



ING. AUTOMOTRIZ

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

AUTORES:

David Patricio Naranjo Medina
Denny Shair Loor Carmilema

TUTOR:

Ing. Pablo Fernando Ante Sánchez

Representación práctica de flujo de masa de aire
y temperatura en escenarios determinados

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **DAVID PATRICIO NARANJO MEDINA** y **DENNY SHAIR LOOR CARMILEMA**, 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.

Handwritten signature of David Patricio Naranjo Medina in black ink.

DAVID PATRICIO NARANJO MEDINA

Handwritten signature of Denny Shair Loor Carmilema in black ink.

DENNY SHAIR LOOR CARMILEMA

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **PABLO FERNANDO ANTE SÁNCHEZ**, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Firma profesor

DEDICATORIAS

Dedico este proyecto, que marca la culminación de una etapa fundamental en mi vida, a toda mi familia. Ustedes han sido el pilar inquebrantable y mi mayor soporte durante los desafíos y triunfos de toda mi carrera universitaria. A mis padres y a mi hermana, por estar incondicionalmente a mi lado en cada paso, brindándome la fuerza necesaria para no rendirme. Un agradecimiento especial y muy profundo a mi padre, cuya guía práctica y vasta experiencia fueron la chispa que encendió mi vocación y la clave para que comprendiera a fondo el verdadero mundo de la mecánica automotriz. A mi madre y a mi hermana, gracias por su aliento constante, su paciencia en las largas jornadas y su amor infinito.

A mis amigos y compañeros de carrera, con quienes he tenido el privilegio de compartir esta increíble etapa; gracias por las amanecidas estudiando y por esas risas que fueron nuestro mejor alivio en los momentos de mayor presión académica. Ustedes hicieron que este camino valiera la pena de principio a fin y me llevo grandes colegas para el futuro. Finalmente, a mi compañero de tesis, Denny, porque gracias a tu compromiso inquebrantable, tu esfuerzo y nuestro excelente trabajo en equipo, logramos superar todos los retos y sacar este proyecto adelante.

— **David Naranjo**

A mis padres, quienes han sido mi mayor inspiración y apoyo incondicional. A mi padre, por enseñarme con su ejemplo que la perseverancia y el esfuerzo diario son la clave para alcanzar cualquier meta, superando siempre toda adversidad. Y a mi madre, por su amor paciente, por ser mi confidente en los momentos difíciles y por impulsarme a explorar mis pasiones más allá de lo académico. Gracias por darme las alas para volar.

Asimismo, a mis abuelitos, quienes han sido pilares fundamentales en mi vida. A mi abuelito, por enseñarme con el ejemplo el valor del trabajo duro, la importancia de aprovechar cada momento y que el afecto se demuestra con hechos y dedicación. Y a mi abuelita, por su calidez y ternura, pero también por su firmeza y guía que me han enseñado a mantener siempre los pies en la tierra.

Quiero reconocer a mis tíos, Franklin, Gladys y Mireya, quienes han sido un ejemplo de perseverancia y bondad. A mi tío Franklin, por su pasión y por demostrarme con el esfuerzo y dedicación que se pueden superar los desafíos. A mi tía Gladys, por su calidez, alegría y por hacerme sentir siempre parte de su hogar. Y a mi tía Mireya, quien es como otra madre para mí, quien ha dado mucho de su vida y cuyo cariño es invaluable.

Y, por supuesto, a Edgar Gurumendi, quien ha sido un verdadero pilar en mi vida, convirtiéndose en un segundo padre y guiándome con su sabiduría siempre. Y por último a mi compañero de tesis, David Naranjo, con quien compartí este largo camino. A través de los contratiempos y las dudas, has sido una persona muy valiosa y amigable, siempre pensando en el bienestar de los demás. Te recomiendo confiar más en tus capacidades y en el poder del trabajo conjunto, sin plegarte ante la presión ajena. Es importante reconocer que este logro es tuyo, que compites contra ti mismo y que nadie puede quitarte el mérito por el esfuerzo que has invertido.

— **Denny Loor**

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi director de artículo de titulación, el Ing. Pablo Ante, por su invaluable guía, su apoyo en la definición del tema y su constante orientación metodológica, los cuales fueron fundamentales para materializar y cumplir con los objetivos de este proyecto. Asimismo, extendiendo mi profunda gratitud a la Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) y a todos los docentes que me acompañaron a lo largo de la carrera. De cada uno de ellos adquirí conocimientos valiosos y perspectivas diferentes que, en conjunto, me brindaron las herramientas técnicas necesarias para culminar con éxito esta investigación.

— **David Naranjo**

Este proyecto es el resultado del invaluable respaldo de diversas personas e instituciones. Por ello, extendiendo mi mayor reconocimiento a la Universidad Internacional del Ecuador por ser el pilar de mi formación profesional. Igualmente, agradezco profundamente a nuestro tutor por su dedicación, paciencia y oportuna dirección técnica, elementos clave para culminar esta investigación con éxito. Para finalizar, mi gratitud eterna a mi familia, cuyo apoyo moral y comprensión constante me impulsaron a lograr este importante paso en mi carrera.

— **Denny Loor**

INDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA	III
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	IV
DEDICATORIAS	V
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN.....	10
ABSTRACT	10
1. INTRODUCCIÓN	11
2. MARCO TEÓRICO	12
2.1. DINÁMICA TÉRMICA, ALTITUD Y EFICIENCIA VOLUMÉTRICA.....	12
2.2. SIMULACIÓN AERODINÁMICA EN DINAMÓMETROS.	13
2.2.1. Enderezadores de flujo (Honeycombs o panel de abejas)	14
2.3. MECÁNICA DE FLUIDOS E INSTRUMENTACIÓN CON TUBO PITOT	15
2.4. TELEMETRÍA AUTOMOTRIZ, ADQUISICIÓN OBD-II Y ARQUITECTURA DE CONTROL.....	17
2.5. CONTROL PID, IOT E INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI).....	18
3. MATERIALES Y MÉTODOS	19
3.1. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION	19
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO	19
3.2.1 Vehículo de prueba y sistema de ventilación.....	19
3.2.2 Infraestructura de ensayo	20
3.3 DISEÑO COMPUTACIONAL Y MANUFACTURA ADITIVA	20
3.3. DESARROLLO TECNICO Y ELECTRONICO	23
3.3.1. Instrumentación sensorial aerodinámica	23
3.3.2. Arquitectura electrónica	23
3.3.3. Lógica de control PID y telemetría.....	23
3.4. PROTOCOLO DE VALIDACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS	23

4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	26
4.1.	Análisis Comparativo entre Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Validación Empírica	26
4.2.	Evaluación Experimental del Comportamiento Termodinámico y Mecánico del Motor	26
5.	CONCLUSIONES	30
6.	REFERENCIAS	31
7.	ANEXOS.....	34

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Tipos de honeycomb</i>	144
Figura 2	<i>Tubo de Pitot, realizado en Autodesk Inventor.</i>	155
Figura 3	<i>Especificaciones Dinamómetro</i>	220
Figura 4	<i>Tobera convergente, realizado en Autodesk Inventor.</i>	211
Figura 5	<i>Sección cuadra posterior de la tobera, realizado en Autodesk Inventor.</i>	211
Figura 6	<i>Panel de Abejas, encargada de redireccionar el flujo turbulento, realizado en Autodesk Inventor.</i>	211
Figura 7	<i>Secciones circulares que proporcionan el efecto, realizado en Autodesk Inventor.</i>	221
Figura 8	<i>Función de Transferencia de Flujo de aire masico.....</i>	28
Figura 9	<i>Comparativa de datos de Entrada Vs Obtenidos</i>	29

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Parámetros de Prueba I – UIDE a UDLA Park.</i>	24
Tabla 2	<i>Parámetros de Prueba II – UDLA Park a UIDE.</i>	24
Tabla 3	<i>Parámetros de Prueba I sin flujo inducido.</i>	25
Tabla 4	<i>Parámetros de Prueba II con flujo inducido por tobera.</i>	25
Tabla 5	<i>Resultados comparativos de flujo de aire másico y temperatura de admisión en diferentes entornos de prueba.....</i>	27
Tabla 6	<i>Datos del Fabricante Nissan.....</i>	28
Tabla 7	<i>Datos Obtenidos en Dinamómetro</i>	29

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1	<i>Sensor de Presión Diferencial MPX5010DP</i>	34
Anexo 2	<i>Tubo de Pitot</i>	34
Anexo 3	<i>Sensor de temperatura.....</i>	34

Anexo 4 <i>Placa PCB</i>	34
Anexo 5 <i>Microprocesador ESP32</i>	34
Anexo 6 <i>Regulador de voltaje XL4015</i>	34
Anexo 7 <i>Puente H - BTS7960</i>	35
Anexo 8 <i>Rele de estado sólido - SSR 40</i>	35
Anexo 9 <i>Escáner OBD II - ELM327</i>	35
Anexo 10 <i>Pantalla HMI – Nextion</i>	35
Anexo 11 <i>Prueba en dinamómetro sin Tobera</i>	35
Anexo 12 <i>Prueba en dinamómetro con Tobera</i>	36

REPRESENTACIÓN PRÁCTICA DE FLUJO DE MASA DE AIRE Y TEMPERATURA EN ESCENARIOS DETERMINADOS

Ing. Pablo Ante S. MSc¹, David Naranjo M.², Denny Loor C.³

¹ Maestría en Gestión de Riesgos, Project Management – Universidad Internacional del Ecuador, Ing. Automotriz
Obtenido, paantesa@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

² Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, danaranjome@uide.edu.ec, Quito - Ecuador

³ Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador, deloorca@uide.edu.ec, Quito – Ecuador

RESUMEN

Introducción: Evaluar motores en dinamómetros a gran altitud genera saturación térmica (*heat soak*) por falta de flujo aerodinámico, reduciendo la eficiencia volumétrica. Este proyecto desarrolla un sistema mecatrónico automatizado para emular estas corrientes y mitigar este sesgo.

Metodología: Se construyó una tobera aerodinámica impresa en 3D (PLA/PETG), equipada con tubo de Pitot, enderezador de flujo y control PID mediante un microcontrolador ESP32. Se validó contrastando la telemetría OBD-II de una Nissan Frontier 2023 en pruebas dinámicas de ruta frente a ensayos estáticos. **Resultados:** En ruta se registraron flujos máximos de 68.69 g/s. En el dinamómetro sin asistencia, la admisión alcanzó 45 °C, limitando el flujo a 80.89 g/s. Al activar la tobera, la temperatura bajó a 35 °C y el flujo subió a 85.5 g/s, mejorando la aspiración en 5.7 % y elevando la potencia de 123.8 CV a 125.1 CV. **Conclusión:** El sistema optimiza la termodinámica al emular el flujo real, reduciendo el estrés térmico y mejorando la eficiencia volumétrica para obtener datos mecánicos precisos. A futuro, se proyecta integrar acopladores ajustables para minimizar la dispersión del aire en diversas arquitecturas vehiculares.

Palabras clave: Eficiencia volumétrica, Dinamómetro, Heat soak, Control PID, Telemetría OBD-II.

ABSTRACT

Introduction: Evaluating engines on dynamometers at high altitudes generates thermal saturation (*heat soak*) due to a lack of aerodynamic flow, reducing volumetric efficiency. This project develops an automated mechatronic system to emulate these airflows and mitigate this bias.

Methodology: A 3D-printed aerodynamic nozzle (PLA/PETG) was built, equipped with a Pitot tube, a flow straightener, and PID control using an ESP32 microcontroller. It was validated by contrasting the OBD-II telemetry of a 2023 Nissan Frontier during dynamic road tests against static tests. **Results:** Under road conditions, maximum flows of 68.69 g/s were recorded. On the dynamometer without assistance, the intake reached 45 °C, limiting flow to 80.89 g/s. Upon activating the nozzle, the temperature dropped to 35 °C and the flow rose to 85.5 g/s, improving aspiration by 5.7% and raising power from 123.8 hp to 125.1 hp. **Conclusion:** The system optimizes thermodynamics by emulating real airflow, reducing thermal stress, and improving volumetric efficiency to obtain accurate mechanical data. In the future, the integration of adjustable couplers is planned to minimize air dispersion across diverse vehicle architectures.

Keywords: Volumetric efficiency, Dynamometer, Heat soak, PID control, OBD-II telemetry.

1. INTRODUCCIÓN

En la formación de ingeniería automotriz, los laboratorios son fundamentales; sin embargo, el dinamómetro actual de la UIDE presenta una limitación crítica: opera estáticamente sin control de temperatura ni de flujo de aire frontal. En el entorno de Quito (2800 msnm), la baja densidad atmosférica agrava esta deficiencia, generando una saturación térmica por la falta de flujo dinámico (ram air). Esto altera artificialmente las curvas de rendimiento del motor, ya que el aire sobrecalentado obliga a la ECU a enriquecer la mezcla y retrasar el avance del encendido. Por ello, esta investigación se justifica en la necesidad de repotenciar el equipo con un sistema de emulación aerotérmica, acercando la práctica académica a la realidad del sector.

Para mitigar este sesgo, es indispensable emular artificialmente dichas corrientes de aire. Tradicionalmente se han empleado sensores de hilo caliente, pero presentan fragilidad y susceptibilidad a turbulencias severas (Sánchez Fortuny, 2022). Como alternativa de alta fidelidad, la mecánica de fluidos clásica mediante geometrías convergentes, como el tubo de Venturi, permite establecer una relación predecible entre presión y velocidad (Torres Jarrín, 2011). Al integrar estas geometrías con un tubo de Pitot, es posible aislar la presión estática de la total y determinar el caudal dinámico de forma robusta.

La automatización de estas variables en una tobera exige un control en lazo cerrado riguroso. Los algoritmos Proporcional-Integral-Derivativo (PID) resultan óptimos para la estabilización térmica en sistemas de baja inercia, especialmente mediante el codiseño de hardware y software abiertos (Santa Ospina y Tirado Arrubla, 2017; Poma y da Rocha, 2025). Para coordinar esta regulación en tiempo real junto con sensores de presión diferencial, el microcontrolador ESP32 destaca por su arquitectura de doble núcleo, convertidores ADC y conectividad nativa, superando los desafíos de la instrumentación moderna (Rahman et al., 2026).

Sin embargo, para validar este sistema es necesario comparar los datos de laboratorio con la respuesta adaptativa del vehículo. El procesamiento de la dinámica del vehículo bajo aceleración y demanda de carga requiere la recuperación de los datos proporcionados desde la red a bordo del vehículo (Moriano Sánchez, 2013). Usar OBD-II para leer las RPM del motor y la temperatura del refrigerante da la retroalimentación necesaria para relacionar la salida de la demanda en un dinamómetro con el esfuerzo real del tren motriz.

En respuesta a esta problemática, el objetivo principal de este trabajo es desarrollar un sistema mecatrónico automatizado capaz de emular condiciones dinámicas para mitigar la deficiencia volumétrica en dinamómetros. Para lograrlo, se diseñó y construyó una tobera mediante manufactura aditiva (PLA/PETG) equipada con tubo de Pitot y enderezador honeycomb. Su operación se reguló mediante una arquitectura electrónica basada en un ESP32 con control PID e interfaz HMI. Finalmente, el sistema se validó contrastando la telemetría OBD-II de una Nissan Frontier 2023 obtenida en pruebas dinámicas de ruta frente a ensayos estáticos de laboratorio. En este contexto, el escenario determinado de evaluación simuló el comportamiento a plena carga en carretera: el electroventilador operó a máximas revoluciones para inducir el mayor caudal posible, mientras que la resistencia calefactora permaneció apagada, replicando fielmente la entrada natural de aire frío exterior.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. DINÁMICA TÉRMICA, ALTITUD Y EFICIENCIA VOLUMÉTRICA

La termodinámica de los motores de combustión interna y de los sistemas controlados electrónicamente establece que la eficiencia volumétrica depende directamente de la densidad del aire de admisión (Bosch, s. f.). La Ecuación de Estado de los Gases Ideales rige esta propiedad física, modelando la densidad (ρ) como una función de las variables termodinámicas ejercidas por las condiciones del entorno:

$$\rho = \frac{P_{atm}}{R \times T}$$

Ec. [1.1]

Donde:

- ρ es la densidad del aire (kg/m^3)
- P_{atm} es la presión atmosférica local (Pa)
- R es la constante específica del aire seco ($287,05 \text{ J} / (\text{kg} \times \text{K})$).
- T es la temperatura absoluta del fluido expresada en Kelvin (K).

La masa de oxígeno disponible por ciclo es menor debido a la disminución de la presión barométrica por la altura a la que se encuentra la región andina del Ecuador y esto se traduce en pérdidas de potencia que se ha demostrado empíricamente que oscilan entre 10% por cada 1000 metros de altitud; es decir, se presenta pérdidas exageradas de cerca del 28% en ciudades como Quito con respecto al nivel del mar (Anrango Farinango & Saguay Rosales, 2025; Gallego Castillo, 2014). Para mitigar esta deficiencia, la Unidad de Control Electrónico (ECU) ajusta la relación aire–combustible enriqueciéndola, consiguiendo así un aumento del consumo específico de combustible (Behar Piquero, 2009).

Esta circunstancia geográfica se ve agravada por una limitación significativa en los laboratorios de pruebas automotrices: la falta de flujo de aire frontal (efecto de aire de ariete) ya que, en pruebas estáticas en el banco dinamométrico, no está disponible el enfriamiento convectivo y, por ello, la temperatura del aire de admisión se eleva rápidamente (heat soak), junto con el intercooler que se combina con una menor densidad del gas aspirado. A pesar de que las regulaciones estandarizadas reducen los hallazgos al aplicar factores de corrección matemáticos, debe instalarse un sistema de ventilación forzada. Esta reconfiguración térmica estabiliza la admisión, simula eventos de conducción en carretera real y proporciona una verificación física de las respuestas del motor a diferentes altitudes (Miralles et al., 2015)

2.2. SIMULACIÓN AERODINÁMICA EN DINAMÓMETROS.

Los sistemas de ventilación que superan la capacidad de los extractores axiales convencionales deben diseñarse para replicar estados dinámicos en un banco de pruebas estático. Puede demostrarse mediante la ecuación de continuidad y el principio de Bernoulli de la mecánica de fluidos, que, si se obliga a un caudal a pasar a través de un conducto convergente, su presión estática disminuirá para convertirse en energía cinética (Torres Jarrín, 2011).

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

Ec. [1.2]

Donde:

- P_1 y P_2 representan las presiones estáticas registradas en dos secciones transversales del conducto

- v_1 y v_2 constituyen las velocidades del fluido en dichas secciones.

- ρ es la densidad calculada del aire en movimiento

Este incremento de velocidad condicionado por la restricción espacial se complementa algebraicamente con la Ecuación de Continuidad, la cual postula la conservación de la masa en un conducto cerrado:

$$A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$$

Ec. [1.3]

Donde A_1 y A_2 son las áreas de las secciones transversales. Esta configuración geométrica permite que el aire sea acelerado significativamente; las investigaciones de dimensionamiento aerodinámico demuestran que una relación de áreas óptima puede amplificar la velocidad del viento hasta 1.8 veces en la boca de salida (De La Cruz Zuñiga, 2018).

El diseño interno de la tobera debe tener en cuenta bien los fenómenos fluido-dinámicos conocidos, para lograr una aceleración eficiente y laminar del aire. Para que el aire se mueva de forma concentrada se mantienen perfiles aerodinámicos que garanticen la suavidad y, por tanto, eviten la separación de la capa límite, de modo que el chorro de aire permanezca adherido sin generar turbulencias parásitas hasta llegar el vehículo (Fernández Veiga, 2015). En la ingeniería automotriz moderna, la construcción de estos entornos de ensayo se basa en una estrategia combinada: la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para calcular y determinar condiciones de flujo óptimas mediante algoritmos, para a continuación verificarlo en el sistema físico donde se deriva la transferencia real de calor del motor (Kazemian, 2025).

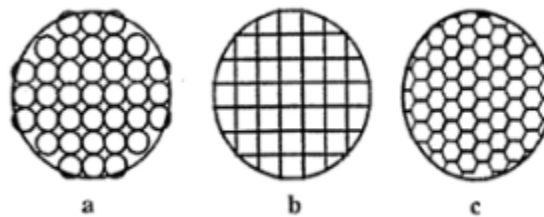
2.2.1. Enderezadores de flujo (Honeycombs o panel de abejas)

Uno de los puntos más importantes para estabilizar el fluido es suprimir las perturbaciones provenientes de la etapa de propulsión ya que las aspas del electroventilador presentan un perfil de velocidad altamente helicoidal, rotacional y turbulento, incapaz de replicar el flujo rectilíneo característico de la circulación en carretera y para eliminar esta desviación, se emplea una estructura geométrica de celdas prismáticas, llamada enderezador de flujo de panal (honeycomb flow straightener) ya que este dispositivo funciona bajo el principio de dividir la corriente principal en varios flujos más pequeños (microcanales) con un diámetro hidráulico muy bajo. Tal como establecen Morales Contreras et al. (2021), la inserción de estos dispositivos en la cámara estabilizadora es un método comprobado para reducir las variaciones fluctuantes de la velocidad transversal, mitigar intensidades de turbulencia severas y producir un perfil de velocidades uniforme previo a la reducción de área.

La malla suprime los componentes transversales de la velocidad y los vórtices rotacionales al encerrar el aire en un área de sección transversal reducida, de modo que no entra libremente, sino que se requiere que cambie a un estado de flujo laminar donde los vectores están dirigidos en una sola dirección antes de ingresar al tramo convergente del tubo de Venturi.

Para que este enderezador garantice la eficiencia aerodinámica sin asfixiar el caudal del sistema, su dimensionamiento debe regirse por parámetros geométricos estrictos. En primer lugar, la literatura indica que los paneles con celdas de geometría hexagonal superan mecánicamente a los arreglos cuadrados o circulares, ya que generan coeficientes de pérdida de presión significativamente menores (Morales Contreras et al., 2021). En segundo lugar, la capacidad correctiva del panel depende la longitud del micro conducto y su diámetro hidráulico (L_h/D_h); para un enderezamiento óptimo, esta relación debe ser de 6 –10, con una porosidad o área abierta efectiva superior al 80% ($\beta_v \geq 0.8$), parámetro de diseño derivado por Morales Contreras et al. (2021). Esto asegura que el aire ingrese al cono de Venturi completamente estabilizado y sin turbulencias parásitas.

Figura 1 Tipos de honeycomb



Fuente. V. Kulkarni, N. Sahoo, S. Chavan, 2011.

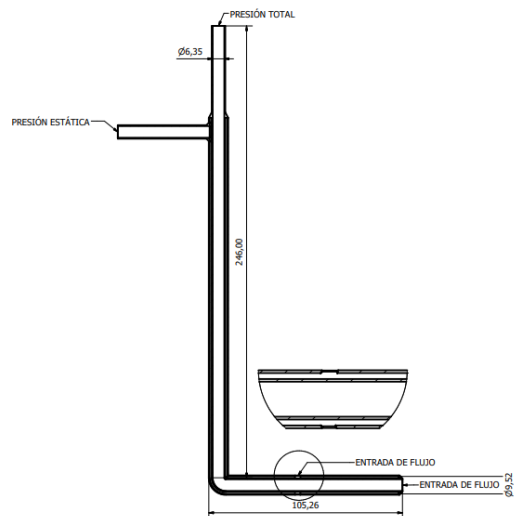
2.3. MECÁNICA DE FLUIDOS E INSTRUMENTACIÓN CON TUBO PITOT

Los principios de la mecánica de fluidos establecen que la ecuación de Bernoulli describe la energía de un fluido en movimiento como tres componentes básicos: la presión estática; la presión dinámica; y la presión hidrostática. (Çengel & Cimbala, 2018). Para aislar la componente exclusiva de la velocidad, se fundamenta científicamente un principio consiste en el uso de un tubo Pitot axial con un sensor diferencial de presión de alta sensibilidad (MPX5010DP).

Por otra parte, en términos físicos, este instrumento se basa en medir dos movimientos ortogonales (Garrido Silva, s. f.) mediante un tubo hueco con una pequeña sección transversal circular alineada en paralelo con la dirección de la velocidad del flujo y un tubo o apertura piezométrica. Esta disposición de dobles tomas neumáticas concéntricas se denomina tubo Pitot estático o tubo Pitot–Prandtl (Çengel & Cimbala, 2018; Garrido Silva, s. f.).

La configuración es una abertura frontal dispuesta en una orientación ortogonal al vector de velocidad del aire, en ese punto el fluido impacta esta nariz fija y llega al denominado punto de estancamiento con una velocidad decreciente menor que un coeficiente casi isentrópico desde su valor en la velocidad de corriente libre hasta cero (Çengel & Cimbala, 2018). Aquí se mide la presión de estancamiento (o presión total), que teóricamente representa el valor hipotético de la presión que una partícula de fluido alcanza en un punto determinado si se la llevara a reposo absoluto sin pérdida de energía (Garrido Silva s. d). Asimismo, integrada de acuerdo con lo anterior, una fila de orificios radiales al ras con la pared y orientados en paralelo a las líneas de corriente sirve como toma piezométrica; detectan únicamente la presión estática real en todo (Çengel & Cimbala 2018), sobre los efectos dinámicos debidos al impacto del flujo.

Figura 2 *Tubo de Pitot, realizado en Autodesk Inventor.*



Fuente. Autoría propia, 2026

La combinación de ambas mediciones permite cuantificar de forma directa la altura de energía cinética del flujo, magnitud que también es denominada presión dinámica (Garrido Silva, s.f.).

Al aplicar la ecuación de Bernoulli para evaluar este fenómeno, la presión de estancamiento se expresa algebraicamente como la suma exacta de la presión estática y la presión dinámica. (Çengel & Cimbala, 2018). Dado que la diferencia matemática neta entre la presión de estancamiento y la presión estática constituye esta presión dinámica (ΔP), es posible relacionar la velocidad del flujo local directamente con la diferencia de las presiones medidas en el transductor (Garrido Silva, s.f.).

Para traducir esta variable neumática en una magnitud cinemática ejecutable en tiempo real por el firmware, el microcontrolador computa la velocidad local del aire (v) empleando la ecuación fundamental derivada del balance de energía:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times \Delta P}{\rho}}$$

Ec. [1.4]

Donde ΔP es la variable de presión en pascales (Pa) y es ρ una constante de densidad del aire de referencia además es importante destacar, que, desde el punto de vista analítico, si la alineación del instrumento en el conducto es correcta, la velocidad medida corresponde exactamente, con la velocidad en el eje del tubo (es decir, en el centro) (Garrido Silva, s. f.). Como ejemplo, en el caso de un flujo completamente desarrollado, la literatura de dinámica de fluidos indica que la velocidad en el centro del eje no es igual a la velocidad media en la sección transversal, sin embargo, bajo un régimen de flujo turbulento —una situación prevalente en la inyección forzada del electroventilador en este proyecto—, ambas difieren muy poco; haciendo que la magnitud medida y el perfil de velocidad sean muy parecidas y altamente representativas para el cálculo (Garrido Silva, s. f.). Después de verificar este comportamiento y con la hipótesis de un flujo incompresible (donde la densidad es constante en toda una sección) (Çengel & Cimbala, 2018), en cada ciclo el firmware calcula el Flujo de Masa aire m que fluye a través de la zona móvil de descarga.

Este proceso está estrictamente gobernado por el principio de conservación de la masa (Çengel & Cimbala, 2018) mediante la aplicación la siguiente relación matemática:

$$m = v \times A \times \rho \times 1000$$

Ec. [1.5]

Donde (m) constituye el caudal másico real expresado en gramos por segundo (g/s). y A representa el área geométrica de la sección de descarga calculada en el modelado asistido por computadora.

2.4. TELEMETRÍA AUTOMOTRIZ, ADQUISICIÓN OBD-II Y ARQUITECTURA DE CONTROL

El control electrónico de la inyección de combustible depende en gran medida de la medición precisa del flujo de aire de admisión y esto se consigue mediante el sensor de Flujo de Aire Masivo (MAF), regido por el principio físico de la anemometría de temperatura constante (CTA) y la ecuación de King, ya que el enfriamiento convectivo de un hilo caliente produce una variación de voltaje que es proporcional al caudal (Sánchez Fortuny, 2022).

Comúnmente se integran en aplicaciones de diagnóstico automotriz, generalmente junto con un sensor de Temperatura del Aire de Admisión (IAT), que indica la temperatura mediante variaciones de resistencia de un termistor de Coeficiente de Temperatura Negativo (NTC). La combinación de estos componentes genera cambios de voltaje analógico (generalmente de 0 a 5 V) en la Unidad de Control Electrónico (ECU), ya que esta información permite el cálculo de la densidad del fluido y la compensación del ancho de pulso estequiométrico (Castellanos Martínez, s.f.).

Para la adquisición independiente de la telemetría de la tobera, la traducción de la presión neumática a una magnitud eléctrica digitalizable es ejecutada mediante la Función de Transferencia del Sensor:

$$P = \frac{V_{out} - Offset}{0,45}$$

Ec. [1.6]

Donde P es la presión diferencial resultante en kPa, representa la sensibilidad nominal del componente alimentado a V/kPa, y el término Offset constituye el voltaje de cero medido analógicamente en reposo durante la fase de auto calibración.

La extracción de telemetría no invasiva es necesaria para validar estas correcciones durante las pruebas estáticas. Al conectar ahora una interfaz ELM327 a un microcontrolador ESP32, es posible conectarse de forma remota al estándar de diagnóstico a bordo del automóvil (OBD-II) mediante una conexión Bluetooth. En esta arquitectura, el ESP32 representa un nodo de procesamiento IoT: solicita algunos Parameter-Identifies (PIDs 0x0F y 0x10), decodifica las respuestas hexadecimales de la ECU y las transforma en variables decimales en tiempo real. Con estos parámetros combinados en una interfaz HMI, se logra un modo de control autónomo y de alta fidelidad, mediante el cual el comportamiento térmico de la tobera puede controlarse de forma independiente sin ninguna interferencia en el software del dinamómetro. (Chimborazo Calvopiña & Tigse Guishcacho, 2025)

2.5. CONTROL PID, IOT E INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

La simulación aerodinámica debe proporcionar una alta estabilidad térmica, evitando las oscilaciones clásicas de los termostatos convencionales de ON/OFF (Santa Ospina & Tirado Arrubla, 2017), para que las pruebas en un dinamómetro sean fiables. Incorpora un algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID). En esta arquitectura de lazo cerrado, se obtiene el error entre la temperatura objetivo y la lectura real a la entrada; las ganancias se estiman teniendo en cuenta la inercia térmica, de modo que el error en estado estacionario se elimina (Callisaya & Rocha 2024).

Para su procesamiento digital repetitivo en intervalos de tiempo estrictos, la dosificación de potencia se rige por la Forma Discreta del Algoritmo PID:

$$u(k) = K_p \times e(k) + K_i \times \Delta t \times \Sigma e(k) + K_d \times \frac{e(k) - e(k - 1)}{\Delta t}$$

Ec. [1.7]

Donde:

$u(k)$ determina la señal de salida digital traducida a ciclos de trabajo PWM para el control del paso de corriente.

$e(k)$ representa el error actual calculado como la diferencia entre el valor de consigna o Set Point y la temperatura real del termopar.

$(k - 1)$ es el error registrado en el ciclo inmediatamente anterior.

K_p K_i K_d constituyen las ganancias sintonizadas para regular la velocidad de respuesta, amortiguar las oscilaciones y estabilizar el sistema.

Con base en la respuesta de este algoritmo, un Relé de Estado Sólido (SSR) controla mediante Modulación por Ancho de Pulso (PWM), con precisión milimétrica, la dosificación de la potencia de calor radiado.

La arquitectura se basa en el paradigma de IoT para la interacción y visualización de estos parámetros en condiciones de tiempo real. El nodo de procesamiento del microcontrolador ESP32 es capaz de adquirir magnitudes físicas complejas y transmitirlos en sistemas de transmisión energéticamente eficientes y de bajo costo a interfaces visuales (Torres Quijije et al., s. f.). Una pantalla táctil (HMI) combinada con la comunicación serial aislada permite al usuario configurar las variables térmicas y monitorear el comportamiento dinámico del flujo sin interferir en el software del banco de pruebas, lo que en conjunto permite asegurar un entorno de laboratorio automatizado y de alta precisión.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. METODOLOGIA DE LA INVESTIGACION

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque metodológico cuantitativo, ya que se fundamenta en la recolección, medición empírica y análisis numérico de variables termodinámicas y mecánicas, tales como la temperatura del aire de admisión ($^{\circ}\text{C}$), el flujo másico de aire (g/s) y la potencia del motor (CV).

Por su alcance y propósito, el estudio es de tipo aplicado, debido a que los conocimientos teóricos de la mecánica de fluidos y el control electrónico se dirigen a solucionar un problema técnico específico dentro de la infraestructura de evaluación automotriz: la saturación térmica (heat soak) y la alteración de la eficiencia volumétrica durante los ensayos estáticos a gran altitud.

Finalmente, la investigación emplea un diseño experimental. Esto se debe a que se manipulan de forma deliberada y controlada las variables independientes (la velocidad y estabilización térmica del flujo de aire inducido mediante la tobera mecatrónica) con el objetivo de observar, aislar y cuantificar su efecto directo sobre las variables dependientes (el comportamiento del tren motriz) a través de un protocolo comparativo estructurado en dos entornos de evaluación (ruta dinámica frente a banco dinamométrico).

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS DE ENSAYO

Para la ejecución del diseño experimental, se seleccionaron componentes específicos que permiten tanto la adquisición fiable de datos como la correcta simulación de las variables aerodinámicas.

3.2.1 Vehículo de prueba y sistema de ventilación

Para las pruebas dinámicas y estáticas se seleccionó como unidad de ensayo una camioneta pickup Nissan Frontier 2023, equipada con un motor a gasolina QR25DE de 2.5 litros. La elección de este vehículo se justifica metodológicamente debido a que su considerable cilindrada genera una alta demanda de flujo másico de aire a plena carga, lo que permite evidenciar y cuantificar con mayor claridad el fenómeno de saturación térmica (heat soak) y la respectiva caída de eficiencia volumétrica en altura.

Para emular el flujo de aire dinámico sobre este vehículo en el entorno controlado, se implementó un electroventilador automotriz (número de parte 1308100A-K00), componente original del sistema de refrigeración de un vehículo Haval H2. La selección de este actuador se fundamenta en su considerable diámetro de barrido de 39.5 cm y en su diseño axial orientado a aplicaciones de alta exigencia térmica. Al ser un componente proyectado para la extracción en radiadores, tiene la capacidad de desplazar los volúmenes de aire requeridos para igualar la presión dinámica del viento frontal en carretera.

Sin embargo, dado que el perfil de velocidad entregado por sus aspas es rotacional y turbulento, su uso justificó la necesidad ineludible de acoplarlo a una malla enderezadora de flujo (honeycomb) para estabilizar la corriente y garantizar un flujo laminar hacia el motor.

3.2.2 Infraestructura de ensayo

Las pruebas en condición estática se llevaron a cabo utilizando el dinamómetro de chasis del laboratorio de la Facultad de Ingeniería Automotriz de la UIDE. A pesar de ser un instrumento altamente preciso para cuantificar la potencia de frenado y el par del motor, su naturaleza de banco estático implica que opera sin control de temperatura ni asistencia de flujo de aire frontal. Esta limitación infraestructural sirvió como el entorno ideal para probar la eficacia de la tobera. Las especificaciones técnicas y los límites operativos de este equipo se detallan a continuación en la Figura 3.

Figura 3 Especificaciones Dinamómetro

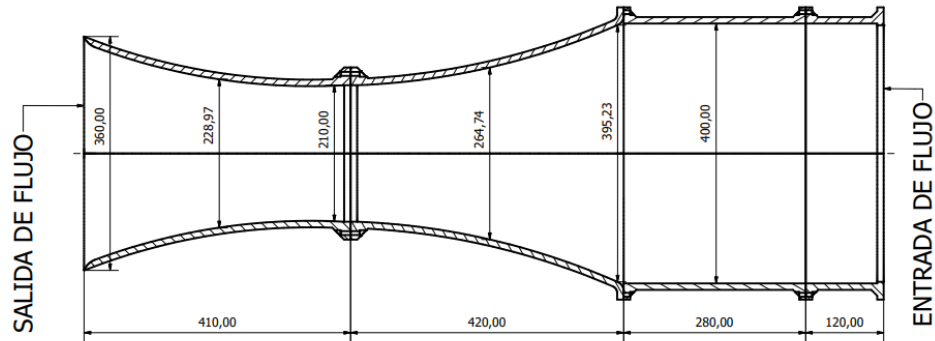
Max Eje Peso:	6500 libras
Max Potencia:	800 HP
Velocidad máxima:	155 + mph
Vehículo Track Rango:	16 " (mínimo dentro) - 86 " (máximo)
Distancia entre ejes máxima:	86 pulgadas
Max Estado Torque:	1.800 pies libras por retardador
Max Dinámica de par:	5.000 pies libras por eje
Requisitos eléctricos:	220/240 VAC @ 25AMPs

Fuente. Herrera Black, C. F. (2016).

3.3 DISEÑO COMPUTACIONAL Y MANUFACTURA ADITIVA

El modelado de la geometría de la tobera de simulación aerodinámica se realizó completamente utilizando el software Autodesk Inventor. Para materializar este diseño, se empleó la manufactura aditiva por modelado por deposición fundida (FDM), un proceso que permite fabricar elementos poliméricos con propiedades específicas que se adaptan a las exigentes necesidades mecánicas y térmicas de las geometrías aerodinámicas de manera físicamente viable (Menargues et al., 2025).

Figura 1 Tobera convergente, realizado en Autodesk Inventor.

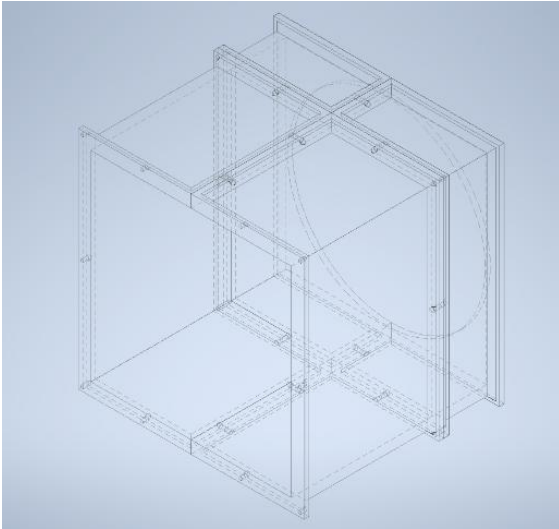


Fuente. Autoría propia, 2026.

Para garantizar la integridad estructural y térmica del conjunto, la manufactura se dividió utilizando dos termoplásticos distintos, seleccionados estratégicamente según su exposición al calor y al esfuerzo mecánico.

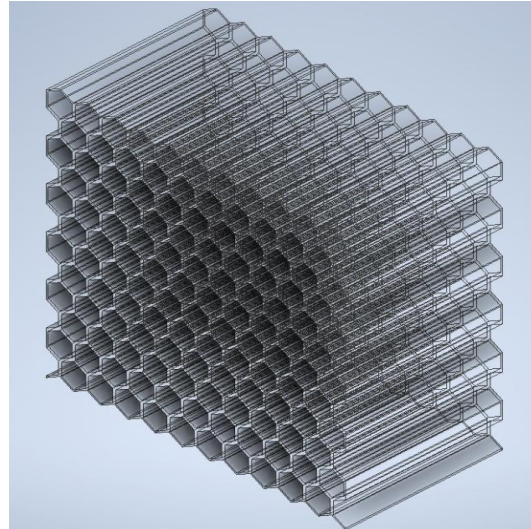
Las secciones cuadradas posteriores (**Figura 5**) —que alojan el electroventilador, la malla enderezadora de flujo tipo panal de abeja (**Figura 6**) y el bloque de resistencias calefactoras— fueron impresas en Tereftalato de Polietileno Glicol (PETG). Esta carcasa trasera requiere de las propiedades del PETG para soportar el anclaje térmico y las vibraciones constantes del ventilador. Su T_g cercana a los 80 °C evita que el material se deforme bajo la exposición al calor (Mendenhall & Eslami, 2023), y su mayor resistencia a la rotura (Hsueh et al., 2021) le permite distribuir adecuadamente las cargas cíclicas del sistema sin generar grietas, asegurando así una superior estabilidad dimensional (Menargues et al., 2025).

Figura 2 Sección cuadra posterior de la tobera, realizado en Autodesk Inventor.



Fuente. Autoría propia, 2026.

Figura 3 Panel de Abejas, encargada de redireccionar el flujo turbulento, realizado en Autodesk Inventor.

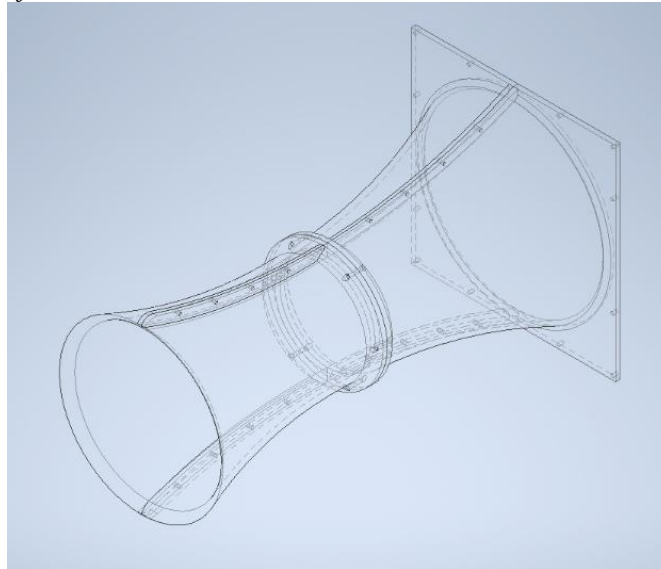


Fuente Autoría propia, 2026.

Por otro lado, los módulos circulares frontales que conforman el cuerpo convergente de la tobera —encargados de generar el efecto Venturi— fueron impresos en Ácido Poliláctico (PLA) (**Figura 7**). El PLA es una opción óptima para estas secciones debido a que posee una resistencia a la tracción superior a los 50 MPa bajo parámetros optimizados (Hsueh et al., 2021). Esta característica proporciona la rigidez estructural suficiente para conservar las tolerancias geométricas, optimizar el acabado superficial y evitar el desprendimiento de la capa límite, manteniendo el flujo adherido a las paredes. Sin embargo, su temperatura de transición vítrea (T_g) de aproximadamente 60 °C limita su aplicabilidad exclusivamente a estas zonas frías (Mendenhall & Eslami, 2023).

En la configuración de la impresión se omitieron los volúmenes 100% sólidos con el fin de prevenir la contracción térmica (deformación) de las piezas y optimizar su rendimiento. En su lugar, se implementó un relleno tipo celosía con una densidad del 20% al 30%, el cual funciona como un exoesqueleto ligero que mejora significativamente la relación resistencia-peso y favorece la amortiguación de las vibraciones en toda la estructura de la tobera.

Figura 4 Secciones circulares que proporcionan el efecto, realizado en Autodesk Inventor.



Fuente. Autoría propia, 2026.

3.3.DESARROLLO TECNICO Y ELECTRONICO

Todos los sensores que se redactan en este apartado se pueden visualizar en la sección de anexos.

3.3.1. Instrumentación sensorial aerodinámica

Los caudalímetros automotrices estándar se descartaron para el cálculo flujo volumétrico y másico inyectado, en consecuencia, se fabricó un tubo Pitot a medida con tubos de cobre de 3/8" y 1/4" que se pueden apreciar en la **Figura 3** para la medición de la presión de estancamiento del fluido y de la presión estática, respectivamente. Las líneas de cobre se conectan mediante mangueras a un sensor de presión diferencial, el MPX5010DP. También se fijó al tubo Pitot una termocupla tipo K controlada por un módulo MAX6675, con el fin de medir la temperatura real del flujo de aire liberado. (**Anexos 1,2,3**)

3.3.2. Arquitectura electrónica

El control de todo el sistema se unificó en una PCB, donde se soldaron todos los módulos electrónicos mientras que el microcontrolador ESP32 es el “cerebro” de la arquitectura. Hay 2 componentes principales en la etapa de alimentación y regulación: un regulador XL4015 para fijar el voltaje del sistema en 5V, que se envía al microcontrolador y luego está un puente H que acciona la velocidad del electroventilador modulándola con señales PWM. El sensor MPX5010DP tiene un voltaje de salida máximo cercano a 4,7V; por lo tanto, la señal analógica se atenuó con un divisor resistivo de voltaje implementado directamente en la PCB, con el fin de proteger al ESP32 de su convertidor ADC de 3,3V. La calefacción se controló mediante un relé de estado sólido del tipo SSR-40 DA. (**Anexos 4,5,6,7,8**)

3.3.3. Lógica de control PID y telemetría

La dosificación térmica fue administrada por un algoritmo de control Proporcional-Integral-Derivativo (PID) programado en C++. Paralelamente, el ESP32 actuó como un gateway IoT, comunicándose vía Wi-Fi con un escáner ELM327 conectado al puerto de diagnóstico del vehículo. Mediante el envío de comandos AT en tiempo real, el sistema alternó dinámicamente entre protocolos de lectura (Nissan Consult y OBD2 Universal), extrayendo la temperatura y las RPM del motor en prueba. La interfaz hombre-máquina (HMI) se desplegó en una pantalla Nextion capacitiva, permitiendo al usuario configurar los Set Points (temperatura y viento) y observar la gráfica del comportamiento del sistema. (**Anexos 9,10**)

3.4. PROTOCOLO DE VALIDACIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Se estructuró un protocolo comparativo para validar el comportamiento térmico en dos entornos, con el fin de demostrar la magnitud de la eficacia del sistema. Para el vehículo de prueba, se eligió una camioneta pickup Nissan Frontier 2023 (motor a gasolina de 2.5 L). La validación se realizó sobre la relación entre el caudal másico de aire (MAF, en g/s) y la

temperatura del aire de admisión del motor (°C). El protocolo incluyó las siguientes sesiones experimentales:

-Escenario A (Telemetría dinámica en ruta): El vehículo se instrumentó con pruebas dinámicas durante un recorrido por la ruta desde la UIDE hasta el sector del UDLA Park. Durante esta etapa, el vehículo utilizó su flujo de aire natural proporcionado por la geografía. La curva base del caudal másico (MAF) frente a la temperatura se escribió en el registro según los datos recopilados. La recolección de datos en la carretera se dividió en dos pruebas bajo las condiciones de operación mencionadas a continuación:

Tabla 1 *Parámetros de Prueba I – UIDE a UDLA Park.*

Parámetro	Valor
Temperatura Ambiental	28 °C
Horario	13:46 h
Condiciones de tráfico	Moderado
Nivel de Combustible	½ tanque
Régimen del motor	Oscilación entre 3000 y 5000 rpm
Distancia recorrida	12.5 km
Tiempo recorrido	10 minutos y 30 segundos

Fuente. Autoría Propia

Tabla 2 *Parámetros de Prueba II – UDLA Park a UIDE.*

Parámetro	Valor
Temperatura Ambiental	22 °C
Horario	16:46 h
Condiciones de tráfico	Alto
Nivel de Combustible	1/4 tanque
Régimen del motor	Oscilación entre 3000 y 5000 rpm
Distancia recorrida	12.5 km
Tiempo recorrido	11 minutos y 40 segundos

Fuente. Autoría Propia

-Escenario B (Laboratorio de dinamometría): Posteriormente, el vehículo fue anclado al rodillo del dinamómetro. Se acopló la tobera aerodinámica al frontal del vehículo y se realizaron pruebas comparativas. Inicialmente se tomaron medidas con la tobera desconectada para registrar el efecto de confinamiento térmico. Luego, se activó el sistema bajo el escenario determinado central de esta investigación: la HMI y el control PID se configuraron para que el electroventilador operara a sus máximas revoluciones, replicando así el alto flujo de aire dinámico que exige el motor a plena carga en carretera. Simultáneamente, la resistencia calefactora se mantuvo apagada en su totalidad, garantizando que el flujo inducido mantuviera la temperatura fría del aire ambiente exterior. Bajo estos parámetros estrictos se ejecutó la segunda prueba estática, cuyas condiciones se detallan a continuación:

Tabla 3 *Parámetros de Prueba I sin flujo inducido.*

Parámetro	Valor
Temperatura Ambiental	19.7 °C
Horario	16:30 h
Condiciones de tráfico	-
Nivel de Combustible	1/4 tanque
Régimen del motor	5600 rpm
Tiempo de prueba	5 minutos

Fuente. Autoría Propia

Tabla 4 *Parámetros de Prueba II con flujo inducido por tobera.*

Parámetro	Valor
Temperatura Ambiental	20 °C
Horario	16:35 h
Condiciones de tráfico	-
Nivel de Combustible	1/4 tanque
Régimen del motor	5600 rpm
Tiempo de prueba	5 minutos

Fuente. Autoría Propia

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Análisis Comparativo entre Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y Validación Empírica

Para validar la eficiencia de la geometría convergente y asegurar la correcta aceleración del fluido, se realizó un análisis de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) en el software Autodesk, contrastando posteriormente estos datos ideales con las mediciones empíricas adquiridas en el estrechamiento físico de la tobera (diámetro de 210 mm).

En el entorno virtual de simulación, asumiendo condiciones ideales de inyección de aire, el CFD proyectó una velocidad máxima en el estrechamiento de 156.28 km/h (43.41 m/s). Aplicando el principio de conservación de masa y asumiendo una densidad atmosférica de 0.87 kg/m³ propia de la altitud de prueba, este escenario ideal representaría un flujo másico teórico de 1308.1 g/s.

Por el contrario, la instrumentación empírica sobre el prototipo físico registró un flujo másico real de 341 g/s en la misma sección transversal, lo que matemáticamente se traduce en una velocidad efectiva de 40.74 km/h (11.32 m/s). La comparativa entre ambos escenarios arroja un factor de error o desviación del 73.9% respecto al modelo computacional.

Lejos de invalidar el diseño, esta discrepancia es un fenómeno esperado y documentado en la mecánica de fluidos experimental. El margen de error se justifica técnicamente por la diferencia entre las condiciones de contorno ideales del software y las limitantes termodinámicas del mundo real. Principalmente, el electroventilador axial utilizado sufre caídas de presión estática significativas al forzar el aire a través de la malla enderezadora de flujo (honeycomb) y enfrentar la resistencia del embudo de Venturi. Asimismo, la fricción real de las paredes impresas en FDM y las micro-turbulencias reducen la velocidad neta del caudal en comparación con un entorno virtual exento de rugosidad. A pesar de estas pérdidas mecánicas por bombeo, el flujo real de 341 g/s obtenido en la garganta resultó ser más que suficiente para alimentar la demanda volumétrica del motor (85.5 g/s) en la etapa de admisión final.

4.2. Evaluación Experimental del Comportamiento Termodinámico y Mecánico del Motor

Los datos recolectados durante las fases de prueba dinámicas (en ruta) y estáticas (en laboratorio utilizando un dinamómetro de chasis el cual se detalla en la sección del documento 2.1 del Marco Teórico) proporcionan una base empírica sólida para evaluar el comportamiento térmico y volumétrico del sistema de admisión. La validación experimental se centró en medir la influencia directa de la temperatura del aire sobre la masa de aire succionada por el motor, un factor crítico cuando se opera bajo condiciones de altitud donde la densidad atmosférica base (0.86 a 0.88 g/s) ya se encuentra reducida, a continuación se muestran en las tablas los datos obtenidos en las pruebas, para su posterior comparación.

Tabla 5 Resultados comparativos de flujo de aire másico y temperatura de admisión en diferentes entornos de prueba

Condición de la prueba	Flujo de Aire Másico Máximo (g/s)	Temperatura de Admisión Maxima (°C)
Prueba en Ruta I	63,09	38
Prueba en Ruta II	68,69	29
Prueba en Dinamómetro I - Sin Tobera	80,89	45
Prueba en Dinamómetro II – Con Tobera	85,5	35

Fuente. Autoría Propia

En base a la **Tabla 5**, los parámetros en ruta se comportaron de manera esperada, lo que presenta las variaciones naturales producidas por factores ambientales y el perfil de conducción variable. En la Prueba de Ruta I se obtuvo un flujo másico máximo de 63,09 g/s, con una temperatura en el aire de admisión de 38 °C en una temperatura ambiente de 19,7 °C según en la **Tabla 3**. Por otra parte, la Prueba de Ruta II mostró una caída evidente de la temperatura ambiente, disminuyendo la temperatura del colector a 29 °C, lo que permitió mayores tasas de flujo de aire llegando a 68,69 g/s, demostrando la sensibilidad de la eficiencia volumétrica frente a variables térmicas.

Ahora tomando en cuenta el fenómeno más significativo, se observó que, dentro del laboratorio, en condiciones estáticas sobre el dinamómetro, la ausencia de un flujo de aire frontal natural provoca un efecto de confinamiento térmico en el vano motor. Es decir que sin el uso del sistema automatizado (Parámetros de prueba I sin tobera), la temperatura de admisión se disparó hasta alcanzar un estado crítico de 45 °C, limitando el flujo másico de aire a 80,89 g/s debido a la expansión térmica del gas, lo que reduce la densidad del aire ingresado de acuerdo con la ley de los gases ideales. (**Ec. [1.1]**) Lo que significa un incremento en la temperatura absoluta (T) de admisión disminuye directamente la densidad (ρ) del fluido, disminuyendo la masa total que ingresa a los cilindros por unidad de tiempo.

Por otro lado, en el diseño aerodinámico de la tobera logro compensar el déficit térmico, que el sistema canalizó y aceleró el flujo de aire hacia la admisión del motor y como resultado, se produjo un descenso de temperatura de 10 °C, lo que correspondería un 22,2%, estabilizándola en 35 °C, lo que en consecuencia disminuyó la expansión térmica del fluido y, por tanto, el aumento de la densidad local instantáneamente. Este aumento de densidad impactó directamente en el flujo de aire según la **Tabla 5**, incrementándolo hasta 85,5 g/s teniendo un incremento neto de 4,61 g/s que representa un beneficio del 5,7% en la capacidad de aspiración del motor bajo condiciones de máxima exigencia controlada.

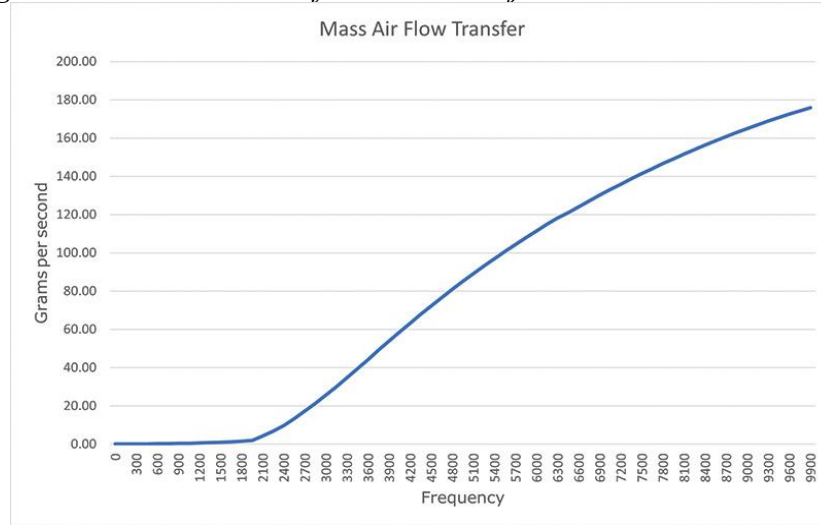
Con ello, se realizó un análisis comparativo entre los datos obtenidos de las pruebas dinámicas y estáticas (**Tabla 5**), y los datos estándares proporcionales obtenidos del fabricante. (**Tabla 6**) De esta forma el estudio amplió su análisis al usar datos estándares de funcionamiento, dado a que los ensayos previos realizados necesitan un punto inicial del cual sostener su validez.

Tabla 6 Datos del Fabricante Nissan

Condición de la prueba	Flujo de Aire Másico Máximo (g/s)	Temperatura de Admisión Maxima (°C)
Condiciones estándares a plena carga según fabricante	110	27

Fuente. Nissan TechNews, 2021

Figura 5 Función de Transferencia de Flujo de aire masico

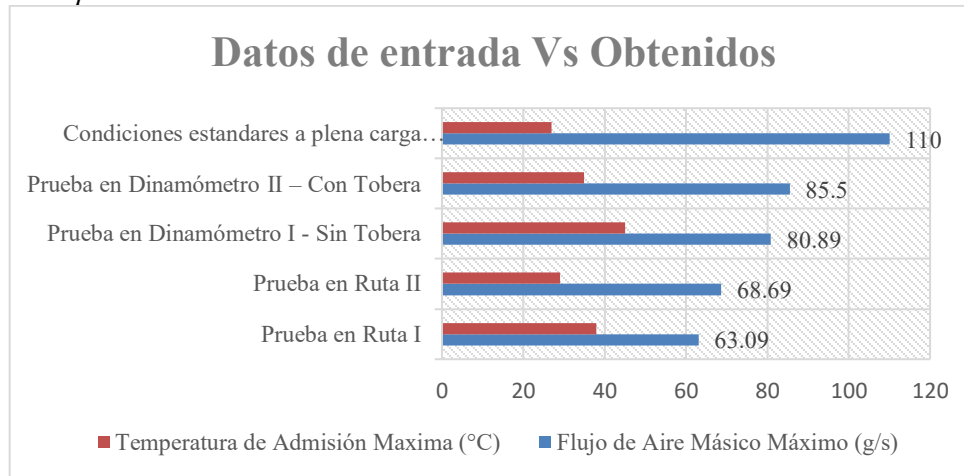


Fuente. Nissan TechNews, 2021

De acuerdo con la información técnica provista por Nissan TechNews, los valores estándares aproximados para garantizar un funcionamiento óptimo del motor a plena carga se sitúan en un rango operativo de 90 a 110 g/s bajo condiciones ideales. Al analizar los datos experimentales expuestos en la **Tabla 5**, se observa que el flujo de aire másico máximo obtenido durante las pruebas en dinamómetro, gracias a la implementación de la tobera convergente, alcanzó los 85,5 g/s

Si bien desde una perspectiva estrictamente matemática este resultado representa una reducción del 22,27% frente al límite máximo teórico de 110 g/s (un valor pico que fue estipulado a partir de la extrapolación de la **Figura 8**), es imperativo contextualizar las variables del entorno de prueba. Los datos proporcionados por el fabricante asumen un escenario ideal, donde la dinámica de fluidos y la presión atmosférica no presentan las restricciones inherentes a un entorno estacionario. En contraste, alcanzar un flujo de 85,5 g/s en un laboratorio resulta ser un avance técnico muy significativo para el proyecto. Este registro posiciona el desempeño del diseño aerodinámico en un margen sumamente estrecho a tan solo 4,5 g/s de diferencia, respecto al umbral inferior óptimo de 90 g/s dictado por la marca. Esto permite concluir que, a pesar de las limitaciones propias de las pruebas estáticas frente a la simulación de ruta, la tobera cumple efectivamente su propósito al compensar la demanda de flujo y aproximar el volumen de aire admitido a los parámetros exigidos para una combustión eficiente.

Figura 6 Comparativa de datos de Entrada Vs Obtenidos



Fuente. Autoria propia, 2026

En la evaluación del rendimiento mecánico sobre el banco de pruebas, se analizó el impacto directo del flujo de aire forzado en la entrega de potencia del motor. En la primera prueba, sin asistencia de la tobera, el automóvil generó una potencia máxima de 123,8 hp a 5600 rpm. Luego, al instalar la tobera, la potencia aumentó hasta 125,1 hp a la misma velocidad del motor, obteniendo una ganancia neta de 1,3 hp y este incremento corrobora empíricamente que la densificación del aire de admisión (producto del descenso térmico previamente analizado) se traduce en un aprovechamiento termodinámico superior.

Tabla 7 Datos Obtenidos en Dinamómetro

Condición de la prueba	Flujo de Aire Másico Máximo (g/s)	Temperatura de Admisión Maxima (°C)	Potencia (Hp)
Prueba en Dinamómetro I - Sin Tobera	80,89	45	123,8
Prueba en Dinamómetro II – Con Tobera	85,5	35	125,1

Por otro lado, este análisis identifica un aspecto físico limitante de la aerodinámica del prototipo actual frente a flujos completamente acoplados: las pérdidas por dispersión del flujo. Dado que la arquitectura frontal de la admisión varía considerablemente entre fabricantes, mantener el 100% del viento impulsado a través de la tobera fluyendo directamente hacia su admisión resulta un desafío mecánico, esto significa que, aunque la ganancia de flujo capturada es positiva, esta parcialmente limitada por el grado de dispersión del aire en la bahía del motor antes de llegar al conducto de succión.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación logró desarrollar y validar un sistema mecatrónico funcional que resuelve un sesgo técnico crítico en las pruebas estáticas sobre dinamómetro: el confinamiento térmico (heat soak) generado por la falta de flujo dinámico. Mediante el diseño computacional y la manufactura aditiva de una tobera instrumentada, gobernada por un algoritmo de control PID, se consiguió emular de forma automatizada las corrientes de aire presentes en rutas reales. Esto asegura que la densidad del aire de admisión no se vea alterada artificialmente, mitigando el estrés térmico y garantizando datos mecánicos precisos y reproducibles dentro del laboratorio.

La evaluación cuantitativa demostró una optimización directa en las variables termodinámicas y mecánicas. En los ensayos estáticos a 5600 rpm sin flujo inducido, la temperatura de admisión alcanzó un estado crítico de 45 °C, limitando el flujo másico a 80.89 g/s. Al acoplar la tobera, la temperatura descendió y se estabilizó en 35 °C, lo que propició un aumento del flujo másico a 85.5 g/s. Este incremento neto de 4.61 g/s representa una mejora del 5.7% en la capacidad de aspiración del motor, acercando el comportamiento del vehículo a los parámetros óptimos dictados por el fabricante. Asimismo, esta densificación del aire generó un impacto netamente positivo en la entrega de potencia, pasando de 123.8 CV a 125.1 CV. Esta ganancia de 1.3 CV evidencia empíricamente que la correcta canalización del flujo no solo mejora la eficiencia volumétrica, sino que reduce el estrés en el tren motriz, optimizando la energía en la combustión.

En su estado actual, el proyecto cuenta con un diseño base escalable y altamente efectivo para simular condiciones de ruta; sin embargo, el análisis de los resultados identificó que la variabilidad en la arquitectura frontal de distintos vehículos provoca pérdidas parciales por dispersión del flujo en el vano motor antes de llegar al conducto de succión. Para superar esta limitación física y potenciar la versatilidad de este equipo, se plantea como línea de investigación futura el diseño e integración de acopladores modulares o difusores direccionales ajustables. Estas adecuaciones permitirán canalizar la totalidad del aire directamente hacia la admisión específica de cualquier automóvil, maximizando la eficiencia del sistema y consolidando un entorno de laboratorio automatizado de alta precisión.

6. REFERENCIAS

- Anrango Farinango, E. X., y Saguay Rosales, J. F. (2025). Desarrollo de un ciclo de conducción adaptado a las condiciones de altitud de la ciudad de Quito, Ecuador, para la estimación precisa de la eficiencia energética y la autonomía de vehículos ICEV, EV y FCEV mediante simulaciones computacionales [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional].
- Behar Piquero, N. (2009). Estudio del fenómeno de la eficiencia volumétrica en un motor de combustión interna [Proyecto de grado, Universidad de los Andes].
- Cardoso Carrazco, C. J. (2021). Diseño e implementación de un sistema de extracción y almacenamiento de parámetros de funcionamiento del automóvil en tiempo real basado en los protocolos de comunicación OBD-II [Trabajo de titulación, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo].
- Castellanos Martínez, J. F. (s.f.). Sistemas fuel injection nivel inicial: Sensores y actuadores. Sesión No 1: Sensores de flujo del sistema fuel injection [Material de capacitación]. Centro Internacional de Instrucción Técnica Automotriz. <https://www.citec-automotriz.com>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones (4.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Chimborazo Calvopiña, J. D., y Tigse Guishcasho, N. R. (2025). Diseño e implementación de una interfaz hombre-máquina para la monitorización de la eficiencia en sistemas fotovoltaicos utilizando celdas calibradas compensadas [Propuesta tecnológica, Universidad Técnica de Cotopaxi].
- De La Cruz Zuñiga, H. A. (2018). Dimensionamiento de un ducto convergente para incrementar la velocidad del viento y su aplicación para un aerogenerador de baja potencia [Tesis de licenciatura, Universidad de Ingeniería y Tecnología].
- Fernández Veiga, M. (2015). Estudio fluido-dinámico de campanas de cocina tipo Coandă [Tesis de grado, Universidad de Vigo].
- Gallego Castillo, J. F. (2014). Desarrollo de pruebas de carretera para caracterizar la pérdida de potencia en motores de combustión interna de vehículos de calle, debida al cambio en presión atmosférica [Documento de grado, Universidad de los Andes].
- Garrido Silva, G. (s.f.). Hpev spanish. Universidad de Navarra (Tecnun), Laboratorio de Mecánica de Fluidos.
- Herrera Black, C. F. (2016). Análisis de características de motor del vehículo Chevrolet Sail 1.4 L. 2012 con el uso de combustible Súper [Trabajo de titulación, Universidad Internacional del Ecuador].

- Hsueh, M. H., Lai, C. J., Wang, S. H., Zeng, Y. S., Hsieh, C. H., Pan, C. Y., & Chou, W. C. (2021). Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3D-printed PLA and PETG, using fused deposition modeling. *Polymers*, 13(11), 1758. <https://doi.org/10.3390/polym13111758>
- Kazemian, M. (2025, 22 de abril). ¿Los túneles de viento numéricos reemplazan a las pruebas de túnel de viento convencionales? Dlubal. <https://www.dlubal.com/es/soporte-y-formacion/soporte/base-de-conocimientos/001948>
- Menargues, S., Martín, J., & Llumà, J. (2025). Effect of additive manufacturing parameters on PLA, ABS, and PETG strength. *Processes*, 13(9), 2733. <https://doi.org/10.3390/pr13092733>
- Mendenhall, S., & Eslami, S. (2023). Experimental investigation of temperature effects on the physical properties and performance of FDM polymers (ABS, PETG, and PLA). *Applied Sciences*, 13(20), 11503. <https://doi.org/10.3390/app132011503>
- Miralles, J., Giménez, A., Domenech, L., y García, V. (2015). Efecto de la relación de compresión en el rendimiento de motores de combustión interna a diferentes altitudes. *Información Tecnológica*, 26(4), 63–74. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642015000400009>
- Morales Contreras, O. A., Paz González, J. A., Paz González, M. L., Sumbarda Ramos, E. G., & Arciniega Martínez, J. (2021). Inserción de honeycomb en túnel de viento de la FCITEC. *Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)*, 4(3), 187-194. <https://doi.org/10.37636/recit.v43187194>
- Moriano Sánchez, C. (2013). Método de procesamiento rápido de las ecuaciones de la dinámica vehicular [Tesis doctoral, Universidad Antonio de Nebrija].
- Poma, D. C., y da Rocha, C. A. (2025). Projeto de um controlador de temperatura PID de alta resolução para uso em um sistema de termoluminescência de hardware e software aberto. *EICPOG*, 10(1).
- Rahman, M. H., Shihab, M., Rahman, M. A., y Naderuzzaman, M. (2026). ESP32 microcontroller: A review of architecture, communication protocols, applications and research challenges. *Open Access Journal on Engineering Applications*, 1(2), 19–33. <https://doi.org/10.64886/oajea.0102.003>
- Sánchez Fortuny, H. (2022). Diseño de un sensor de flujo de hilo caliente [Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de Catalunya].
- Santa Ospina, L. F., y Tirado Arrubla, L. (2017). Módulo de control de temperatura (PID) [Trabajo de grado, Instituto Tecnológico Metropolitano].

- Torres Jarrín, C. I. (2011). Principio de Bernoulli con la aplicación del tubo de Venturi [Monografía de bachillerato, Unidad Educativa Liceo Oxford].
- Torres Quijije, Á., Cedeño Barzola, J., Samaniego Mena, E., y Herbas Montoya, L. (2026). Sistema de monitoreo remoto de magnitudes eléctricas basado en protocolos de comunicación IoT (Internet de las cosas). Revista Ingeniería e Innovación, 14(1). <https://doi.org/10.21897/rri.4215>

7. ANEXOS

Anexo 1 *Sensor de Presión Diferencial
MPX5010DP*



Anexo 3 *Sensor de temperatura*



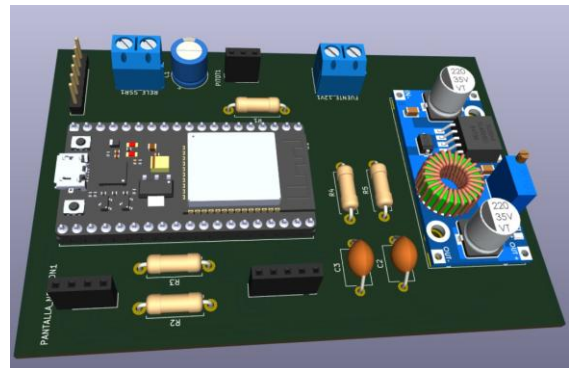
Anexo 5 *Microprocesador ESP32*



Anexo 2 *Tubo de Pitot*



Anexo 4 *Placa PCB*



Anexo 6 *Regulador de voltaje XL4015*



Anexo 7 Puente H - BTS7960



Anexo 8 Relé de estado sólido - SSR 40



Anexo 9 Escáner OBD II - ELM327



Anexo 10 Pantalla HMI – Nextion



Anexo 11 Prueba en dinamómetro sin Tobera



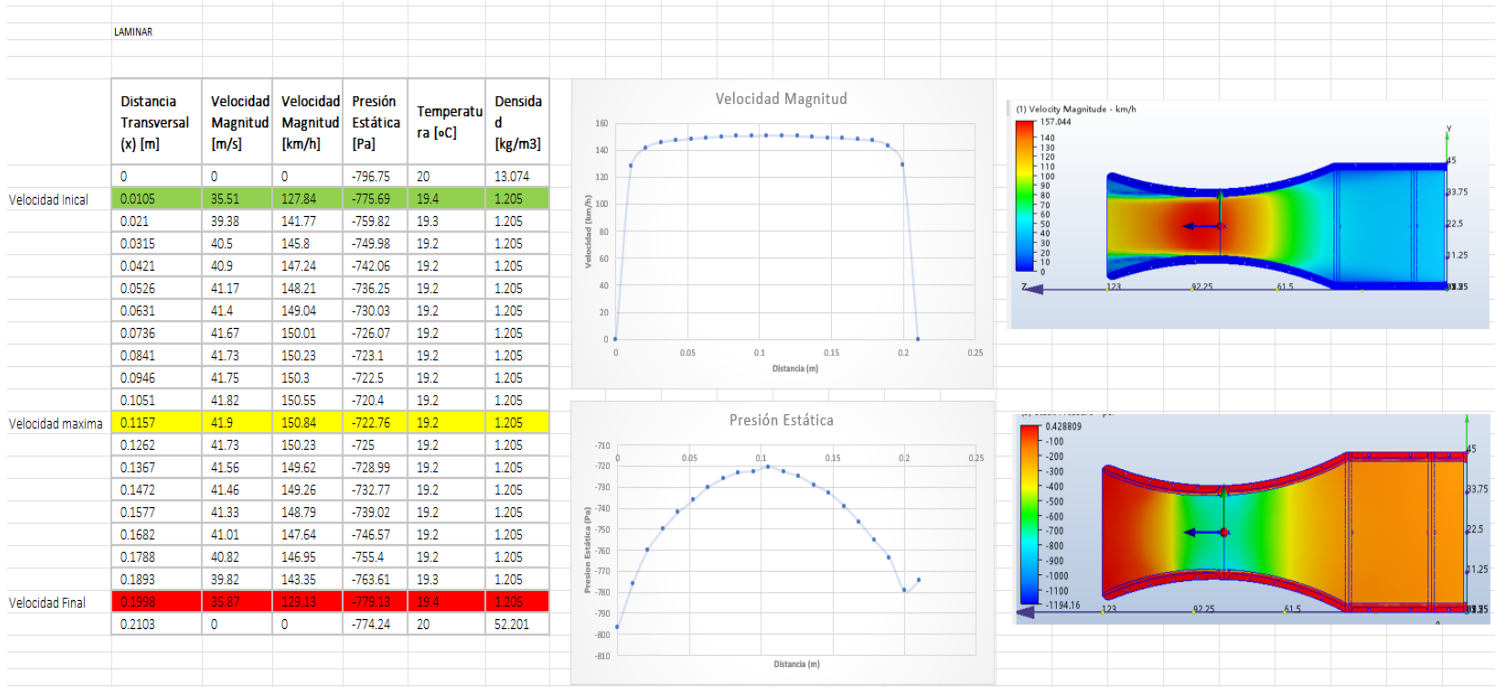
Fuente: Programa de Simulación de Datos del Dinamómetro UIDE

Anexo 12 Prueba en dinamómetro con Tobera



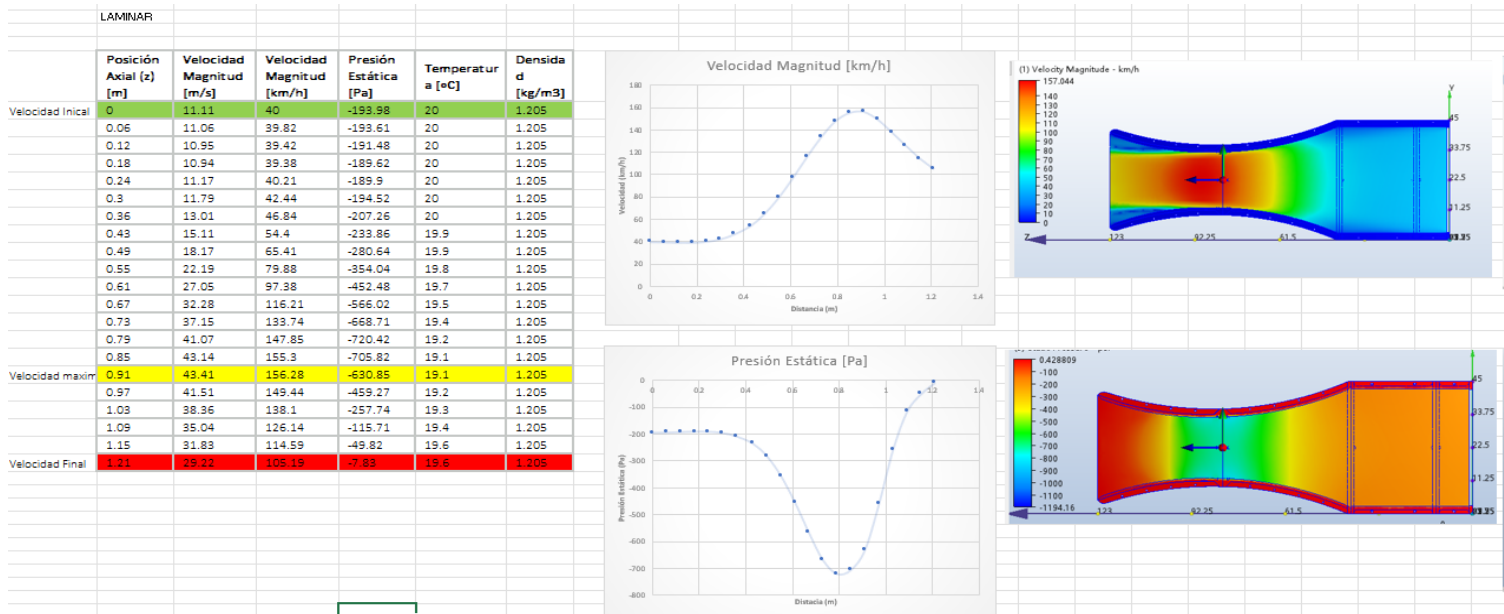
Fuente: Programa de Simulación de Datos del Dinamómetro UIDE.

Datos Simulatorios laminares obtenidos en programa CFD Autodesk (En el estrechamiento de la estructura)



Fuente: Excel e Capturas de pantalla del programa

Datos Simulatorios laminares obtenidos en programa CFD Autodesk (A lo largo de la estructura)



Fuente: Excel e Capturas de pantalla del programa

