



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE
ALIMENTACIÓN EN EL DESEMPEÑO DE LA INYECCIÓN: COMPARATIVA
ENTRE EL SISTEMA MPI Y UNA COMPUTADORA PROGRAMABLE.**

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

AUTOR: ALDRIN JHOAO CIFUENTES MARTÍNEZ

TUTOR: EDGAR VICENTE ROJAS REINOSO

Quito - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez con documento de identificación N° 1721292959 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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.

Quito, 26 de febrero del año 2026

Atentamente,



Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez

1721292959


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

Yo Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez con documento de identificación No.1721292959, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto Técnico: “Estudio del impacto de la configuración del sistema de alimentación en el desempeño de la inyección: Comparativa entre el sistema MPI y una computadora programable”, 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, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana

Quito, 26 de febrero del año 2026

Atentamente,



Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez

1721292959

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Edgar Vicente Rojas Reinoso con documento de identificación N° 0106065519, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ESTUDIO DEL IMPACTO DE LA CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN EL DESEMPEÑO DE LA INYECCIÓN: COMPARATIVA ENTRE EL SISTEMA MPI Y UNA COMPUTADORA PROGRAMABLE, realizado por Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez con documento de identificación N° 1721292959, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción: Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 26 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Edgar Vicente Rojas Reinoso PhD.

0106065519

DEDICATORIA

Dedico el presente proyecto a Dios, por ser mi guía en cada paso, por brindarme fortaleza en los momentos difíciles y sabiduría para alcanzar mis metas.

A mi abuelita, cuyo amor incondicional y ejemplo de vida me inspiran cada día a ser mejor persona.

A mis padres, por su esfuerzo, sacrificio y apoyo constante; por enseñarme el valor del trabajo, la humildad y la perseverancia.

A mi hermana, por su cariño y alegría, que siempre me han acompañado en este camino.

Y a mi novia, por su comprensión, motivación y compañía inquebrantable durante todo este proceso.

Este logro es el reflejo del amor, la fe y el respaldo de todos quienes han creído en mí.

Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez

AGRADECIMIENTO

Mis sinceros agradecimientos a Dios, por brindarme la fortaleza, sabiduría y perseverancia necesarias para culminar esta etapa de mi vida; a la Universidad Politécnica Salesiana, por permitirme adquirir los conocimientos y valores que fortalecieron mi formación profesional; a mis docentes, por su dedicación, enseñanza y orientación constante; a mis padres, por su amor, esfuerzo y apoyo incondicional; y a mi novia, por su comprensión, paciencia y motivación, que fueron un impulso fundamental para alcanzar este logro.

Aldrin Jhoao Cifuentes Martínez

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	3
INTRODUCCIÓN	5
PROBLEMA	8
Delimitación del problema. –	10
Objetivo General.....	11
Objetivos Específicos.	11
MARCO TEÓRICO.....	12
Motores de encendido provocado (MEP).....	12
Componentes Principales del Sistema de Encendido	12
Sistema de Encendido del Motor BMW M52TUB28	12
Funcionamiento de ciclos en los motores de encendido por chispa.....	14
Admisión	14
Compresión.....	14
Combustión.....	14
Escape.....	14
Tipos de motores según su alimentación.....	15
Motores de aspiración natural.....	16
Motores turboalimentados	17
Motores supercargados	18
Sistemas de Inyección Multipunto (MPI).....	18
Sistema MPI Convencional	19
Sistema Dual MPI.....	19
Sistema MPI para Gas Licuado de Petróleo (LPG).....	20
Unidades de Control Electrónico Programables (ECU).....	20
Alimentación Forzada.....	21
Funcionamiento de Turbo Compresores	21
Funcionamiento de Supercargadores	22
Tipos de Turbo Compresores	22
Turbo Compresores de Geometría Fija	22
Turbo Compresores de Geometría Variable (VGT)	22
Turbo Compresores Secuenciales.....	22
CAPÍTULO 1	23
DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS.....	23
1.1 Descripción del vehículo de estudio	23

1.2	Equipos e instrumentos utilizados	24
1.3	Elementos para modificaciones Mecánicas y de Transmisión	25
1.3.1	Embrague Stage 5	25
1.3.2	Bomba de combustible de alto flujo	27
1.3.3	Unidad de control electrónico programable ECU	28
1.3.4	Kit turbo.....	29
CAPÍTULO 2		33
INSTALACIÓN DEL TURBOCOMPRESOR EN EL MOTOR M52TUB28		33
2.1	Instalación de la ECU programable y verificación previa en modo atmosférico .	33
2.2	Diseño y planificación del sistema de sobrealimentación	34
2.3	Preparación del motor y adecuación del vano motor.....	35
2.4	Montaje del turbocompresor, wastegate y sistema de escape.....	36
2.5	Instalación del intercooler, tuberías de presión y válvula de descarga.....	37
2.6	Construcción y adaptación del catalizador a medida para el sistema turbo.....	38
2.7	Adecuación del sistema de alimentación de combustible.....	39
2.8	Puesta en marcha, pruebas en banco y calibración final.....	39
CAPÍTULO 3		41
RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL		41
3.1	Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con motor stock	41
3.2	Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con Ecu programable.....	43
3.3	Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con motor turboalimentado	47
3.4	Resultados del banco de potencia (dinamometría)	49
3.4.1	Motor stock.....	50
3.4.2	Motor con ECU standalone	51
3.4.3	Motor turboalimentado	52
3.4.4	Evaluación Comparativa del Rendimiento en el Banco de Potencia.....	52
3.4.5	Comparativa porcentual global.....	54
3.5	Evaluación del mapa de inyección.....	56
3.6	Análisis de la eficiencia volumétrica (VE%).....	58
3.7	Análisis del avance de encendido (Timing).....	59
3.8	Cálculo: Emisiones por HP y por Nm	61
3.8.1	Emisiones por unidad de potencia y torque de CO [% Vol]	62
3.8.2	Emisiones por unidad de potencia y torque de HC [ppm]	64
3.8.3	Emisiones por unidad de potencia y torque de CO2 [% Vol].....	65
3.8.4	Emisiones por unidad de potencia y torque de O2 [% Vol]	67
3.8.5	Emisiones por unidad de potencia y torque de λ	68

CAPÍTULO 4.....	70
GESTIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO TECNICO	70
4.1 Gestión del proyecto	70
4.2 Organización del Equipo	70
4.3 Evidencias Objetivas de coordinación	70
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73
ANEXOS.....	81
ANEXO A.	81
ANEXO B.	82
ANEXO C.	88
ANEXO D.	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Vehículo experimental.....	23
Figura 2. Comparativa del motor stock y el modelo conceptual del motor modificado. ...	25
Figura 3. Instalación de embrague Stage 5.....	26
Figura 4. Unidad de control electrónico programable ECU.....	28
Figura 5. Turbocompresor a instalar en el motor M52TUB28.....	30
Figura 6. Intercooler a instalar en el motor M52TUB28.....	31
Figura 7. Instalación de unidad de control electrónico programable ECU.	33
Figura 8. Motor M52TUB28 Stock.....	34
Figura 9. Preparación para Header en M52TUB28.....	35
Figura 10. Instalación de Wastegate en M52TUB28.	36
Figura 11. Instalación sistema de escape M52TUB28.....	37
Figura 12. Instalación sistema de enfriamiento.....	37
Figura 13. Instalación sistema de admisión.....	38
Figura 14. Instalación de catalizador.....	39
Figura 15. Software para configuración del sistema.	40
Figura 16. Resultados del dinamómetro con motor Stock.	50
Figura 17. Resultados del dinamómetro con Ecu programable.....	51
Figura 18. Resultados del dinamómetro con motor turboalimentado.	52
Figura 19. Resultados del dinamómetro comparativa entre etapas.	53
Figura 20. Comparativa de potencia y torque entre etapas	54
Figura 21. Comparativa de incremento de potencia entre etapas	55
Figura 22. Comparativa de incremento de torque entre etapas	56
Figura 23. Tabla AFR usada en el vehículo.	57
Figura 24. Tabla VE usada con Ecu programable.....	58
Figura 25. Tabla VE usada con motor turboalimentado.....	59
Figura 26. Tabla de avance de ignición usada con Ecu Programable.	60
Figura 27. Tabla de avance de ignición usada con motor turboalimentado.	61
Figura 28. Comparativa de etapas de emisiones CO.....	63

Figura 29. Comparativa de etapas de emisiones HC.....	65
Figura 30. Comparativa de etapas de emisiones CO2.....	66
Figura 31. Comparativa de etapas de emisiones O2.....	68
Figura 32. Comparativa de etapas de emisiones λ	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Ficha técnica de BMW E46 328i.....	24
Tabla 2. Especificaciones del embrague stage 5.....	26
Tabla 3. Especificaciones de la bomba de alto flujo.....	27
Tabla 4. Especificaciones de la unidad de control electrónico programable ECU.....	29
Tabla 5. Especificaciones del kit turbo a instalar.....	31
Tabla 6. Análisis de gases con motor stock a 800 revoluciones.....	41
Tabla 7. Análisis de gases con motor stock a 1000 revoluciones.....	42
Tabla 8. Análisis de gases con motor stock a 2000 revoluciones.....	42
Tabla 9. Análisis de gases con motor stock a 3000 revoluciones.....	42
Tabla 10. Análisis de gases con motor stock a 4000 revoluciones.....	43
Tabla 11. Análisis de gases con motor stock a 5000 revoluciones.....	43
Tabla 12. Análisis de gases con Ecu programable a 800 revoluciones.....	44
Tabla 13. Análisis de gases con Ecu programable a 1000 revoluciones.....	45
Tabla 14. Análisis de gases con Ecu programable a 2000 revoluciones.....	45
Tabla 15. Análisis de gases con Ecu programable a 3000 revoluciones.....	46
Tabla 16. Análisis de gases con Ecu programable a 4000 revoluciones.....	46
Tabla 17. Análisis de gases con Ecu programable a 5000 revoluciones.....	46
Tabla 18. Análisis de gases con motor turboalimentado a 800 revoluciones.....	47
Tabla 19. Análisis de gases con motor turboalimentado a 1000 revoluciones.....	48
Tabla 20. Análisis de gases con motor turboalimentado a 2000 revoluciones.....	48
Tabla 21. Análisis de gases con motor turboalimentado a 3000 revoluciones.....	48
Tabla 22. Análisis de gases con motor turboalimentado a 4000 revoluciones.....	49
Tabla 23. Análisis de gases con motor turboalimentado a 5000 revoluciones.....	49
Tabla 24. Comparativa de potencia y torque entre etapas.....	53
Tabla 25. Comparativa de incremento de potencia entre etapas.....	55
Tabla 26. Comparativa de incremento de torque entre etapas.....	55
Tabla 27. Conversión de torque.....	62
Tabla 28. Emisiones por unidad de potencia y torque de CO.....	63
Tabla 29. Emisiones por unidad de potencia y torque de HC.....	64
Tabla 30. Emisiones por unidad de potencia y torque de CO2.....	66
Tabla 31. Emisiones por unidad de potencia y torque de O2.....	67
Tabla 32. Emisiones por unidad de potencia y torque de λ	69

RESUMEN

Los motores de combustión interna (MCI) han sido objeto de una evolución acelerada, impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia energética, reducir las emisiones contaminantes y optimizar su desempeño operativo. Si bien la electromovilidad ha ganado relevancia a nivel global, en numerosos países de Latinoamérica el parque automotor continúa dependiendo en gran medida de sistemas tradicionales de inyección. En este contexto, resulta fundamental que estos motores operen de manera eficiente, con el fin de minimizar el impacto ambiental y garantizar un rendimiento adecuado. Por ello, la gestión electrónica del motor adquiere un papel esencial, ya que permite un control más preciso de los procesos de combustión y una mayor capacidad de adaptación a las distintas condiciones de funcionamiento.

El estudio de este proyecto de titulación se enfoca en examinar el funcionamiento de un motor de encendido provocado, utilizando como caso particular un BMW E46 328i del año 1999. El estudio examina el desempeño de la gestión electrónica y de la alimentación de aire en distintas configuraciones. La investigación incluye la evaluación del sistema original de inyección multipunto (MPI), la implementación posterior de una ECU programable y finaliza con el montaje de un sistema de turboalimentación. Este estudio analiza con exactitud el efecto de las modificaciones en la mezcla aire-combustible (AFR), la eficiencia volumétrica (VE) y el avance de encendido sobre los parámetros de combustión, a partir del análisis de gases de escape.

Los datos adquiridos a través de mediciones directas en un dinamómetro nos posibilitan una comparación directa y mucho más clara del rendimiento del motor en cada etapa. Esta técnica evidencia cómo el torque, la potencia y la dinámica del vehículo van cambiando gradualmente a medida que se perfeccionan los mapas de inyección, la eficiencia volumétrica (VE) y el avance de encendido. Gracias al estudio detallado de las emisiones (CO, CO₂, HC, O₂ y lambda) se proporcionará la relación exacta entre la calibración electrónica y la eficiencia de la combustión. Esto permitirá crear una base para determinar el impacto de los cambios en la eficiencia y en la sostenibilidad del motor.

Más allá de los valores numéricos, el propósito de este estudio es evidenciar la importancia de comprender y adaptar las tecnologías de gestión electrónica para motores de

combustión interna, especialmente en contextos donde estos seguirán siendo predominantes en las próximas décadas. Mediante herramientas técnicas, conocimientos de ingeniería y metodologías de análisis, es posible mejorar el desempeño del motor y, al mismo tiempo, contribuir a una operación más limpia y eficiente del transporte en la región.

Palabras Claves: ECU programable, sistema de inyección multipunto, análisis de gases de combustión, AFR, eficiencia volumétrica, avance de encendido.

ABSTRACT

Internal combustion engines (ICEs) have undergone rapid evolution, driven by the need to improve energy efficiency, reduce pollutant emissions, and optimize operational performance. Although electromobility has gained relevance globally, in many Latin American countries, the vehicle fleet continues to rely heavily on traditional injection systems. In this context, it is essential that these engines operate efficiently in order to minimize environmental impact and ensure adequate performance. For this reason, electronic engine management plays an essential role, as it allows for more precise control of combustion processes and greater adaptability to different operating conditions.

This degree project focuses on examining the operation of a spark ignition engine, using a 1999 BMW E46 328i as a specific case study. The study examines the performance of electronic management and air supply in different configurations. The research includes an evaluation of the original multipoint injection (MPI) system, the subsequent implementation of a programmable ECU, and concludes with the installation of a turbocharging system. This study accurately analyzes the effect of modifications to the air-fuel ratio (AFR), volumetric efficiency (VE), and ignition advance on combustion parameters, based on exhaust gas analysis.

The data acquired through direct measurements on a dynamometer allows us to make a direct and much clearer comparison of engine performance at each stage. This technique shows how the torque, power, and dynamics of the vehicle gradually change as the injection maps, volumetric efficiency (VE), and ignition advance are refined. A detailed study of emissions (CO, CO₂, HC, O₂, and lambda) will provide the exact relationship between electronic calibration and combustion efficiency. This will create a basis for determining the impact of changes on engine efficiency and sustainability.

Beyond the numerical values, the purpose of this study is to highlight the importance of understanding and adapting electronic management technologies for internal combustion engines, especially in contexts where these will continue to be predominant in the coming decades. Through technical tools, engineering knowledge, and analysis methodologies, it is possible to improve engine performance while contributing to cleaner and more efficient transportation in the region.

Keywords: ECU standalone, multipoint injection system, combustion gas analysis, AFR, volumetric efficiency, ignition advance.

INTRODUCCIÓN

La eficacia y precisión en la gestión de la inyección de combustible influyen directamente en el rendimiento de los motores de combustión interna, ya que la potencia desarrollada, el consumo específico y los niveles de emisiones generadas dependen de una adecuada atomización, dosificación y estabilidad de la mezcla aire-combustible, por lo cual la ingeniería automotriz ha desarrollado diversas configuraciones de alimentación, entre las que destacan el sistema de inyección multipunto (MPI, del inglés Multi Point Injection) y los sistemas gestionados mediante computadoras programables mediante el análisis de estas configuraciones permite evaluar el efecto que cada una ejerce sobre el proceso de inyección y establecer parámetros técnicos para comprender sus diferencias, alcances y aplicaciones en motores de combustión interna (Farinango-Herrera et al., 2024; Kassim et al., 2023).

El sistema de inyección multipunto se ha consolidado durante muchas décadas como una de las tecnologías más utilizadas y confiables en motores de gasolina debido a su capacidad para inyectar combustible en múltiples puntos del colector de admisión, mejorando así la homogeneidad de la mezcla antes de la combustión (Farinango-Herrera et al., 2024; Kassim et al., 2023).

Este diseño es una gran opción la cual contribuye a mejorar la eficiencia volumétrica y a reducir las emisiones contaminantes, al permitir una distribución más eficiente del combustible entre los cilindros. Esto enfrenta desafíos inherentes a su diseño, especialmente relacionados con la necesidad de conservar el combustible en fase líquida y evitar la transferencia de calor hacia el tanque, aspectos que influyen mucho en la estabilidad de la mezcla y también en la calidad de la combustión (Agostinelli et al., 2011).

Los diferentes sistemas controlados mediante computadoras programables representan un avance significativo en la gestión electrónica del motor y su rendimiento tanto en consumo como en eficiencia. Estas ECUs permiten cambiar parámetros en tiempo real como; el tiempo de inyección, el ancho de pulso, el avance de encendido y otras variables de operación, empleando datos provenientes de sensores esenciales como la velocidad del motor, la posición del acelerador, la temperatura del aire o el estado de combustión (Banis, 2019; Omary et al., 2003). La variación de parámetros nos brinda una mejor precisión en la dosificación del combustible, generando mejoras en la eficiencia de la

combustión y en la reducción de emisiones bajo distintos regímenes de trabajo y condiciones ambientales como son la altura (Farinango-Herrera et al., 2024; Omary et al., 2003). Su implementación implica un nivel mayor de complejidad técnica, demanda conocimientos avanzados de calibración especializados y conlleva costos adicionales asociados al hardware y software utilizados (Banis, 2019; Sun et al., 2024).

La comparación entre ambos sistemas evidencia que, el sistema de inyección multipunto ofrece robustez, simplicidad y bajos costos de mantenimiento, las computadoras programables dan una flexibilidad superior, la cual permite adaptarse a variaciones, modificaciones mecánicas o condiciones extremas de operación, con un mejor desempeño en eficiencia de combustión, emisiones y ganancia tanto en torque como potencia (Farinango-Herrera et al., 2024). El sistema de inyección multipunto continúa siendo una solución funcional para configuraciones convencionales, especialmente en lugares donde la economía y la facilidad de mantenimiento son factores determinantes.

Internacionalmente, las tecnologías de inyección han evolucionado con respecto a la necesidad global de reducir emisiones y mejorar la eficiencia energética de los motores. Sistemas como la inyección directa de gasolina (GDI del inglés Gasoline Direct Injection) y los sistemas multipunto electrónicos han demostrado mejoras significativas en atomización y mezcla, permitiendo una combustión más eficiente y menor generación de contaminantes (Pielecha y Stępień, 2022; Tripathy et al., 2017).

La adopción de tecnologías avanzadas también ha introducido nuevos desafíos, como el incremento en las emisiones de partículas y la formación de depósitos en inyectores en el caso de los sistemas de inyección directa, lo cual requiere estrategias adicionales de control y mantenimiento (Pielecha y Stępień, 2022; Tripathy et al., 2017).

Estudios recientes destacan que variaciones en parámetros como la presión de inyección o el tiempo de apertura del inyector influyen en la formación de CO, PM y NO_x, siendo este último dependiente directamente de la temperatura de combustión, lo que subraya la complejidad y los retos del diseño moderno de la inyección (Karthic et al., 2020; Natti et al., 2013; Selvaraj, 2024).

En Ecuador la optimización del consumo de combustible y la reducción de emisiones se han convertido en prioridades debido al costo de los combustibles y las particularidades del parque automotor nacional.

Investigaciones desarrolladas en la ciudad de Quito han analizado el comportamiento de motores de combustión interna al emplear diferentes formulaciones de combustible. En el estudio realizado por Rojas-Reinoso, Alvarez-Loor et al. (2023) se evaluó el uso combinado de gasolina Súper y Extra, evidenciándose una disminución del consumo sin afectar de manera significativa el desempeño del motor. De forma complementaria, Rojas-Reinoso, Duque-Escobar et al. (2023) investigaron el efecto de mezclas de gasolina con etanol, concluyendo que estas pueden mejorar la eficiencia energética sin comprometer el funcionamiento del motor. Este panorama nacional resalta la importancia de optimizar los sistemas de inyección existentes y considerar la adopción de tecnologías programables como herramientas clave para mejorar la eficiencia energética y reducir emisiones en el contexto ecuatoriano.

PROBLEMA

Dentro de las tecnologías de inyección de combustible, el sistema de inyección multipunto y las computadoras programables (del inglés ECU standalone) representan dos enfoques distintos con aplicaciones y beneficios específicos. Un vehículo utiliza un sistema de inyección MPI gestionado por la ECU la cual regula la mezcla aire/combustible mediante sensores y mapas preestablecidos. El sistema nos da beneficios como una mejor atomización del combustible y un flujo volumétrico estable al motor, reducción de emisiones contaminantes gracias a una dosificación precisa y un funcionamiento confiable sin necesidad de ajustes constantes.

La incorporación de sistemas de sobrealimentación en motores originalmente aspirados introduce condiciones de operación que superan los límites de diseño de los sistemas de inyección multipunto (MPI) de fábrica. Estudios desarrollados por Bontorin y De Oliveira Carvalho (2016) demostraron que las ECU originales emplean mapas de inyección y encendido calibrados para rangos de presión cercanos a la atmosférica, lo que limita su capacidad de respuesta ante incrementos significativos de presión y caudal de aire. De manera complementaria, Valle et al. (2004) evidenciaron que el cálculo de combustible en las ECU OEM se fundamenta en la información proveniente del sensor de presión absoluta del múltiple (MAP), el sensor de oxígeno (O_2 o sonda lambda), el sensor de posición del acelerador (TPS), el sensor de temperatura del aire de admisión (IAT) y el sensor de temperatura del refrigerante del motor (ECT), cuyos rangos de medición no contemplan condiciones de sobrepresión. En conjunto, estas investigaciones sustentan que la implementación de turbocompresores o supercargadores puede generar una dosificación inadecuada de combustible cuando se mantiene la electrónica original, comprometiendo el rendimiento y el control de emisiones del motor (Bontorin y De Oliveira Carvalho, 2016; Valle et al., 2004).

Cuando el motor comienza a trabajar con presión positiva, por ejemplo, entre 0.3 y 0.7 bar en instalaciones básicas de sobrealimentación el caudal de aire puede aumentar con respecto a la condición original. La ECU OEM no está programada para interpretar estos valores, pues sus tablas internas poseen límites de carga y de tiempo de inyección que no pueden ser modificados directamente. (Heidary et al., 2023; Wang y Yang, 2006).

Como consecuencia, los inyectores alcanzan rápidamente valores críticos, mientras que la bomba de combustible opera al límite de caudal, produciendo mezclas progresivamente pobres. A pesar de que la ECU intenta corregir estas desviaciones mediante las señales del sensor O₂. Una vez superado ese umbral, la ECU activa estrategias de protección como reducción de pulso de inyección, retardo del encendido o cortes de seguridad. Estudios previos confirman que, bajo sobrealimentación, los sistemas MPI de fábrica presentan insuficiencia tanto por el límite físico de los componentes como por la programación cerrada de la ECU OEM (Dasgupta et al., 2020). Por estas razones, la reprogramación avanzada o la adopción de una ECU programable se vuelve necesaria para gestionar adecuadamente el mayor flujo de aire y garantizar una combustión segura.

En condiciones de altura extrema como lo es el Distrito Metropolitano de Quito, el sistema MPI no representa una limitación funcional del motor, sino que su arquitectura opera mediante mapas de inyección preconfigurados y no reescribibles, lo que impide ajustar de forma directa los tiempos de inyección y el caudal cuando se introducen condiciones externas no contempladas en su calibración original, como la sobrealimentación (Gimelli et al., 2019; Valle et al., 2004).

La menor presión atmosférica afecta la densidad del aire y, aunque la ECU de fábrica realiza ciertas compensaciones a través del sensor MAP (del inglés Manifold Absolute Pressure), la respuesta del motor puede no ser óptima, generando pérdida de potencia y variaciones en la eficiencia del combustible. El uso de una ECU standalone se convierte en una alternativa viable para mejorar la respuesta del motor sobrealimentado, ya que permite realizar ajustes más precisos y personalizados en la mezcla aire/combustible, el avance de encendido y otros parámetros críticos del desempeño del motor (Mo et al., 2016).

Las ECU standalone dan un control más preciso y ampliado del motor frente a un sistema MPI convencional, particularmente en configuraciones turboalimentadas. Mientras una ECU OEM limita sus mapas a presiones próximas a la atmosférica (95 a 105 kPa) y pulsos de inyección, una ECU programable puede gestionar presiones de admisión entre 150 y 250 kPa, utilizar sensores MAP de 3 a 4 bar y operar con AFR enriquecidos de 11.0–11.8 bajo carga para reducir la temperatura de combustión, permite integrar inyectores de alto caudal ≥ 440 cc, ajustar el avance de encendido de forma independiente por carga y rpm, y aplicar estrategias avanzadas como el control de presión del turbo, control de despegue y

retraso del turbo. (Heidary et al., 2023; Kim et al., 2022; Valle et al., 2004; Wang y Qian, 2010; Wang y Yang, 2006).

En entornos de elevada altitud como Quito ($\approx 72\text{--}75$ kPa de presión barométrica), la ECU standalone corrige automáticamente la caída de densidad del aire mediante compensaciones barométricas y tablas de VE dinámicas, evitando detonación y manteniendo la estabilidad del AFR. Por estas capacidades, las ECU programables resultan esenciales para asegurar un funcionamiento seguro y eficiente en motores turboalimentados (Dasgupta et al., 2020).

Delimitación del problema.

Este avance cobra especial relevancia en condiciones ambientales desafiantes como la altitud de Quito ≈ 2850 m.s.n.m, donde la menor densidad del aire afecta la combustión, reduciendo la potencia del motor y alterando la relación aire/combustible. Los motores atmosféricos experimentan una disminución en la entrega de potencia debido a la reducción de oxígeno disponible para la combustión, lo que impacta directamente en su rendimiento. En estos casos, contar con un sistema de inyección y sobrealimentación capaz de adaptarse a estas condiciones se vuelve fundamental para mitigar la pérdida de potencia y optimizar la eficiencia del motor (Xie et al., 2025).

Si bien la sobrealimentación ha sido ampliamente documentada como una estrategia efectiva para mejorar el desempeño global del motor, la eficiencia volumétrica y el consumo específico de combustible, la mayor parte de los estudios disponibles se concentran en aplicaciones aeronáuticas, motores de competición o configuraciones experimentales bajo condiciones altamente controladas (Abreu y Brójo, 2023; Pana et al., 2013).

En el ámbito automotriz, particularmente en motores de encendido por chispa utilizados en vehículos de producción, existe una limitada caracterización experimental del impacto de la sobrealimentación sobre los parámetros de combustión cuando se implementan sistemas de gestión electrónica programable. Aunque se ha reportado que el incremento de presión de admisión contribuye a la reducción del consumo específico de combustible mediante la mejora de la eficiencia volumétrica (Abreu y Brójo., 2023). No se dispone de suficiente evidencia que relacione estos beneficios con el comportamiento real de las emisiones de gases de escape bajo condiciones operativas representativas.

Si bien se ha demostrado que la optimización de la relación aire–combustible y del avance de encendido puede mejorar la eficiencia térmica y reducir las emisiones contaminantes en distintos tipos de motores (He et al., 2009; Fukuhara et al., 2013; Sako et al., 2005).

En este sentido, se identifica la necesidad de delimitar y analizar experimentalmente el efecto de la configuración del sistema de alimentación y de la gestión electrónica del motor sobre el proceso de combustión, mediante el análisis de gases de escape, con el fin de determinar su influencia en el desempeño, la eficiencia y las emisiones contaminantes del motor, contribuyendo así a una mejor comprensión de la sobrealimentación en aplicaciones automotrices reales (Abreu y Brójo, 2023; Fukuhara et al., 2013; Pana et al., 2013).

Objetivo General.

- Analizar el comportamiento del sistema de inyección entre un motor con sistema MPI (Multi Point Injection) OEM y computadoras programables (ECU standalone), evaluando su impacto en la eficiencia y desempeño del motor bajo diferentes configuraciones del sistema de alimentación con presiones atmosféricas y sobrealimentadas.

Objetivos Específicos.

- Describir detalladamente las especificaciones del vehículo, los componentes del kit de sobrealimentación y la configuración del sistema de control.
- Analizar la capacidad de adaptación de cada sistema de inyección ante modificaciones como inducción forzada.
- Evaluar la respuesta del motor en términos de potencia, torque al modificar la alimentación mediante un turbo, presión de combustible e inyectores en un sistema MPI y en una ECU programable.
- Determinar que configuración es la más adecuada para diferentes aplicaciones, como uso diario, tuning o competición, considerando la facilidad de ajuste y el costo/beneficio.

MARCO TEÓRICO

Motores de encendido provocado (MEP)

Los motores de encendido provocado, también conocidos como motores de encendido por chispa, operan bajo el principio del ciclo Otto. Estos motores utilizan una chispa eléctrica para encender una mezcla de aire y combustible comprimida en el cilindro (Dabelstein et al., 2021; Machrafi, 2012).

El ciclo de funcionamiento de un motor de cuatro tiempos incluye las siguientes etapas: admisión, compresión, combustión y escape (Descieux y Feidt, 2006; Machrafi, 2012).

Componentes Principales del Sistema de Encendido

- Bujía: Genera la chispa necesaria para la ignición de la mezcla entre aire/combustible.
- Bobina de Encendido: Transforma la baja tensión de la batería en alta tensión necesaria para crear la chispa.
- Distribuidor: Dirige la alta tensión de la bobina a cada bujía en el momento adecuado.
- Sensor de Posición del Cigüeñal: Determina la posición del pistón y envía señales al sistema de encendido para sincronizar la chispa cilindro (Dabelstein et al., 2021; Descieux y Feidt, 2006; Machrafi, 2012).

Sistema de Encendido del Motor BMW M52TUB28

El motor BMW M52TUB28, que equipa al BMW E46 328i modelo 1999, utiliza un sistema de encendido por chispa totalmente electrónico basado en tecnología Coil-On-Plug (COP). En este sistema, cada cilindro incorpora una bobina de encendido individual instalada directamente sobre la bujía, lo que permite generar una chispa de alta energía sin necesidad de cables de alta tensión, reduciendo pérdidas y mejorando la precisión temporal del encendido. La función principal del sistema es inflamar la mezcla aire-combustible en el momento exacto, garantizando así un proceso de combustión eficiente y un desempeño óptimo del motor. Emplea un sistema de encendido electrónico digital controlada por la ECU Bosch MS42, que gestiona tanto la energía suministrada a cada bobina individual como el

momento exacto de chispa. Este tipo de sistema corresponde a una configuración moderna de encendido por chispa, ampliamente utilizada en motores a gasolina por su precisión, baja pérdida energética y facilidad de diagnóstico (Ge, Parameswaran, y Zhao 2024; Kala et al. 2013).

Existen tecnologías de encendido más avanzadas, como sistemas de corona o encendido por láser, estas se encuentran reservadas para aplicaciones experimentales o de investigación, y no forman parte de los motores de producción como el M52TUB28 (Mullett et al. 2008; Suess et al. 2012).

Las bujías constituyen el elemento central en la iniciación de la combustión dentro de los cilindros. Su estado influye directamente en la fiabilidad operativa, la estabilidad del ralentí, la durabilidad del motor y la eficiencia del proceso de combustión. El mantenimiento adecuado y la sustitución periódica de las bujías son esenciales para asegurar un funcionamiento estable y evitar pérdidas de potencia o aumentos en el consumo de combustible (Stephany, Popardovský, y Lukášik 2024).

El parámetro de avance de encendido, ignition timing, determina el instante exacto en que la bujía produce la chispa en relación con la posición del pistón. Variaciones en el avance o retraso del encendido afectan de manera significativa la potencia, el par motor, el rendimiento térmico y el consumo específico de combustible. Diversos estudios demuestran que un ajuste preciso del momento de encendido permite optimizar el desempeño global del motor bajo distintas condiciones de carga y velocidad (Kale et al. 2019).

La eficiencia del sistema de encendido determina en gran medida la calidad del proceso de combustión. Un encendido adecuado favorece una combustión completa del combustible, mejorando la economía de operación y reduciendo las emisiones contaminantes (Ge et al., 2024; Meyer, 2005). En motores modernos, la integración del sistema de encendido con la unidad de control electrónico (ECU) permite una gestión precisa del avance de chispa, adaptándolo en tiempo real mediante la lectura de sensores como el árbol de levas, cigüeñal, temperatura de refrigerante, mezcla y detonación (Andreas y Wenzel, 2008; Santoso et al., 2022).

Estas capacidades de control avanzado posibilitan mantener un rendimiento óptimo incluso ante variaciones en temperatura ambiental, calidad del combustible, altitud o condiciones de carga.

Funcionamiento de ciclos en los motores de encendido por chispa.

Los motores de encendido por chispa operan con base en un modelo teórico que analiza los procesos de admisión, compresión, combustión y escape, los cuales influyen significativamente en el ciclo de funcionamiento y el rendimiento general del motor (Dabelstein et al., 2021).

Admisión

En el ciclo de admisión, la válvula de admisión se abre para permitir la entrada de la mezcla de aire y combustible en el cilindro. En motores con sistemas de sincronización variable de válvulas (VANOS), el tiempo de apertura y cierre de las válvulas puede ajustarse para optimizar el llenado del cilindro y mejorar la eficiencia del motor (Murtaza et al., 2018; Ribeiro et al., 2006).

Compresión

La válvula de admisión se cierra y el pistón se mueve hacia arriba, comprimiendo la mezcla de aire y combustible. La relación de compresión puede ser variable en algunos motores modernos para mejorar la eficiencia y el rendimiento (Murtaza et al., 2018; Sezer y Bilgin, 2008).

Combustión

Una chispa de la bujía enciende la mezcla comprimida, causando una explosión que empuja el pistón hacia abajo. La sincronización del encendido es crucial y puede ser ajustada para evitar el fenómeno de "knock" o detonación, que puede dañar el motor (Chen et al., 2019; Uguru-Okorie., 2016).

Escape

La válvula de escape se abre y los gases quemados son expulsados del cilindro cuando el pistón se mueve hacia arriba. El sistema VANOS puede ajustar el tiempo de

apertura de la válvula de escape para mejorar la evacuación de los gases y reducir las emisiones (Murtaza et al., 2018; Ribeiro et al., 2006).

Tipos de motores según su alimentación

En el ámbito de la ingeniería automotriz, los sistemas de admisión de aire desempeñan un papel fundamental en el desempeño del motor, ya que influyen directamente en la potencia, eficiencia y comportamiento dinámico del vehículo. En este contexto, se destacan tres configuraciones principales: motores de aspiración natural, turboalimentados y supercargados, cada una con características particulares en cuanto a su funcionamiento y desempeño.

En términos de eficiencia del combustible, los motores de aspiración natural presentan un rendimiento relativamente inferior, al no aprovechar la energía contenida en los gases de escape. Los motores turboalimentados, en cambio, logran una mejor eficiencia energética gracias a una combustión más completa y una mezcla aire-combustible más homogénea (Ramkumar et al., 2023, 2025; Shen et al., 2005, 2006).

En cuanto al tiempo de respuesta, los motores aspirados y supercargados destacan por su reacción inmediata ante el acelerador, mientras que los turboalimentados pueden presentar un retardo conocido como el retraso del turbo (del inglés turbo lag), originado por el tiempo necesario para que el turbocompresor alcance su velocidad de operación (Hu et al., 2017).

Respecto a la complejidad y costo, los motores de aspiración natural son más sencillos en diseño, de menor costo y de mantenimiento más accesible. Los motores turboalimentados y supercargados implican sistemas más complejos, que incluyen componentes adicionales como el turbocompresor, el enfriador de aire (del inglés intercooler) y los conductos de sobrealimentación, lo que incrementa el costo y la necesidad de un mantenimiento especializado (Radden y Schümann, 2004; Serrano et al., 2018).

En relación con las emisiones contaminantes, los motores aspirados suelen generar mayores niveles de hidrocarburos y monóxido de carbono debido a una combustión menos eficiente. En cambio, los turboalimentados pueden reducir las emisiones por una mejor atomización del combustible, aunque en algunos casos pueden incrementar la formación de

óxidos de nitrógeno (NOx) por las altas temperaturas de combustión (Mahmoudi et al., 2017).

En cuanto al comportamiento en altitud, los motores aspirados experimentan una pérdida notable de potencia debido a la menor densidad del aire, mientras que los sistemas de sobrealimentación —tanto turbo como supercargados— compensan esta deficiencia al forzar la admisión de aire a presión, manteniendo un rendimiento más estable. En el caso de los supercargadores, esta ventaja puede verse parcialmente limitada por la carga mecánica del sistema (Abreu y Brójo, 2023; Shen et al., 2005, 2006).

Motores de aspiración natural

Los motores de aspiración natural dependen únicamente de la presión atmosférica y del desplazamiento del motor para admitir el aire necesario durante el ciclo de combustión. Por esta razón, su potencia se encuentra limitada por las condiciones ambientales y la capacidad volumétrica del motor (Ramkumar et al., 2023, 2025; Shen et al., 2005, 2006).

Los motores de aspiración natural operan utilizando únicamente la presión atmosférica para llenar los cilindros, lo que condiciona su eficiencia y rendimiento. A cargas parciales, estos motores pueden alcanzar una mayor eficiencia térmica en comparación con motores supercargados, debido a que no dependen de dispositivos adicionales que incrementen el consumo energético (Zhao y Song, 2025). Asimismo, presentan menor consumo específico de combustible, ya que no utilizan compresores ni turbinas que demanden potencia adicional. Una de sus limitaciones principales radica en las emisiones, pues tienden a generar concentraciones más elevadas de CO y NOx en comparación con motores turboalimentados o supercargados (Kolakoti y Rao, 2020).

Desde la perspectiva del rendimiento, los motores aspirados ofrecen una buena respuesta transitoria, ya que no existe retardo en la entrega de potencia, característica que resulta ventajosa en ciertas aplicaciones dinámicas (Kleeberg et al., 2006). Su potencia y torque son inherentemente menores debido a la imposibilidad de aumentar la densidad del aire admitido sin asistencia externa (Iyer et al., 2011). En estudios comparativos, un motor naturalmente aspirado puede registrar eficiencias térmicas cercanas a 37.5%, inferiores a las alcanzadas por motores con inducción forzada (Taki et al., 2023).

Motores turboalimentados

Los motores turboalimentados utilizan un turbocompresor accionado por los gases de escape, lo que permite incrementar la cantidad de aire admitido y mejorar la eficiencia de combustión. Este principio se traduce en un aumento considerable de la potencia específica del motor, así como en una mejor relación potencia-cilindrada (Liu et al., 2021; Ramkumar et al., 2023, 2025; Shen et al., 2005, 2006).

Los motores turboalimentados mejoran significativamente el rendimiento del motor mediante la recuperación de energía de los gases de escape para comprimir el aire de admisión. Esto permite incrementos sustanciales de potencia y torque, así como mejoras en la eficiencia del combustible (Iyer et al., 2011). Particularmente, la turboalimentación puede reducir el consumo de combustible hasta en un 20% y aumentar el torque de frenado hasta en un 75%, lo que evidencia una clara ventaja frente a los motores aspirados (Ketata y Driss, 2025).

A pesar de estos beneficios, uno de los desafíos más comunes es el “turbo lag”, un retraso transitorio en la entrega de potencia debido al tiempo que tarda el turbocompresor en alcanzar su velocidad de operación (Kleeberg et al., 2006). Los motores turboalimentados siguen mostrando ventajas ambientales claras: registran menores emisiones de hidrocarburos no quemados y CO diferente de los motores NA (Iyer et al., 2011; Ketata y Driss, 2025).

Desde un punto de vista comparativo, un motor turboalimentado puede incrementar la densidad del aire de admisión en un 43% y la potencia máxima en un 29% respecto a un motor naturalmente aspirado (Buchman y Winter, 2016). Además, en aplicaciones avanzadas como el ciclo Miller turboalimentado, la eficiencia térmica puede aumentar del 34.98% al 38.55% al elevar la relación del ciclo Miller entre 19% y 30% (Zhu et al., 2024)

En relación con emisiones, un sistema turbo puede reducir las emisiones de NOx en un 32.4% y el CO en un 28% frente a configuraciones aspiradas (Zhu et al., 2024). En aplicaciones más avanzadas, como motores de hidrógeno de inyección directa turboalimentados, las emisiones de NOx pueden reducirse a menos de 20 ppm mediante combustión pobre y encendido retardado (Bao et al., 2022).

Motores supercargados

Los motores supercargados emplean un compresor impulsado mecánicamente por el propio motor, lo que ofrece una respuesta inmediata al acelerador y un incremento de potencia similar al de los turboalimentados. Al depender directamente de la energía mecánica del motor, los supercargadores pueden reducir la eficiencia global del sistema debido a la carga adicional que imponen (Hu et al., 2017; Ramkumar et al., 2023, 2025).

Los motores supercargados emplean un compresor accionado directamente por el motor, lo que permite una respuesta inmediata y una entrega de potencia más lineal en comparación con los turboalimentados. Estos beneficios mecánicos suelen venir acompañados de ciertos compromisos en eficiencia. Aunque los supercargadores aumentan la potencia, generalmente lo hacen a expensas de una mayor eficiencia de combustible, debido al trabajo mecánico que consumen (Buchman y Winter, 2016; Karabektas, 2009).

La ventaja principal de los motores supercargados radica en su excelente respuesta transitoria, que suele ser superior a la de un motor turboalimentado debido a la ausencia de turbo lag. Desde el punto de vista del control de gases residuales, los supercargadores pueden eliminar la alta presión de escape y reducir la interferencia de pulsaciones, lo cual mejora la uniformidad del barrido y puede compensar parcialmente sus desventajas de consumo (Hu et al., 2017).

En términos de emisiones, estos motores pueden presentar menores emisiones de CO y HC, aunque en ciertos casos pueden aumentar las emisiones de NOx debido a mayores temperaturas de combustión asociadas a la mayor densidad del aire comprimido (Ramkumar et al., 2023, 2025). En comparación con los motores NA y turbo, también presentan una eficiencia térmica menor que los motores aspirados en condiciones de carga parcial, debido a la carga parasitaria del compresor (Zhao y Song, 2025).

Sistemas de Inyección Multipunto (MPI)

Los sistemas de inyección multipunto (MPI) representan una evolución en la tecnología de inyección de combustible al proporcionar un control más preciso sobre la cantidad y el momento en que se inyecta el combustible en cada cilindro. A diferencia de los sistemas de inyección monopunto, que suministran combustible a través de un único inyector

para todos los cilindros, los sistemas MPI inyectan directamente en el puerto de admisión de cada cilindro, logrando una mejor distribución del combustible y una mayor eficiencia de combustión (Bandyopadhyay et al., 2021).

Uno de los principales beneficios de los sistemas MPI es su impacto en el rendimiento y las emisiones del motor. Investigaciones han demostrado que los sistemas MPI duales pueden mejorar el par motor y la potencia, además de optimizar la atomización del combustible. Una mejor atomización facilita una combustión más eficiente, lo que contribuye a una reducción de emisiones contaminantes (Lee et al., 2016).

Estos sistemas presentan ciertos desafíos. La atomización y la mezcla del combustible pueden no ser óptimas en algunas condiciones, afectando la estabilidad de la combustión y el nivel de emisiones. La calibración adecuada del tiempo de inyección y otros parámetros resulta crucial para maximizar el rendimiento y minimizar el impacto ambiental (Hushim et al., 2012).

Sistema MPI Convencional

El sistema de inyección multipunto convencional emplea inyectores encargados de suministrar combustible en varios puntos del colector de admisión, lo cual permite formar una mezcla aire-combustible más homogénea. Este diseño contribuye a una operación más eficiente del motor y reduce la acumulación de depósitos en las válvulas de admisión, favoreciendo un funcionamiento más limpio y estable (Shibata et al., 2017). Este sistema presenta desafíos importantes, especialmente en lo referente a la necesidad de controlar la transferencia térmica hacia el tanque de combustible y garantizar que el combustible permanezca en fase líquida bajo cualquier condición de operación, lo que resulta fundamental para evitar pérdidas de eficiencia y problemas de vaporización prematura (Agostinelli et al., 2011).

Sistema Dual MPI

El sistema Dual MPI constituye una solución híbrida que integra la inyección multipunto con la inyección directa, aprovechando las ventajas combinadas de ambas tecnologías. Esta arquitectura mejora la atomización del combustible y aumenta la robustez frente a variaciones en el flujo de aire de admisión, lo cual resulta especialmente beneficioso

en regímenes de alta carga. Asimismo, la vaporización del combustible en el colector nos da un efecto de refrigeración que reduce la probabilidad de detonación y contribuye a un mejor rendimiento térmico y operativo del motor (Shibata et al., 2017).

Sistema MPI para Gas Licuado de Petróleo (LPG)

El sistema MPI diseñado para operar con Gas Licuado de Petróleo (LPG) emplea inyección en fase líquida, una característica que representa una ventaja significativa frente a los sistemas de inyección en fase gaseosa. Este tipo de inyección permite obtener una mezcla más fría y densa, lo que incrementa la eficiencia volumétrica del motor y favorece un proceso de combustión más eficiente. Como resultado, se mejora el rendimiento del motor y se reducen las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), debido a la disminución de la temperatura de combustión asociada a la inyección líquida de LPG (Agostinelli et al., 2011).

Unidades de Control Electrónico Programables (ECU)

Las ECU programables (standalone) ofrecen una solución más avanzada y flexible para el control del sistema de inyección de combustible. A diferencia de las ECU OEM, que tienen parámetros fijos y están diseñadas para cumplir con normativas estándar, las ECU programables permiten modificar en tiempo real la sincronización, duración y presión de la inyección, proporcionando un control más preciso sobre el proceso de combustión. Esto se traduce en un mejor desempeño del motor y en una reducción significativa de las emisiones (Carpenter et al., 2015).

En términos de rendimiento, las ECU programables optimizan la combustión mediante ajustes precisos en la relación aire-combustible y el avance de encendido, lo que resulta en un aumento significativo del torque y la potencia. Esta capacidad de maximizar la fuerza generada en cada ciclo de combustión es especialmente relevante en motores con inducción forzada, donde el control preciso de la inyección permite aprovechar al máximo el potencial del motor. Además, la adaptabilidad de estos parámetros a las condiciones de conducción en tiempo real asegura que el motor entregue la máxima potencia disponible en todo momento (Kadekar y Wakankar, 2018).

Además, las ECU programables se extiende a la capacidad de realizar una calibración precisa del motor, adaptando los parámetros de inyección a las necesidades específicas del

vehículo y del conductor. Esta flexibilidad es crucial para optimizar el rendimiento en diversas condiciones de conducción, desde la ciudad hasta la pista. Además, la posibilidad de modificar los parámetros de la ECU permite realizar cambios en el motor, como la instalación de un turbo, y aprovechar al máximo el rendimiento después de dichas modificaciones. Gracias a esto las ECU programables ofrecen un control superior sobre el sistema de inyección, resultando en un aumento del torque y la potencia, una reducción de las emisiones y una mayor adaptabilidad del motor a diferentes condiciones y configuraciones (Luo et al., 2015).

Las ECU programables destacan por su capacidad para reducir emisiones contaminantes al controlar con precisión la mezcla aire-combustible, optimizando la combustión y disminuyendo gases nocivos como HC, CO y NO_x. Además, logran un equilibrio entre rendimiento y sostenibilidad, permitiendo mantener alta potencia sin incrementar significativamente el consumo de combustible o las emisiones, gracias a una calibración precisa y adaptativa a las condiciones de conducción en tiempo real (Farinango-Herrera et al., 2024).

Alimentación Forzada

La alimentación forzada se refiere a la técnica de aumentar la cantidad de aire que entra en el motor, lo que permite una mayor combustión agregando también más potencia. Esta técnica se logra principalmente mediante el uso de turbo compresores y supercargadores. Ambos dispositivos comprimen el aire de admisión, aumentando su densidad y permitiendo que más oxígeno entre en los cilindros del motor, lo que mejora la eficiencia de la combustión y la potencia del motor (Lee et al., 2017; Lee et al., 2016; Tripathi et al., 2019).

Funcionamiento de Turbo Compresores

Utilizan los gases de escape del motor para accionar una turbina que, a su vez, impulsa un compresor que comprime el aire de admisión. Esto permite una mayor eficiencia al reutilizar la energía de los gases de escape (Lee et al., 2017; Lee et al., 2016; Santaella et al., 2024; Subramani et al., 2020).

Funcionamiento de Supercargadores

Son accionados mecánicamente por el motor, generalmente a través de una correa conectada al cigüeñal. Comprimen el aire de admisión directamente, dándonos una respuesta más rápida en comparación con los turbocompresores, aunque a costa de una mayor carga parasitaria en el motor (Pradhan y Jeemon, 2018; Temming y Kauder, 2006; Tripathi et al., 2019).

Tipos de Turbo Compresores

Los turbocompresores pueden clasificarse en sistemas de geometría fija, geometría variable y secuenciales, cada uno orientado a optimizar la eficiencia del flujo de gases de escape (Dziedzic y Danilecki, 2018).

Turbo Compresores de Geometría Fija

Tienen una configuración simple y son más económicos, pero su eficiencia puede variar significativamente con la velocidad del motor (That's blown it, 2004; Wang y Qian, 2010).

Turbo Compresores de Geometría Variable (VGT)

Ajustan la geometría de la turbina para optimizar el flujo de gases de escape a diferentes velocidades del motor, mejorando la eficiencia y reduciendo el "turbo lag" (Eichhorn et al., 2010; Rose et al., 2011).

Turbo Compresores Secuenciales

Utilizan dos turbocompresores de diferentes tamaños que operan en diferentes rangos de velocidad del motor para maximizar la eficiencia y la respuesta (Dziedzic y Danilecki, 2018; That's blown it, 2004)

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES, EQUIPOS E INSTRUMENTOS

1.1 Descripción del vehículo de estudio

El vehículo empleado para el desarrollo corresponde a un BMW E46 328i del año 1999, el cual será sometido a mediciones de torque y potencia, equipado con un motor M52TUB28, de seis cilindros en línea, con un desplazamiento de 2.8 litros y un sistema de inyección multipunto secuencial (MPI). Este motor, de tipo MEP (Motor de Encendido por Chispa), fue seleccionado por su diseño robusto, su disponibilidad de información técnica y la posibilidad de implementar sistemas de gestión electrónica programable.

El vehículo se encuentra en condiciones mecánicas óptimas y mantiene la configuración original del sistema de admisión y escape para la etapa de análisis atmosférico como se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1. Vehículo experimental.



Fuente: Autor

La **Tabla 1** muestra las especificaciones del motor original sin modificaciones y con sus valores típicos.

Tabla 1. Ficha técnica de BMW E46 328i

Elemento	Especificación Original (OEM)
Código de motor	M52TUB28
Tipo de motor	6 cilindros en línea, gasolina
Cilindrada	2.793 cm ³
Diámetro x carrera	84.0 mm × 84.0 mm
Relación de compresión	10.2 : 1
Distribución	DOHC, 24 válvulas, doble VANOS
Sistema de inyección	Multipunto secuencial (MPI, Siemens MS42)
Alimentación de aire	Aspiración natural
Potencia máxima original	193 HP @ 5.500 rpm
Par máximo original	280 Nm @ 3.500 rpm

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica (Km77 s. f.).

Descripción de especificaciones de motor y medidas del vehículo BMW E46 328i.

1.2 Equipos e instrumentos utilizados

Para el desarrollo de las pruebas experimentales se utilizaron los siguientes instrumentos y equipos:

- Banco dinamométrico de chasis: empleado para medir la potencia y el torque entregados por el motor bajo diferentes condiciones de carga.
- Sensor AFR (Air-Fuel Ratio): tipo banda ancha, alimentado por 12 V DC, compatible con sensores banda ancha UEGO LSU 4.2 y 4.9, lo que permite medir con precisión un rango de 10.0:1 a 20.0:1. Opera en condiciones térmicas exigentes, con un rango de -30 °C a +120 °C, y dispone de una salida analógica de 0 a 5 V para integración con ECU programables o sistemas de datalogging. Su tiempo de respuesta menor a 150 ms lo hace adecuado para motores turboalimentados y procesos de calibración donde se requieren variaciones rápidas y precisas de la mezcla aire/combustible (Generic Manufacturer s. f.).
- Software TunerStudio: herramienta empleada para la configuración, adquisición de datos y análisis del desempeño motor (EFI Analytics s. f.).
- Manómetro de presión de combustible y regulador independiente: para verificar y estabilizar la presión del sistema de alimentación.

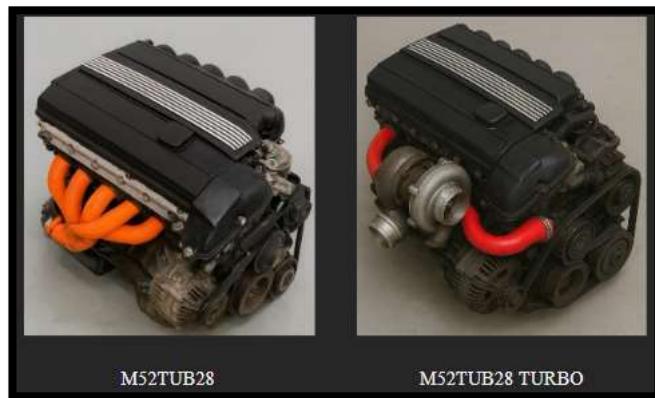
- Tacómetro y datalogger digital: para registrar la velocidad del motor, carga y parámetros dinámicos.

1.3 Elementos para modificaciones Mecánicas y de Transmisión

Con el objetivo de optimizar el desempeño del motor y permitir la implementación de estrategias avanzadas de calibración, se realizaron diversas modificaciones tanto en el sistema mecánico como en el sistema electrónico del vehículo experimental BMW E46 328i.

Estas adaptaciones fueron necesarias para integrar un sistema de sobrealimentación y una ECU programable, garantizando la compatibilidad entre los componentes y el control preciso de los parámetros del motor como se muestra en la **Figura 2**.

Figura 2. Comparativa del motor stock y el modelo conceptual del motor modificado.



Fuente: Autor

Modelo conceptual del motor en configuración original (stock) vs con modificaciones implementadas.

1.3.1 Embrague Stage 5

El sistema de embrague desempeña un papel fundamental en la transmisión de potencia entre el motor y la caja de cambios. En configuraciones de alto desempeño, donde el motor ha sido modificado mediante la incorporación de un sistema de alimentación forzada (turboalimentación) y una ECU programable, el embrague original del vehículo no es capaz de soportar el incremento de torque generado. La **Figura 3** muestra el embrague ensamblado en el motor.

Figura 3. Instalación de embrague Stage 5.



Fuente: Autor

Se instaló en el vehículo el embrague ClutchMax Stage 5 Performance, el cual está diseñado para aplicaciones de competencia o alto rendimiento.

Este conjunto está conformado por una placa de presión reforzada, un disco cerámico de seis pastillas (“6-puck”) con acople rígido y un volante de inercia liviano fabricado en acero cromolibdeno (chromoly), lo que le permite soportar torques de hasta 454 lb-ft y potencias cercanas a 500 HP (ClutchMax s. f.), como se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Especificaciones del embrague stage 5.

Parámetro técnico	Valor / Especificación
Tipo	Embrague de alto desempeño con volante liviano
Capacidad máxima de torque	454 lb-ft
Potencia soportada	≈ 500 HP
Material del disco	Cerámica sinterizada, 6 pastillas
Tipo de cubo (hub)	Rígido, sin amortiguador torsional
Diámetro del disco	9 7/16" (≈ 240 mm)
Número de estrías (spline)	10 (1 1/8" eje transmisión BMW)
Placa de presión	Hierro fundido nodular de alta resistencia
Material del volante	Acero Chromoly 4140 forjado
Peso del volante	≈ 5.9 a 6.8 kg (reducción ≈ 45 %)
Balaceo dinámico	Hasta 15 000 rpm
Tipo de acople	Seco, monodisco

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha tecnica(ClutchMax s. f.).

Descripción y dimensiones de los componentes que componen el embrague para el vehículo BMW E46 328i.

1.3.2 Bomba de combustible de alto flujo

Esta bomba es eléctrica de tipo sumergida y forma parte de la serie de alto flujo de Quantum, la cual se caracteriza por su eficiencia volumétrica, durabilidad y compatibilidad con combustibles alternativos, incluyendo mezclas de etanol (E85/Flex Fuel). Su capacidad nominal de 340 litros por hora (LPH) la convierte en una opción ideal para motores de seis cilindros en línea como el BMW M52B28, utilizados en el BMW E46 328i, cuando se implementan mejoras en el sistema de inyección o se incorpora un kit de turboalimentación (Quantum Fuel Systems s. f.).

Desde el punto de vista funcional, la Quantum 340 LPH ofrece una curva de flujo estable incluso en presiones elevadas, lo cual es fundamental para mantener una mezcla aire/combustible precisa en motores con mapas de inyección personalizados o ECU programable. Esto contribuye directamente a la estabilidad del AFR (Air/Fuel Ratio) y al aumento del desempeño general del motor, evitando caídas de presión que podrían generar detonación o pérdida de potencia como se muestra en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Especificaciones de la bomba de alto flujo.

Parámetro técnico	Valor / Especificación
Tipo	Eléctrica interna (<i>in-tank</i>) de alto flujo
Caudal nominal	340 L/h @ 40 psi (2.8 bar)
Presión máxima operativa	125 psi (8.6 bar)
Voltaje nominal	12 V DC
Corriente de operación	13–15 A (según carga)
Diámetro del cuerpo	39 mm
Longitud total	120 mm (aprox.)
Material del cuerpo	Acero con recubrimiento anticorrosivo
Tipo de válvula de derivación	Interna calibrada, alta presión
Compatibilidad de combustible	Gasolina, E85, mezclas etanol/flex fuel
Conector eléctrico	2 pines tipo EV1
Configuración de instalación	Sumergida con kit de mangueras y prefiltro
Temperatura de operación	–40 °C a +80 °C

Fuente: *Elaboración propia a partir de ficha técnica(Quantum Fuel Systems s. f.).*

Especificaciones de la bomba de alto flujo instalada en el BMW E46 328i.

1.3.3 Unidad de control electrónico programable ECU

Para la gestión electrónica del motor se seleccionó una unidad de control programable tipo standalone, en reemplazo de la ECU basada en Megasquirt utilizada en el BMW E46 328i.

La ECU programable empleada presenta una arquitectura diseñada para motores de combustión interna de hasta seis cilindros en línea, siendo completamente compatible con el motor M52B28 del vehículo de estudio. Dispone de entradas para sensores de cigüeñal con rueda fónica 60-2, sensor de posición del acelerador (TPS), sensor de presión absoluta del múltiple (MAP), sensor de temperatura del aire de admisión (IAT), sensor de temperatura del refrigerante (ECT) y sensor de oxígeno de banda ancha, los cuales permiten una lectura precisa de las variables operativas del motor, como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4. Unidad de control electrónico programable ECU



Fuente: Autor

El sistema permite la configuración de mapas tridimensionales de inyección (VE), encendido (Timing) y mezcla aire-combustible (AFR), los cuales pueden ajustarse en tiempo real mediante el software de calibración Tuner Studio. Asimismo, la ECU cuenta con funciones avanzadas como registro de datos (datalogging), control de lanzamiento (launch control), cambio de mapas durante la operación (dual map), y protecciones contra sobrevoltaje, cortocircuito y polaridad invertida.

La implementación de esta unidad de control programable en el proyecto permite evaluar de manera cuantitativa el impacto que tiene una gestión electrónica configurable

frente a un sistema original. Con ello, se busca determinar las mejoras obtenidas en términos de potencia, eficiencia térmica y respuesta del motor, especialmente al integrar un sistema de alimentación forzada mediante turbocompresor.

La **Tabla 4** muestra las diferentes condiciones, especificaciones y herramientas que incluyen la computadora programable.

Tabla 4. Especificaciones de la unidad de control electrónico programable ECU.

Parámetro Técnico	Descripción
Tipo de ECU	Programable tipo <i>Standalone</i>
Aplicación	Motores de combustión interna (gasolina) hasta 6 cilindros
Tipo de gestión	Control secuencial de inyección y encendido
Entradas principales	Sensor de cigüeñal (60-2), TPS, MAP, IAT, ECT, sensor de oxígeno (wideband)
Salidas principales	6 inyectores, 6 bobinas, relé de bomba, ventilador, boost solenoid
Mapas configurables	Inyección (VE), encendido (Timing), mezcla (AFR), y presión de sobrealimentación (Boost)
Resolución de mapas	16×16 o superior (RPM vs %TPS o MAP)
Velocidad de procesamiento	Frecuencia de muestreo de hasta 1 kHz por canal
Voltaje de operación	9 a 18 V DC
Protecciones	Contra sobrevoltaje, cortocircuito y polaridad invertida
Comunicación	USB o Bluetooth (según versión)
Software de calibración	Tuner Studio
Modos de control	Open Loop, Closed Loop, Launch Control, Boost Control, Dual Map
Compatibilidad de sensores	NTC, hall, inductivos y banda ancha (wideband O ₂)
Funciones adicionales	Registro de datos (<i>datalogging</i>), control de ventilador, corte de RPM, cambio de mapa en marcha

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica (EFI Analytics s. f.-a).

1.3.4 Kit turbo

En el presente proyecto, se seleccionó el kit de sobrealimentación maXpeedingrods T04E (turbo + intercooler + tuberías + wastegate) para la unidad de estudio, un BMW E46 328i de 1999. La justificación de esta elección radica en su capacidad declarada para

incrementar la potencia del motor dentro del rango de ≈ 350 HP bajo presiones de turbo moderadas (7.5 a 14.5 psi), lo cual lo convierte en una opción adecuada para un montaje de performance que preserve la durabilidad del tren motriz, como se muestra en la **Figura 5**.

Figura 5. Turbocompresor a instalar en el motor M52TUB28.



Fuente: Autor

Turbocompresor a instalar en el vehículo BMW para la configuración de sobrealimentación.

Este conjunto es compatible con motores de 4 a 6 cilindros en línea, con desplazamientos entre 1.5 l a 3.0 l, lo que permite su adaptación al motor M52B28 del E46, siempre y cuando se realicen las modificaciones de soporte necesarias (sistema de combustible, intercooler, colector de escape, línea de aceite, etc.). La configuración incluye un turbo de diámetro adecuado estimar $A/R \approx 0.63$ y un intercooler de tamaño aproximado de $27'' \times 7'' \times 2.5''$, con entrada de $2.5''$ que facilita una mayor eficiencia de intercambio térmico y menor pérdida de carga de aire al estar sobrealimentando el motor (MaxpeedingRods s. f.).

La **Figura 6** muestra el intercooler o enfriador de aire que será instalado en el vehículo.

Figura 6. Intercooler a instalar en el motor M52TUB28.



Fuente: Autor

La implementación de este kit en la tesis se fundamenta en el análisis de cómo un sistema de sobrealimentación estructurado contribuye al aumento del flujo de aire admisible por el motor, lo cual, en conjunción con una gestión de combustible adecuada (como la que se realiza mediante la ECU programable), permite elevar el desempeño del vehículo.

Asimismo, se busca demostrar que la mejora en el sistema de alimentación (aire + combustible) requiere también que la transmisión y otros subsistemas (embrague, volante, refrigeración) estén dimensionados para ese nuevo nivel de carga, garantizando fiabilidad y consistencia.

La **Tabla 5** muestra las especificaciones del embrague.

Tabla 5. Especificaciones del kit turbo a instalar.

Parámetro técnico	Especificación aproximada / Datos recopilados
Potencia estimada que puede soportar el kit	Hasta ~350 a 400 HP para motores de 1.5 a 3.0 l en configuración de sobrealimentación.
Rango de presión de sobrealimentación sugerida	~7.5 a ~14.5 psi
Tipo de configuración del turbo	Flange de entrada: T3/T4 4-bolt.
A/R Turbina (Turbine housing)	Aproximadamente 0.63 A/R para la versión T04E del kit.

A/R Compresor (Compressor housing)	Aproximadamente 0.50 A/R para la sección del compresor.
Diámetro de entrada del compresor	~72 mm.
Diámetro de salida del compresor	~53 mm.
Material de la carcasa de la turbina	Hierro dúctil (ductile iron); resistencia térmica alta (hasta ~700 °C o más) en algunos listados.
Material de la rueda de turbina	Aleación de alta resistencia (por ejemplo, K418) con gran estabilidad térmica.
Intercooler (tamaño estimado)	~27" × 7" × 2.5" en algunos listados de kit universal.
Inlet del intercooler	Aproximadamente 2.5" indicado en las especificaciones del kit universal.
Tipo de alimentación de aceite	Ingreso tipo 1/8" NPT según listado básico del turbo.

Fuente: Elaboración propia a partir de ficha técnica (MaxpeedingRods s. f.).

Descripción los componentes y medidas de cada uno los componentes pertenecientes al kit del turbocompresor.

CAPÍTULO 2

INSTALACIÓN DEL TURBOCOMPRESOR EN EL MOTOR M52TUB28

2.1 Instalación de la ECU programable y verificación previa en modo atmosférico

La primera etapa consiste en la instalación y puesta en funcionamiento de la ECU programable, la cual se caracteriza por ser un sistema plug-and-play diseñado específicamente para la arquitectura eléctrica de los motores BMW M52. Debido a esta compatibilidad, la instalación no requirió modificaciones en el arnés original ni adaptaciones adicionales, permitiendo que el módulo se integrara de forma directa en la ubicación destinada para la ECU de fábrica. Esta etapa se ejecutó antes del montaje del sistema turbo, con el objetivo de validar el comportamiento del motor en su configuración atmosférica y asegurar que todos los sensores, actuadores y canales de control funcionaran adecuadamente antes de someter el conjunto a condiciones de sobrealimentación como se muestra en la **Figura 7**.

Figura 7. Instalación de unidad de control electrónico programable ECU.



Fuente: Autor

Una vez instalada la ECU, se procedió a cargar un mapa base específico para el motor M52TUB28 en condición naturalmente aspirada. Este mapa permitió establecer los parámetros iniciales de encendido, inyección y control de ralentí, facilitando el arranque del motor y ofrece una referencia clara para evaluar su desempeño sin modificaciones mecánicas adicionales. Durante esta fase se verificó la lectura correcta de los sensores de posición de cigüeñal, árbol de levas, temperatura del refrigerante, temperatura del aire de admisión y sensor de oxígeno, así como el funcionamiento de los canales de activación de bobinas e inyectores. Esta evaluación previa resultó fundamental para descartar fallas eléctricas,

inconsistencias en el sistema de alimentación y posibles interferencias en las señales electrónicas.

El funcionamiento estable del motor en su configuración atmosférica permitió obtener un punto de partida confiable para la segunda fase del proyecto, correspondiente a la instalación del turbocompresor y a la posterior calibración bajo sobrealimentación. Adicionalmente, el uso anticipado de la ECU programable facilitó la comparación entre dos escenarios: el motor en estado stock con gestión electrónica original y el motor atmosférico gestionado por la ECU standalone. Esta doble referencia fue esencial para analizar diferencias en mezcla, encendido, eficiencia volumétrica y emisiones, así como para interpretar los resultados obtenidos en la segunda pasada de análisis de gases realizada posteriormente con el sistema de sobrealimentación instalado.

2.2 Diseño y planificación del sistema de sobrealimentación

La primera etapa consiste en el diseño y planificación integral del sistema de sobrealimentación destinado al motor BMW M52TUB28. Este proceso inició con la selección del turbocompresor T04E, considerado adecuado para un motor de seis cilindros por su capacidad de flujo, su carcasa compresora A/R 0.50 y su turbina A/R 0.63 con brida T3. Se evaluó la compatibilidad dimensional con el vano motor del BMW E46, asegurando el espacio necesario para el múltiple tubular, el enfriador de aire, las tuberías de presión y los conductos de lubricación, manteniendo el múltiple de admisión en su forma original, tal como se muestra en la **Figura 8**.

Figura 8. Motor M52TUB28 Stock.



Fuente: Autor

Durante esta etapa se definió la arquitectura general del kit turbo, las trayectorias del aire de admisión, los puntos de fijación estructural, la ubicación frontal del enfriador de aire (del inglés intercooler) y la integración de una válvula de descarga externa y una válvula de alivio. Asimismo, se analizaron los materiales y diámetros de tubería a emplear, seleccionando aluminio de 2.5 pulgadas para mantener un flujo óptimo con mínimas pérdidas de carga.

2.3 Preparación del motor y adecuación del vano motor

En la segunda etapa se realizó una preparación previa del motor con el fin de garantizar la correcta instalación del sistema. Se inspeccionaron componentes críticos como juntas, soportes del múltiple de escape y líneas de lubricación, reemplazándose aquellos elementos que pudieran comprometer la estanqueidad.

Se retiró el múltiple de escape original para dar paso al múltiple tubular con brida T3. Posteriormente, se verificó su alineación con la salida de la culata y se comprobó la distancia libre respecto al chasis, la columna de dirección y los elementos térmicamente sensibles, como se muestra en la **Figura 9**.

Figura 9. Preparación para Header en M52TUB28.



Fuente: Autor

También se confirmó la correcta orientación del CHRA del turbocompresor para que el retorno de aceite quedara perfectamente vertical, condición indispensable para asegurar una evacuación gravitacional adecuada hacia el cárter. Antes de proceder con el montaje

definitivo se revisó la compatibilidad del tubo de bajada de escape y se identificaron puntos idóneos para la instalación.

2.4 Montaje del turbocompresor, wastegate y sistema de escape

La tercera etapa correspondió al montaje del hardware principal del sistema de sobrealimentación. El turbocompresor T04E fue fijado al múltiple tubular utilizando la tornillería específica y juntas metálicas capaces de soportar altas temperaturas. A continuación, se instaló la wastegate externa de 38 mm en el puerto designado, conectándola a la fuente de presión del compresor para regular la apertura según la presión objetivo como se muestra en la **Figura 10**.

Figura 10. Instalación de Wastegate en M52TUB28.



Fuente: Autor

En esta fase se fabricó y adaptó el downpipe desde la salida de la turbina, incorporando un tramo flexible para absorber dilataciones térmicas y vibraciones. Este conducto se conectó posteriormente al sistema de escape del vehículo, garantizando un flujo continuo y sin restricciones.

Además, se colocaron aislantes térmicos en zonas cercanas a mazos eléctricos y componentes sensibles con el fin de reducir la transferencia de calor proveniente del conjunto turbocompresor como se muestra en la **Figura 11**.

Figura 11. Instalación sistema de escape M52TUB28.



Fuente: Autor

Instalación del sistema de escape, incluyendo la tubería y el tramo flexible, asegurando la correcta alineación, estanqueidad y absorción de vibraciones del conjunto.

2.5 Instalación del intercooler, tuberías de presión y válvula de descarga

En esta etapa se centró en la instalación del sistema de enfriamiento del aire de sobrealimentación y el conjunto de tuberías. El intercooler frontal se montó en el parachoques delantero utilizando soportes metálicos fabricados a medida, asegurando la exposición directa al flujo de aire para maximizar su eficiencia térmica como se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Instalación sistema de enfriamiento.



Fuente: Autor

Se procedió a conectar la salida del turbocompresor hacia el intercooler empleando tubería de aluminio de 2.5 pulgadas, asentada mediante abrazaderas tipo T-Bolt para evitar fugas a alta presión. Desde la salida del intercooler se canalizó el aire hacia el cuerpo de aceleración mediante otro tramo de tubería, en el cual se integró la válvula de descarga, cuya función es liberar el exceso de presión cuando la mariposa se cierra, adicionalmente también se instaló la toma para el medidor de boost de presión del turbo, adecuando un solo cuerpo desde el intercooler hasta la admisión ya que esto nos permitiría optimización de espacio y evitar pérdida de boost como se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Instalación sistema de admisión.



Fuente: Autor

Durante esta etapa también se revisaron posibles interferencias mecánicas y se realizaron ajustes menores en soportes y curvas de tubería para garantizar un flujo estable y sin estrangulamientos.

2.6 Construcción y adaptación del catalizador a medida para el sistema turbo

La última etapa consiste en la construcción de un catalizador fabricado a medida, diseñado a partir del catalizador original del BMW E46, pero adaptado específicamente al nuevo sistema turbo.

El catalizador se sometió a pruebas de contrapresión y revisión de soldaduras para asegurar un flujo óptimo de gases y garantizar su compatibilidad con el nuevo conjunto turboalimentado como se muestra en la **Figura 14**.

Figura 14. *Instalación de catalizador.*



Fuente: *Autor*

Se replanteó la geometría interna y externa del componente, reubicando las bridas y puntos de unión para alinearse correctamente con el tubo de bajada (del inglés downpipe) y la salida del turbo. Además, se incorporó agujeros con rosca para los sensores necesarios y así conservar la lógica de lectura del sistema original, ajustando su posición para trabajar correctamente en el entorno post-turbo.

2.7 Adecuación del sistema de alimentación de combustible

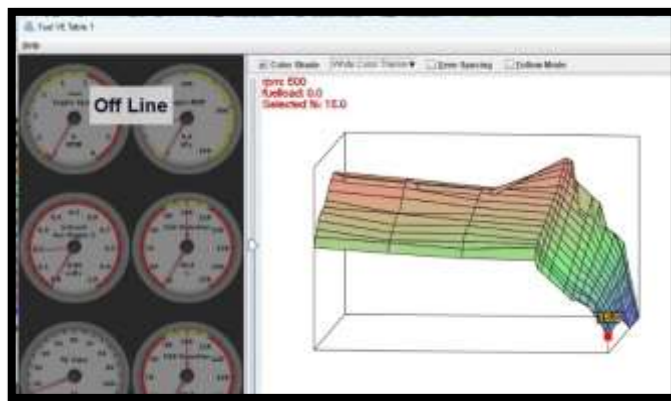
En esta etapa se realizaron modificaciones en el sistema de suministro de combustible para adaptarlo a los nuevos requerimientos del motor sobrealimentado. Se instaló una bomba de alto flujo con capacidad superior a la bomba original, permitiendo mantener una presión y caudal adecuados incluso bajo altos niveles de demanda. También se integró un regulador de presión de combustible ajustable para establecer una presión base según las necesidades de calibración. Se verificó el estado de las líneas de combustible, inspeccionando posibles fugas, fatiga o puntos de obstrucción. La revisión de inyectores y su compatibilidad con los pulsos eléctricos generados por la ECU programable formaron parte de esta etapa, garantizando que la mezcla de air

2.8 Puesta en marcha, pruebas en banco y calibración final

La última etapa incluyó la puesta en marcha del motor, los ensayos en banco y la calibración definitiva del sistema de sobrealimentación. Una vez completado el montaje, el motor fue encendido para verificar fugas en las líneas de aceite, combustible y presión. Se ajustó la presión base del turbocompresor de acuerdo con el resorte de la wastegate y se

estabilizó el ralentí mediante ajustes preliminares de mezcla y avance de encendido. Posteriormente, el vehículo se sometió a pruebas en banco de rodillos para registrar variables críticas como AFR, presión de turbo, temperatura del aire de admisión, presión de combustible y temperatura de gases de escape. Con estos datos se calibraron las tablas de VE, AFR y timing en distintos rangos de carga, evitando detonaciones y asegurando una combustión eficiente como se muestra en la **Figura 15**.

Figura 15. Software para configuración del sistema.



Fuente: Autor

Se muestra cual es el software utilizado para la calibración de la computadora programable.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL

3.1 Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con motor stock

El análisis de emisiones realizado con el motor en estado completamente original sin modificaciones y con la ECU OEM muestra un comportamiento estable y razonable con la calibración OEM realizada por el fabricante BMW para el motor M52TUB28. Los valores medidos para CO, CO₂, HC, O₂ y lambda se mantienen dentro de los rangos esperados para un motor de inyección multipunto de combustible, lo que confirma un funcionamiento adecuado del sistema de inyección y del conjunto sensor/actuador.

En el régimen de ralentí (800 RPM), se obtuvo una relación lambda de 0.951, que indica una mezcla ligeramente rica, condición normal en motores con normativa previa a EURO-3, donde la ECU tiende a enriquecer ligeramente para garantizar estabilidad del ralentí y minimizar variaciones de combustión. Los valores de CO (2.24 %) y HC (334 ppm) se mantienen dentro de niveles aceptables para un motor atmosférico de esta generación como se muestra en la **Tabla 6**.

Tabla 6. Análisis de gases con motor stock a 800 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a Ralentí						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	800	2.24	13.2	334	0.64	0.951

Fuente: Autor

Los resultados del análisis de gases de escape en condición de ralentí indican que el vehículo cumple con los requisitos establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204 y en cumplimiento con el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 017, vigentes para vehículos a gasolina de 1999 en circulación, al no evidenciar desviaciones que comprometan el proceso de combustión (INEN, 2010; INEN, 2012).

A 1000 y 2000 RPM, la mezcla se aproxima progresivamente hacia un valor cercano a la estequiometría, con lambda de 0.984 y 0.996, respectivamente. Esto muestra la correcta actuación del sistema de control en lazo cerrado (lazo cerrado), donde la sonda lambda regula

de forma controlada el AFR alrededor de 14.7:1 para optimizar el proceso de combustión y reducir emisiones contaminantes. Los niveles de CO disminuyen con respecto al ralentí y el O₂ residual se mantiene bajo, demostrando una buena eficiencia de combustión como se muestra en la **Tabla 7** y la **Tabla 8**.

Tabla 7. Análisis de gases con motor stock a 1000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 1000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	1000	1.32	13.7	287	0.75	0.984

Fuente: Autor

Tabla 8. Análisis de gases con motor stock a 2000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 2000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	2000	1.20	13.8	176	0.83	0.996

Fuente: Autor

En el régimen de 3000 y 4000 RPM, el motor conserva una tendencia estable hacia la mezcla estequiométrica, con valores de lambda entre 0.986 y 0.989, lo que coincide con el comportamiento normal de los motores BMW equipados con sistemas de inyección multipunto y con el sistema de combustible. Los niveles de hidrocarburos sin combustionar (HC entre 208 y 242 ppm) se mantienen dentro de márgenes razonables para el año del vehículo y tipo de motor, y no presentan indicios de combustiones incompletas como se muestra en la **Tabla 9** y la **Tabla 10**.

Tabla 9. Análisis de gases con motor stock a 3000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 3000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	3000	1.31	13.4	242	0.75	0.986

Fuente: Autor

Tabla 10. Análisis de gases con motor stock a 4000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 4000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	4000	1.21	13.6	208	0.73	0.989

Fuente: Autor

Finalmente, a 5000 RPM, se obtuvo un valor de lambda de 0.959, que representa una mezcla levemente enriquecida. Este enriquecimiento es característico en motores atmosféricos que operan bajo cargas más elevadas, ya que el sistema incrementa la cantidad de combustible para mejorar la refrigeración interna de la cámara, prevenir detonación y asegurar la durabilidad del motor en condiciones de alta demanda. Los valores de CO y HC se mantienen dentro de rangos normales como se muestra en la **Tabla 11**.

Tabla 11. Análisis de gases con motor stock a 5000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 5000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	5000	1.70	13.5	225	0.39	0.959

Fuente: Autor

En términos generales, los parámetros analizados demuestran un comportamiento razonable con el diseño original del M52TUB28, evidenciando:

- Combustión estable y controlada en todos los regímenes evaluados.
- Mezcla ligeramente rica en ralentí y altas RPM, lo cual es adecuado para la estabilidad y protección del motor.
- Operación en torno a mezcla estequiométrica en regímenes medios, garantizando baja emisión de contaminantes y eficiencia óptima.
- Ausencia de indicios de fallas de sensores, fugas de vacío o desajustes en el sistema de control.

3.2 Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con Ecu programable

Es importante señalar que la potencia máxima en motores de encendido por chispa se obtiene generalmente en un rango cercano a mezclas levemente pobres o

estequiométricas. En este punto, la combustión es más rápida y eficiente, debido a una mayor temperatura de la cámara y a una presión de expansión favorable. El aumento de potencia registrado puede asociarse a que la calibración realizada redujo un exceso previo de enriquecimiento en áreas específicas del mapa de combustible.

Es necesario considerar que las pruebas de gases se realizaron en condiciones de baja carga y régimen estacionario, mientras que el dinamómetro opera bajo altas cargas y aperturas del acelerador próximas al 100 %, donde intervienen otros valores en las tablas de combustible dentro de la ECU programable. Por lo cual, la mezcla observada durante la medición de emisiones no refleja directamente la mezcla real utilizada por el motor en el momento en que alcanzó su potencia máxima. Es decir, el motor evidenció mezcla pobre únicamente en condiciones de carga parcial, mientras que en condiciones de plena carga donde se midió la potencia, el vehículo trabajó en un rango más adecuado.

El incremento de potencia no se debe a operar con mezclas extremadamente pobres como las reflejadas en los análisis de ralentí y medias RPM, sino a que la calibración eliminó un exceso de combustible previo en la zona de plena carga, permitiendo al motor aproximarse temporalmente a un punto de mayor eficiencia térmica. Las mezclas pobres detectadas en condiciones de carga parcial evidencian la necesidad de una optimización adicional del mapa de inyección para garantizar seguridad térmica, evitar detonación y asegurar la durabilidad del motor.

A 800 rpm el motor opera con una mezcla rica ($\lambda = 0.923$), lo cual es normal para mantener estabilidad. El CO elevado (2.73 %) y los HC moderados (404 ppm) indican una combustión completa pero rica. Aquí la ECU prioriza suavidad y estabilidad antes que eficiencia como se muestra en la **Tabla 12**.

Tabla 12. Análisis de gases con Ecu programable a 800 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a Ralentí						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	800	2.73	13	404	0.35	0.923

Fuente: Autor

Los resultados del análisis de gases de escape en condición de ralentí indican que el vehículo cumple con los parámetros asociados a la concentración de monóxido de carbono (CO) establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204, conforme al Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 017 para vehículos a gasolina en circulación correspondientes al año 1999. No obstante, se evidencia un incumplimiento en el parámetro de hidrocarburos no quemados (HC), lo que refleja una combustión incompleta del combustible, el valor del coeficiente lambda (λ) confirma una tendencia a mezcla rica, condición que contribuye al incremento de HC en los gases de escape. En consecuencia, se determina que el vehículo no cumple de manera integral con la normativa ambiental ecuatoriana en condición de ralentí (INEN, 2010; INEN, 2012).

A 1000 rpm inicia una transición abrupta hacia una mezcla muy pobre ($\lambda = 1.571$). El CO cae a 0.18 %, mientras que el O₂ aumenta considerablemente (8.21 %). Aunque la combustión ocurre, los valores de HC (424 ppm) muestran ligeras fallas de inflamación. Esta zona corresponde a carga parcial, donde la ECU aún necesita correcciones, mientras que a 2000 rpm persiste la tendencia pobre ($\lambda = 1.598$). El incremento de HC (536 ppm) demuestra una combustión incompleta por exceso de aire. En esta área del mapa la mezcla se encuentra fuera del rango óptimo para motores MEP como se muestra en la **Tabla 13** y la **Tabla 14**.

Tabla 13. Análisis de gases con Ecu programable a 1000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 1000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	HC [ppm]	O ₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	1000	0.18	8.8	424	8.21	1.571

Fuente: Autor

Tabla 14. Análisis de gases con Ecu programable a 2000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 2000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	HC [ppm]	O ₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	2000	0.20	8.7	536	8.66	1.598

Fuente: Autor

Entre 3000 y 4000 rpm el motor mantiene una condición de mezcla pobre, aunque con una ligera tendencia a la corrección. A 3000 rpm se registra el valor de lambda más elevado de todo el rango evaluado ($\lambda = 1.625$), acompañado de un incremento en HC (663

ppm), lo que evidencia una combustión inestable y un riesgo térmico considerable si esta condición se presentara bajo carga real. A 4000 rpm la mezcla comienza a mostrar una leve mejora: el lambda desciende a 1.554, el CO aumenta ligeramente hasta 0.40 % y el oxígeno residual disminuye a 8.45 %. Estos cambios indican que la ECU empieza a aportar más combustible en esta zona del mapa, aunque la combustión todavía no es completamente eficiente. Esta transición refleja que la calibración está corrigiendo gradualmente la falta de combustible en alta carga parcial, preparando al motor para acercarse a una mezcla más adecuada en los rangos superiores (5000 rpm) como se muestra en la **Tabla 15** y la **Tabla 16**.

Tabla 15. Análisis de gases con Ecu programable a 3000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 3000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	3000	0.34	8.2	663	8.99	1.625

Fuente: Autor

Tabla 16. Análisis de gases con Ecu programable a 4000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 4000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	4000	0.40	8.3	832	8.45	1.554

Fuente: Autor

A 5000 rpm la mezcla ($\lambda = 1.474$) se acerca nuevamente a una zona más favorable para la eficiencia. El aumento de CO (0.45 %) y la reducción de O₂ (7.57 %) muestran que en este punto la ECU aporta más combustible, lo cual coincide con lo observado en la prueba de potencia. Este comportamiento confirma que, en condiciones reales de carga alta, la mezcla es distinta y se aproxima más a una relación óptima, permitiendo obtener el incremento de potencia detectado como se observa en la **Tabla 17**.

Tabla 17. Análisis de gases con Ecu programable a 5000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 5000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	5000	0.45	9.1	502	7.57	1.474

Fuente: Autor

3.3 Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con motor turboalimentado

Tras la instalación definitiva del sistema de sobrealimentación tipo turbo y la correspondiente calibración preliminar de la ECU programable, las mediciones se realizaron a diferentes regímenes de operación (800 a 5000 RPM), permitiendo observar de manera precisa cómo varían los principales parámetros de combustión en condiciones de baja carga y sin presencia significativa de presión de sobrealimentación. Los resultados obtenidos evidencian un comportamiento claro: el motor opera de forma consistente con una mezcla pobre ($\lambda > 1$), baja presencia de CO y HC, y niveles progresivamente mayores de oxígeno residual, lo que refleja un funcionamiento eficiente y sin enriquecimiento prematuro de mezcla.

En el régimen de ralentí (800 RPM), los valores obtenidos muestran una combustión limpia y estable, caracterizada por una concentración de CO del 0.10 % y 175 ppm de HC, acompañados de un valor lambda de 1.154. Estos resultados indican que la ECU mantiene una mezcla ligeramente pobre, lo cual es común en estrategias de ahorro de combustible y estabilidad térmica durante bajas cargas como se muestra en la **Tabla 18**.

Tabla 18. Análisis de gases con motor turboalimentado a 800 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a Ralentí						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	HC [ppm]	O ₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	800	0.1	12.7	175	0.20	1.154

Fuente: Autor

Los resultados del análisis de gases de escape obtenidos en condición de ralentí muestran que el vehículo cumple con los parámetros de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos no quemados (HC) establecidos en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204, conforme a lo dispuesto en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 017 para vehículos a gasolina en circulación del año 1999. Sin embargo, el valor del coeficiente lambda (λ) evidencia una mezcla excesivamente pobre, condición que, aunque no genera incumplimiento directo de los parámetros regulados, puede afectar la estabilidad del ralentí y el desempeño del motor. En consecuencia, se determina que el vehículo cumple con la normativa ambiental ecuatoriana en condición de ralentí (INEN, 2010; INEN, 2012).

A 1000 RPM, se registra un incremento del oxígeno residual (1.80 %), lo que confirma un empobrecimiento controlado de la mezcla, manteniéndose una lambda de 1.128 y una reducción de HC respecto al motor atmosférico. Esto es característico de un motor turbo calibrado para evitar enriquecimiento innecesario antes de alcanzar presión positiva como se muestra en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Análisis de gases con motor turboalimentado a 1000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 1000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	HC [ppm]	O ₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	1000	0.23	13.1	150	1.80	1.128

Fuente: Autor

A 2000 RPM, el motor continúa operando en una mezcla pobre ($\lambda = 1.101$), con valores reducidos de CO (0.16 %) y HC (119 ppm). La presencia de oxígeno residual (2.23 %) confirma que el sistema aún no entra en modo lazo abierto (del inglés open loop) enriquecido, dado que estas RPM en una prueba estática no generan presión de turbo significativo. De manera similar, a 3000 RPM persiste la tendencia a una combustión más adecuada, con 119 ppm de HC y lambda de 1.112. Esta condición establece que el motor se encuentra aún en baja carga y no requiere mezcla rica para protección, por lo cual la ECU mantiene AFR elevados hasta detectar incremento real de presión como se muestra en la **Tabla 20** y la **Tabla 21**.

Tabla 20. Análisis de gases con motor turboalimentado a 2000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 2000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	HC [ppm]	O ₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	2000	0.16	13.4	119	2.23	1.101

Fuente: Autor

Tabla 21. Análisis de gases con motor turboalimentado a 3000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 3000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO ₂ [% Vol]	HC [ppm]	O ₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	3000	0.15	13.1	119	2.38	1.112

Fuente: Autor

En los regímenes más altos evaluados, 4000 y 5000 RPM, se observa un aumento notable del oxígeno residual, alcanzando valores de 3.95 % y 3.98 % respectivamente, asociados a lambda por encima de 1.21. Esto confirma que el motor continúa operando en una estrategia de mezcla pobre durante toda la prueba, dado que la ausencia de carga real impide la generación de boost y, por tanto, la activación del mapa de enriquecimiento para condiciones de sobrealimentación. De forma paralela, los valores de CO permanecen extremadamente bajos (0.12 % a 4000 RPM y 0.09 % a 5000 RPM), mientras que el HC se mantiene en niveles reducidos, lo cual evidencia estabilidad en el proceso de combustión incluso bajo mezcla pobre como se muestra en la **Tabla 22** y la **Tabla 23**.

Tabla 22. Análisis de gases con motor turboalimentado a 4000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 4000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	4000	0.12	11.9	106	3.95	1.214

Fuente: Autor

Tabla 23. Análisis de gases con motor turboalimentado a 5000 revoluciones.

Resultado de análisis de gases a 5000 RPM						
PARAMETROS	RPM [1/min]	CO [% Vol]	CO₂ [% Vol]	HC [ppm]	O₂ [% Vol]	λ
RESULTADOS	5000	0.09	12.2	166	3.98	1.208

Fuente: Autor

EL análisis global de esta tercera pasada revela que, en condiciones sin carga y sin activación del turbo, la ECU programable mantiene un AFR pobre en toda la gama de funcionamiento. Esto se traduce en una combustión más eficiente, menores emisiones de CO y HC, y ausencia de enriquecimiento prematuro. Este comportamiento es totalmente normal en motores turbocargados en fase de calibración, ya que la mezcla rica solo debe aplicarse cuando exista presión de sobrealimentación para garantizar la seguridad del motor. En consecuencia, los valores registrados confirman un funcionamiento adecuado del sistema turbo instalado, así como una correcta gestión del combustible por parte de la ECU en condiciones de precarga.

3.4 Resultados del banco de potencia (dinamometría)

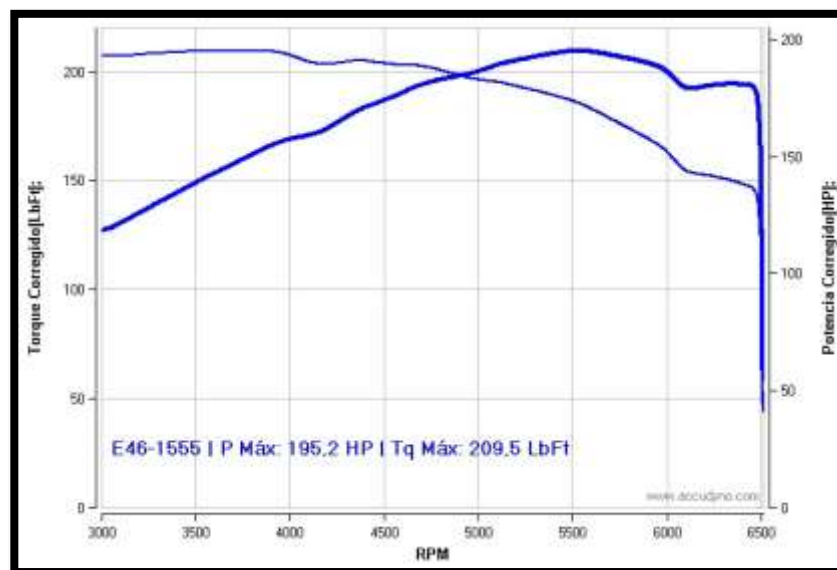
La evaluación en dinamómetro constituye un procedimiento fundamental para determinar el desempeño real del motor bajo condiciones controladas. A través de esta prueba es posible obtener valores precisos de potencia efectiva, torque y régimen de giro, permitiendo analizar el comportamiento del motor en distintas configuraciones y validar los efectos de las modificaciones implementadas. En esta sección se presentan los resultados obtenidos para el motor en su condición original (stock), posteriormente con la instalación de la ECU programable y finalmente bajo una configuración con alimentación forzada mediante turbocompresor. La comparación entre estas tres etapas permite cuantificar el impacto de la gestión electrónica y del aumento de aire admitido sobre el rendimiento dinámico del motor.

3.4.1 Motor stock

En la primera prueba, realizada con el motor en su configuración original (stock), se obtuvo una potencia y un torque coherentes con las especificaciones de fábrica del M52TUB28 la cual es de 193 Hp.

Estos resultados constituyen la línea base de referencia para evaluar cómo se comportan los ajustes posteriores al sistema de gestión y al sistema de admisión del motor como se muestra en la **Figura 16**.

Figura 16. Resultados del dinamómetro con motor Stock.



Fuente: Autor

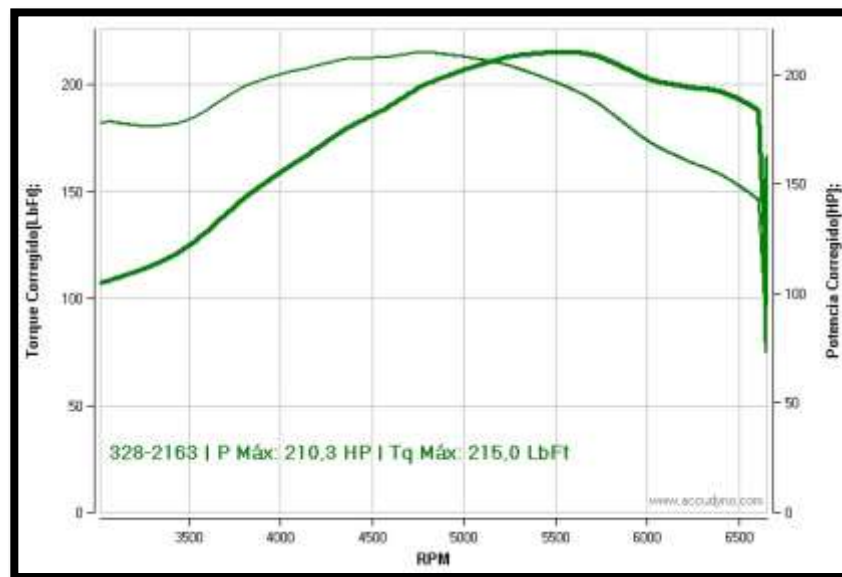
La curva dinamométrica evidencia un incremento progresivo de potencia desde bajas revoluciones, alcanzando su valor máximo en la zona media/alta del régimen operativo. El torque se mantiene relativamente estable en la parte media del rango de rpm, lo cual es característico de los motores atmosféricos de aspiración natural.

3.4.2 Motor con ECU standalone

En la segunda etapa se efectuó la prueba dinamométrica tras la instalación y calibración de la ECU programable. Los resultados muestran un aumento significativo tanto en potencia como en torque dando como resultado +15.1 Hp y +5.5 LbFt respectivamente, esto producido por una mezcla aire/combustible más precisa y a un avance de encendido optimizado.

Este comportamiento confirma el efecto positivo de la gestión electrónica sobre el rendimiento, permitiendo un control más exacto de los parámetros críticos del motor como se muestra en la **Figura 17**.

Figura 17. Resultados del dinamómetro con Ecu programable.



Fuente: Autor

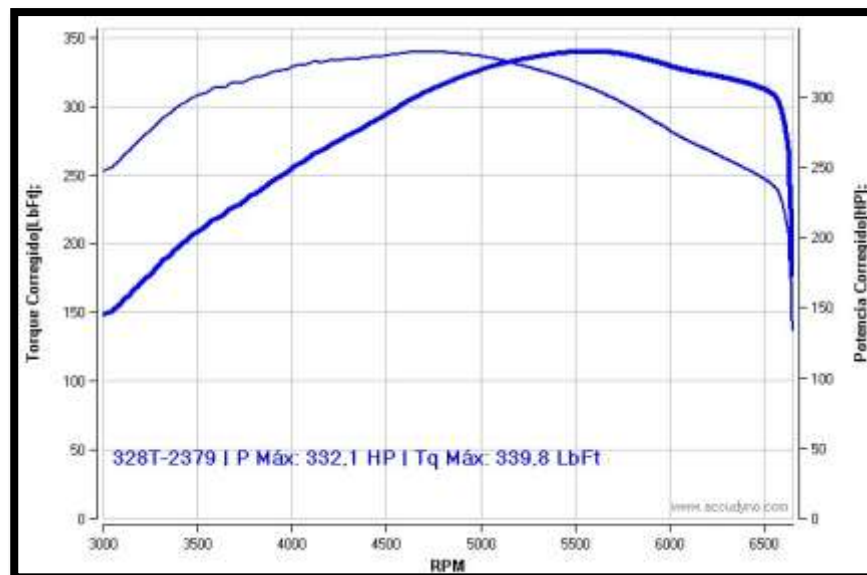
La curva de potencia presenta una entrega más uniforme y sostenida, mientras que el torque evidencia una mejora en su valor máximo y una mayor estabilidad a lo largo del régimen medio. Esto indica una mayor eficiencia de combustión y una mejor respuesta del motor ante variaciones de carga.

3.4.3 Motor turboalimentado

En la tercera configuración, el motor se sometió a la prueba dinamométrica con el sistema turboalimentado instalado y calibrado. Los resultados evidencian un incremento sustancial de potencia y torque respecto a las etapas anteriores, dando como resultado +121.8 Hp y +124.8 LbFt respectivamente.

El comportamiento registrado confirma el impacto de la alimentación forzada en la capacidad del motor para generar trabajo útil, evidenciando la sinergia entre la calibración electrónica y el sistema de sobrealimentación como se muestra en la **Figura 18**.

Figura 18. Resultados del dinamómetro con motor turboalimentado.



Fuente: Autor

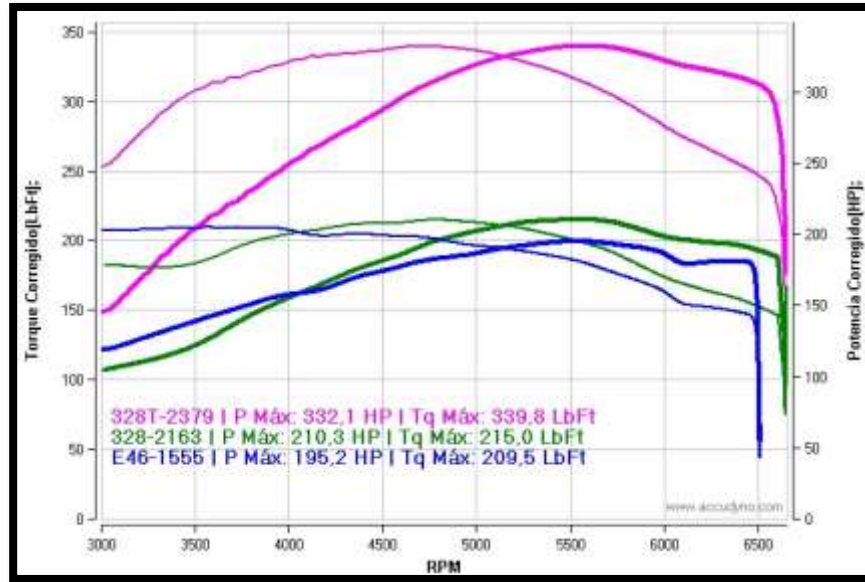
La curva de torque muestra una ganancia pronunciada desde bajas revoluciones, consecuencia de la presión de sobrealimentación que aumenta la densidad del aire y la energía disponible en la combustión. Asimismo, la potencia se mantiene elevada incluso en regímenes altos, debido a la mayor cantidad de aire y combustible.

3.4.4 Evaluación Comparativa del Rendimiento en el Banco de Potencia

Al comparar los resultados obtenidos en las tres etapas, se observa una mejora progresiva del rendimiento del motor conforme se introducen modificaciones en el sistema de gestión electrónica y en el sistema de admisión. La transición desde la configuración stock hacia la ECU programable genera un incremento medible en la eficiencia de combustión y

en la entrega de torque. Finalmente, la implementación del sistema turboalimentado provoca el mayor aumento de potencia, debido al incremento de la presión efectiva media dentro del cilindro como se muestra en la **Figura 19**.

Figura 19. Resultados del dinamómetro comparativa entre etapas.



Fuente: Autor

Esta comparación permite concluir que la optimización de los parámetros de inyección, encendido y mezcla, junto con la mayor disponibilidad de aire dada por el turbo, influyen directamente en el comportamiento del motor, mejorando su eficiencia y capacidad de generación de potencia y torque en todos los regímenes de operación como se muestra en la **Tabla 24**.

Tabla 24. Comparativa de potencia y torque entre etapas

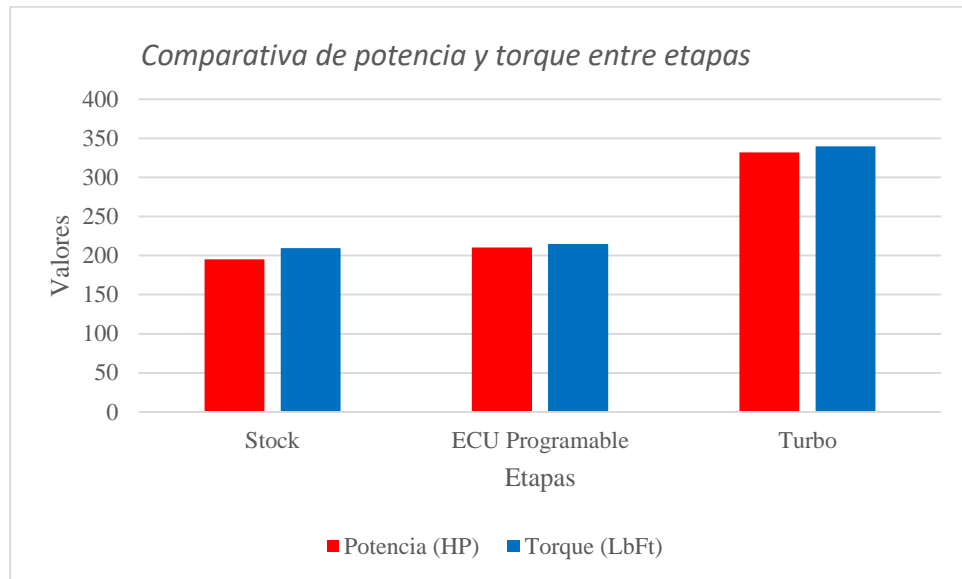
Configuración	Potencia (HP)	Torque (LbFt)
Stock	195.2	209.5
ECU Programable	210.3	215.0
Turbo	332.1	339.8

Fuente: Autor

Se muestra los resultados de las tablas tanto en potencia como en torque en las tres etapas; stock, ECU programable y turbo.

En la **Figura 20** se muestra la comparativa de potencia vs torque en un diagrama de barras

Figura 20. Comparativa de potencia y torque entre etapas



Fuente: Autor

Se muestra cual es el incremento de potencia y torque respectivamente entre las tres etapas: stock, ECU programable y turbo

3.4.5 Comparativa porcentual global

El motor en condición stock registró 195.2 HP y 284 Nm, sirviendo como línea base. La instalación de la ECU programable produjo un incremento del 7.7 % en potencia y 2.6 % en torque, lo cual confirma una mejora moderada atribuible a una optimización del AFR en carga y del avance de encendido. La configuración turboalimentada mostró el mayor incremento, alcanzando 332.1 HP (+70.1 %) y 460.7 Nm (+62.2 %), evidenciando la influencia directa de la mayor masa de aire inducida por el turbocompresor y del ajuste electrónico a mayores presiones como se muestra en la **Tabla 25** y la **Tabla 26**.

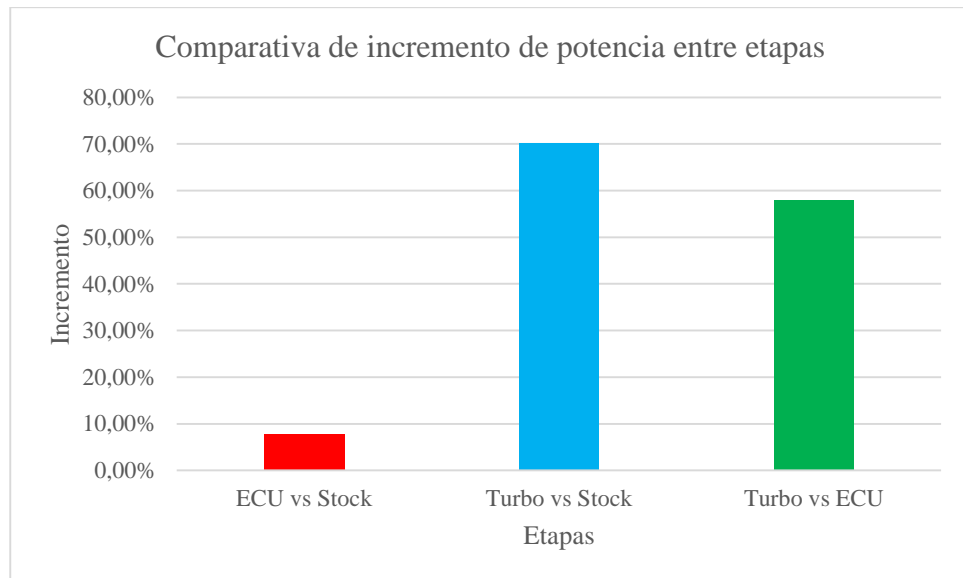
Tabla 25. Comparativa de incremento de potencia entre etapas

Comparación	Incremento
ECU vs Stock	+7.7%
Turbo vs Stock	+70.1%
Turbo vs ECU	+57.9%

Fuente: Autor

En la **Figura 21** se muestra la comparativa en un diagrama de barras obtenido del incremento de potencia.

Figura 21. Comparativa de incremento de potencia entre etapas



Fuente: Autor

Se muestra cual es el incremento de potencia obtenido después de realizar las pruebas correspondientes en las tres etapas.

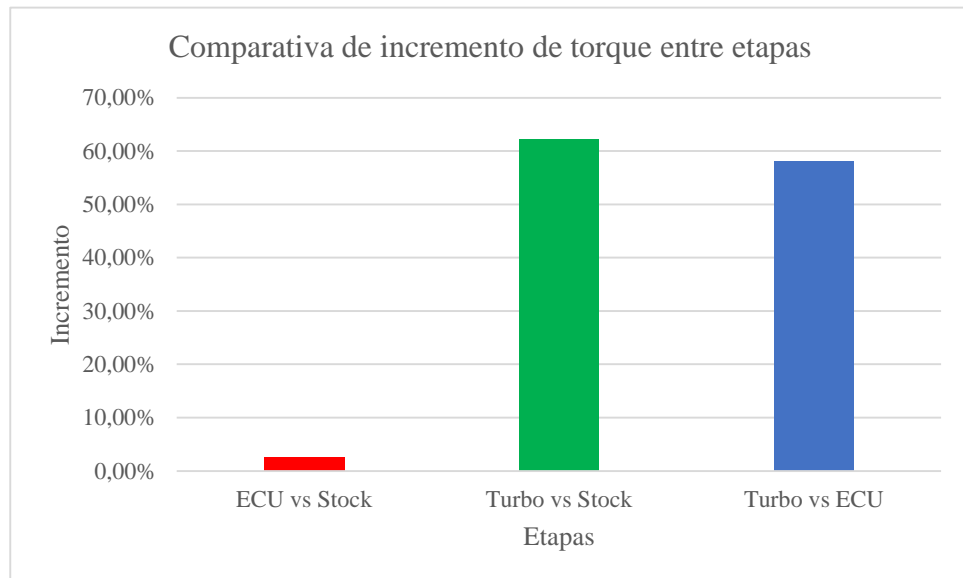
Tabla 26. Comparativa de incremento de torque entre etapas

Comparación	Incremento
ECU vs Stock	+2.6%
Turbo vs Stock	+62.2%
Turbo vs ECU	+58.0%

Fuente: Autor

En la **Figura 22** se muestra la comparativa en un diagrama de barras obtenido del incremento de torque.

Figura 22. Comparativa de incremento de torque entre etapas



Fuente: Autor

Se muestra cual es el incremento de torque obtenido después de realizar las pruebas correspondientes en las tres etapas.

3.5 Evaluación del mapa de inyección

La evaluación del mapa de inyección permite analizar el suministro de combustible empleada por la ECU programable en diferentes estados de operación del motor. A través del AFR (Air/Fuel Ratio) es posible determinar si la mezcla generada se ajusta a los requerimientos de eficiencia, seguridad y rendimiento. En este apartado se analiza la tabla de AFR obtenida durante la segunda y tercera pasada, reconociendo que los valores numéricos son constantes entre ambas configuraciones, pero su interpretación difiere debido a las condiciones de carga y presión presentes en cada caso.

Al comparar la tabla del motor con ECU standalone y la tabla del motor turboalimentado, se observa que la tabla de AFR permanece constante en ambas configuraciones; su interpretación difiere debido a las condiciones operativas del motor. En

la segunda pasada con motor con ECU standalone, el AFR uniforme refleja una estrategia conservadora propia de una calibración inicial con ECU programable, donde la prioridad es garantizar estabilidad y evitar variaciones abruptas en la mezcla. Durante la tercera pasada con motor turboalimentado, la presencia de sobrealimentación incrementa significativamente la demanda de aire y el esfuerzo térmico dentro del cilindro, por lo que mantener un AFR idéntico no representa las necesidades reales del motor bajo presión positiva. Esta comparación evidencia que el mapa de inyección no puede analizarse de manera aislada, sino que debe interpretarse en conjunto con la eficiencia volumétrica (VE%) y con el mapa de avance de encendido (Timing) como se muestra en la **Figura 23**.

Figura 23. Tabla AFR usada en el vehículo.

The screenshot shows a software window titled "AFR Table 1" with a menu bar (View, Tools, Help) and a toolbar with various icons. The main area is a grid with "a f r i o a d l" on the y-axis and "T P S" on the x-axis. The y-axis values are 400.0, 300.0, 100.0, 90.0, 80.0, 70.0, 60.0, 50.0, 40.0, 30.0, 20.0, 10.0. The x-axis values are 500, 800, 1100, 1400, 2000, 2600, 3100, 3700, 4300, 4900, 5400, 6000. The grid contains numerical values representing the air-fuel ratio, with colors ranging from blue to red. At the bottom right, there are "Burn" and "Close" buttons.

400.0	12.3	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0	11.0
300.0	11.7	11.6	11.6	11.6	11.6	11.6	11.5	12.6	11.5	11.4	11.4	11.4
100.0	12.3	12.3	12.3	12.3	12.2	12.2	12.2	12.1	12.1	12.1	12.0	12.0
90.0	12.5	12.5	12.5	12.5	12.4	12.4	12.4	12.3	12.3	12.3	12.2	12.2
80.0	12.8	12.8	12.8	12.7	12.7	12.6	12.6	12.6	12.5	12.5	12.4	12.4
70.0	12.8	12.8	12.8	12.8	12.7	12.7	12.7	12.6	12.6	12.6	12.5	12.5
60.0	12.9	12.9	12.9	12.9	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8	12.7	12.7	12.7
50.0	14.1	14.1	14.1	14.1	14.1	13.7	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6	13.6
40.0	14.7	14.7	14.7	14.7	14.4	14.0	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
30.0	14.7	14.7	14.7	14.7	14.5	14.3	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.3
20.0	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6	14.6
10.0	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.8	14.9	15.0	15.0	15.0	15.0	15.0
↵	500	800	1100	1400	2000	2600	3100	3700	4300	4900	5400	6000

Fuente: Autor

Ambas tablas condicionan directamente el requerimiento de combustible: un aumento de VE incrementa la masa de aire admitida y exige mayor enriquecimiento, mientras que un encendido más retardado bajo boost requiere ajustes adicionales en el tiempo de inyección para preservar la estabilidad de combustión. Por tanto, la uniformidad del AFR en ambas pasadas indica que el sistema aún se encuentra en una fase preliminar de calibración, donde el mapa de inyección debe ajustarse posteriormente para responder

adecuadamente a las variaciones de carga, flujo de aire y condiciones de encendido que caracterizan al funcionamiento turboalimentado.

3.6 Análisis de la eficiencia volumétrica (VE%)

La eficiencia volumétrica (VE%) permite cuantificar la capacidad del motor para llenar sus cilindros con aire fresco por ciclo, siendo un indicador directo del potencial de generación de torque y potencia. El análisis comparativo entre la segunda y la tercera pasada permite identificar cómo la ECU programable y la sobrealimentación modifican el comportamiento respiratorio del motor y su capacidad de admisión.

En la pasada del motor con ECU standalone, los valores de VE (%) reflejan el comportamiento típico de un motor atmosférico con calibración optimizada. Se observan zonas de eficiencia media en rangos intermedios de RPM, donde el flujo dinámico del aire permite un mejor llenado de los cilindros. La ausencia de sobrealimentación limita el VE% a niveles inherentemente menores, sin superar el 100%, lo cual confirma que la ECU programable está operando dentro de los márgenes naturales del motor, priorizando estabilidad y progresividad en la entrega de aire como se muestra en la **Figura 24**.

Figura 24. Tabla VE usada con Ecu programable.

Throttle (%)	501	801	1101	1401	2001	2601	3101	3700	4300	4900	5400	6000	6500	7000	7200	7500
100.0	42.0	43.0	44.0	51.0	55.4	63.9	67.5	72.0	72.9	73.8	77.5	73.9	70.6	74.3	75.8	78.0
98.0	41.0	43.0	43.0	50.5	54.8	63.1	66.7	71.0	71.9	72.7	76.2	72.5	69.1	72.6	74.1	76.2
95.0	41.0	42.0	43.0	49.7	53.8	61.9	65.4	69.5	70.3	71.1	74.2	70.3	66.7	70.1	71.5	73.6
90.0	39.0	40.0	41.0	48.4	52.2	60.0	63.2	67.0	67.7	68.4	70.8	66.6	62.8	66.0	67.2	69.1
85.0	38.0	39.0	40.0	47.1	50.6	58.1	61.0	64.6	65.2	65.8	67.5	68.0	63.9	66.8	67.9	69.7
80.0	37.0	38.0	38.0	45.8	49.0	56.2	58.9	62.1	62.6	63.1	66.1	66.3	61.9	64.6	65.7	67.3
75.0	36.0	36.0	37.0	44.6	46.6	52.6	54.3	56.4	58.4	60.4	62.7	62.6	61.0	63.4	64.4	65.8
70.0	34.0	35.0	36.0	43.3	45.1	50.9	52.4	54.2	56.0	57.8	59.4	59.0	57.1	59.2	60.1	61.4
65.0	33.0	34.0	34.0	42.0	43.6	49.2	50.5	52.0	53.6	55.2	57.0	56.3	58.2	60.1	60.8	62.0
60.0	32.0	32.0	33.0	40.7	42.6	48.6	50.2	52.2	50.1	52.1	53.7	52.6	54.3	55.9	56.5	57.5
55.0	30.0	31.0	31.0	39.4	41.0	46.7	48.1	49.7	47.3	49.0	50.3	49.0	50.4	51.7	52.3	53.1
50.0	29.0	29.0	30.0	30.3	31.7	33.0	34.2	35.5	36.9	38.2	39.4	40.7	41.9	43.0	43.5	44.2
45.0	24.0	24.0	24.0	29.2	30.3	31.4	32.3	33.3	34.4	35.5	36.4	37.5	38.4	39.3	39.7	40.2
40.0	15.7	15.7	15.7	20.1	20.9	21.7	22.4	23.2	24.0	24.8	25.4	26.2	26.9	27.6	27.8	28.3
35.0	15.7	13.2	10.7	18.0	18.5	19.0	19.5	20.0	20.5	21.0	21.5	22.0	22.4	22.9	23.0	23.3
30.1	14.7	11.4	7.7	1.7	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.8	3.9	4.0	4.0

Fuente: Autor

En la pasada con motor turboalimentado, los valores de VE% aumentan considerablemente en comparación con la configuración atmosférica, especialmente en zonas de alta carga, la presencia de turbo implica superar el 100% de eficiencia volumétrica en múltiples puntos del mapa. Esto se relaciona directamente con la entrada de aire comprimido al múltiple de admisión, lo cual incrementa la masa de aire introducida en cada ciclo. Este comportamiento confirma la mejora en la respiración del motor y su capacidad de generar mayor presión media efectiva, alineándose con el incremento de potencia registrado en dinamometría como se muestra en la **Figura 25**.

Figura 25. Tabla VE usada con motor turboalimentado.

	501	801	1101	1401	2001	2601	3101	3700	4300	4900	5400	6000	6500	7000	7200	7500
170.0	55.0	56.0	61.8	67.6	79.2	88.8	99.8	105.0	110.9	111.8	115.5	111.9	108.6	112.3	113.8	116.0
165.0	54.0	55.4	61.0	66.7	77.9	87.7	98.1	102.7	109.9	110.7	114.2	110.5	107.1	110.6	112.1	114.2
160.0	54.0	54.8	60.2	65.7	76.6	86.6	96.5	100.4	108.3	109.1	112.2	108.3	104.7	108.1	109.5	111.6
150.0	52.0	53.6	58.7	63.8	74.0	84.4	93.2	95.7	105.7	106.4	108.8	104.6	100.8	104.0	105.2	107.1
130.0	51.0	51.2	55.6	59.9	68.7	85.0	91.5	91.4	103.2	103.8	105.5	106.0	101.9	104.8	105.9	107.7
120.0	42.0	42.0	46.0	56.0	64.1	80.7	86.2	86.8	100.6	101.1	104.1	104.3	99.9	102.6	103.7	105.3
110.0	41.0	40.8	44.5	54.1	65.4	79.5	83.9	83.1	97.4	99.4	101.7	101.6	100.0	102.4	103.4	104.8
100.0	39.0	39.6	42.9	52.2	62.8	77.3	80.6	78.5	81.8	85.1	87.8	91.1	93.9	96.6	97.7	99.4
90.0	38.0	38.4	41.3	44.3	54.2	69.1	71.2	73.8	76.3	78.9	81.0	83.6	85.7	87.8	88.7	90.0
80.0	37.0	37.2	39.8	42.4	51.6	60.7	62.2	64.1	65.9	67.7	69.2	71.0	72.5	74.0	74.6	75.5
70.0	35.0	36.0	38.2	40.5	48.9	57.4	58.3	59.4	60.4	61.5	62.4	63.4	64.3	65.2	65.6	66.1
60.0	34.0	34.0	35.0	35.3	36.7	42.0	43.2	44.5	45.9	47.2	48.4	49.7	50.9	52.0	52.5	53.2
50.0	29.0	29.0	29.0	34.2	35.3	36.4	37.3	38.3	39.4	40.5	41.4	42.5	43.4	44.3	44.7	45.2
40.0	21.7	21.7	21.7	26.1	20.9	26.7	27.4	28.2	29.0	29.8	30.4	31.2	31.9	32.6	32.8	33.3
35.0	21.7	19.2	16.7	24.0	18.5	24.0	24.5	25.0	25.5	26.0	26.5	27.0	27.4	27.9	28.0	28.3
30.0	20.7	17.4	8.7	7.7	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.8	3.9	4.0	4.0

Fuente: Autor

3.7 Análisis del avance de encendido (Timing)

El avance de encendido es un parámetro crítico que determina el momento exacto de ignición dentro del ciclo de combustión. Su ajuste adecuado maximiza la presión efectiva dentro del cilindro y evita fenómenos de detonación. El análisis comparativo entre la segunda y la tercera pasada permite identificar la estrategia de encendido utilizada por la ECU programable en condiciones atmosféricas y bajo sobrealimentación.

Durante la pasada del motor con ECU standalone, el avance de encendido presenta valores relativamente elevados en zonas de carga media y alta, típicos de un motor

naturalmente aspirado. Esto permite mejorar la presión media efectiva y optimizar el torque entregado por el motor. El mapa evidencia una estrategia orientada a eficiencia, ya que en ausencia de sobrealimentación el motor tolera niveles mayores de avance sin riesgo de preignición como se muestra en la **Tabla 26**.

Figura 26. Tabla de avance de ignición usada con Ecu Programable.

	701	846	1040	1260	1480	1833	2240	2666	3033	3460	3900	4340	4780	5166	5400	6000
100.0	17.8	14.9	14.8	20.5	21.2	19.3	23.6	28.8	30.7	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
92.0	18.0	15.2	14.9	20.7	21.5	19.7	24.1	29.2	30.7	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
85.0	18.3	15.4	15.0	20.9	21.7	20.0	24.5	29.5	30.8	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0	31.0
78.0	18.6	15.7	15.1	21.0	21.9	20.3	25.0	32.8	33.8	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
70.0	19.0	16.3	15.3	21.2	22.2	20.7	25.4	33.1	33.9	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0	34.0
63.0	19.0	16.4	15.4	21.4	22.4	21.0	25.9	32.4	32.9	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1	33.1
56.0	18.9	16.5	15.5	21.5	22.6	21.3	26.3	32.8	33.1	33.3	33.3	33.3	33.3	33.5	33.5	33.5
49.0	18.8	16.6	15.6	21.7	22.8	21.6	26.7	33.1	33.5	33.6	33.7	33.7	34.0	34.1	34.1	34.1
45.0	18.7	16.4	15.6	21.8	23.0	21.8	27.0	33.3	33.6	34.0	34.3	34.5	34.5	34.5	34.5	34.5
42.0	18.6	16.3	15.7	21.9	23.1	22.0	27.2	33.5	33.7	34.1	34.4	34.4	34.5	34.6	34.6	34.8
38.0	18.5	16.2	15.7	22.0	23.2	22.2	27.4	33.7	33.8	34.1	34.3	34.4	34.5	34.7	34.8	35.0
34.0	18.5	16.1	15.8	22.1	23.3	22.3	27.7	33.9	34.0	34.1	34.2	34.5	34.6	34.8	35.0	35.0
30.0	15.6	13.0	12.9	22.1	23.4	22.5	27.9	31.0	31.0	31.3	31.5	31.5	31.9	32.0	32.0	32.0
27.0	15.7	12.9	12.9	22.2	22.6	23.1	23.8	24.5	25.1	25.8	26.5	27.3	28.0	28.6	29.0	30.0
25.0	15.7	12.9	12.9	21.8	22.2	22.7	23.3	23.9	24.5	25.1	25.7	26.4	27.0	27.6	28.0	28.9
20.0	15.7	12.6	12.7	16.9	17.1	17.5	18.0	18.4	18.8	19.3	19.7	20.2	20.7	21.1	21.4	22.0

Fuente: Autor

En la tercera pasada con motor turboalimentado, el mapa de avance presenta un retraso evidente en zonas de alta carga, condición necesaria ante la presencia de presión positiva en el múltiple. Al aumentar la densidad del aire y la presión dentro del cilindro, la temperatura final de compresión se incrementa, reduciendo la tolerancia al avance. Por ello, la estrategia de la ECU programable se ajusta para retardar el encendido y evitar la detonación, priorizando la seguridad térmica del motor. Esta adaptación es coherente con el comportamiento esperado de un motor sobrealimentado como se muestra en la **Figura 27**.

Figura 27. Tabla de avance de ignición usada con motor turboalimentado.

Ignition	701	846	1040	1260	1480	1833	2240	2666	3033	3460	3900	4340	4780	5166	5400	6000
170.0	10.8	11.1	11.5	15.0	15.5	16.2	19.0	22.7	23.1	23.5	23.9	24.4	24.8	25.2	25.4	26.0
165.0	11.3	11.6	12.0	15.4	15.8	16.5	19.2	23.0	23.4	23.8	24.3	24.8	25.2	25.6	25.9	26.5
160.0	11.8	12.0	12.4	15.8	16.2	16.8	19.5	23.3	23.7	24.2	24.7	25.2	25.7	26.1	26.4	27.0
150.0	12.8	13.0	13.3	16.6	16.9	17.5	19.9	23.9	24.3	24.9	25.4	26.0	26.5	27.0	27.3	28.1
130.0	14.8	14.9	15.0	18.2	18.4	18.7	20.8	25.0	25.6	26.2	26.9	27.6	28.3	28.9	29.2	30.2
120.0	15.7	15.8	15.9	19.0	19.1	19.3	21.3	25.6	26.2	26.9	27.7	28.4	29.2	29.8	30.2	31.2
110.0	16.7	16.8	16.8	19.8	19.9	20.0	21.7	26.2	26.8	27.6	28.4	29.2	30.0	30.7	31.1	32.2
100.0	17.7	17.7	17.7	20.6	20.6	20.6	22.2	26.8	27.5	28.3	29.2	30.0	30.9	31.6	32.1	33.3
90.0	18.7	18.6	18.6	21.5	21.4	21.2	22.6	25.3	26.1	27.0	27.9	28.8	29.8	30.6	31.1	32.3
80.0	18.2	16.9	15.1	21.2	21.8	22.7	23.8	24.8	25.8	26.9	28.0	29.1	30.3	31.3	31.9	33.4
70.0	17.7	16.4	14.6	20.1	22.0	22.8	23.8	24.8	25.6	26.6	27.6	28.7	29.7	30.6	31.1	32.6
60.0	17.2	15.9	14.2	22.1	22.2	22.9	23.8	24.7	25.5	26.4	27.3	28.2	29.1	29.9	30.4	31.7
50.0	16.7	15.4	13.7	22.1	22.4	23.1	23.8	24.6	25.3	26.1	26.9	27.7	28.6	29.3	29.7	30.9
40.0	16.2	14.9	13.2	22.2	22.6	23.2	23.8	24.5	25.1	25.8	26.6	27.3	28.0	28.6	29.0	30.0
35.0	16.0	14.7	12.9	22.1	22.5	23.1	23.9	24.7	25.3	26.1	26.9	27.7	28.5	29.2	29.6	30.7
30.0	15.7	14.4	12.7	22.1	21.2	21.9	22.8	23.6	24.4	25.2	26.1	27.0	27.9	28.7	29.1	30.4

Fuente: Autor

3.8 Cálculo: Emisiones por HP y por Nm

Se usa:

$$Emisión\ por\ HP = \frac{Valor\ de\ Emisión}{Hp}$$

$$Emisión\ por\ Nm = \frac{Valor\ de\ Emisión}{torque\ (Nm)}$$

$$Nm = LbFt * 1.35582$$

Conversión de torque:

En la **Tabla 27** se muestra la conversión de torque de las tres pruebas realizadas en el vehículo.

Tabla 27. Conversión de torque.

Configuración	Torque LbFt	Torque Nm
Stock	209.5	284.0 Nm
ECU	215.0	291.5 Nm
Turbo	339.8	460.7 Nm

Fuente: Autor

Análisis porcentual de emisiones en función de HP y Nm. Las emisiones con el rendimiento, se calcularon indicadores del tipo:

- Gases por unidad de potencia (gas/HP)
- Gases por unidad de torque (gas/Nm)

Estos indicadores permiten cuantificar cuántas emisiones genera el motor por cada unidad de trabajo entregado, lo cual convierte los datos de emisiones en métricas comparables entre configuraciones distintas.

3.8.1 Emisiones por unidad de potencia y torque de $CO_{[\% Vol]}$

El motor stock presenta los valores más altos de CO en todas las RPM. Cuando se normalizan las emisiones respecto a HP y Nm, se observa:

- ECU programable reduce el CO/HP entre 70–85 % respecto al stock, debido a una mezcla significativamente más pobre en baja carga.
- Turboalimentado presenta los valores más bajos, con reducciones superiores al 90 %, ya que la mezcla permanece pobre en baja carga y no entra en modo enriquecido sin boost.

Este comportamiento confirma que la presencia de sobrealimentación no incrementa el CO a bajas cargas si la ECU está correctamente calibrada como se muestra en la **Tabla 28**.

Tabla 28. Emisiones por unidad de potencia y torque de CO.

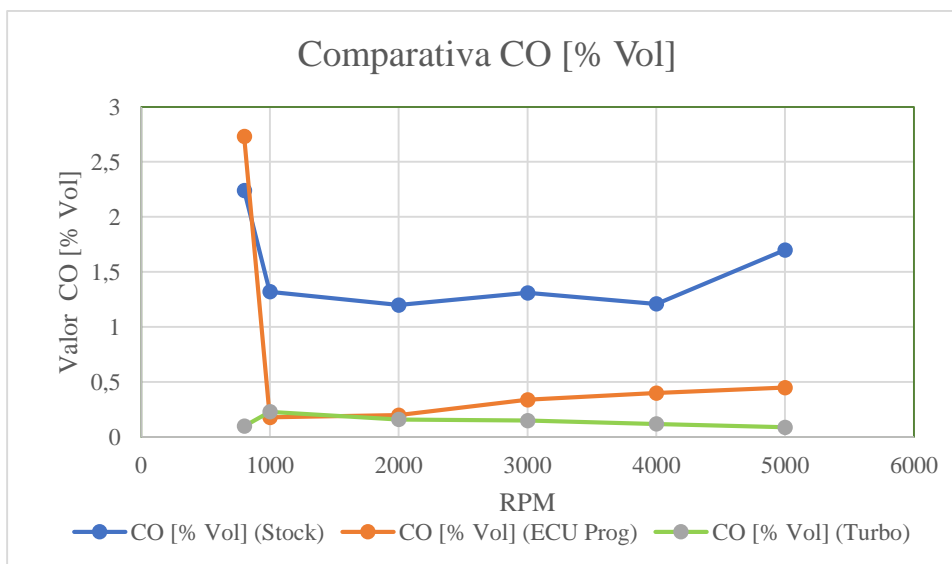
Condición	CO [% vol] por HP			CO [% vol] por Nm		
	Stock CO%/HP	ECU Prog CO%/HP	Turbo CO%/HP	Stock CO%/Nm	ECU Prog CO%/Nm	Turbo CO%/Nm
800	0.01147	0.01298	0.00030	0.01069	0.01270	0.00029
1000	0.00676	0.00086	0.00069	0.00630	0.00084	0.00068
2000	0.00614	0.00095	0.00048	0.00573	0.00093	0.00047
3000	0.00671	0.00162	0.00045	0.00625	0.00158	0.00044
4000	0.00620	0.00190	0.00036	0.00577	0.00186	0.00035
5000	0.00871	0.00214	0.00027	0.00812	0.00209	0.00026

Fuente: Autor

Se presentan los valores correspondientes a los datos de monóxido de carbono (CO) por unidad de potencia (HP) y por par motor (Nm), obtenidos a partir de las pruebas de ensayo realizadas.

En la **Figura 28** se puede observar la comparativa de CO en las tres etapas.

Figura 28. Comparativa de etapas de emisiones CO.



Fuente: Autor

Se observan las tres etapas desarrolladas a diferentes RPM y sus valores de CO correspondientes.

3.8.2 Emisiones por unidad de potencia y torque de $HC_{[ppm]}$

Los HC representan combustible no quemado.

- El motor stock exhibe valores normales para su tecnología MPI.
- En la configuración con ECU programable, los HC aumentan hasta un +200 %, reflejando mezcla muy pobre y combustiones parciales.
- Con turbo, los HC disminuyen hasta 50–70 % respecto al stock, indicando una combustión más eficiente a pesar de la mezcla pobre en las mediciones estáticas.

Cuando se normalizan respecto a HP/Nm:

- Los HC/HP en ECU programable triplican los valores stock.
- En turbo, los HC/HP caen entre 60–80 %, mostrando que un motor turbo bien calibrado no necesariamente emite más HC.

Como se muestran en la **Tabla 29**.

Tabla 29. Emisiones por unidad de potencia y torque de HC.

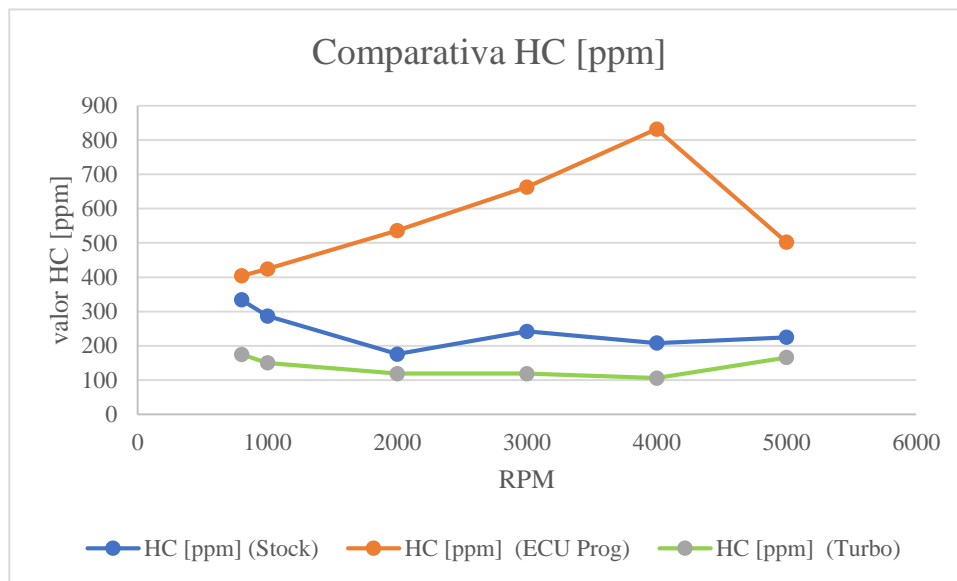
Condición	$HC_{[ppm]}$ por HP			$HC_{[ppm]}$ por Nm		
	Stock HC/HP	ECU Prog HC/HP	Turbo HC/HP	Stock HC/Nm	ECU Prog HC/Nm	Turbo HC/Nm
800	1.71	1.92	0.53	1.59	1.88	0.51
1000	1.47	2.01	0.45	1.37	1.97	0.44
2000	0.90	2.55	0.36	0.84	2.49	0.35
3000	1.24	3.15	0.36	1.15	3.08	0.35
4000	1.06	3.95	0.32	0.99	3.86	0.31
5000	1.15	2.39	0.50	1.07	2.33	0.49

Fuente: Autor

Se presentan los valores correspondientes a los datos de monóxido de carbono (HC) por unidad de potencia (HP) y por par motor (Nm), obtenidos a partir de las pruebas de ensayo realizadas.

En la **Figura 29** se puede observar la comparativa de (HC) en las tres etapas.

Figura 29. Comparativa de etapas de emisiones HC.



Fuente: Autor

Se observan las tres etapas desarrolladas a diferentes RPM y sus valores de HC correspondientes.

3.8.3 Emisiones por unidad de potencia y torque de CO_2 [% Vol]

El CO_2 es un indicador directo de eficiencia de combustión.

- El motor stock posee valores estables entre 13–13.8 %, coherentes con combustión estequiométrica.
- Con la ECU programable, el CO_2 disminuye drásticamente (8–9 %), lo que refleja combustible insuficiente y combustión incompleta en baja carga.
- En el motor turbo, el CO_2 retorna a valores similares al stock debido a un AFR más cercano a la estequiometría con ligera tendencia a pobreza controlada.

La comparación porcentual muestra que el CO_2/HP disminuye más del 40 % en la ECU programable y se normaliza en la configuración turbocargada como se muestra en la **Tabla 30**.

Tabla 30. Emisiones por unidad de potencia y torque de CO2.

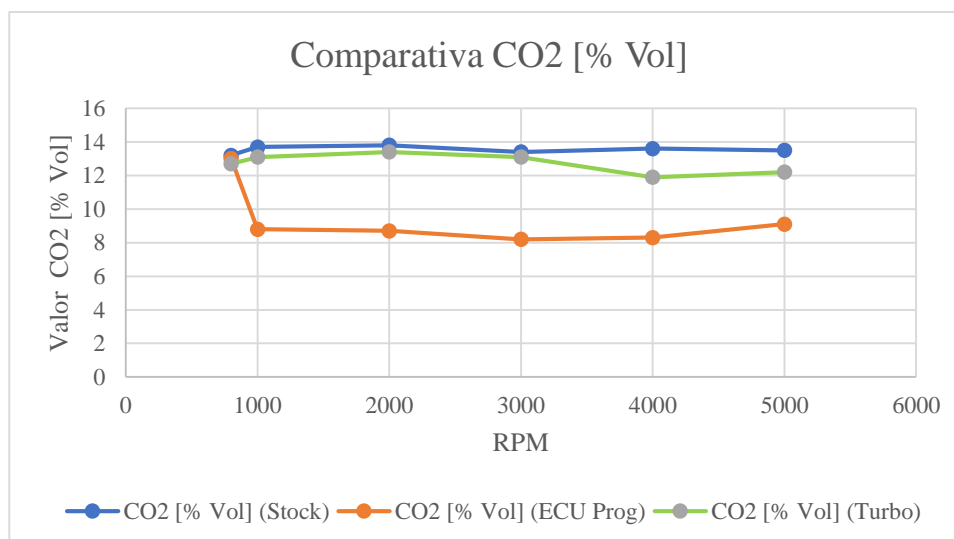
Condición	CO ₂ [% Vol] por HP			CO ₂ [% Vol] por Nm		
	Stock CO ₂ /HP	ECU Prog CO ₂ /HP	Turbo CO ₂ /HP	Stock CO ₂ /Nm	ECU Prog CO ₂ /Nm	Turbo CO ₂ /Nm
800	0.0676	0.0619	0.0382	0.0630	0.0605	0.0373
1000	0.0702	0.0418	0.0394	0.0654	0.0409	0.0386
2000	0.0707	0.0414	0.0403	0.0659	0.0405	0.0395
3000	0.0687	0.0390	0.0394	0.0640	0.0381	0.0386
4000	0.0697	0.0395	0.0358	0.0648	0.0386	0.0351
5000	0.0692	0.0433	0.0367	0.0645	0.0423	0.0359

Fuente: Autor

Se presentan los valores correspondientes a los datos de monóxido de carbono (CO₂) por unidad de potencia (HP) y por par motor (Nm), obtenidos a partir de las pruebas de ensayo realizadas.

En la **Figura 30** se puede observar la comparativa de (HC) en las tres etapas.

Figura 30. Comparativa de etapas de emisiones CO2.



Fuente: Autor

Se observan las tres etapas desarrolladas a diferentes RPM y sus valores de CO₂ correspondientes.

3.8.4 Emisiones por unidad de potencia y torque de O_2 [% vol]

El O_2 muestra qué tanto oxígeno queda sin reacción en los gases.

- Stock: valores bajos (0.6–0.8 %), combustión completa.
- ECU programable: valores extremadamente altos (8–9 %), mezcla pobre severa.
- Turbo: valores intermedios (2–4 %), mezcla pobre pero controlada.

Porcentualmente, el O_2 /HP en la ECU programable llega a ser 1000 % mayor que el stock. En turbo, es 2 a 4 veces mayor, pero dentro de un rango seguro para baja carga como se muestra en la **Tabla 31**.

Tabla 31. Emisiones por unidad de potencia y torque de O_2 .

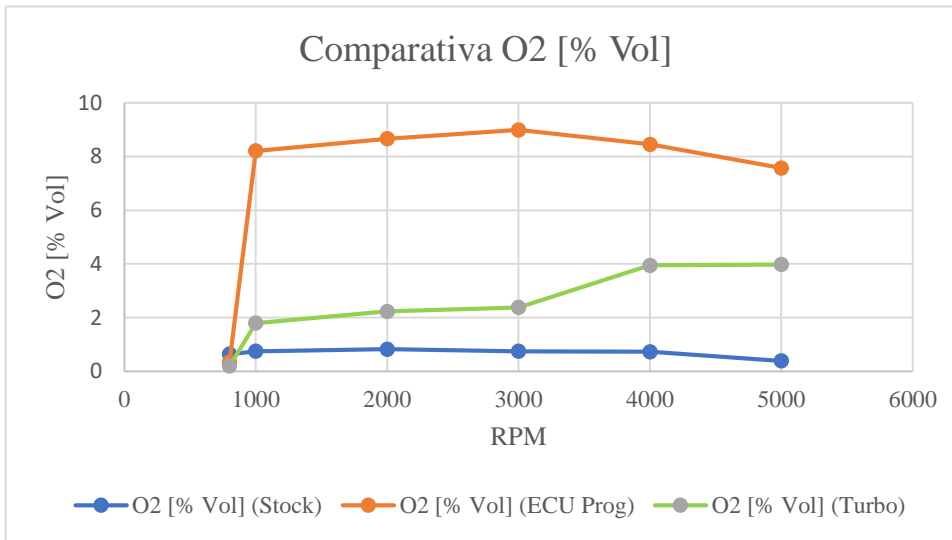
Condición	O_2 [% vol] por HP			O_2 [% vol] por Nm		
	Stock O_2 /HP	ECU Prog O_2 /HP	Turbo O_2 /HP	Stock O_2 /Nm	ECU Prog O_2 /Nm	Turbo O_2 /Nm
800	0.00327	0.00166	0.00060	0.00305	0.00163	0.00059
1000	0.00384	0.03907	0.00542	0.00358	0.03816	0.00530
2000	0.00425	0.04118	0.00672	0.00396	0.04028	0.00656
3000	0.00384	0.04275	0.00716	0.00358	0.04181	0.00701
4000	0.00374	0.04018	0.01189	0.00348	0.03930	0.01162
5000	0.00200	0.03602	0.01198	0.00186	0.03521	0.01171

Fuente: Autor

Se presentan los valores correspondientes a los datos de monóxido de carbono (O_2) por unidad de potencia (HP) y por par motor (Nm), obtenidos a partir de las pruebas de ensayo realizadas.

En la **Figura 31** se puede observar la comparativa de (O_2) en las tres etapas.

Figura 31. Comparativa de etapas de emisiones O2.



Fuente: Autor

Se observan las tres etapas desarrolladas a diferentes RPM y sus valores de O2 correspondientes.

3.8.5 Emisiones por unidad de potencia y torque de λ

Lambda indica la relación aire/combustible como se muestra en la Tabla 29.

- Stock opera casi siempre en $\lambda \approx 1$, ideal para emisiones bajas.
- ECU programable opera entre λ 1.47–1.63, mezcla pobre extrema.
- Turbo opera entre λ 1.10–1.21, mezcla pobre moderada sin boost.

El λ /HP confirma:

- ECU programable presenta valores 50–60 % superiores al stock.
- Turbo mantiene valores 30–40 % superiores, indicando eficiencia sin riesgo de detonación en baja carga como se muestra en la **Tabla 32**.

Tabla 32. Emisiones por unidad de potencia y torque de λ .

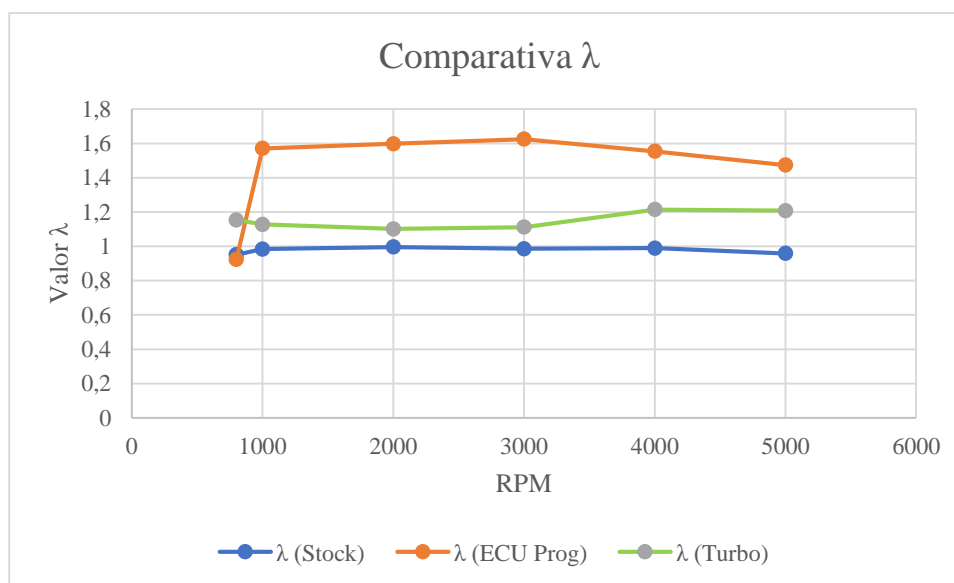
Condición	λ por HP			λ por Nm		
	Stock λ /HP	ECU Prog λ /HP	Turbo λ /HP	Stock λ /Nm	ECU Prog λ /Nm	Turbo λ /Nm
800	0.00487	0.00438	0.00347	0.003349	0.003166	0.002505
1000	0.00504	0.00747	0.00339	0.003465	0.005389	0.002449
2000	0.00510	0.00760	0.00331	0.003507	0.005483	0.002390
3000	0.00505	0.00772	0.00335	0.003472	0.005576	0.002414
4000	0.00506	0.00739	0.00365	0.003482	0.005331	0.002636
5000	0.00491	0.00701	0.00363	0.003377	0.005054	0.002622

Fuente: Autor

Se presentan los valores correspondientes a los datos de monóxido de carbono (λ) por unidad de potencia (HP) y por par motor (Nm), obtenidos a partir de las pruebas de ensayo realizadas.

En la **Figura 32** se puede observar la comparativa de (λ) en las tres etapas.

Figura 32. Comparativa de etapas de emisiones λ .



Fuente: Autor

Se observan las tres etapas desarrolladas a diferentes RPM y sus valores de λ correspondientes.

CAPÍTULO 4

GESTIÓN Y ORGANIZACIÓN DEL PROYECTO TECNICO

4.1 Gestión del proyecto

La planificación del proyecto de investigación se desarrolló de forma individual. Esta define la secuencia de actividades realizadas, mientras que la organización y el seguimiento se gestionaron mediante herramientas de planificación y registros. La planificación se presenta de manera detallada a través de un cronograma tipo Gantt, el cual está incluido en el **ANEXO A**. En el cual se establecieron actividades, los tiempos de ejecución y los hitos correspondientes para cada etapa del estudio

La gestión de los recursos económicos del proyecto se detalla en el presupuesto de investigación, donde se especifican las cantidades, los costos unitarios, los subtotales, los proveedores y la justificación técnica de cada rubro, así como los costos asociados a equipos, materiales, pruebas y otros requerimientos necesarios para la ejecución del estudio. Esta información se presenta de forma organizada en el **ANEXO D**.

4.2 Organización del Equipo

El seguimiento y control del proyecto se respaldan mediante la bitácora de actividades, en la cual se registran de forma cronológica y semanal las tareas ejecutadas, los ajustes significativos realizados durante el desarrollo (denominados como control de cambios) y las pruebas experimentales llevadas a cabo. Asimismo, se incluyen evidencias objetivas de cada actividad, las cuales se encuentran documentadas en el **ANEXO B**.

4.3 Evidencias Objetivas de coordinación

El cumplimiento de los lineamientos y el seguimiento académico del proyecto de titulación se evidencian mediante las actas y documentos oficiales de aprobación y control, los cuales constituyen un respaldo formal del proceso investigativo. Aunque el proyecto fue desarrollado de manera individual, se mantuvieron registros de revisión y seguimiento con el tutor y/o instancias académicas mediante actas o informes de avance, en los cuales constan acuerdos, observaciones y acciones correctivas. En conjunto, estos documentos representan evidencia verificable del proceso de planificación, ejecución, control y mejora continua del proyecto, los cuales se presentan en el **ANEXO C**.

CONCLUSIONES

- La implementación de la ECU programable (Standalone) sobre el motor atmosférico permitió una optimización moderada del rendimiento, logrando un incremento del 7.7% en potencia (210.3 HP) y un 2.6% en torque (215.0 LbFt) respecto a la configuración original. Esto demuestra que, aunque la gestión electrónica mejorada perfecciona la curva de entrega y la eficiencia de combustión mediante el ajuste preciso del avance de encendido y la mezcla, las limitaciones físicas de aspiración natural restringen las ganancias significativas de potencia sin inducción forzada.
- La incorporación del sistema de sobrealimentación (Turbocompresor T04E) generó el impacto más significativo en el desempeño dinámico del vehículo, alcanzando una potencia máxima de 332.1 HP y un torque de 339.8 LbFt, lo que representa un aumento del 70.1% y 62.2% respectivamente frente al motor stock. Estos resultados validan la hipótesis de que el aumento de la densidad del aire, gestionado por una electrónica capaz de interpretar presión positiva (boost) y ajustar la eficiencia volumétrica (VE) por encima del 100%, es la estrategia más efectiva para elevar drásticamente las prestaciones del motor M52TUB28.
- El análisis de emisiones normalizado por unidad de trabajo (emisiones por HP) evidenció que la configuración turboalimentada es termodinámicamente más eficiente en condiciones de carga. A pesar de operar con mezclas pobres en fases de transición ($\lambda > 1.10$), el sistema turbo redujo las emisiones de CO por HP en más de un 90% y los HC por HP entre un 60-80% en comparación con el motor original. Esto confirma que, con una calibración adecuada, el aumento de potencia mediante sobrealimentación no implica necesariamente un aumento proporcional en la huella contaminante por unidad de potencia entregada.
- La comparación de los mapas de inyección y encendido demostró la incapacidad de la ECU OEM para gestionar la sobrealimentación, debido a sus límites de lectura de presión atmosférica. Se concluye que el uso de una ECU programable es indispensable en conversiones turbo, ya que permitió retrasar el avance de encendido en zonas de alta carga para evitar la detonación y enriquecer la mezcla ante el incremento masivo de flujo de aire, garantizando la integridad mecánica y la estabilidad térmica del motor bajo las nuevas condiciones de presión.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda encarecidamente extender la fase de calibración de la ECU Standalone para optimizar las zonas de baja carga y transición de boost.
- Para la siguiente etapa del proyecto, se sugiere implementar el control de la presión de sobrealimentación de manera electrónica a través de la ECU Standalone como un boost controller lo cual permitirá una gestión más precisa.
- Dada la ganancia de potencia, se recomienda realizar un proyecto complementario enfocado en la evaluación del estrés termomecánico del motor, lo cual es fundamental para validar la confiabilidad a largo plazo de los componentes internos originales.
- Se plantea como proyecto futuro aprovechar la flexibilidad de la ECU Standalone para investigar el desempeño del motor utilizando combustibles alternativos (como E85 o gasolina de competición de alto octanaje). Esta configuración permitiría explotar las capacidades máximas del turbocompresor con márgenes de seguridad ampliados.
- Para beneficio de futuros proyectos académicos o de tuning, se recomienda documentar y estandarizar la metodología para el cableado y la adaptación de sensores a la ECU Standalone.
- Una guía detallada reduciría el tiempo de instalación y el riesgo de errores, mejorando la relación costo/beneficio en la aplicación de esta tecnología.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Abreu, J., y F. Brójo. 2023. «SUPERCHARGING OF A 4-STROKE SPARK IGNITION JUNKERS ENGINE». en *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition Proceedings Imece*. Vol. 4.
- Agostinelli, D., N. Carter, G. Fang, y F. Hamori. 2011. «Optimization of a mono-fuel liquid phase LPG MPI fuel system». *SAE Technical Papers*.
- Agostinelli, David, Nick Carter, Gewen Fang, y Ferenc Hamori. 2011. «Optimization of a mono-fuel liquid phase LPG MPI fuel system». *SAE Technical Papers*. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85072487184&partnerID=40&md5=0020e8bd9083224cc2335e17b020b8f6>.
- Andreas, S., y M. Wenzel. 2008. « μ P Controlled power electronics static double-spark ignition for historic combustion engine». Pp. 162-67 en *2008 9th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering Proceedings Apeie 2008*.
- Bandyopadhyay, D., P. S. Sutar, S. B. Sonawane, S. D. Rairikar, K. Kavathekar, S. S. Thipse, C. Kshirsagar, y S. Kale. 2021. «Experimental Analysis of Heavy Duty CNG Engine Based on Its Aspiration and Fuel System». en *SAE Technical Papers*.
- Banis, K. 2019. «Biasing a staged fuel injection system of a single cylinder four stroke gasoline engine». Pp. 195-200 en *Research for Rural Development*. Vol. 1.
- Bao, L. Z., B. G. Sun, y Q. H. Luo. 2022. «Optimal control strategy of the turbocharged direct-injection hydrogen engine to achieve near-zero emissions with large power and high brake thermal efficiency». *Fuel* 325. doi:10.1016/j.fuel.2022.124913.
- Bontorin, Ana Carolina Bueno, y Leonardo De Oliveira Carvalho. 2016. «Investigation of the Impact of Lean Mixtures on the Performance of GDI Engines». *SAE Technical Papers Part F127082(October)*. doi:10.4271/2016-36-0326.
- Buchman, M. R., y A. G. V. Winter. 2016. «Validating a method for turbocharging single cylinder four stroke engines». en *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*. Vol. 3.
- Carpenter, A. L., R. E. Mayo, J. G. Wagner, y P. E. Yelvington. 2015. «High-pressure electronic fuel injection for small-displacement single-cylinder diesel engine». en *ASME 2015 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference, ICEF 2015*. Vol. 2.
- Chen, Ceyuan, Muhsin M. Ameen, Haiqiao Wei, Claudia Iyer, Foochern Ting, Brad Vanderwege, y Sibendu Som. 2019. «LES Analysis on Cycle-to-Cycle Variation of Combustion Process in a DISI Engine». *SAE Technical Papers 2019-January(January)*. doi:10.4271/2019-01-0006.
- ClutchMax. s. f. «Complete Clutch and Flywheel Bundle Kit». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://clutchmax.net/pages/complete-clutch-and-flywheel-bundle-kit>.

- Dabelstein, W., A. Reglitzky, A. Schütze, y K. Reders. 2021. *Engine Technology*.
- Dasgupta, S., P. Sarmah, y P. P. Borthakur. 2020. «Application of variable geometry turbine turbochargers to gasoline engines- A review». *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 943(1):012010. doi:10.1088/1757-899X/943/1/012010.
- Descieux, D., y M. Feidt. 2006. «Modelling of a spark ignition engine for power-heat production optimization». Pp. 1137-44 en *ECOS 2006 Proceedings of the 19th International Conference on Efficiency Cost Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.
- Dziedzic, P., y K. Danilecki. 2018. «The concept of determining the control function of turbochargers in sequential turbo-charging». en *Iop Conference Series Materials Science and Engineering*. Vol. 421.
- EFI Analytics. s. f.-a. «MegaSquirt-II Engine Management System». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://www.megasquirt.info/ms2>.
- EFI Analytics. s. f.-b. «TunerStudio MS Engine Management Software». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://www.tunerstudio.com/>.
- Eichhorn, R. H. L., M. D. Boot, y C. C. M. Luijten. 2010. «Throttle loss recovery using a variable geometry turbine». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2010-01-1441.
- Farinango-Herrera, C., J. Zambrano-Ramón, y E. V. Rojas-Reinoso. 2024. «Thermographic Analysis of Exhaust Gas and Emissions by Varying Catalyst Behaviour and Injection Parameters». *Energies* 17(6). doi:10.3390/en17061417.
- Fukuhara, Yoshiki, Naoya Kimata, y Takashi Suzuki. 2013. «Improving the fuel economy of supercharged engine». *SAE Technical Papers* 2013. doi:10.4271/2013-32-9118.
- Ge, H., S. Parameswaran, y P. Zhao. 2024. *Modelling of Spark Ignition System*. Vol. Part F2865.
- Generic Manufacturer. s. f. «UEGO Wideband Air–Fuel Ratio Controller Kit». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://www.aliexpress.com/item/100500xxxxxxx.html>.
- Gimelli, Alfredo, Massimiliano Muccillo, Gennaro Reale, Francesco Salluzzi, Pasquale Solimene, y Gianluca Toscano. 2019. «Preliminary analysis of a hydraulic variable valve actuation loss model for the control-oriented base engine calibration». en *AIP Conference Proceedings*. Vol. 2191.
- He, Chao, Longqing Zhao, Dewen Jia, y Jiaqiang Li. 2009. «Particle number emissions and size distributions of diesel engines with electronically controlled unit injector». Pp. 229-32 en *2009 International Conference on Energy and Environment Technology*. Vol. 1.

- Heidary, A. R., A. Nejat, y Sh. Alaviyoun. 2023. «CFD Study of the Impacts of a Turbocharger's Various Wastegate and Bypass Configurations on the Efficiency and the Flow Field of its Radial Turbine». *Journal of Applied Fluid Mechanics* 16(6):1145 – 1159. doi:10.47176/jafm.16.06.1519.
- Hu, B., J. W. G. Turner, S. Akehurst, C. Brace, y C. Copeland. 2017. «Observations on and potential trends for mechanically supercharging a downsized passenger car engine:a review». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering* 231(4):435-56. doi:10.1177/0954407016636971.
- Hushim, M. F., A. J. Alimin, y M. F. Mansor. 2012. *Effect of intake manifold angle of port-fuel injection retrofit-kit to the performances of an S.I. engine*. Vol. 165.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2010). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204: Emisiones de gases contaminantes en vehículos automotores a gasolina en circulación*. INEN.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2012). *Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 017: Emisiones contaminantes de vehículos automotores en circulación*. INEN.
- Iyer, H., R. Shaik, A. Vagesh, M. Ravisankar, S. Srikanth, y R. Velusamy. 2011. «Turbocharging a small two cylinder di diesel engine - Experiences in improving the power, low end torque and specific fuel consumption». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2011-24-0133.
- Kadekar, P., y A. Wakankar. 2018. «Automated Test Environment for On-Board Diagnostics Counters for an Automotive On-Road Application». Pp. 409-13 en *Proceedings of the 2nd International Conference on Trends in Electronics and Informatics, ICOEI 2018*.
- Kala, V., P. Dernerova Foitova, M. Mikolas, y P. Paus. 2013. «Description and comparison of different types of priming systems». Pp. 397-401 en *International Multidisciplinary Scientific Geoconference Surveying Geology and Mining Ecology Management Sgem*. Vol. 1.
- Kale, A. B., J. M. Phate, P. S. Munfan, y Y. S. Chavan. 2019. *Investigation of relation between ignition timing and advance angle to improve engine performance*.
- Karabektas, M. 2009. «The effects of turbocharger on the performance and exhaust emissions of a diesel engine fuelled with biodiesel». *Renewable Energy* 34(4):989-93. doi:10.1016/j.renene.2008.08.010.
- Karthic, S. V., M. Senthil Kumar, G. Nataraj, y P. Pradeep. 2020. «An assessment on injection pressure and timing to reduce emissions on diesel engine powered by renewable fuel». *Journal of Cleaner Production* 255. doi:10.1016/j.jclepro.2020.120186.
- Kassim, M. S., M. K. Allawi, y H. S. S. Aljibori. 2023. «SIMULATION OF EFFECT OF INJECTION STRATEGIES ON PERFORMANCE OF A SPARK IGNITION

ENGINE». *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering* 15(1):212-17.

- Ketata, A., y Z. Driss. 2025. «Comparative analysis of emission characteristics and performance between naturally aspirated and turbocharged engines operating on waste oil biodiesel-diesel blends». *Journal of Umm Al Qura University for Engineering and Architecture*. doi:10.1007/s43995-025-00239-5.
- Kim, MinHo, YoungSoo Do, y JaeWook Jeon. 2022. «Wireless ECU reprogramming for multiple vehicles in factories and service centers via WiFi». en *Proceedings of the 2022 16th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication, IMCOM 2022*.
- Kleeberg, H., D. Tomazic, O. Lang, y K. Habermann. 2006. «Future potential and development methods for high output turbocharged direct injected gasoline engines». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2006-01-0046.
- Km77. s. f. «BMW Serie 3 (E46) 328i: datos y especificaciones (1998)». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://www.km77.com/coches/bmw/serie-3/1998/berlina/estandar/328i/datos>.
- Kolakoti, A., y B. V. A. Rao. 2020. «Performance and emission analysis of a naturally aspirated and supercharged IDI diesel engine using palm methyl ester». *Biofuels* 11(4):479-90. doi:10.1080/17597269.2017.1374770.
- Lee, S., S. Noh, T. Choi, y R. S. Davis. 2016. «Effects of dual mpfi on performance and fuel consumption in a small gasoline engine». en *FISITA 2016 World Automotive Congress - Proceedings*.
- Lee, W., E. Schubert, Y. Li, S. Li, D. Bobba, y B. Sarlioglu. 2016. «Electrification of turbocharger and supercharger for downsized internal combustion engines and hybrid electric vehicles-benefits and challenges». en *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo Itec 2016*.
- Lee, W., E. Schubert, Y. Li, S. Li, D. Bobba, y B. Sarlioglu. 2017. «Overview of Electric Turbocharger and Supercharger for Downsized Internal Combustion Engines». *IEEE Transactions on Transportation Electrification* 3(1):36-47. doi:10.1109/TTE.2016.2620172.
- Liu, Q., Z. Liu, G. Wu, J. Wang, y Z. Yang. 2021. *Premixed Combustion Mechanism of Vehicle Turbocharged Diesel Engine Under Transient Working Conditions Based on DSPACE*. Vol. 747.
- Luo, X., B. De Jager, y F. Willems. 2015. «Emission constrained multiple-pulse fuel injection optimisation and control for fuel-efficient diesel engines». Pp. 2571-76 en *2015 European Control Conference, ECC 2015*.
- Machrafi, H. 2012. *Philosophy for controlling auto-ignition in an HCCI engine*.

- Mahmoudi, A. R., I. Khazaei, y M. Ghazikhani. 2017. «Simulating the effects of turbocharging on the emission levels of a gasoline engine». *Alexandria Engineering Journal* 56(4):737-48. doi:10.1016/j.aej.2017.03.005.
- MaxpeedingRods. s. f. «T04E Turbo Kit with Wastegate, Intercooler and Piping Kit for BMW E36/E46 325i, 328i, M3 I6». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://www.maxpeedingrods.com/product/t04e-turbo-kit-wastegateintercoolerpiping-kit-for-bmw-e36-e46-325i-328i-m3-i6.html?search=e46%20kit>.
- Meyer, R. 2005. «Turbo charging BMW's spray guided DI-combustion system - Benefits and challenges». Pp. 95-102 en *Advanced Engine Design and Performance*. Vol. 33.
- Mo, T., C. K. Poon, W. C. Ting, X. Wen, X. Feng, y S. C. Chan. 2016. «Advanced and integrated electronic fuel injection (EFI) system for motorcycle engine». en *FISITA 2016 World Automotive Congress - Proceedings*.
- Mullett, J. D., P. B. Dickinson, A. T. Shenton, G. Dearden, y K. G. Watkins. 2008. «Multi-cylinder laser and spark ignition in an IC gasoline automotive engine: A comparative study». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2008-01-0470.
- Murtaza, G., A. I. Bhatti, y Q. Ahmed. 2018. «Design, Development, and Evaluation of a Control Framework for an Atkinson Cycle Engine». *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME* 140(5). doi:10.1115/1.4038299.
- Natti, K., A. Sinha, C. Hoerter, P. Andersson, J. Andersson, C. Lohmann, D. Schultz, N. H. Cho, y R. Winsor. 2013. «Studies on the Impact of 300 MPa injection pressure on engine performance, gaseous and particulate emissions». *SAE International Journal of Engines* 6(1):336-51. doi:10.4271/2013-01-0897.
- Omary, N. K., M. K. G. Babu, J. P. Subrahmanyam, y T. S. Bhatti. 2003. «PC Based (Digital) Controlled Gasoline Fuel Injection System for a Single Cylinder Spark Ignition Engine». *SAE Technical Papers* 2003-Augus(August). doi:10.4271/2003-28-0025.
- Pana, Constantin, Niculae Negurescu, y Alexandru Cernat. 2013. «Improvement of the automotive spark ignition engine performance by supercharging and the bioethanol use». *Lecture Notes in Electrical Engineering* 191 LNEE(VOL. 3):27 – 36. doi:10.1007/978-3-642-33777-2_3.
- Pielecha, I., y Z. Stępień. 2022. «OPERATIONAL EVALUATION OF ATOMIZATION INDICATORS FOR GASOLINE WITH ADMIXTURES OF ETHANOL AND BUTANOL DURING KEEP-CLEAN TESTS». *Archives of Transport* 62(2):123-37. doi:10.5604/01.3001.0015.9583.
- Pradhan, S., y P. K. Jeemon. 2018. «Modeling and Validation of a Roots-type Supercharger Using GT-SUITE». *SAE Technical Papers* 2018-April. doi:10.4271/2018-01-0164.

- Quantum Fuel Systems. s. f. «340LPH Fuel Pump w/ Installation Kit - Automotive Performance, QFS-343FT-118 High Flow Fuel». Recuperado 13 de diciembre de 2025. <https://www.highflowfuel.com/340lph-fuel-pump-w-installation-kit-automotive-performance-qfs-343ft-118-qfs/?Year=1999&Make=BMW&Model=328i&Engine=L6%202.8L%202793CC>.
- Radden, P., y M. Schümann. 2004. «Plastic solution for supercharged air pipes | Kunststoff-Lösung für Ladeluftrohre». *Kunststoffe Plast Europe*, 95-96.
- Ramkumar, J., A. Krishnasamy, y A. Ramesh. 2023. «A novel layout to charge a single cylinder diesel engine using supercharging and impulse turbo-compounding». *International Journal of Engine Research* 24(9):3922-42. doi:10.1177/14680874231175397.
- Ramkumar, J., A. Krishnasamy, y A. Ramesh. 2025. «Design of a novel impulse turbine for exhaust energy recovery in a commercial load carrier single cylinder diesel engine». *International Journal of Engine Research* 26(1):54-81. doi:10.1177/14680874241267346.
- Ribeiro, Bernardo, Jorge Martins, y Nikit Kothari. 2006. «Otto and VCR miller engine performance during the European driving cycle». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2006-01-0440.
- Rojas-Reinoso, V., J. Alvarez-Loor, H. Zambrano-Becerra, y J. A. Soriano. 2023. «Comparative Study of Gasoline Fuel Mixture to Reduce Emissions in the Metropolitan District». *Sustainability Switzerland* 15(4). doi:10.3390/su15042921.
- Rojas-Reinoso, V., S. Duque-Escobar, C. Guapulema-Guapulema, y J. A. Soriano. 2023. «Study of the Variation of Fuel Pressure to Improve Spraying and the Range of the Injection Jet». *Energies* 16(14). doi:10.3390/en16145472.
- Rose, A. T. J. M., S. Akehurst, y C. J. Brace. 2011. «Modelling the performance of a continuously variable supercharger drive system». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering* 225(10):1399-1414. doi:10.1177/0954407011406320.
- Sako, Takahiro, Shunsaku Nakai, Koji Moriya, y Norimasa Iida. 2005. «Improvement of performance in a natural-gas fueled homogeneous charge compression ignition engine with supercharged». *Nihon Kikai Gakkai Ronbunshu, B Hen/Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Part B* 71(707):1955 – 1960. doi:10.1299/kikaib.71.1955.
- Santaella, J. R. B., O. J. Suarez, y J. J. C. Eras. 2024. «Applying fuzzy and adaptive control techniques to a turbocharger test bench». en *2024 IEEE Colombian Conference on Applications of Computational Intelligence Colcaci 2024 Proceedings*.
- Santoso, B., C. T. Pambudi, D. D. D. P. Tjahjana, y F. Imaduddin. 2022. «Improve Engine Performance Using Twin Spark Plug Ignition». en *Aip Conference Proceedings*. Vol. 2499.

- Selvaraj, K. 2024. «A comprehensive review: role of fuel injection methodologies on performance enhancement and mitigation of emissions in the diesel engine». *International Journal of Oil Gas and Coal Technology* 36(2):219-43. doi:10.1504/IJOGCT.2024.140281.
- Serrano, J. R., F. J. Arnau, L. M. García-Cuevas González, A. Gómez-Vilanova, y S. Guilain. 2018. «Impact of a holistic turbocharger model in the prediction of engines performance in transient operation and in steady state with LP-EGR». en *ASME 2018 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference Icef 2018*. Vol. 2.
- Sezer, Ismet, y Atilla Bilgin. 2008. «Exergy analysis of SI engines». *International Journal of Exergy* 5(2):204 – 217. doi:10.1504/IJEX.2008.016676.
- Shen, L. Z., Y. H. Bi, W. Zhang, J. L. Lei, W. S. Yan, Y. Z. Yang, y N. Zhang. 2005. «Combustion process of turbocharged and inter-cooled turbocharged diesel engine in different altitude regions». *Ranshao Kexue Yu Jishu Journal of Combustion Science and Technology* 11(6):524-29.
- Shen, L. Z., Y. Z. Yang, J. L. Lei, Y. H. Bi, W. S. Yan, y Y. J. Yang. 2006. «Study of performance and emissions of a turbocharged inter-cooling diesel engine at different altitudes». *Neiranji Xuebao Transactions of CSICE Chinese Society for Internal Combustion Engines* 24(3):250-55.
- Shibata, Hitoshi, Takeshi Mizobuchi, Makoto Iwamuro, Akinori Koda, y Hidekazu Omura. 2017. «New Spray Concept Development for Dual Injection System». *SAE Technical Papers* 2017-March(March). doi:10.4271/2017-01-0835.
- Stephany, R., V. Popardovský, y P. Lukášik. 2024. «Effect of Spark Plug Life on Combustion Engine Vibration». Pp. 606-10 en *Transport Means Proceedings of the International Conference*. Vols. 2024-Octob.
- Subramani, D. A., R. Dhinakaran, y V. R. Prasanth. 2020. *Introduction to Turbocharging—A Perspective on Air Management System*.
- Suess, M., M. Guenther, M. Schenk, y H. S. Rottengruber. 2012. «Investigation of the potential of corona ignition to control gasoline homogeneous charge compression ignition combustion». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D Journal of Automobile Engineering* 226(2):275-86. doi:10.1177/0954407011416905.
- Sun, W., J. Li, y Z. Jia. 2024. «Simulation Study on Electronic Control Fuel Injection System of Automobile Engine». Pp. 7075-79 en *Chinese Control Conference Ccc*.
- Taki, S., Y. Konishi, Y. Tomitani, K. Ishii, A. Imakita, y S. Kawawa. 2023. «Development of New V6 3.0 L Turbocharged and 3.5 L Naturally Aspirated Gasoline Direct Injection Engines». en *SAE Technical Papers*.
- Temming, J., y K. Kauder. 2006. *Screw-type supercharger without timing gear - Simulation and verification*.

- That's blown it. 2004. *Transport Engineer*, 12-15.
- Tripathi, S., S. Singh, K. Ahmad, y A. Thakur. 2019. «Despite the Turbo-Lag, Turbochargers are preferred to Superchargers by the Manufacturers». Pp. 577-81 en *2019 International Conference on Automation Computational and Technology Management Icaactm 2019*.
- Tripathy, S., S. Sahoo, y D. K. Srivastava. 2017. *Gasoline direct injection-challenges*.
- Uguru-Okorie, Daniel, Ademola Dare, y A. A. Burluka. 2016. «Effect of Supercharging on Cycle-To-Cycle Variation in a Two-Stroke Spark Ignition Engine». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2016-01-0688.
- Valle, Ramón Molina, José Eduardo Mautone Barros, José Guilherme Coelho Baeta, y Fabrício José Pacheco Pujatti. 2004. «Mapping procedure applied to general engine management system for spark plug engines». *SAE Technical Papers*. doi:10.4271/2004-01-3435.
- Wang, D., y X. Qian. 2010. «New-style turbocharger and its control system». Pp. V13551-54 en *Iccasm 2010 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling Proceedings*. Vol. 13.
- Wang, Lin-Shu, y Shiyong Yang. 2006. «Turbo-Cool turbocharging system for spark ignition engines». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 220(8):1163 – 1175. doi:10.1243/09544070JAUTO172.
- Xie, Wenping, Xu Dong, Mingyang Yang, y Kangyao Deng. 2025. «Study on matching and altitude adaptive characteristics of multistage turbocharging for gasoline engine at high-altitude conditions». *Energy* 321:135364. doi:10.1016/J.ENERGY.2025.135364.
- Zhao, Y., y J. Song. 2025. «Theoretical thermal efficiencies of ideal, supercharged and gasoline engine cycles». *Journal of Engineering Research Kuwait* 13(3):1667-72. doi:10.1016/j.jer.2024.05.001.
- Zhu, D., H. Wu, T. Lee, Q. Sun, Z. Shi, X. Li, y C. F. Lee. 2024. «Effects of the turbocharged Miller cycle strategy on the performance improvement and emission characteristics of diesel engines». *Environmental Pollution* 346. doi:10.1016/j.envpol.2024.123587.

ANEXO B. Bitácora de actividades

Fecha	Semana/Sesión	Actividad realizada	Resultado/Entregable	Decisión tomada (y por qué)	Responsable	Categoría	Evidencia (link/archivo/foto)	Estado	Observaciones
8/9/2025	S1	Revisión bibliográfica	Marco teórico	Se consideraron las especificaciones técnicas del vehículo para muestrear la potencia y verificar la concordancia con la ficha técnica del fabricante.	Aldrin Cifuentes	Marco teórico	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINaOPsgiueNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A
15/9/2025	S2	Investigación del vehículo	Levantamiento de especificaciones técnicas del vehículo y componentes originales.	Se levantaron las especificaciones técnicas del vehículo para establecer una línea base de comparación del desempeño del motor antes y después.	Aldrin Cifuentes	Descripción del vehículo de estudio.	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINaOPsgiueNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A
25/9/2025	S3	Toma de datos	Registro de condiciones ambientales de prueba.	Se registraron las condiciones ambientales para considerar su influencia en la combustión y el desempeño del motor y asegurar la	Aldrin Cifuentes	Delimitación del problema	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINaOPsgiueNAa	Finalizado	N/A

				comparabilidad de los resultados.			3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp		
5/10/2025	S4	Fabricación de elementos	Planificación de fabricación de elementos.	Se planificó la fabricación de los elementos del sistema de sobrealimentación para asegurar su correcta integración y el desarrollo adecuado de las pruebas experimentales.	Aldrin Cifuentes	Elementos para modificaciones Mecánicas y de Transmisión	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	No se concretaron los tiempos de planificación
10/10/2025	S5	Instalación de elementos	Instalación física de la ECU programable y validación del arnés eléctrico.	Se instaló la ECU programable y se validó el arnés eléctrico para garantizar la correcta comunicación y el funcionamiento confiable del sistema durante las pruebas experimentales.	Aldrin Cifuentes	Unidad de control electrónico programable ECU	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A

21/10/2025	S6	Configuración y tuneo	Configuración inicial de mapas de inyección (VE), encendido (Timing) y AFR en modo atmosférico.	Se configuraron los mapas de VE, encendido y AFR en modo atmosférico para establecer una referencia estable y segura del motor.	Aldrin Cifuentes	Instalación de la ECU programable y verificación previa en modo atmosférico	https://estliveupsed-u-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgieNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	La configuración de los mapas duro más de lo planificado por razones de tuneo.
29/10/2025	S7	Pruebas de funcionamiento	Pruebas de funcionamiento en ralentí y cargas parciales.	Se realizaron pruebas en ralentí y carga parcial para verificar la estabilidad del motor y la correcta calibración inicial de inyección y encendido.	Aldrin Cifuentes	Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con motor stock. Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con Ecu programable.	https://estliveupsed-u-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgieNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A
8/11/2025	S8	Ajuste de elementos	Ajuste fino de parámetros electrónicos para operación estable y segura del motor.	Se ajustaron finamente los parámetros electrónicos del motor para asegurar una operación estable y segura antes de pruebas de mayor exigencia.	Aldrin Cifuentes	Puesta en marcha, pruebas en banco y calibración final	https://estliveupsed-u-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgieNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A

12/11/2025	S9	Instalación de elementos	Montaje del turbocompresor, intercooler, wastegate y sistema de tuberías.	Se montó el sistema de sobrealimentación (turbocompresor, intercooler, wastegate y tuberías) para asegurar el control del flujo de aire y la presión durante las pruebas experimentales.	Aldrin Cifuentes	Montaje del turbocompresor, wastegate y sistema de escape	https://estliveupsed-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_upsedu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgieNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A
23/11/2025	S10	Instalación de elementos	Adecuación del sistema de alimentación de combustible (bomba de alto flujo y regulador).	Se adecuó el sistema de combustible con una bomba de alto flujo y un regulador de presión para garantizar un suministro estable y una combustión segura durante las pruebas.	Aldrin Cifuentes	Bomba de combustible de alto flujo	https://estliveupsed-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_upsedu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgieNAa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A

30/11/2025	S11	Configuración de elementos	Configuración de mapas de inyección y encendido para operación turboalimentada.	Se validó el funcionamiento del motor bajo presión positiva mediante el control de parámetros críticos para asegurar una operación segura y confiable durante las pruebas.	Aldrin Cifuentes	Puesta en marcha, pruebas en banco y calibración final	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQA0m3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A
9/12/2025	S12	Pruebas de funcionamiento	Validación del funcionamiento bajo presión positiva y control de parámetros críticos.	Se realizaron pruebas de dinamometría para medir y comparar la potencia y el torque en cada configuración del motor.	Aldrin Cifuentes	Resultados del análisis de gases a ralentí y carga con motor turboalimentado	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQA0m3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	Se realizaron varias pruebas ya que no todas salieron con el resultado esperado.
22/12/2025	S13	Pruebas de funcionamiento	Realización de pruebas de dinamometría en cada configuración.	Se realizaron pruebas de dinamometría para obtener y comparar valores de potencia y torque en las distintas configuraciones del motor.	Aldrin Cifuentes	Resultados del banco de potencia (dinamometría)	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQA0m3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A

29/12/2025	S14	Toma de datos y análisis	Medición y análisis de gases de escape (CO, CO ₂ , HC, O ₂ y λ).	Se midieron y analizaron los gases de escape (CO, CO ₂ , HC, O ₂ y λ) para evaluar la combustión y el impacto del sistema de alimentación y la gestión electrónica en las emisiones.	Aldrin Cifuentes	Resultados del análisis de gases a ralentí y carga	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	Se realizaron varias pruebas ya que no todas salieron con el resultado esperado.
5/1/2025	S15	Análisis de resultados	Comparación de resultados de potencia, torque, emisiones y eficiencia volumétrica.	Se compararon los resultados de potencia, torque, emisiones y eficiencia volumétrica para evaluar el impacto del sistema de alimentación en el desempeño del motor.	Aldrin Cifuentes	Evaluación del mapa de inyección Análisis de la eficiencia volumétrica (VE%) Análisis del avance de encendido (Timing)	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A
14/1/2025	S16	Redacción de texto y resultados	Redacción, revisión y ajuste final del documento de titulación según normativa académica.	Se realizó la redacción, revisión y ajuste final del documento de titulación conforme a la normativa académica vigente.	Aldrin Cifuentes	Tesis	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:w:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAOm3scM1zZRINa0PsgiuENaa3V2ZHR_WAmJHPbH25mfx8?e=VCN9fp	Finalizado	N/A

ANEXO C. Actas y documentos de respaldo académico

Fecha	Tipo (reunión/avance)	Asistentes	Agenda	Acuerdos/Decisiones	Tareas asignadas (qué/quién/cuándo)	Evidencia (acta/pdf/foto)	Observaciones	Firma
10/9/2025	Seminario anteproyecto	Aldrin Cifuentes	Desarrollo de anteproyecto	Planificación	Aldrin Cifuentes: desarrollo de anteproyecto	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQDNu2yG6dZRSZJEMi7CVfdCA71Tvq3YNU19Za70ctTmoo?e=0AqBaX	N/A	
11/9/2025	Seminario anteproyecto	Aldrin Cifuentes	Desarrollo de anteproyecto	Planificación	Aldrin Cifuentes: desarrollo de anteproyecto	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQDNu2yG6dZRSZJEMi7CVfdCA71Tvq3YNU19Za70ctTmoo?e=0AqBaX	N/A	
12/9/2025	Seminario anteproyecto	Aldrin Cifuentes	Desarrollo de anteproyecto	Planificación	Aldrin Cifuentes: desarrollo de anteproyecto	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQDNu2yG6dZRSZJEMi7CVfdCA71Tvq3YNU19Za70ctTmoo?e=0AqBaX	N/A	
24/11/2025	Revisión de proyecto de titulación	Aldrin Cifuentes	Desarrollo del proyecto de titulación y correcciones	Desarrollo y cambios	Aldrin Cifuentes: Corrección de proyecto, introducción y citas	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQANfixZ0xz8QZkkwvCf-z_8ASIk-q7lBhW1z6xz8gRio8Q?e=cba13M	Cambios pertinentes	

24/11/2025	Revisión de proyecto de titulación	Aldrin Cifuentes	Desarrollo del proyecto de titulación y correcciones	Desarrollo y cambios	Aldrin Cifuentes: Corrección de proyecto, marco teórico reorganización	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQBKoV-uf6OQSKCbEw-IHPt2AYSu7sA2xQglrNe-9e8FSuc?e=0dsdpq	Cambios pertinentes	
3/12/2025	Revisión de proyecto de titulación	Aldrin Cifuentes	Desarrollo del proyecto de titulación y correcciones	Desarrollo y cambios	Aldrin Cifuentes: Corrección de proyecto, cambios en Capítulo 1	Revisión 3.12.2025.pdf	Cambios pertinentes	
22/12/2025	Revisión de proyecto de titulación	Aldrin Cifuentes	Desarrollo del proyecto de titulación y correcciones	Desarrollo y cambios	Aldrin Cifuentes: Corrección de proyecto y verificación de plagio	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQD0npp8iCUPQ79dqObQQEEjAT81iC5m2X35k7FVx0odGqU?e=O2xew6	Cambios pertinentes	

21/1/2026	Seminario titulación Abet	Aldrin Cifuentes	Metodología	Planificación	Aldrin Cifuentes: Corrección de proyecto	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQDR0SXpKyDPRJeOz-kHudDEAZxPxITmha3qIFi8rYD3aOs?e=wffEox	Cambios pertinentes	
-----------	---------------------------	------------------	-------------	---------------	---	---	---------------------	--

ANEXO D. Presupuesto del proyecto de investigación

Rubro	Ítem/Descripción	Especificación clave	Cant.	Costo unitario (USD)	Subtotal (USD)	Proveedor /Fuente	Justificación técnica	Restricción (costo/tiempo/seguridad/norma)	Evidencia (cotización/factura/link)	Estado
Equipos	Analizador de gases de escape	Analizador de gases Brain Bee: Propiedad de la UPS	1	0	0	UPS	Medición de gases del vehículo	N/A	0	Finalizado

Equipos	Medidor de boost	Glowshift 20 PSI Boost	1	31	31	glowshift_oulet	Medición de Boost	Tiempo de importación	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQDwFs_OGpEyQI_euvrysGNDjARaKO7f_WKV_I-zOq6f5-gQU?e=IJW3Vg	Finalizado
Repuestos	Bomba de combustible de alto flujo	Quantum Flextech 340	1	108	108	Quantum fuel system	Mayor presión de combustible	Tiempo de importación	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQBI-zXSxIDbSIlzG6tmH7_qAT9yxeMqb8cX34Zeb_08KfA?e=vHYaWI	Finalizado
Repuestos	Embrague de alto desempeño	MaxClutch	1	308	308	Maxclutch	Ayuda a pegar la caja de cambios	Tiempo de importación	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQA3LskOokP7TKshAUZAmnhPAXVKmv780fr6etVMqH7qLC4?e=rv55H4	Finalizado

Repuestos	Volante de inercia liviano	MaxClutch	1	308	308	Maxclutch	Aligera el movimiento del volante	Tiempo de importación	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQA3LskOokP7TKshAUZAmnhPAXVKmv780fr6etVMqH7qLC4?e=rv55H4	Finalizado
Repuestos	Kit turbo	Maxspeedingroads	1	390	390	maxspeedingroadsMal	Ayuda a aumentar el aire	Tiempo de importación	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQATnR2GmXJQS49fKH0i1qSnAQRifSI7NXYvHWPcmvWVZRo?e=NhYPjn	Finalizado
Repuestos	Tuberia de escape	Tuberia 6-1 de 3"	1	350	350	Javi services	Mejora el flujo de gases	Demora tiempo planificado	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQASlxbGBLOeRpfByozPmgVMAC74stBl8-MrkvUe8cbQNBU?e=S8nleY	Finalizado

Materiales	Aceite de motor	Liqui molly	1	150	150	MUNDIAUTO	Ayuda a mantener el motor en condiciones optimas	N/A	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQA_r0Jc7UdSTp9WixsDyIKEAaPQyrR6n3aAoAgKGFEnx0A?e=8tAlnT	Finalizado
Materiales	Refrigerante	Simoniz	1	5	5	MUNDIAUTO	Mantiene el motor en temperatura	N/A	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQC9XhSNYtTPSKGUC9OT6AWsAWLsVSCUN2XwGBGFLrX5Bm0?e=ETNUxl	Finalizado
Materiales	Cableado y gestion electrónica	Siemens	1	100	100	MUNDIAUTO	Controla la gestion electrónica en todo el vehículo	N/A	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQAt-TkLceZCRICdu6kQrKtOAXlqnEztdHQVYPJLS1wBsjc?e=mdVU6g	Finalizado

Pruebas	Pruebas de dinamometría en configuración original	Dinamometro propiedad de high performance	1	60	60	MUNDIAUTO	Toma de datos	N/A	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQATEltYcx8_RJ8Kni_0_GzOAOqIunUWpye5Cl0oQ23MO0E?e=MFm86A	Finalizado
Pruebas	Pruebas de dinamometría con ECU programable	Dinamometro propiedad de high performance	1	60	60	JLCOMPETICIÓN	Toma de datos	Demora tiempo planificado	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQD_7FCulFX4RJ6lOu8HR17FAVvyXKbTKnHLqOCerHa3Mx64?e=jAkZI	Finalizado
Pruebas	Pruebas de dinamometría con sistema turboalimentado	Dinamometro propiedad de high performance	1	60	60	JLCOMPETICIÓN	Toma de datos	Demora tiempo planificado	https://estliveupsedu-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/acifuentesm1_est_ups_edu_ec/IQB5VovF8MYaSoftyX48a8Y99AQwEUJ1ToCcQyyP5EDAesNE?e=7tehDA	Finalizado
Software	Software de calibración de la ECU	TunerStudio	1	0	0	Tunerstudio	Permite hacer cambios en	N/A	https://www.tunerstudio.com/index.php/downloads	Finalizado

	(TunerStudio)						el sistema de la ECU			
	TOTAL				1930					