



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**DISEÑO DE UN PLENUM DE ADMISIÓN PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN
POR HIDRÓGENO, FUNDAMENTADO EN CRITERIOS GEOMÉTRICOS EN BÚS-
QUEDA DE UNA MEJOR EFICIENCIA VOLUMÉTRICA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: RONALD XAVIER SÁNCHEZ MONTERO
YERAMI ANDRES ALCÍVAR MARMOLEJO
TUTOR: ING. PAÚL HERNÁN TOTOY MONTERO. MGTR

Guayaquil – Ecuador

2026

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Ronald Xavier Sánchez Montero con documento de identificación N° 0957269335 y Yerami Andrés Alcívar Marmolejo con documento de identificación N° 1716663651; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 27 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ronald Xavier Sánchez Montero

0957269335



Yerami Andrés Alcívar Marmolejo

1716663651

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Ronald Xavier Sánchez Montero con documento de identificación No. 0957269335 y Yerami Andrés Alcívar Marmolejo con documento de identificación No. 1716663651, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo Académico: “Diseño de un plenum de admisión para un motor de combustión por hidrógeno, fundamentado en criterios geométricos en búsqueda de una mejor eficiencia volumétrica.”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 27 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ronald Xavier Sánchez Montero

0957269335



Yerami Andrés Alcívar Marmolejo

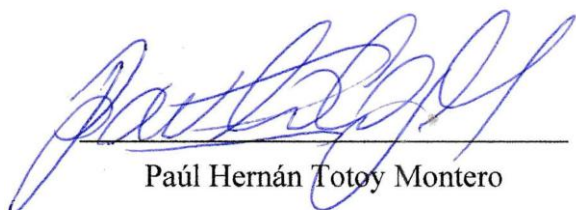
1716663651

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Paúl Hernán Totoy Montero con documento de identificación N° 1722909395, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN PLENUM DE ADMISIÓN PARA UN MOTOR DE COMBUSTIÓN POR HIDRÓGENO, FUNDAMENTADO EN CRITERIOS GEOMÉTRICOS EN BÚSQUEDA DE UNA MEJOR EFICIENCIA VOLUMÉTRICA, realizado por Ronald Xavier Sánchez Montero con documento de identificación N° 0957269335y por Yerami Andrés Alcívar Marmolejo con documento de identificación N° 1716663651, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 27 de febrero del año 2026

Atentamente,



Paúl Hernán Totoy Montero

1722909395

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mi mamá y a mi papá, por su amor, esfuerzo, apoyo incondicional y por ser mi mayor motivación en cada etapa de mi vida. Gracias por creer en mí, por sus consejos, por acompañarme siempre y por recordarme que no estoy solo en mi camino. A mi hermana, por su cariño, compañía y por estar presente con su apoyo en este camino académico.

Y a mi Lunita, mi fiel compañera, por acompañarme cada noche y cada madrugada mientras me quedaba hasta tarde realizando tareas y avanzando en este sueño. Su presencia fue un consuelo y una compañía invaluable en tantas jornadas de esfuerzo.

Finalmente, me dedico también este logro a mí mismo, por no rendirme, por seguir adelante pese al cansancio y por mantenerme firme hasta alcanzar esta meta.

Ronald Xavier Sanchez Montero.

Dedico este logro, ante todo, a Dios, por iluminar mi camino, darme fuerzas en los momentos más difíciles y permitirme alcanzar esta meta. Gracias por acompañarme en cada paso y levantarme cuando sentí que caía.

A mi familia, por ser mi apoyo incondicional. A mi mamá, por su amor, esfuerzo y por enseñarme a nunca rendirme; todo lo que soy y he logrado tiene mucho de ti. Gracias por creer en mí incluso cuando yo dudaba. A mi abuelita, por su cariño, sus consejos y por recordarme siempre de dónde vengo; llevo conmigo tus palabras y tu ejemplo. También agradezco a mis profesores y a mi tutor, por su paciencia y acompañamiento durante este proceso, y a mis amigos y compañeros, por el apoyo, las conversaciones y las risas que hicieron este camino más llevadero.

Este logro no es solo mío, sino de todos los que estuvieron a mi lado, brindándome amor, confianza y palabras de aliento. Hoy celebro esta meta con el corazón lleno de gratitud, sabiendo que este triunfo también les pertenece.

Yerami Andrés Alcivar Marmolejo

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a mis padres, por todo el sacrificio, amor y apoyo que me han brindado a lo largo de mi formación. Gracias por ser el pilar de mi vida y por impulsarme siempre a seguir adelante. A mi hermana, por su compañía, ánimo y respaldo en este proceso, y por estar presente en cada paso de este camino. A mis amigos, por compartir conmigo esta etapa, por las risas, el apoyo en los momentos de estrés, las palabras de aliento y por hacer que este recorrido universitario sea una experiencia inolvidable. Expreso también mi sincero agradecimiento a mi tutor, el Ingeniero Paul Hernán Totoy Montero, por su paciencia, compromiso, dedicación y guía constante durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir sus conocimientos, por exigirnos a dar lo mejor de nosotros y por acompañarnos con profesionalismo hasta cumplir nuestro objetivo de culminar esta etapa, graduarnos y dar un paso más hacia nuestra formación como ingenieros.

Ronald Xavier Sánchez Montero.

Expreso mi profundo agradecimiento, en primer lugar, a Dios, por darme la vida, la sabiduría y la fortaleza para culminar esta importante etapa, especialmente en los momentos de dificultad. A mi familia, por su apoyo constante, su confianza y su amor incondicional, fundamentales durante todo este proceso. De manera especial, agradezco a mi madre, por motivarme siempre a seguir adelante, enseñarme a no rendirme y creer en mí incluso en los momentos de duda, y a mi abuela, por sus oraciones, consejos y valores que hoy guían mi vida personal y profesional. Agradezco sinceramente al Ingeniero Paul Totoy por su guía, paciencia y dedicación durante el desarrollo de esta tesis, así como por compartir sus conocimientos y aportar a nuestra formación profesional. También a mi compañero de tesis, Ronald Sánchez, por su compromiso, responsabilidad y trabajo en equipo para alcanzar esta meta.

Finalmente, agradezco a todas las personas que me acompañaron y apoyaron en este camino, porque este logro también les pertenece por su ánimo, confianza y apoyo constante.

Yerami Andrés Alcívar Marmolejo

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen:.....	1
1. Introducción	2
2. Materiales y Métodos	3
2.1. Materiales	4
2.1.1. Banco Experimental	4
2.1.2. Instrumentación y adquisición de datos	4
2.2. Métodos.....	4
2.2.1. Diseño experimental	4
2.2.2. Diseño Geométrico de Plenum	6
2.2.3. Configuración del modelo CFD.....	7
2.2.4. Generación de malla e independencia numérica	7
2.2.5. Fabricación del Prototipo.....	8
3. Resultados	8
4. Discusión.....	10
5. Conclusiones	12
Apéndice A. Graficas Residuales/Refinamiento De Malla	13
Apéndice B. Campos De Presión De Los 3 Diseños.	14
Referencias.....	15

Artículo

Diseño de un plenum de admisión para un motor de combustión por hidrógeno, fundamentado en criterios geométricos en búsqueda de una mejor eficiencia volumétrica.

Ronald Sánchez¹, Yerami Alcívar² y Paúl Totoy³

¹ Universidad Politécnica Salesiana; rsanchezm4@est.ups.edu.ec

² Universidad Politécnica Salesiana; yalcivarm@est.ups.edu.ec

³ Universidad Politécnica Salesiana; ptotoy@ups.edu.ec

Resumen:

La presente investigación evaluó el comportamiento fluidodinámico de tres configuraciones de plenum de admisión para un motor Honda GX200 (diseño original, tipo Venturi y tipo Bellmouth), con el objetivo de identificar la geometría de mejor desempeño en la conducción del flujo de aire hacia la culata, reduciendo pérdidas de carga y favoreciendo la eficiencia volumétrica. La metodología combinó mediciones experimentales y simulación numérica CFD: en la fase experimental se registraron, en ralentí, carga media y carga alta, el régimen de giro, el vacío en admisión, la temperatura y el flujo másico, y estos datos se utilizaron para definir las condiciones de frontera del modelo desarrollado en ANSYS Fluent con el modelo de turbulencia k-omega SST, cuya confiabilidad se respaldó mediante criterios de convergencia del solucionador e independencia de malla. Los resultados evidenciaron que la geometría del plenum influye directamente en la distribución de velocidad y en la caída de presión del sistema de admisión; el diseño original mostró el comportamiento menos favorable por sus transiciones geométricas bruscas y mayor tendencia a pérdidas internas, el diseño tipo Venturi mejoró la conducción del flujo respecto al original pero presentó aceleraciones localizadas y una recuperación de presión menos favorable, mientras que el diseño tipo Bellmouth alcanzó el mejor desempeño global al proporcionar una entrada más progresiva, mejor uniformidad del flujo y menor restricción aerodinámica. En la validación experimental, bajo niveles de vacío de 15, 10 y 5 inHg, se obtuvieron RPM promedio aproximadas de 820, 1451 y 2101, con desviaciones estándar del orden de ± 2 a ± 3 RPM. Al comparar el plenum original frente al Bellmouth, el flujo másico aumentó de 5, 11 y 21 kg/h a 7, 13 y 25 kg/h en baja, media y alta carga, respectivamente (incrementos de 40.0%, 18.2% y 19.0%), y se registraron incrementos relativos de régimen de giro de 13.65%, 27.84% y 31.46% en las mismas condiciones. La comparación experimental entre el plenum original y el Bellmouth confirmó esta tendencia, al registrarse incrementos de flujo másico y rpm bajo las mismas condiciones de vacío, además de una operación más estable del motor, por lo que se concluye que el plenum tipo Bellmouth constituye la alternativa técnicamente más adecuada para optimizar el sistema de admisión del motor evaluado.

Citation: To be added by editorial staff during production.

Academic Editor: Firstname Lastname

Received: date

Revised: date

Accepted: date

Published: date



Copyright: © 2023 por los autores. Presentado para su posible publicación en acceso abierto bajo los términos y condiciones de Creative Commons Attribution license.

Palabras clave: CFD; plenum de admisión; Bellmouth; Venturi; optimización geométrica; eficiencia volumétrica.

Abstract: This research evaluated the fluid dynamic behavior of three intake plenum configurations for a Honda GX200 engine (original design, Venturi-type design, and Bellmouth-type design), with the aim of identifying the geometry with the best performance for guiding airflow toward the cylinder head, reducing pressure losses, and improving volumetric efficiency. The methodology combined experimental measurements and CFD numerical simulation: during the experimental phase, engine speed, intake vacuum, temperature, and mass flow were recorded under three operating conditions (idle, medium load, and high load), and these data were used to define the boundary conditions of the numerical model developed in ANSYS Fluent using the k-omega SST turbulence model, whose reliability was supported through solver convergence criteria and mesh independence analysis. The results showed that plenum geometry directly influences velocity distribution and pressure drop in the intake system; the original design exhibited the least favorable behavior due to abrupt geometric transitions and a greater tendency toward internal losses, the Venturi-type design improved flow guidance compared to the original but showed localized accelerations and less favorable pressure recovery, whereas the Bellmouth-type design achieved the best overall performance by providing a more

progressive inlet, better flow uniformity, and lower aerodynamic restriction. The experimental comparison between the original plenum and the Bellmouth plenum confirmed this trend, with increases in mass flow and engine speed under the same vacuum conditions, as well as more stable engine operation, leading to the conclusion that the Bellmouth-type plenum is the most technically suitable alternative for optimizing the intake system of the evaluated engine.

Keywords: CFD; intake plenum; Bellmouth; Venturi; geometric optimization; volumetric efficiency.

1. Introducción

La creciente necesidad de reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia energética de los sistemas de propulsión ha impulsado la investigación en combustibles alternativos y tecnologías de optimización para motores de combustión interna. En este contexto, el hidrógeno ha emergido como uno de los vectores energéticos más prometedores debido a su elevada velocidad de propagación de llama, amplio rango de inflamabilidad y ausencia de emisiones directas de dióxido de carbono durante su combustión [1, 2]. Estas propiedades lo posicionan como una alternativa viable para su implementación en motores de combustión interna adaptados, especialmente en escenarios donde se busca una transición progresiva hacia tecnologías más limpias sin reemplazar completamente la infraestructura existente.

Diversas investigaciones han demostrado que el empleo de hidrógeno puede contribuir a mejorar la eficiencia térmica y reducir emisiones contaminantes cuando el proceso de formación de mezcla y la dinámica de admisión son adecuadamente controlados [3–5]. Sin embargo, la baja densidad volumétrica del hidrógeno introduce desafíos relevantes en el llenado del cilindro, lo que puede comprometer la eficiencia volumétrica del motor y, por ende, su desempeño global [2, 6]. En este sentido, el diseño del sistema de admisión adquiere un papel determinante, ya que influye directamente en la masa de aire —o mezcla aire–hidrógeno— que logra ingresar efectivamente al cilindro durante el ciclo de admisión.

El plenum de admisión constituye uno de los elementos más relevantes dentro de este sistema. Su función no se limita únicamente a conducir el flujo hacia la culata, sino también a amortiguar pulsaciones de presión, estabilizar la distribución del flujo y reducir pérdidas asociadas a cambios bruscos de sección. Estudios recientes han evidenciado que parámetros geométricos como el volumen del plenum, el radio de curvatura de la entrada, la transición hacia el conducto y la relación entre diámetros influyen significativamente en la uniformidad del flujo, la caída de presión interna y la estabilidad aerodinámica del sistema [7, 8]. Diseños con transiciones abruptas pueden inducir separación del flujo y zonas de recirculación que incrementan las pérdidas de carga, mientras que configuraciones con entradas progresivas tipo Bellmouth favorecen una conducción más uniforme y una reducción de restricciones aerodinámicas [9].

A pesar de estos avances, la mayor parte de los estudios disponibles en la literatura se han desarrollado para motores alimentados con combustibles convencionales, principalmente gasolina [8, 9]. En el caso específico de motores alimentados con hidrógeno, las investigaciones se han concentrado predominantemente en estrategias de inyección, modelado de combustión o análisis termodinámico global, existiendo una cantidad limitada de trabajos que integren de manera sistemática el diseño geométrico del plenum con validación experimental y simulación CFD orientada a aplicaciones con combustibles alternativos [5, 6, 10]. Esta situación evidencia una brecha de conocimiento relacionada con la optimización geométrica del sistema de admisión bajo criterios reproducibles y técnicamente verificables.

El uso de herramientas de dinámica de fluidos computacional (CFD) se ha consolidado como una metodología eficaz para analizar el comportamiento interno del flujo en sistemas de admisión, permitiendo evaluar distribuciones de velocidad, campos de presión y posibles zonas de recirculación antes de la fabricación de prototipos [7, 9]. No obstante, la confiabilidad de estos modelos depende de su adecuada configuración numérica y, especialmente, de su contraste con mediciones experimentales que respalden las tendencias observadas.

En este contexto, el presente estudio propone el diseño y evaluación fluidodinámica de diferentes configuraciones geométricas de plenum de admisión mediante simulación CFD y validación experimental. El análisis experimental se realiza con aire como fluido de referencia, lo cual permite aislar el efecto estrictamente geométrico sobre el comportamiento del flujo interno.

Adicionalmente, esta investigación se desarrolla en el marco del proyecto de investigación de la Universidad Politécnica Salesiana titulado “Implementation of New Technologies for Energy Efficiency and Sustainable Mobility to Optimize Resource Consumption and Promote Eco-Efficient Solutions in Urban and Industrial Environments”[11]. Dicho proyecto busca promover soluciones tecnológicas orientadas a la eficiencia energética y la movilidad sostenible, fomentando el desarrollo de propuestas que optimicen el consumo de recursos y reduzcan el impacto ambiental. La optimización geométrica del sistema de admisión presentada en este trabajo se alinea directamente con estos objetivos, al contribuir a la reducción de pérdidas internas y al potencial mejoramiento del desempeño volumétrico del motor.

Por lo expuesto, el trabajo está orientado en diseñar y evaluar un plenum de admisión optimizado bajo criterios geométricos, validado mediante simulación CFD y comparación experimental, con aplicación potencial en motores de combustión interna alimentados con hidrógeno. Este enfoque integra herramientas numéricas avanzadas, análisis experimental y vinculación institucional en un marco orientado a la eficiencia energética aplicada.

2. Materiales y Métodos

La metodología adoptada integró caracterización experimental del motor, modelado geométrico del sistema de admisión, simulación numérica CFD y validación comparativa entre configuraciones. El enfoque combinó experimentación controlada y modelado físico-numérico, estrategia recomendada para estudios de optimización de sistemas de admisión en motores de combustión interna[7, 9]. El flujograma del proceso se lo puede observar en la Figura 1.

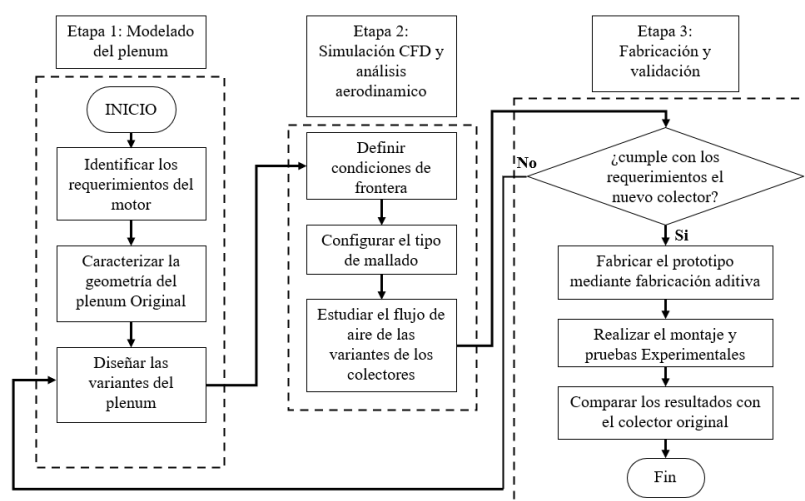



Figura 1. Flujograma de actividades

2.1. Materiales

2.1.1. Banco Experimental

El estudio se realizó sobre un motor monocilíndrico Honda GX200 de cuatro tiempos, empleado como plataforma experimental para caracterizar el comportamiento del sistema de admisión bajo distintas condiciones de vacío. Este tipo de motor es ampliamente utilizado en investigaciones experimentales por su simplicidad constructiva y estabilidad operativa [3, 5], las especificaciones se lo pueden revisar en Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones resumidas del motor Honda GX200

Parámetro	Valor	Figura
Tipo	Monocilíndrico, 4 tiempos	
Cilindrada	196 cm ³	
Calibre × carrera	68 × 54 mm	
Relación de compresión	8.5:1	
Potencia neta	4.3 kW @ 3600 rpm	
Par máximo neto	12.4 N·m @ 2500 rpm	

2.1.2. Instrumentación y adquisición de datos

La instrumentación se seleccionó con base en criterios de resolución adecuada al rango de operación y estabilidad metrológica. La evaluación de repetibilidad siguió lineamientos generales de precisión experimental descritos en ISO 5725 [12], como se muestra en Tabla 2.

Tabla 2. Instrumentación y recursos utilizados

Recurso	Magnitud medida	Resolución
Tacómetro óptico	rpm	±1 rpm
Vacuómetro	Vacío (inHg)	±1 inHg
Termopar + multímetro	Temperatura (°C)	±0.1 °C
Sincrómetro	Flujo másico (kg/h)	±1 kg/h
Autodesk Inventor	Modelado CAD	-
ANSYS Fluent	CFD	-

La presión atmosférica de operación se fijó en 101400 Pa según condiciones ambientales locales.

2.2. Métodos

2.2.1. Diseño experimental

Las variables consideradas en el presente diseño experimental se clasificaron según su naturaleza funcional dentro del sistema: factor controlado (setpoint), variable respuesta primaria, respuesta secundaria y covariable ambiental. Esta clasificación permite estructurar adecuadamente el modelo estadístico jerárquico y evitar la asignación incorrecta de grados de libertad, especialmente en presencia de mediciones repetidas y variables no manipuladas experimentalmente [12, 13].

Cada nivel fue evaluado mediante tres réplicas independientes, constituyendo un total de nueve corridas experimentales. En cada corrida se registraron seis mediciones temporales de régimen de giro (RPM) a los 10, 20, 30, 40, 50 y 60 segundos, resultando en un total de:

$$N = 3 \text{ niveles} \times 3 \text{ réplicas} \times 6 \text{ tiempos} = 54 \text{ observaciones} \quad (1)$$

Este enfoque corresponde a un diseño jerárquico con estructura anidada y mediciones repetidas, apropiado cuando las observaciones dentro de cada unidad experimental no son independientes [13, 14].

Donde, el estudio se estructuró bajo un diseño unifactorial con medidas repetidas, incorporando una variable ambiental como covariable continua. El factor controlado fue el vacío de admisión (inHg), definido como setpoint experimental con tres niveles: 15 (ralentí), 10 (media carga) y 5 inHg (carga completa), ya que se consideran valores típicos de buen estado mecánico de motor, como indica la Tabla 3.

Tabla 3. Factor experimental (set point)

Factor	Niveles	Tipo
Vacío (inHg)	15-10-5	Fijo

El vacío de admisión fue definido como variable independiente controlada, estableciendo tres condiciones operativas que representan distintos estados de carga del sistema.

El régimen de giro (RPM) constituye la variable respuesta principal, evaluada bajo estructura de medidas repetidas. El flujo másico se registró en cada réplica por nivel de vacío ($n = 3$ por condición) y se reportó como media \pm desviación estándar. Debido a la resolución del sincrómetro (± 1 kg/h), su análisis se interpreta en términos de tendencia y magnitud del cambio entre condiciones y geometrías. Por su parte, la temperatura del aire fue registrada durante cada medición, pero no manipulada experimentalmente, razón por la cual se incorporó como covariable continua dentro del modelo mixto, permitiendo controlar su posible efecto sobre la respuesta sin alterar la estructura factorial del diseño [15]. Como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. clasificación de variables y tratamiento estadístico.

Variable	Tipo	Número de observaciones	Tratamiento estadístico
RPM	Primaria	54	Modelo mixto
Flujo másico	Secundaria	9	Descriptivo
Temperatura del aire	Covariable ambiental	54	ANCOVA

El análisis inferencial se realizó mediante un modelo lineal mixto (LME) que permite modelar simultáneamente efectos fijos y aleatorios, siendo apropiado para diseños jerárquicos con mediciones repetidas [14, 16].

La formulación general adoptada fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + s_{j(i)} + \beta_k + \gamma T_{ijk} + (\alpha\beta)_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (2)$$

Donde:

- Y_{ijk} : RPM observada
- μ : media global
- α_i : efecto fijo del vacío
- $s_{j(i)}$: efecto aleatorio de la réplica anidada en el nivel de vacío
- β_k : efecto fijo del tiempo
- T_{ijk} : temperatura ambiente
- γ : coeficiente asociado a la covariable

- $(\alpha\beta)_{ik}$: interacción vacío–tiempo
- ε_{ijk} : error residual

Los grados de libertad fueron estimados mediante el método de Satterthwaite, adecuado para modelos mixtos con estructuras no completamente balanceadas [14].

El procesamiento estadístico se realizó en MATLAB utilizando la función fitlme del Statistics and Machine Learning Toolbox, estructurando inicialmente los datos en formato largo (long format) para preservar la jerarquía experimental (vacío–réplica–tiempo). Se definieron como factores categóricos el vacío y el tiempo, mientras que la temperatura del aire se incorporó como covariable continua. Posteriormente, se estimó un segundo modelo incorporando la temperatura como covariable, evaluado mediante máxima verosimilitud restringida (REML) para la estimación de parámetros y máxima verosimilitud (ML) para la comparación entre modelos anidados. Se efectuó análisis de varianza del modelo mixto, inspección de efectos fijos y evaluación diagnóstica mediante análisis gráfico de residuos (residuos vs ajustados y QQ-plot), garantizando la validez del ajuste estadístico conforme a metodologías consolidadas en diseño de experimentos con medidas repetidas [13–15].

Se calcularon para cada corrida la media, desviación estándar y rango del régimen de giro durante los 60 s, permitiendo evaluar la estabilidad operacional, como indica la Tabla 5.

Tabla 5. Factor experimental (set point)

Vacío (inHg)	RPM media aproximada	Desviación estándar promedio
15	820	±2 rpm
10	1451	±2 rpm
5	2101	±3 rpm

Los resultados muestran una clara diferenciación entre niveles de vacío y baja variabilidad intra-corrida, indicando estabilidad dinámica en cada condición. Generándose un ajuste lineal simple de tendencia en concordancia con [13]. Finalmente, el flujo másico se registró en cada réplica por nivel de vacío ($n = 3$ por condición). Debido a la resolución del sincrómetro (± 1 kg/h), la dispersión se interpreta dentro del rango instrumental y se reporta como estadística resumen (media \pm desviación estándar)).

2.2.2. Diseño Geométrico de Plenum

Se caracterizó el plenum original del Honda GX200 y se diseñaron dos variantes geométricas: Bellmouth, y Venturi, como indica la Figura 2. Las modificaciones se fundamentaron en criterios de transición suave y control de aceleración del flujo, reportados como relevantes en la literatura sobre sistemas de admisión [7, 9, 17].

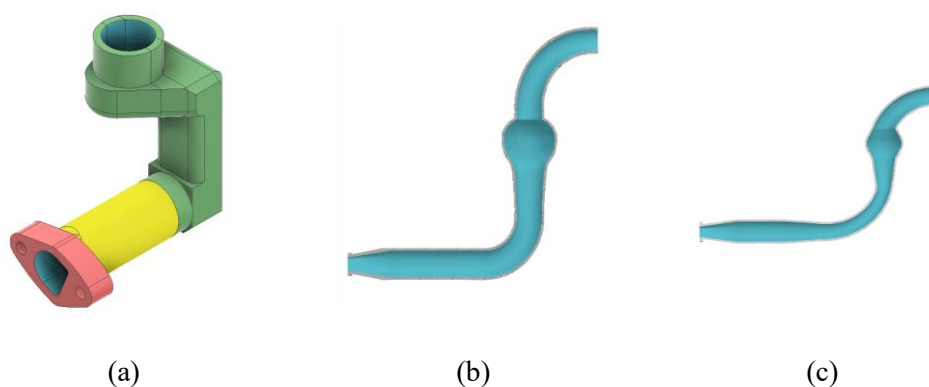


Figura 2. Diseño geométrico de Plenum de admisión. a) Diseño original de plenum de admisión. b) Variante Bellmouth de plenum de admisión. c) Variante Venturi de plenum de admisión.

El diseño Bellmouth buscó minimizar separación de flujo mediante curvatura progresiva[18], mientras que el Venturi evaluó el efecto de contracción–expansión controlada[19]. Además, en la Tabla 6 se indican las dimensiones base del conducto del plenum original empleado para el diseño de las variantes.

Tabla 6. Dimensiones del conducto del carburador

Parámetro	Valor
Diámetro interior (Sección mayor)	24.4 mm
Diámetro interno (Sección menor)	18.8 mm
Longitud del ducto	60 mm

2.2.3. Configuración del modelo CFD

El análisis numérico se ejecutó en ANSYS Fluent bajo régimen estacionario, empleando el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST, reconocido por su capacidad para capturar gradientes de presión adversos y separación en flujos internos[20, 21]. Estos valores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Configuración de CFD

Parámetro	Configuración
Tipo de análisis	Estacionario
Modelo de turbulencia	SST $k-\omega$
Frontera de entrada	Pressure Inlet
Frontera de salida	Pressure Outlet
Operation condition	101400 Pa
Temperatura	302 K
Densidad	1.168 kg/m ³

Las condiciones de frontera se establecieron para representar el escenario de máxima apertura del sistema de admisión (mariposa del carburador completamente abierta), con el objetivo de minimizar restricciones externas al plenum y aislar el efecto de la geometría del colector en el comportamiento del flujo. De esta manera, la comparación entre diseños se centra en las pérdidas y patrones de recirculación atribuibles principalmente al plenum, manteniendo constantes el resto de los parámetros operativos.

2.2.4. Generación de malla e independencia numérica

Se empleó mallado no estructurado con refinamiento en regiones de alto gradiente. Se realizó estudio de independencia de malla con tres tamaños (4 mm, 3 mm y 2 mm), siguiendo buenas prácticas de validación numérica [22].

- La malla final seleccionada fue de 2 mm, con:
- Primera capa: 0.03 mm
- 12 capas de inflación
- Crecimiento: 1.2
- Objetivo: $y^+ \approx 1$

La resolución de capa límite se fundamentó en teoría clásica de capa límite [22].

2.2.5. Fabricación del Prototipo

El plenum seleccionado se fabricó mediante Fused Deposition Modeling empleando filamento ABS de alta resistencia térmica. La manufactura aditiva es adecuada para prototipado funcional de conductos internos complejos [19, 21, 23].

Posteriormente se realizó:

- Lijado interno para reducción de rugosidad
- Sellado con resina para estanqueidad

Estos procedimientos mejoran la continuidad superficial y reducen pérdidas por fricción interna [23], el proceso gráfico se muestra en Figura 3.

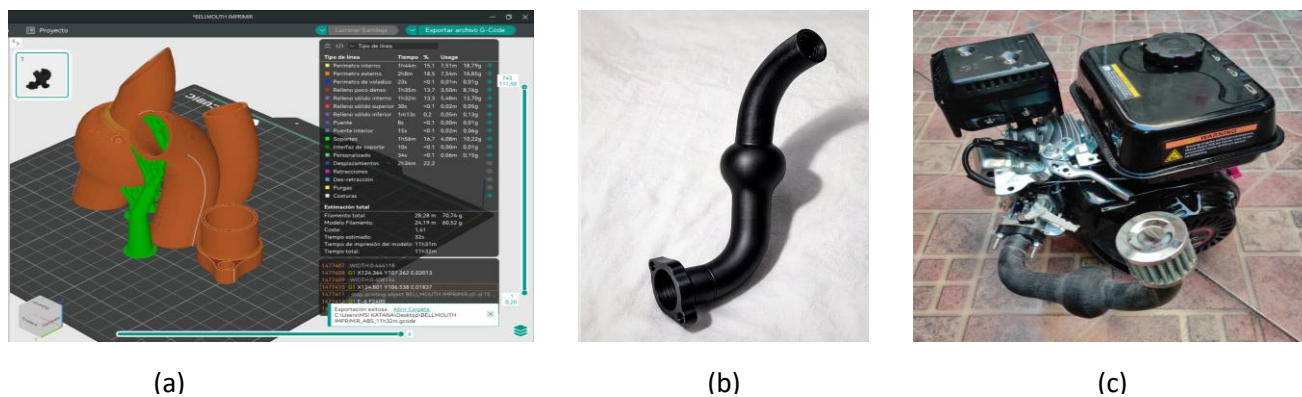


Figura 3. Generación de código G (a), Plenum impreso con acabados (b), Plenum acoplado al motor (c).

3. Resultados

El comportamiento base del sistema de admisión mostró una diferenciación clara entre los tres niveles de vacío evaluados. Las RPM medias obtenidas fueron 820 rpm (15 inHg), 1451 rpm (10 inHg) y 2101 rpm (5 inHg). La dispersión intragrupo fue baja ($\leq \pm 3$ rpm), evidenciando estabilidad operacional en cada condición.

El flujo másico registrado fue de 5 kg/h, 11 kg/h y 21 kg/h para baja, media y alta carga, respectivamente. La relación entre reducción de vacío y aumento de régimen mostró una tendencia creciente consistente, indicando mayor demanda volumétrica del motor conforme disminuye la depresión en admisión.

Estos valores constituyen la referencia experimental para la comparación con las geometrías modificadas.

El análisis CFD mostró diferencias claras en la distribución de velocidad y en la calidad del flujo hacia la culata. El diseño original presentó aceleraciones intensas y recirculaciones visibles en la zona del codo. El Bellmouth mostró un patrón más uniforme y estable, mientras que el Venturi presentó aceleración localizada tipo “núcleo” en la zona de contracción–expansión, como muestra la Figura 4.

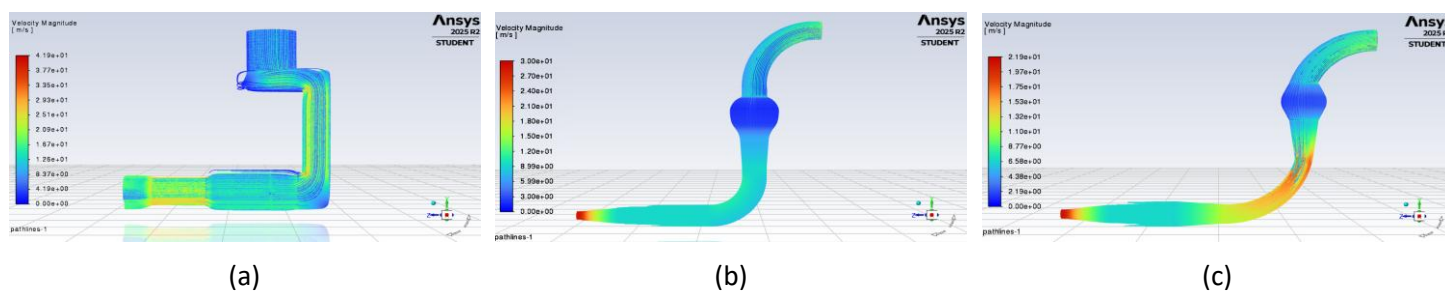


Figura 4. Grafica de velocidad – Plenum original (a), Bellmouth (b) y Venturi (c).

Y la tendencia de comportamiento se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Comparación CFD resumida entre geometrías

Configuración	Velocidad máxima aprox. (m/s)	Comportamiento del flujo	Recirculación	Desempeño global
Original	41.9	Aceleración intensa en el codo y flujo menos uniforme	Sí, marcada	Bajo
Bellmouth	30.0	Flujo más uniforme, alineado y estable	No dominante	Mejor
Venturi	21.9	Aceleración localizada en la zona de contracción-expansión	Local	Intermedio

Aunque el Venturi presentó una velocidad máxima global menor, su patrón de flujo mostró una aceleración localizada en la zona de contracción, lo que puede comprometer la uniformidad de alimentación a la salida. En contraste, el Bellmouth ofreció una mejor redistribución del flujo y menor tendencia a pérdidas por forma.

La comparación experimental entre la geometría original y la configuración Bellmouth evidenció incrementos consistentes en el régimen de giro bajo condiciones equivalentes de vacío. A 15 inHg, el régimen promedio aumentó de 820 rpm a 932 rpm (+13.65 %); a 10 inHg, de 1451 rpm a 1855 rpm (+27.84 %); y a 5 inHg, de 2101 rpm a 2762 rpm (+31.46 %).

El incremento fue progresivo conforme disminuyó el vacío, indicando que el efecto de la optimización geométrica se amplifica en condiciones de mayor demanda volumétrica. Este comportamiento sugiere que la reducción de pérdidas por forma y la mejora en la conducción del flujo impactan de manera más significativa cuando el motor opera cercano a su régimen de carga alta.

En términos de flujo másico, el plenum Bellmouth registró valores de 7 kg/h, 13 kg/h y 25 kg/h en baja, media y alta carga, respectivamente, frente a 5 kg/h, 11 kg/h y 21 kg/h del sistema original. Los incrementos relativos fueron de +40.0 %, +18.2 % y +19.0 %. El aumento absoluto más alto se observó en alta carga (+4 kg/h), coherente con la mayor exigencia de llenado del cilindro.

El análisis conjunto de los resultados numéricos y experimentales permite establecer una jerarquía clara de desempeño entre las configuraciones evaluadas. El plenum original mostró mayores aceleraciones localizadas y zonas de recirculación asociadas a transiciones geométricas abruptas, lo que se tradujo en mayor restricción interna. El diseño Venturi presentó una reducción de velocidad máxima global, pero con aceleraciones concentradas en la región de contracción, lo que limitó la uniformidad del flujo hacia la salida.

Por su parte, la geometría Bellmouth evidenció una transición progresiva que favoreció la redistribución homogénea del flujo y la disminución de gradientes adversos de presión. Numéricamente, esta configuración redujo la velocidad máxima en regiones críticas en aproximadamente 28 % respecto al diseño original, lo que indica menor aceleración localizada y, por ende, menor pérdida por forma. Experimentalmente, dicha mejora se tradujo en incrementos sostenidos de régimen de giro y flujo másico bajo iguales condiciones de vacío.

La coherencia entre la reducción de irregularidades del campo de velocidad (CFD) y el aumento del suministro volumétrico medido experimentalmente sugiere que la optimización geométrica logró disminuir pérdidas internas y mejorar la eficiencia de admisión. Este efecto se vuelve más relevante a mayores cargas, donde el sistema es más sensible a restricciones aerodinámicas.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de una transición tipo Bellmouth constituye la alternativa geométrica más eficiente entre las configuraciones evaluadas, al mejorar la estabilidad del flujo y favorecer el llenado del cilindro sin introducir aceleraciones localizadas perjudiciales.

4. Discusión

El análisis estadístico fue desarrollado mediante un modelo lineal mixto (LME) implementado en MATLAB (fitlme), siguiendo la estructura de la ecuación (2), donde el vacío (V) se consideró efecto fijo, la réplica anidada efecto aleatorio y la temperatura covariable continua.

- Los resultados del modelo confirman:
- Diferencia altamente significativa entre niveles de vacío ($p < 0.001$).
- Efecto no significativo de la temperatura como covariable ($p > 0.05$).
- Baja varianza residual.

Los resultados se resumen en la Tabla 9,

Tabla 9. Resultados del modelo lineal mixto (LME)

Efecto fijo	F-value	p-value	Interpretación
Vacío (inHg)	$\gg 100$	< 0.001	Altamente significativo
Tiempo	No significativo	> 0.05	No significativo
Temperatura	No significativo	> 0.05	No significativa
Interacción $V \times T$	No significativo	> 0.05	No significativa

Los resultados se indican en la Figura 5.

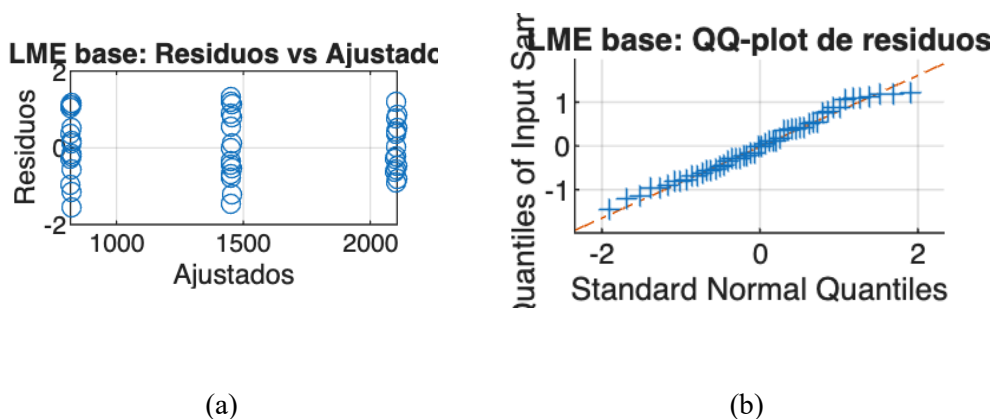


Figura 5. Gráfica de análisis estadístico – a) Análisis de residuos ajustados, b) QQ-plot de residuos.

La baja dispersión intragrupo ($\sigma \approx 2-3$ rpm) confirma estabilidad metrológica conforme a ISO 5725 [12] y lineamientos clásicos de diseño experimental [13–15]. Esto valida que las diferencias observadas entre configuraciones no se deben a ruido experimental sino a modificaciones geométricas reales.

La comparación entre los resultados numéricos obtenidos mediante simulación CFD y los datos experimentales registrados en banco permite establecer una relación directa entre el comportamiento fluidodinámico interno del plenum y el desempeño operativo del motor. Esta correlación constituye un elemento clave para validar la pertinencia del rediseño geométrico bajo criterios técnicos reproducibles.

Desde el análisis numérico, el diseño original evidenció aceleraciones intensas en la zona del codo y presencia de recirculaciones asociadas a transiciones geométricas abruptas. Estas características generan gradientes adversos de presión y pérdidas locales por forma, lo cual coincide con los fundamentos clásicos de dinámica de fluidos internos[22]. En contraste, la geometría tipo Bellmouth presentó una transición progresiva en la entrada, reduciendo la separación del flujo y favoreciendo una distribución de velocidades más uniforme hacia la salida del conducto.

Los campos de velocidad obtenidos muestran que el diseño Bellmouth reduce la velocidad máxima localizada aproximadamente en 28 % respecto al diseño original en zonas críticas del conducto, lo que sugiere una disminución de aceleraciones puntuales y, por tanto, una menor pérdida de carga interna. Este comportamiento es consistente con estudios de optimización geométrica en sistemas de admisión que reportan mejoras en uniformidad de flujo mediante entradas suavizadas[7, 18].

Desde el punto de vista experimental, esta mejora fluidodinámica se tradujo en incrementos sostenidos tanto en régimen de giro como en flujo másico bajo las mismas condiciones de vacío. Específicamente, al comparar el plenum original con la configuración Bellmouth, se observaron incrementos de RPM de +13.65 %, +27.84 % y +31.46 % para 15, 10 y 5 inHg, respectivamente. De manera paralela, el flujo másico aumentó de 5 a 7 kg/h en carga baja (+40 %), de 11 a 13 kg/h en carga media (+18.2 %) y de 21 a 25 kg/h en carga alta (+19.0 %).

La coherencia entre ambas metodologías (numérica y experimental) indica que la reducción de irregularidades en el campo de velocidad y la disminución de recirculaciones internas favorecen un mayor suministro volumétrico hacia la culata. Este efecto es particularmente evidente en condiciones de mayor demanda (5 inHg), donde el sistema de admisión es más sensible a restricciones aerodinámicas, comportamiento también reportado en investigaciones previas sobre influencia geométrica en colectores de admisión[8, 9].

Adicionalmente, el diseño tipo Venturi, aunque presentó una velocidad máxima global inferior a la del diseño original, mostró aceleraciones concentradas en la región de contracción–expansión, lo que generó un patrón menos uniforme en la salida. Este fenómeno limita su efectividad práctica frente al Bellmouth, ya que la uniformidad del flujo resulta más determinante que la reducción puntual de velocidad máxima, tal como ha sido documentado en estudios de optimización de admisiones en motores de encendido por chispa[7, 24].

La Figura 6 presenta la evolución de los residuos durante la simulación CFD, evidenciando un comportamiento decreciente y estable a lo largo de las iteraciones. Esta tendencia indica que el solucionador alcanzó un régimen convergente, reduciendo los errores numéricos de las ecuaciones gobernantes y garantizando la consistencia interna de los resultados obtenidos. En consecuencia, los campos de presión y velocidad analizados en las figuras posteriores se consideran numéricamente confiables para la comparación entre geometrías, ya que se derivan de una solución estable y adecuada [25].

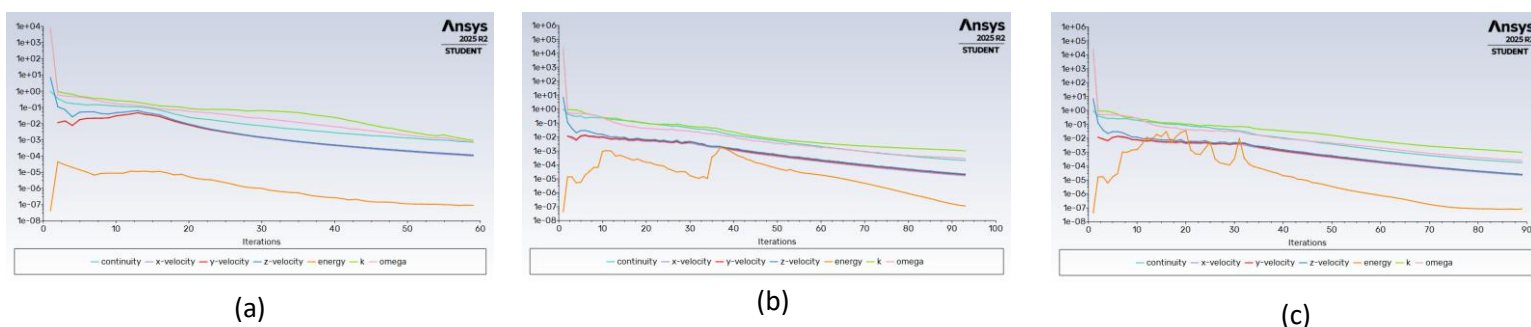


Figura 6. Grafica de residuos – a) Análisis de residuales de plenum original, b) Análisis de residuales de plenum Bellmouth, c) Análisis de residuales de plenum Venturi.

En términos generales, el análisis estadístico basado en medias, dispersión e intervalos de confianza confirma estabilidad intragrupo y diferencias claras entre condiciones de vacío. La comparación Original vs Mejora muestra incrementos consistentes en RPM y aumentos observados en flujo másico, los cuales son coherentes con la teoría y con reportes previos sobre la influencia de la geometría del sistema de admisión en pérdidas de carga y distribución del flujo [8, 25].

Si bien el presente estudio fue desarrollado empleando aire como fluido de referencia y un motor Honda GX200 convencional como plataforma experimental, los resultados obtenidos poseen implicaciones directas para aplicaciones en motores de combustión interna alimentados con hidrógeno. En este tipo de sistemas, la eficiencia volumétrica constituye uno de los principales desafíos técnicos debido a la baja densidad del hidrógeno en condiciones atmosféricas, lo cual limita la masa total admitida al cilindro cuando se emplean configuraciones de inyección en el colector o mezcla previa[1, 2].

Diversos autores han señalado que, en motores H_2 , la dinámica de admisión adquiere una relevancia aún mayor que en motores convencionales, ya que cualquier pérdida adicional de carga o irregularidad en la distribución del flujo afecta directamente el llenado efectivo del cilindro y, por ende, el rendimiento térmico global del sistema[2, 5, 10]. En este contexto, la reducción de pérdidas por forma y la mejora en la uniformidad del flujo interno —observadas en la geometría tipo Bellmouth— adquieren especial importancia técnica

Los incrementos experimentales de flujo másico (hasta +40 % en carga baja y +19 % en carga alta) y de régimen de giro bajo igual nivel de vacío evidencian una mejora en la capacidad de admisión del sistema. Desde una perspectiva de transferencia tecnológica, este comportamiento sugiere que un rediseño geométrico del plenum podría contribuir a mitigar parcialmente las limitaciones volumétricas asociadas al hidrógeno, especialmente en configuraciones de alimentación por puerto (PFI), donde el desplazamiento volumétrico del aire por el combustible gaseoso es un fenómeno conocido [5].

En términos de dinámica interna, la transición progresiva de sección que caracteriza al diseño Bellmouth reduce gradientes adversos de presión y minimiza la separación del flujo, principios ampliamente respaldados por teoría clásica de capa límite [22] y estudios contemporáneos de optimización de entradas en sistemas rotodinámicos[18]. Esta reducción de irregularidades internas es particularmente relevante en motores H_2 , donde la velocidad de propagación de llama elevada y el amplio rango de inflamabilidad requieren un control cuidadoso de la mezcla para evitar fenómenos indeseados como retroceso de llama (backfire) o combustión anómala[2, 5].

Por tanto, aunque la validación experimental fue realizada con aire, los fundamentos físicos observados —reducción de pérdidas internas, mejora en distribución de velocidad y aumento del caudal efectivo— son transferibles conceptualmente a sistemas de admisión destinados a combustibles gaseosos de baja densidad. La optimización geométrica del plenum no sustituye estrategias de inyección directa o sobrealimentación, pero constituye una intervención pasiva de bajo costo que puede complementar dichas tecnologías.

En conjunto, los hallazgos del estudio respaldan que el rediseño geométrico del sistema de admisión, particularmente mediante configuraciones tipo Bellmouth, representa una alternativa técnicamente viable para mejorar la eficiencia volumétrica en motores convencionales y ofrece una base sólida para futuras investigaciones orientadas a aplicaciones con hidrógeno.

5. Conclusiones

Se establecieron las condiciones técnicas y operativas necesarias del motor para definir un marco de diseño y evaluación del plenum de admisión. La caracterización del régimen mediante tres niveles de vacío (15, 10 y 5 inHg), representativos de carga baja, media y alta, permitió obtener valores de referencia estables de RPM por condición. La baja dispersión de las mediciones dentro de cada nivel evidenció un funcionamiento consistente

del banco, lo cual sustenta la confiabilidad de los datos utilizados para comparar el sistema original frente a la propuesta de mejora.

La evaluación de alternativas geométricas mediante herramientas CAE permitió orientar el rediseño hacia una admisión con un comportamiento de flujo más favorable que el sistema original. La interpretación del campo de flujo sugiere una distribución más uniforme y una reducción de zonas asociadas a pérdidas locales, como recirculaciones y gradientes marcados de presión, lo que respalda técnicamente la selección del prototipo optimizado. En conjunto, el enfoque de diseño asistido por simulación aportó criterios para justificar la geometría final más allá de una decisión empírica.

La verificación experimental con síncro metro mostró un aumento del flujo másico al comparar el prototipo con el sistema original: de 5, 11 y 21 kg/h se pasó a 7, 13 y 25 kg/h en carga baja, media y alta, respectivamente, equivalentes a incrementos relativos de 40.0%, 18.2% y 19.0%. Este mayor suministro de aire se reflejó también en el incremento del régimen de giro bajo las mismas condiciones de vacío, con aumentos de 13.65%, 27.84% y 31.46% para 15, 10 y 5 inHg, lo cual confirma que la modificación geométrica del plenum contribuye a mejorar el proceso de admisión, con un efecto más evidente a mayores demandas del motor.

Apéndice A. Graficas Residuales/Refinamiento De Malla

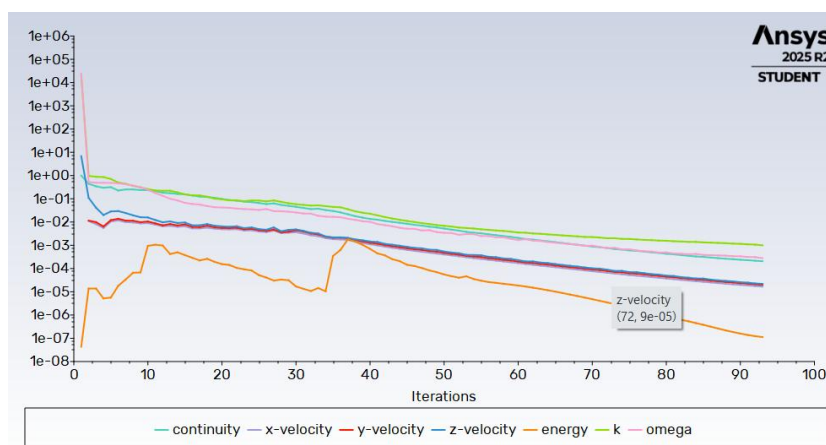


Figura A.1. Grafica residuales/refinamiento de malla 2mm.

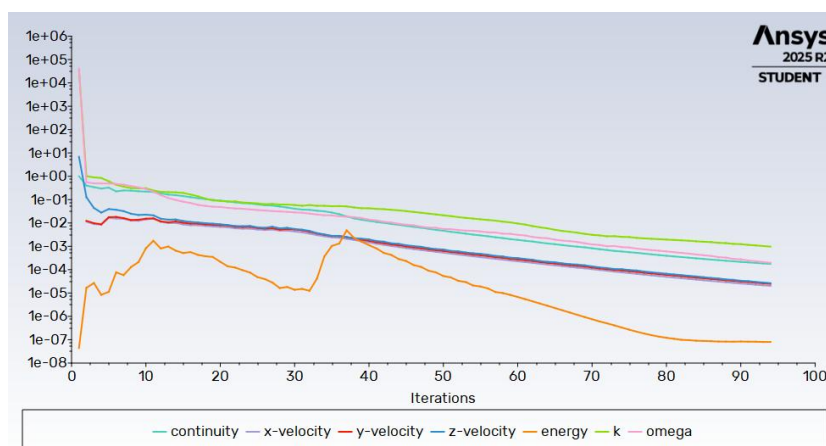


Figura A.2. Grafica residuales/refinamiento de malla 3mm.

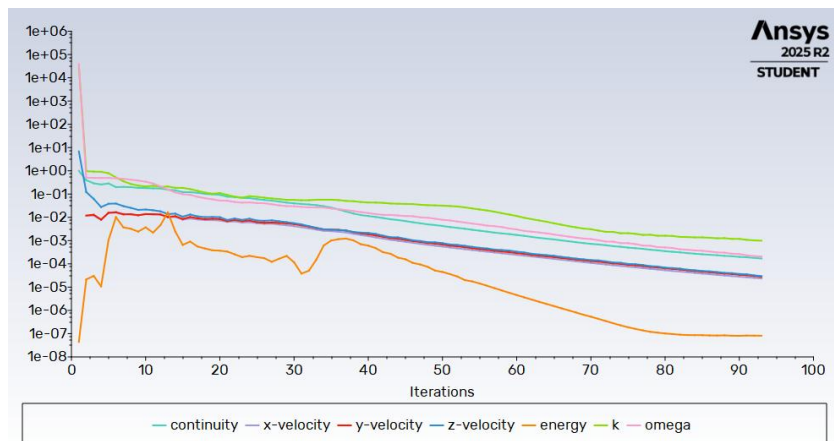


Figura A.3. Grafica residuales/refinamiento de malla 4mm.

Apéndice B. Campos De Presión De Los 3 Diseños.

Figura B.1. Grafica presión diseño original.

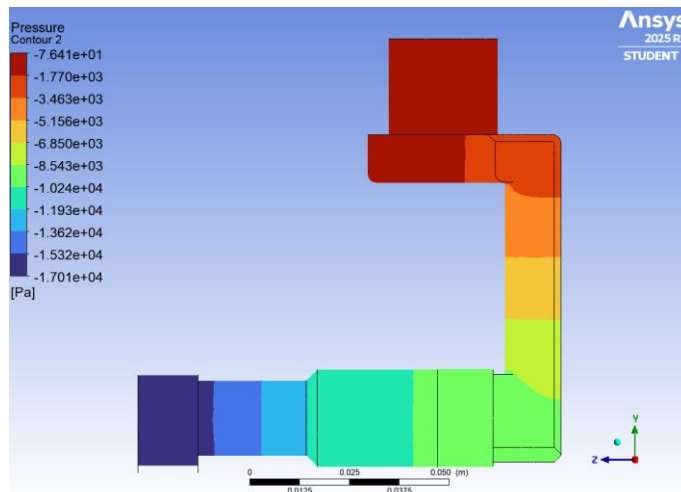


Figura B.2. Grafica presión diseño tipo Bellmouth.

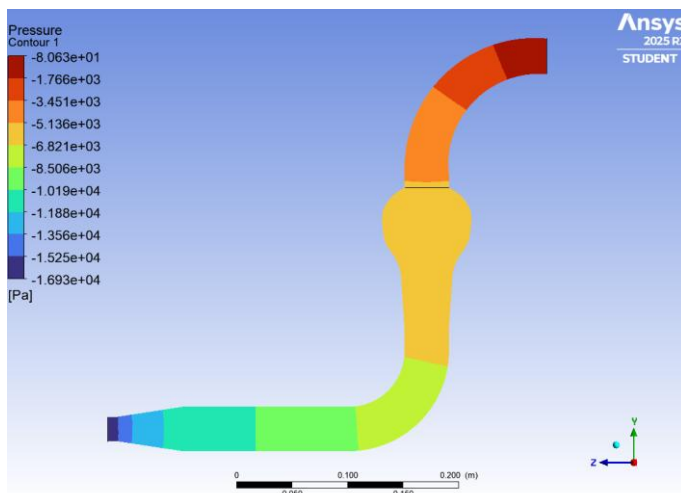
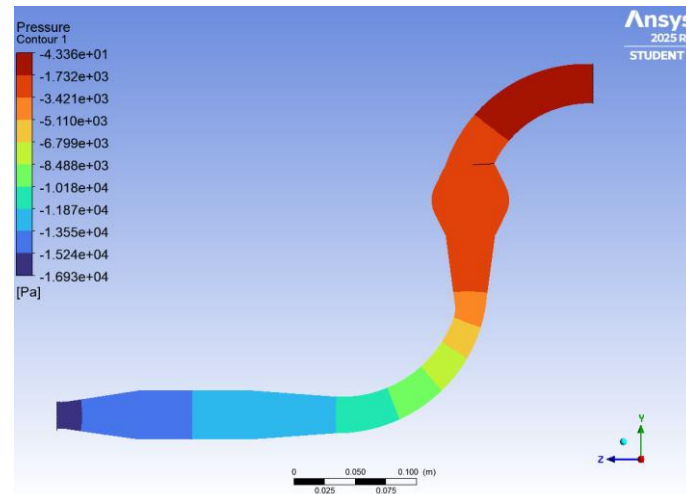


Figura B.3. Grafica presión diseño tipo Venturi.



Referencias

1. White, C.M., Steeper, R.R., Lutz, A.E.: The hydrogen-fueled internal combustion engine: a technical review. *Int. J. Hydrogen Energy*. 31, 1292–1305 (2006). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2005.12.001>
2. Verhelst, S., Wallner, T.: Hydrogen-fueled internal combustion engines. *Prog. Energy Combust. Sci.* 35, 490–527 (2009). <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2009.08.001>
3. Shadidi, B., Najafi, G., Yusaf, T.: A Review of Hydrogen as a Fuel in Internal Combustion Engines. *Energies* 2021, Vol. 14, Page 6209. 14, 6209 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14196209>
4. Tarbajovský, P., Fil'o, M.: Hydrogen Direct Injection and Intake Characteristics of an Internal Combustion Engine. *Applied Sciences* 2025, Vol. 15, Page 13230. 15, 13230 (2025). <https://doi.org/10.3390/app152413230>
5. Abubakar, S., Said, M.F.M., Abas, M., Khalid, A., Roslan, M.F., Ismail, N., Umaru, S., Narayan, S., Kaisan, M.: Recent progress on hydrogen-fueled port fuel injection spark ignition engine: A systematic review. *Thermal Science*. 29, 3509–3528 (2025). <https://doi.org/10.2298/TSCI240930081A>
6. Misul, D.A., Baratta, M., Kheshtinejad, H.: Fluid-Dynamic Modeling and Advanced Control Strategies for a Gaseous-Fuel Injection System. Presented at the April 1 (2014)
7. Anaclerio, F., Viggiano, A., Fornarelli, F., Caso, P., Sparaco, D., Magi, V.: The Influence of the Intake Geometry on the Performance of a Four-Stroke SI Engine for Aeronautical Applications. *Energies* 2024, Vol. 17, Page 5309. 17, 5309 (2024). <https://doi.org/10.3390/EN17215309>

8. Shin, J., Kim, D., Son, Y., Park, S.: Effect of intake manifold geometry on cylinder-to-cylinder variation and tumble enhancement in gasoline direct injection engine. *Scientific Reports* 2022 12:1. 12, 19862- (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24079-8>
9. Begum, M.R., Samin, S.A.N., Rizon, S.I., Chowdhury, M.S.H., Haque, M.R., Kharshiduzzaman, Md., Bhuiyan, Md.S., Hamja, A.: Numerical analysis and performance comparison of a single-cylinder engine intake system with an airflow restrictor. *Discover Vehicles* 2026 2:1. 2, 6- (2026). <https://doi.org/10.1007/s44465-026-00006-3>
10. Wojs, M.K., Laskowski, P.P., Zimakowska-Laskowska, M.: Numerical investigation of intake flow dynamics in hydrogen-fueled engines. *Combustion Engines*. (2025). <https://doi.org/10.19206/CE-208775>
11. Universidad Politécnica Salesiana: Implementación de Nuevas Tecnologías para la Eficiencia Energética y la Movilidad Sostenible para Optimizar el Consumo de Recursos y Promover Soluciones Ecoeficientes en Entornos Urbanos e Industriales, <https://pure.ups.edu.ec/es/projects/implementation-of-new-technologies-for-energy-efficiency-and-sust/>
12. ISO: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. (2023)
13. Montgomery, D.C.: *Design and Analysis of Experiments*, EMEA Edition. Wiley (2020)
14. Milliken, G.A., Johnson, D.E.: *Analysis of messy data. Volume 1, Designed experiments*. CRC Press, Boca Raton, FL (2009)
15. Box, G.E.P., Hunter, J.Stuart., Hunter, W.Gordon.: *Statistics for experimenters : design, innovation, and discovery*. Wiley-Interscience (2005)
16. Davison, A.C.: *Statistical models*. Cambridge University Press (2009)
17. Carbajosa, F.C.: Estudio computacional de control de flujo mediante soplado cíclico en borde de salida. (2022)
18. Naderi, V., Farsadizadeh, D., Hosseinzadeh, A., Arvanaghi, H.: Experimental Study of Bell-Mouth Intakes on Discharge Coefficient. *Journal of Civil Engineering and Urbanism*. 3, 368–371 (2013)
19. Zotti, A., Paduano, T., Napolitano, F., Zuppolini, S., Zarrelli, M., Borriello, A.: Fused Deposition Modeling of Polymer Composites: Development, Properties and Applications. *Polymers (Basel)*. 17, 1054 (2025). <https://doi.org/10.3390/polym17081054>
20. Launder, B.E., Spalding, D.B.: The numerical computation of turbulent flows. *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 3, 269–289 (1974). [https://doi.org/10.1016/0045-7825\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7825(74)90029-2)
21. Dizon, J.R.C., Gache, C.C.L., Cascolan, H.M.S., Cancino, L.T., Advincula, R.C.: Post-Processing of 3D-Printed Polymers. *Technologies (Basel)*. 9, 61 (2021). <https://doi.org/10.3390/technologies9030061>

22. Schlichting, H., Gersten, K.: *Boundary-Layer Theory*. Springer Berlin Heidelberg, Cham, Switzerland (2016)
23. Žigon, J., Kariž, M., Pavlič, M.: Surface Finishing of 3D-Printed Polymers with Selected Coatings. *Polymers (Basel)*. 12, 2797 (2020). <https://doi.org/10.3390/polym12122797>
24. Park, J., Yeom, J., Baeck, S., Lee, S., Park, J.Y.: A Numerical Analysis of Flow Dynamics Improvement in a Blower via Simple Integration of Bell Mouth and Nose Cone Structures. *Energies (Basel)*. 18, 1830 (2025). <https://doi.org/10.3390/en18071830>
25. Han, M.H., Park, J.H., Yang, J.S., Yoon, S.Y., Min, J.K.: Shape optimization of bellmouth to improve flow uniformity under non-aligned inflow condition in gas turbine casing. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*. 18, 2400533 (2024). <https://doi.org/10.1080/19942060.2024.2400533>