm ³
Relación de compresión	10,5 a 1
Válvulas por cilindro	4
Tipo de distribución	Dos árboles de levas en la culata
Alimentación	Inyección Indirecta.
Automatismo de parada y arranque del motor ("Stop/Start")	No

Anexo 2. Medidas y modelado de los elementos del motor.

Los siguientes datos fueron medidos del motor real debido a que no se encontraron bibliografía referente a este motor que proporcione los datos necesarios para la simulación.

Tabla. Parámetros Fundamentales

Parámetro	Valor	Fuente/Comentario
Longitud de biela	144.2 mm	Medida centro a centro entre el perno de pistón y la muñequilla del cigüeñal.
Radio del cigüeñal	43.2 mm	(Carrera = 86.4 mm → Radio = Carrera/2).
Carrera (Stroke)	86.4 mm	Confirmado en manuales técnicos GM Family 1 Ecotec.
Diámetro (Bore)	80.5 mm	Confirmado en medidas
Relación de compresión	10.5:1	Típica en motores 1.8L Ecotec.

Las medidas de las válvulas que se muestran en la siguiente tabla están tomadas tanto del cabezote como de los catálogos de ventas de almacenes.

Tabla. Características de las válvulas

Parámetro	Válvula de Admisión	Válvula de Escape	Fuente/Comentario
Diámetro de la cabeza	33.0–33.5 mm	28.0–28.5 mm	Medido en despieces oficiales. Válvula y asiento
Diámetro del vástago	5.5 mm	5.5 mm	Estándar en motores Ecotec.
Longitud total	104.5–105.0 mm	104.5–105.0 mm	Incluye cabeza y vástago.
Ángulo del asiento	45°	45°	Ángulo de sellado.
Lift máximo (apertura)	9.0–9.5 mm	8.5–9.0 mm	Depende del árbol de levas.
Timing de apertura	10–15° antes PMS	45–50° antes PMS	Para análisis CFD.

Tabla. Parámetros del motor para la configuración inicial

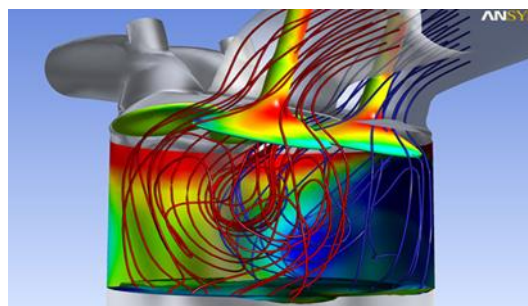
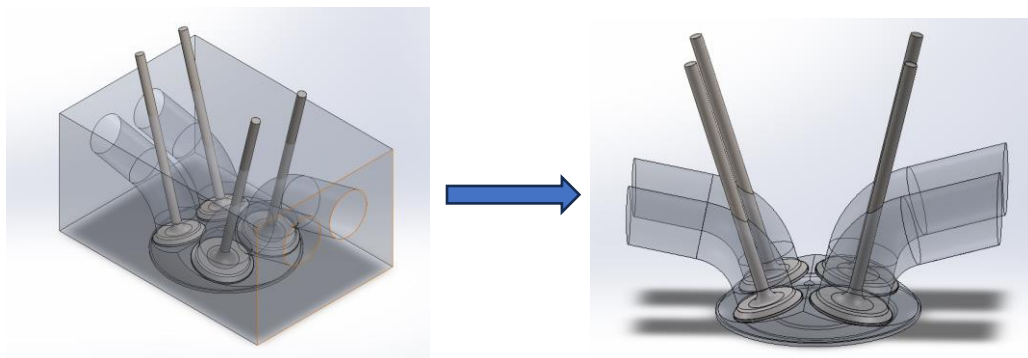
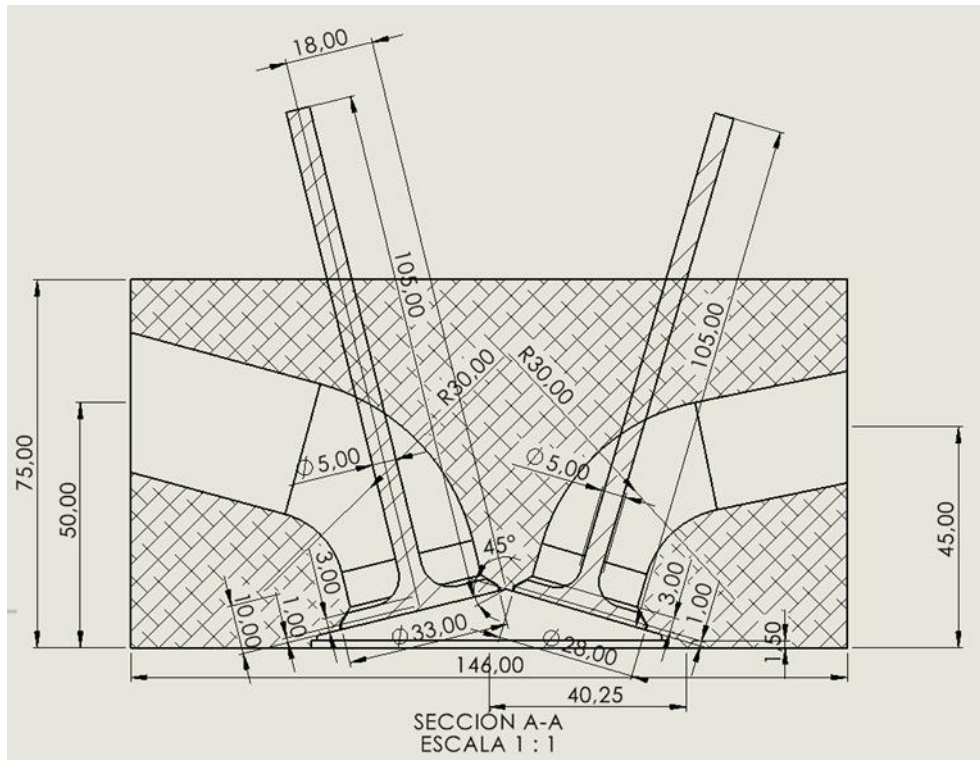
Parámetro	Valor	Notas
Piston Offset/Wrist Pin Offset	0.5–1.0 mm (hacia el lado de empuje)	Diseño típico para reducir ruido de pistón. Usa 0.75 mm como valor medio.
Minimum Valve Lift	0.2–0.5 mm	Para análisis CFD, usa 0.3 mm como apertura mínima para evitar errores en malla.
Ángulo de apertura válvulas	Admisión: 10° antes PMS / Escape: 45° antes PMS	Timing estándar para motores Ecotec.

Tabla Parámetros del motor para la configuración inicial

Evento	Ángulo (grados)	Referencia
IVC (Inlet Valve Close)	40–50° después PMI	(Cierre posterior al PMI para aprovechar inercia del flujo).
EVO (Exhaust Valve Open)	50–55° antes PMS	(Apertura anticipada para liberar presión antes de PMS).

Tabla de pruebas realizadas en port flow y pruebas de combustión.

Parámetro	Prueba Port Flow (Flujo en Puertos)	Prueba de Combustión (Ciclo Completo)	Unidades	Notas
Tipo de Simulación	Estacionaria	Transitoria	-	Port Flow analiza admisión/escape; Combustión modela ciclo completo.
Presión de Admisión	1.0 (atmosférica)	0.95–1.05 (depende de RPM)	bar	Para combustión, varía con velocidad del pistón.
Temperatura de Admisión	300	300–350 (calentamiento dinámico)	K	En combustión, se considera transferencia de calor en puertos.
Presión de Escape	1.1 (backpressure)	1.1–1.2 (onda de presión)	bar	Mayor backpressure en combustión por pulsos de escape.
Lift de Válvulas	8 mm (fijo)	Perfil dinámico (0–8 mm)	mm	En combustión, sigue curva de levas real.
Ángulo de Válvulas	-	IVC: 50° después PMI / EVO: 52° antes PMS	°	Timing para ciclo completo.
Velocidad del Pistón	No aplica	Perfil sinusoidal (0–20 m/s)	m/s	Calculado desde RPM y carrera.
RPM	No aplica	2000–6000	rpm	Rango operativo del motor.
Mezcla Aire-Combustible	No aplica	$\Phi=1$ (estequiométrica)	-	Relación 14.7:1 para gasolina.
Ignición	No aplica	15° antes PMS	°	Ubicación de bujía en centro de cámara.
Turbulencia	Modelo k- ϵ estándar	k- ω SST (transitorio)	-	k- ω SST captura mejor los vórtices en squish.
Temperatura de Paredes	400 (constante)	Conjugada (Al: 500 K / Hierro: 450 K)	K	En combustión, se modela transferencia de calor.
Tiempo de Simulación	Hasta convergencia	2–3 ciclos completos	-	Combustión requiere múltiples ciclos para estabilidad.



Anexo 3. Geometría de válvulas tanto para admisión y escape.

Figura 14

Dominio de la prueba

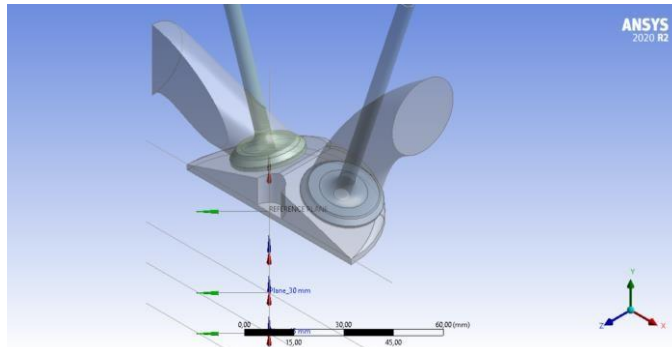
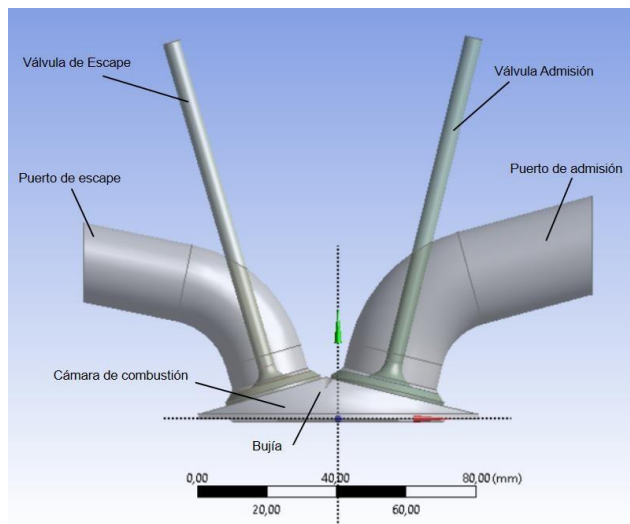


Figura 15

Dominio de la prueba

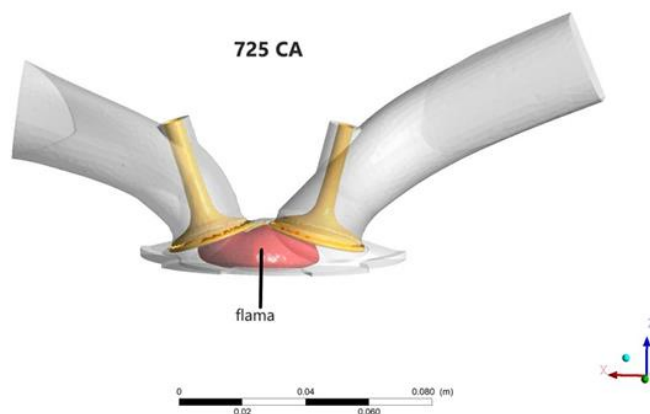


Nota: Asignación de datos geométricos para el modelado. Fuente (Autores,2025)

Anexo 4. Figura de análisis de presión.

Figura 4

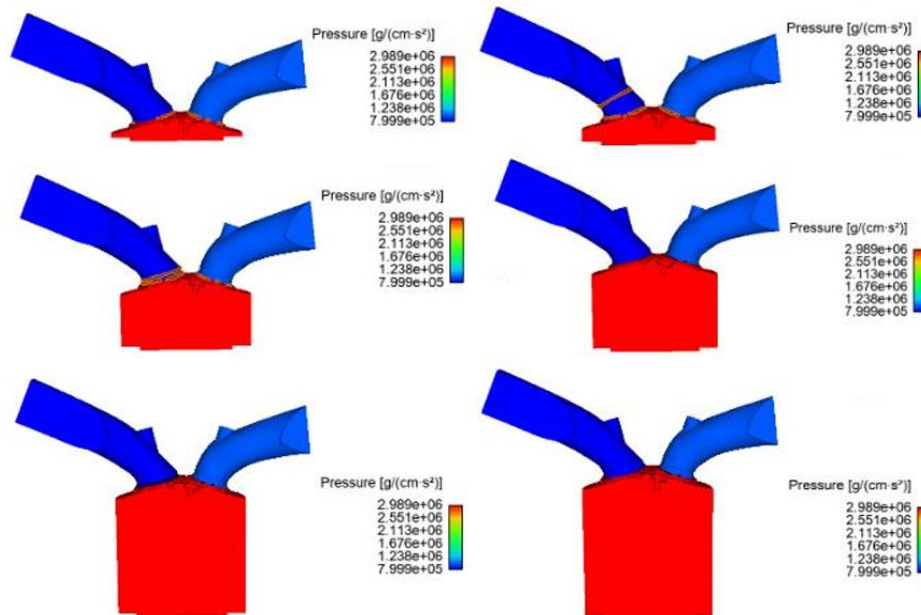
Propagación de la flama (color rojo)



Anexo 5. Figura de simulación de propagación de presión por la cámara y el pistón

Figura 16

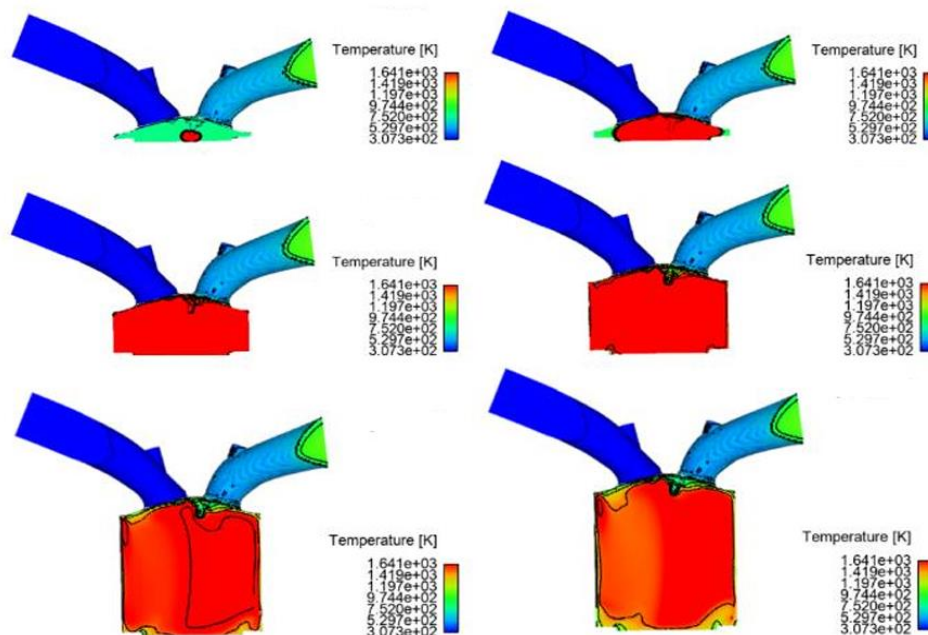
Simulación de propagación de presión por la cámara y el pistón. cámara normal lado izquierdo, cámara modificada lado derecho.



Anexo 6. Simulación de propagación de la temperatura por la cámara y el pistón.

Figura 17

Simulación de propagación de la temperatura por la cámara y el pistón. cámara normal lado izquierdo, cámara modificada lado derecho



Anexo 7. Figuras de resultados de gases

Figura 18

Simulación de la propagación de CO en el cilindro. cámara normal lado izquierdo, cámara modificada lado derecho

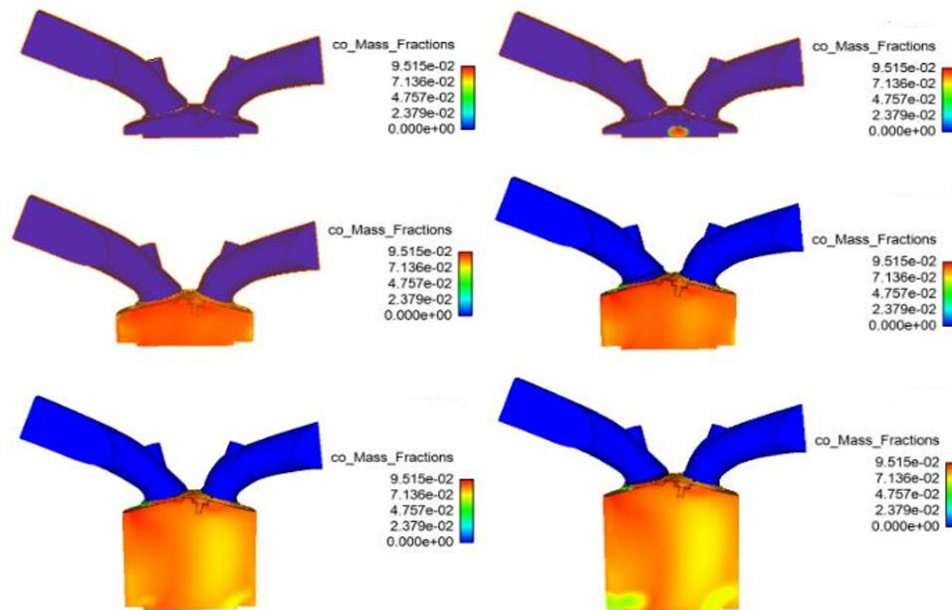


Figura 19

Simulación de la propagación de CO₂ en la cámara de combustión. cámara normal lado izquierdo, cámara modificada lado derecho

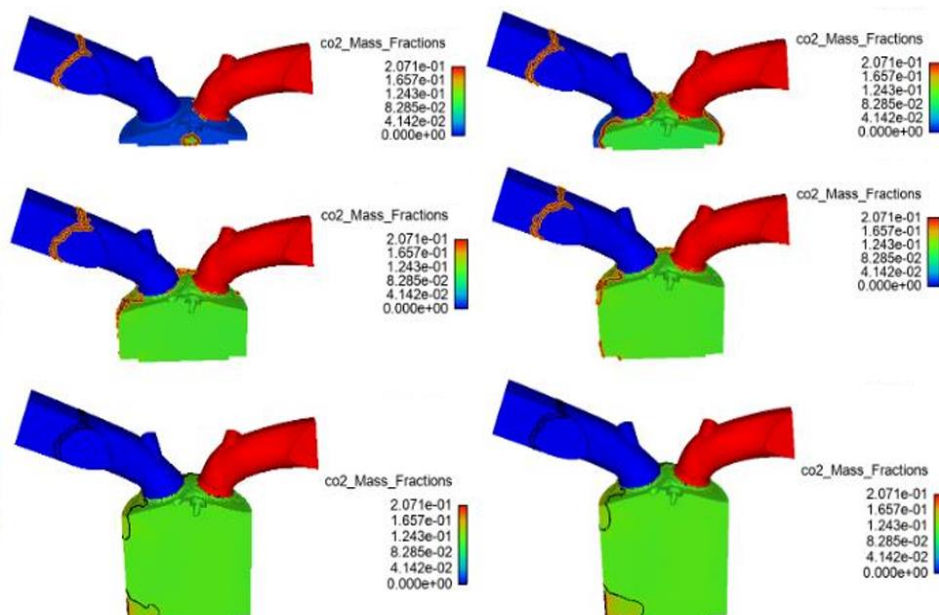


Figura 20

Simulación de la propagación de NOx en la cámara de combustión. cámara normal lado izquierdo, cámara modificada lado derecho

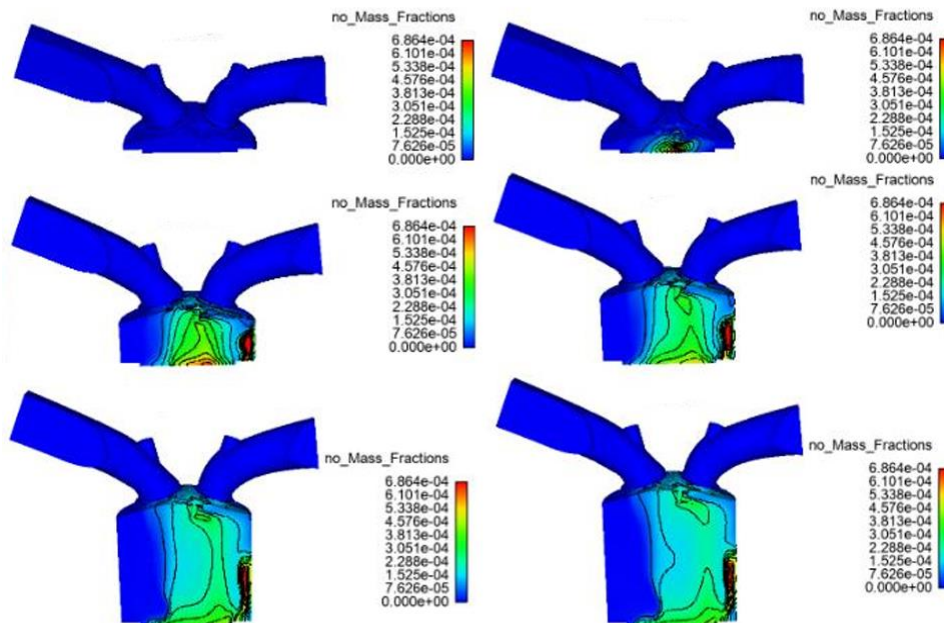
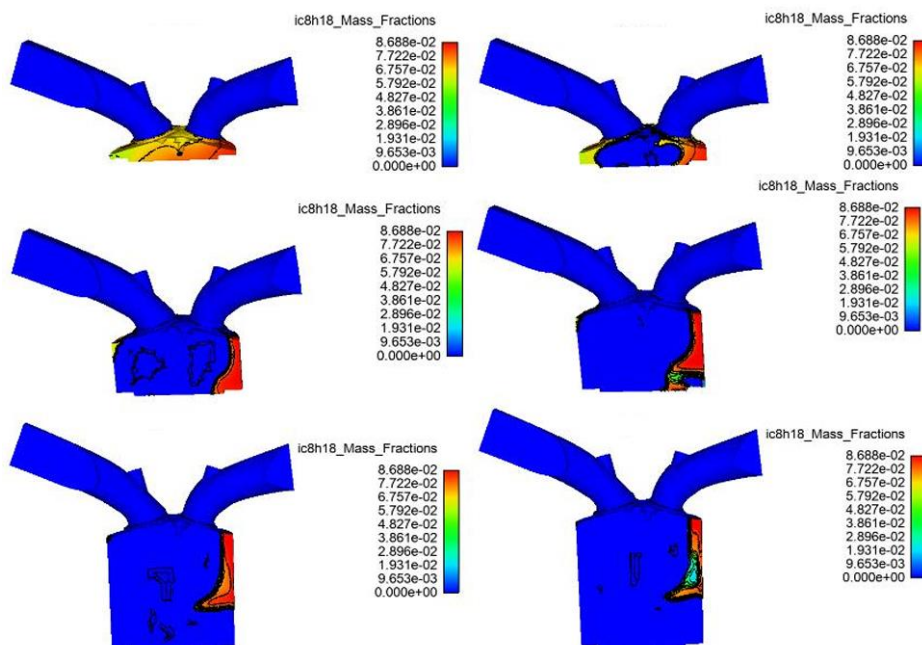


Figura 21

Simulación de Hidrocarburos no combustionados. cámara normal lado izquierdo, cámara modificada lado derecho



Anexo 8 Análisis en los puertos de entrada.

Es por esto que para tener un mejor análisis de estos datos se realizó el análisis en los puertos de entrada por lo que la Figura 22 muestra el contorno de la presión estática a lo largo del puerto de succión, con un valor mínimo de -7952,153 Pa y un valor máximo de -0,132 Pa. La figura 23 muestra una vista ampliada de los vectores de velocidad de la presión estática en el puerto de succión. Además, el análisis muestra que la presión se concentra alrededor de la sección transversal de la válvula, con un valor mínimo de -9170 Pa y un valor máximo de 0,103 Pa.

Figura 22
Contorno de presión estática

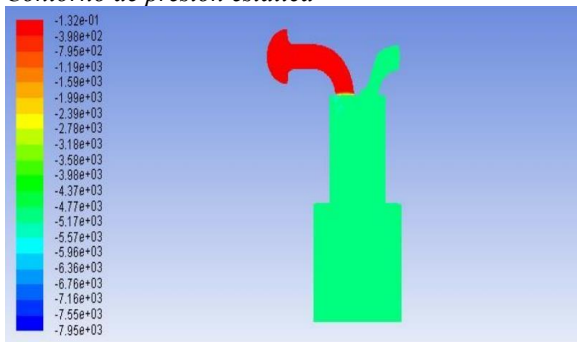
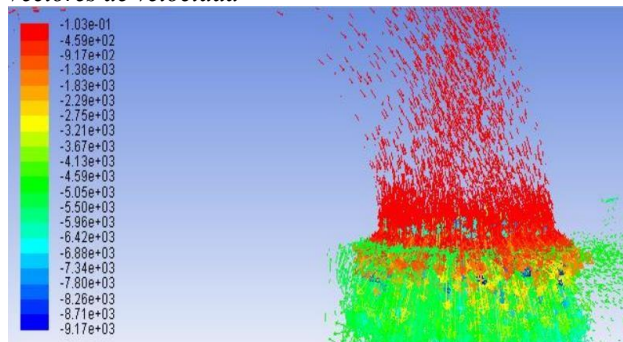


Figura 23
Vectores de velocidad



Nota: Visualización del análisis de presión concentrada alrededor de la sección transversal de las válvulas.

Fuente (Autores,2025)

La Figura 24 muestra el contorno de la presión dinámica a lo largo del puerto de succión, con valores máximos y mínimos de $5,346 \times 10^{-4}$ Pa y 4752,833 Pa, respectivamente. La Figura 25 muestra una vista ampliada de los vectores de velocidad de la presión dinámica en el puerto de succión, con un mínimo de $5,399 \times 10^{-4}$ Pa y un máximo de 7291,115 Pa.

Figura 24
Contorno de presión dinámica

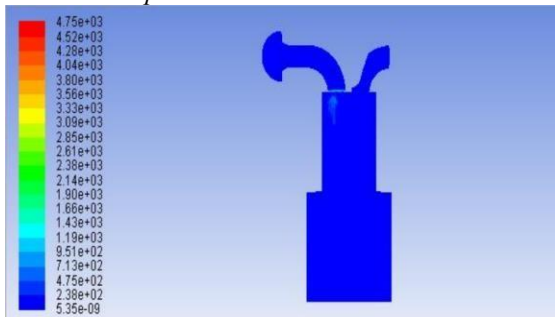
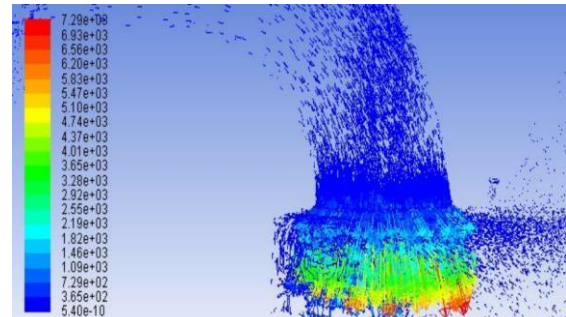


Figura 25
Vectores de velocidad



Nota: Visualización de parámetros de flujo dinámico en el conducto de aspiración mediante representación gráfica. Fuente (Autores,2025)

La Figura 26 muestra el contorno de la velocidad del aire, con un valor mínimo de 0 m/s y un valor máximo de 91,3915 m/s. La Fig. 27 muestra una vista ampliada de los vectores

de velocidad en el puerto de succión con un mínimo de 3.110×10^{-4} pa y un máximo de 114 pa. También indica que la masa de aire está más concentrada alrededor de la válvula y la sección transversal del puerto de entrada, con un movimiento de remolino.

Figura 26

Contorno de la velocidad

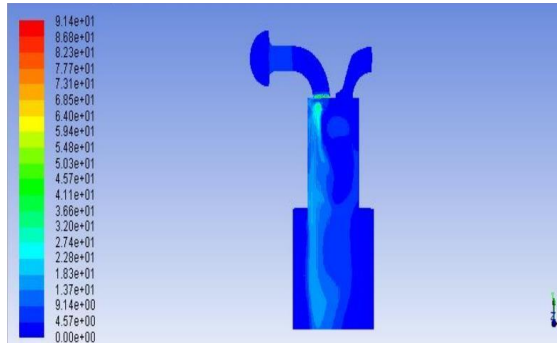
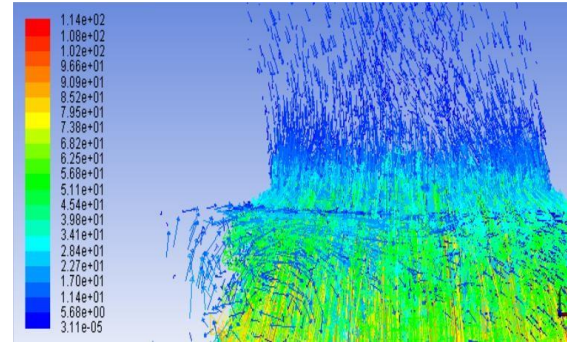


Figura 27

Vectores de velocidad

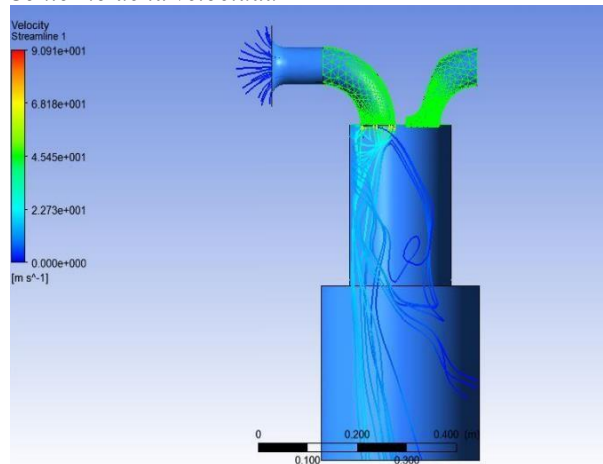


Nota: Representación de la velocidad del contorno de aire. Fuente (Autores,2025)

La Figura 28 muestra la línea de corriente de velocidad de post-procesamiento en el puerto de entrada con una velocidad mínima de 0 m/s y una velocidad máxima de 90.910 m/s. Se observa que la corriente de aire experimenta turbulencia a medida que fluye hacia abajo dentro del cilindro.

Figura 28

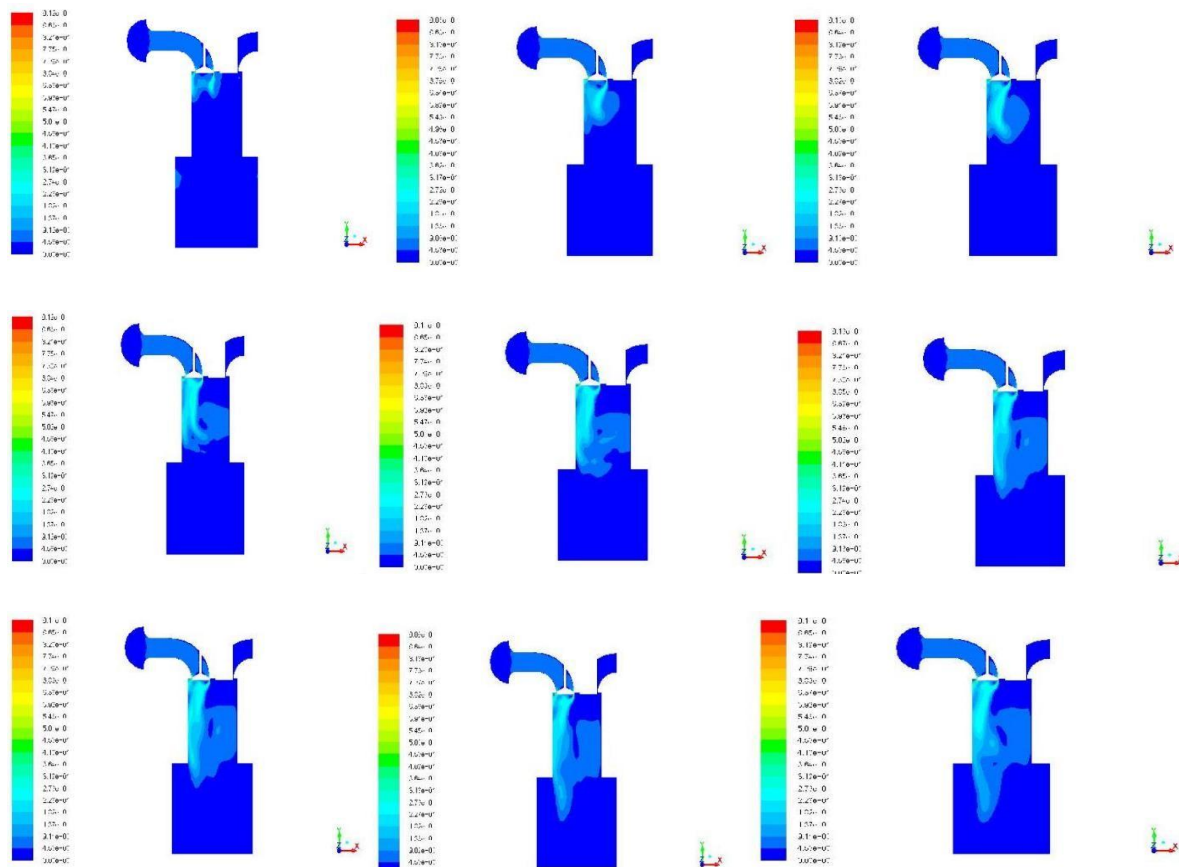
Contorno de la velocidad



Fuente (Autores,2025)

La Figura 29 muestra la magnitud de la velocidad de post-procesamiento en el puerto de entrada para tres movimientos de remolino diferentes: swirl 1 (con una elevación de la válvula de 1.50 mm), swirl 2 (con una elevación de la válvula de 3.00 mm) y swirl 3 (con una elevación de la válvula de 8.00 mm). En cada uno de ellos, la corriente de aire se distribuyó de forma turbulenta, lo que finalmente favorece una combustión suave. La figura muestra la velocidad de ingreso de la mezcla al cilindro.

Figura 29



Swirl 1

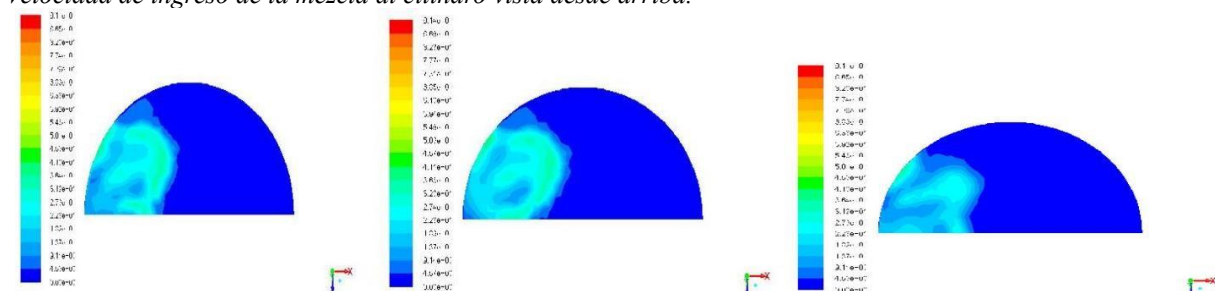
Swirl 2

Swirl 3

La figura 30 muestra la magnitud de la velocidad en el puerto de entrada para los tres movimientos de remolino: swirl 1, swirl 2 y swirl 3. En cada uno de ellos, la corriente de aire se desplaza hacia la pared del cilindro, donde experimenta movimientos de rotación y turbulencia, lo que finalmente favorece una combustión suave.

Figura 30

Velocidad de ingreso de la mezcla al cilindro vista desde arriba.



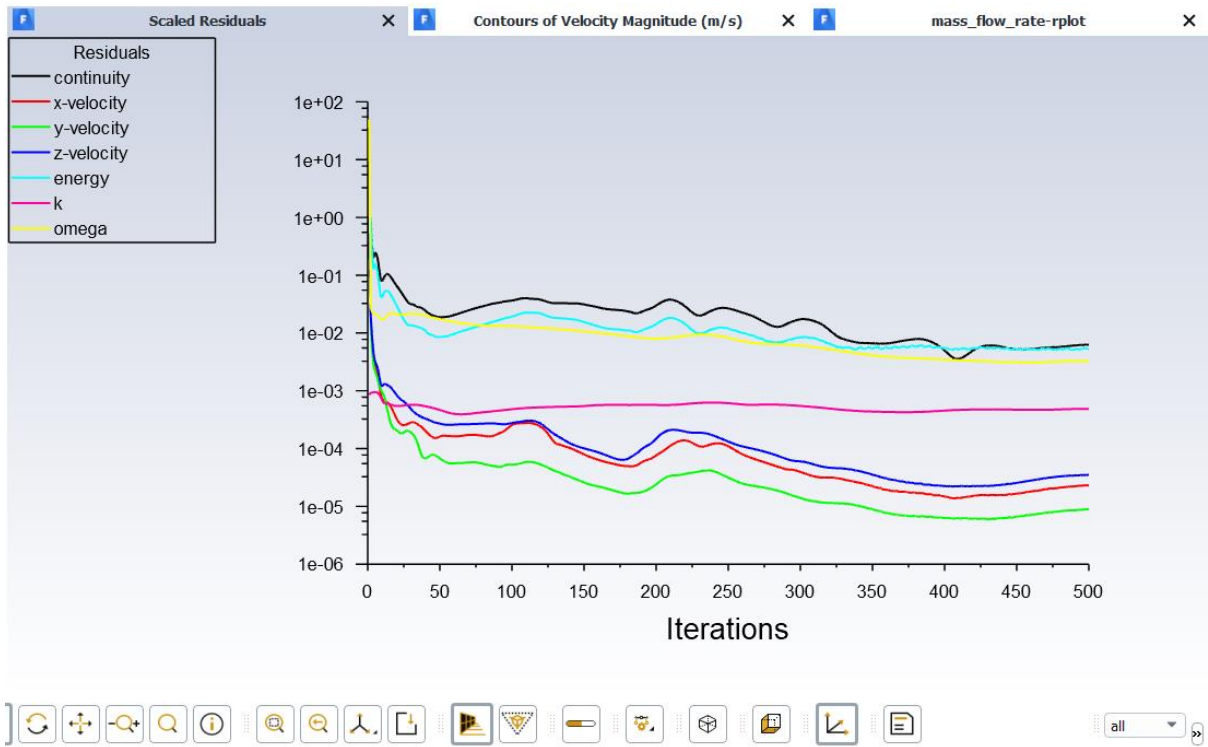
Nota: Simulación de los tres tipos de swirl. Fuente (Autores,2025)

Anexo 9

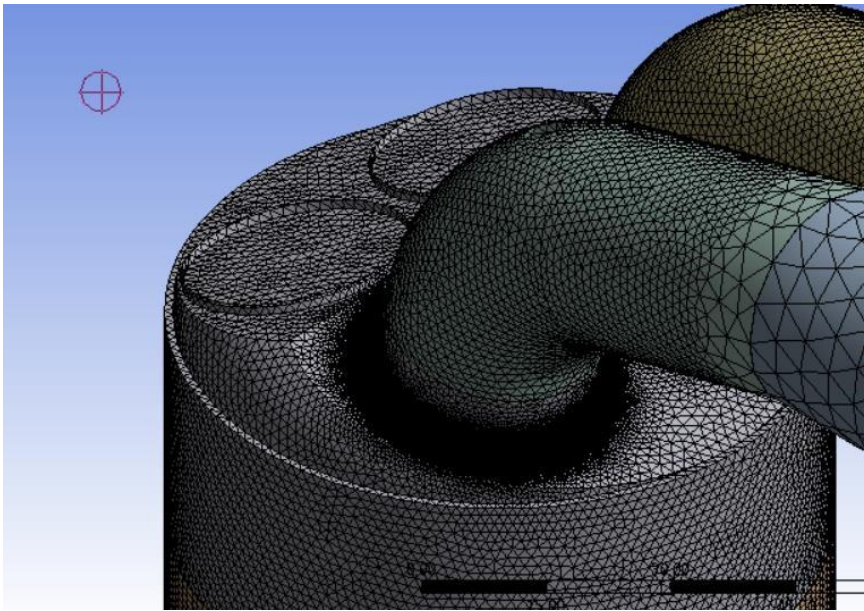
Referencias consultadas para el estado del arte

N°	Autor(es)	Año	Conclusión Principal
1	İlker TEMİZER et al.	2023	La geometría de cámara asimétrica (8 cavidades) reduce 40.3% el hollín, pero aumenta ligeramente NOx. Mayor <i>TKE</i> y velocidad de aire mejoran la mezcla.
2	Aniekan Essienubong Ikpe et al.	2021	Mayor <i>valve lift</i> (8 mm) incrementa el <i>swirl</i> y mejora la distribución radial de temperatura, reduciendo emisiones tóxicas.
3	Raviteja Punukollu et al.	2024	Cámaras SCC reducen hollín, mientras TCC minimizan NOx. Inyección tardía disminuye hollín en 450%, e inyección temprana reduce NOx en 1600%.
4	I. V. Kurchatkin et al.	2017	Validación de modelos CFD en ANSYS IC Engine para flujo frío en motores radiales, con mejora de puertos de admisión.
5	Sathishkumar Kuppuraj et al.	2016	Materiales compuestos (SiC-ZrB ₂) en pistones reducen estrés térmico vs. aluminio, optimizando durabilidad.
6	Singh Rathore & Vineet Kumar Dwivedi	2024	Análisis FEA de pistones compuestos revela mejor relación resistencia-peso, con aplicaciones en motores de alta eficiencia.
7	Abhishek Joshi et al.	2024	FEA en culatas de motores muestra que cargas térmicas y mecánicas requieren diseños balanceados para evitar deformaciones.
8	Yousif Badri et al.	2021	Optimización de espesores en pistón (3 mm corona, 2 mm boss) reduce estrés y masa, pero aumenta temperatura.
9	Pankaj Kumar Gupta	2021	Análisis comparativo de aluminio vs. hierro fundido en pistones: aluminio es preferible por conductividad térmica, pero requiere refuerzos en altas temperaturas.
10	Nik Muhammad Hafiz Nik Ab Rashid et al.	2024	Geometrías de pistón en HCCI/PFI afectan fase de combustión. Corona espiral aumenta presión a 9.42 MPa.
11	K B Sai Sanjana et al.	2016	Materiales compuestos (poliéster, silicio) en cilindros reducen peso y mejoran transferencia de calor vs. acero.
12	Shaik Arifulla & S Ramanababu	2021	Válvulas bimetálicas optimizan resistencia térmica y reducen peso vs. metálicas.
13	Arun Teja Doppalapudi & Abul Kalam Azad	2024	Cámaras SCC en motores diésel mejoran presión (63.2 bar) y distribución de combustión vs. FCC/BTCC.
14	Emarti Kumari et al.	2021	Aleación de aluminio en pistones muestra mayor deformación, pero mejor flujo de calor vs. hierro fundido/acero.
15	Aniekan Essienubong Ikpe & Michael Okon Bassey	2024	Mayor <i>valve lift clearance</i> incrementa <i>TKE</i> y vectores de velocidad, mejorando eficiencia de combustión en motores Renault.
16	John B. Heywood	2018	Fundamentos de motores: turbulencia (<i>swirl/squish</i>) es clave para mezcla aire-combustible y reducción de emisiones.
17	H. Zhao	2010	Inyección directa en gasolina mejora eficiencia, pero requiere optimización de <i>spray</i> y combustión homogénea.
18	J. Yi	2010	Modelos CFD son esenciales para optimizar sistemas de combustión en motores GDI, equilibrando emisiones y rendimiento.
19	T. Lake et al.	2010	Sistemas <i>Lean Boost</i> en motores GDI reducen CO ₂ pero requieren aftertreatment avanzado para NOx.
20	Pedro A.C. Gonçalves & Pedro F.V. Carvalheira	2024	Motores con etanol pueden alcanzar emisiones netas cero, pero dependen de innovaciones en combustibles y combustión.
21	Yanchun Zhao & Jinou Song	2024	Ciclos teóricos muestran que motores sobrealimentados tienen menor eficiencia térmica que los atmosféricos, pero mayor densidad de potencia.
22	Antonio García et al.	2025	Turboalimentadores optimizados mejoran eficiencia en motores dual-fuel (RCCI), reduciendo pérdidas por bombeo en 0.2 bar.
23	V Ganesan	2012	Análisis de motores: interacción entre turbulencia, combustión y emisiones.
24	Alberto Hernández López et al.	2018	Optimización CFD de combustión en motores diésel: geometrías de cámara y <i>spray</i> son críticas para reducir emisiones.

Pruebas Realizadas



Mallado del dominio computacional



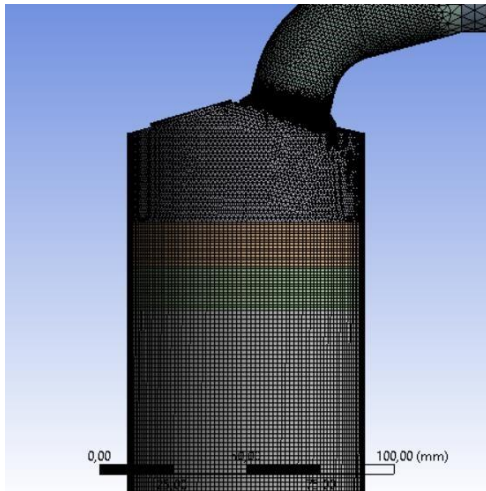
Nota: Construcción del mallado. Fuente (Autores,2025)

Estadística del número de componentes de la malla

Detalle	Número
Nodos	1954581
Elementos	4425349

Nota: Procesamiento de mallado con tamaño de 1.2 mm y calidad media en un área de 110.83 2 mm. Fuente (Autores,2025)

Refinamiento del mallado del dominio computacional



Nota: Visualización de tipos de refinamientos en la geometría de la cámara. Fuente (Autores,2025)