

Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción

Diseño de banco de pruebas para diagnóstico de ECU mediante simulación de
señales automotrices.

INGE-3007

Proyecto Integrador

Previo la obtención del Título de:

Nombre de la titulación

Ingeniero en Mecatrónica

Presentado por:

Rocío Isabel Chávez Lucio

Jennifer Denisse Pacheco Merino

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

Dedicatoria

Este proyecto se lo dedico a mi padre y a mi madre, por todo el apoyo que me ha dado a lo largo de mi formación académica y personal. Gracias por su constante esfuerzo, por la confianza depositada en mí y por motivarme a seguir adelante incluso en los momentos más difíciles, siendo este el reflejo de la perseverancia y el compromiso que me han inculcado, que representa una parte del camino que he podido recorrer gracias a su apoyo y comprensión.

Rocío Chávez

Dedicatoria

Dedico este proyecto a mis padres, Johson Pacheco y Perlita Merino, por su apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida académica. A mi padre, quien hoy ya no está conmigo, le dedico este título; su fe, amor y ejemplo fueron la fuerza que me permitió seguir adelante.

Jenniffer Pacheco

Agradecimientos

Mi sincero agradecimiento a Dios por brindarme la salud y fortaleza necesarias para culminar esta etapa. A mis padres y hermanos, por su apoyo constante y motivación. A mi compañera de tesis y amiga, Jenniffer Pacheco, por su compromiso y apoyo a lo largo del desarrollo del camino.

A mis amigos Dominique Cevallos, Erick Solórzano y Daniel Paladines, y a mis amigas de Colombia, Adriana Marín y María Posada, por su ánimo y confianza. A mis mascotas, por su compañía durante este proceso.

Finalmente, agradezco a nuestro tutor, Ph.D. Bryan Puruncajas, y al M.Sc. León Torres, por su guía y acompañamiento académico.

Rocío Chávez

Declaración Expresa

Nosotros Rocío Isabel Chávez Lucio y Jennifer Denisse Pacheco Merino acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

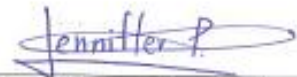
En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 13 de octubre del 2025.



Rocío Isabel Chávez

Lucio



Jennifer Denisse Pacheco

Merino

Evaluadores

Jonathan Roberto León Torres, M.Sc.

Profesor de Materia

Bryan Joao Puruncajas Maza, Ph. D.

Tutor de proyecto

Resumen

El presente proyecto tiene como objetivo diseñar para evaluar el funcionamiento de una unidad de control electrónico automotriz en un entorno controlado, sin necesidad de instalarla en un vehículo real. La propuesta responde a la creciente complejidad de los sistemas electrónicos vehiculares y a la limitada disponibilidad de herramientas accesibles para diagnóstico especializado en talleres locales. Como hipótesis, se plantea que la simulación controlada de señales y condiciones de carga permite identificar fallas internas de manera segura y eficiente. El desarrollo del proyecto se realizó mediante una metodología estructurada, empleando un microcontrolador Arduino Mega 2560, conversores digital-analógico, circuitos de acondicionamiento de señal, módulos de simulación de carga y una interfaz gráfica desarrollada en Python. Se consideraron normas internacionales de seguridad eléctrica y compatibilidad electromagnética aplicables a equipos de prueba.

Los resultados demostraron que el sistema generado permite reproducir señales analógicas y digitales representativas de sensores y actuadores reales, validando la respuesta de la unidad de control bajo condiciones simuladas. Concluyendo que el sistema desarrollado es una herramienta funcional, modular y escalable, útil para el diagnóstico electrónico automotriz y formación especializada.

Palabras clave: Unidad de Control Electrónico, Diagnóstico automotriz, Simulación de señales

Abstract

The present project aims to design a system for evaluation of an automotive electronic control unit in a controlled environment, without the need to install it in a real vehicle. The proposal is justified by the increasing complexity of vehicular electronic systems and the limited availability of accessible tools for specialized diagnostics in local workshops. The hypothesis states that controlled signal and load simulation enables safe and efficient identification of internal faults.

The project was developed using a structured methodology, employing an Arduino Mega 2560 microcontroller, digital-to-analog converters, signal conditioning circuits, load simulation modules, and a graphical user interface developed in Python. International standards related to electrical safety and electromagnetic compatibility applicable to test equipment were also considered.

The results demonstrated that the developed system can reproduce analog and digital signals representative of real sensors and actuators, validating the response of the control unit under simulated conditions. It is concluded that the proposed system is a functional, modular, and scalable tool suitable for automotive electronic diagnostics and specialized technical training.

Keywords: Electronic Control Unit, Automotive diagnostics, Signal simulation.

Índice general

Resumen.....	I
<i>Abstract</i>	II
Abreviaturas.....	VI
Simbología.....	VIII
Índice de figuras.....	IX
Índice de tablas.....	XI
Índice de planos.....	XII
Capítulo 1.....	1.
1.1 Introducción.....	2
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Justificación del problema.....	4
1.4 Objetivos.....	5
1.4.1 Objetivo general.....	5
1.4.2 Objetivos específicos.....	5
1.5 Marco teórico.....	6
1.5.1 Crecimiento del parque automotor en Ecuador.....	6
1.5.2 ECU y subsistemas asociados.....	6
1.5.3 Estructura y funcionamiento general.....	7
1.5.4 Tipos de ECU.....	8
1.5.5 Software y control.....	8
1.5.6 Sensores automotrices.....	9
1.5.7 Actuadores automotrices.....	10
1.5.8 Fallas comunes e impacto.....	12
1.5.9 Normativas y requisitos para equipos de pruebas electrónico.....	13
1.5.10 Estudios previos y equipos del mercado.....	14

Capítulo 2.....	17
2. Metodología.....	18
2.1 Requerimientos y restricciones del diseño	18
2.1.1 Requerimientos de diseño	18
2.1.2 Restricciones de diseño.....	19
2.2 Alternativas de solución	20
2.2.1 Alternativas de arquitectura del sistema	20
2.2.2 Criterios de selección para alternativas de arquitectura de sistema.....	21
2.2.3 Selección de alternativas.....	22
2.2.4 Diseño conceptual de la solución.....	23
2.3 Metodología de diseño	24
2.4 Diseño electrónico.....	25
2.4.1 Selección del controlador principal	26
2.4.2 Selección de conversor digital-analógico	28
2.4.3 Componentes electrónicos del sistema	30
2.4.4 Diseño del circuito de simulación de sensores	32
2.4.5 Diseño de circuito de simulación de carga.	34
2.4.6 Bloque de circuito de alimentación.....	35
2.5 Diseño mecánico	36
2.6 Diseño de interfaz.....	40
2.6.1 Interfaz gráfica de usuario (GUI).....	43
Capítulo 3.....	46
3. Resultados y análisis.....	48
3.1 Estructura del componente electrónico	48
3.1.1 Arquitectura general del sistema.....	48
3.1.2 Módulos electrónicos implementados.....	49
3.1.3 Módulo de alimentación y regulación de voltaje.....	51

3.2	Generación de señales CKP y CMP	52
3.3	Estructura mecánica del banco de pruebas.....	53
3.4	Resultados de pruebas funcionales y cumplimiento de requerimientos.....	55
3.4.1	Simulación de señales de sensores automotrices	55
3.4.2	Resultados de la simulación de señales CKP y CMP	57
3.4.3	Encendido lógico de la ECU y activación de salidas.....	59
3.4.4	Simulación de condiciones de falla.....	60
3.4.5	Simulación de falla por inyector desconectado	61
3.4.6	Visualización del estado del sistema y diagnóstico	63
3.5	Análisis de costos	64
3.5.1	Análisis de costos por unidad	64
3.5.2	Costos al por mayor	65
3.5.3	Análisis comparativo de costos por unidad y al por mayor	66
Capítulo 4.....		66
4.	Conclusiones y recomendaciones	68
4.1	Conclusiones	68
4.2	Recomendaciones.....	69
Referencias.....		70.
Apéndices.....		77

Abreviaturas

ABS/ESP	Anti-lock Braking System / Electronic Stability Program
ADC	Analog-to-Digital Converter
ATM	Autoridad de Tránsito Municipal
CAN Bus	Controller Area Network
CKP	Crankshaft Position Sensor
CMP	Camshaft Position Sensor
DAC	Digital-to-Analog Converter
ECU	Electronic Control Unit
ECM	Engine Control Module
ECT	Engine Coolant Temperature Sensor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EVAP	Evaporative Emissions System
ESP32	Módulo WiFi/Bluetooth
FPS	Fuel Pressure Sensor
FTPS	Fuel Tank Pressure Sensor
FODINFA	Fondo de Desarrollo Infantil
GUI	Graphical User Interface
HIL	Hardware-in-the-Loop
HMI	Human-Machine Interface

IAT	Intake Air Temperature Sensor
IEC	International Electrotechnical Commission
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ISO	International Organization for Standardization
KS	Knock Sensor
LIN	Local Interconnect Network
MAF	Mass Air Flow Sensor
MAP	Manifold Absolute Pressure Sensor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
O ₂	Oxygen Sensor (Lambda)
OBD-II	On-Board Diagnostics II
PLC	Programmable Logic Controller
PWM	Pulse Width Modulation
PyQt6	Python Qt 6 Framework
RAM	Random-Access Memory
RC	Resistor-Capacitor Filter
ROM	Read-Only Memory
SAS	Steering Angle Sensor
TPS	Throttle Position Sensor
XR2206	Generador de funciones

Simbología

O₂ Símbolo químico del oxígeno

V Voltios (unidad de voltaje)

Índice de figuras

Figura 1 Ubicación de la ECM en el vehículo	7
Figura 2 Relación funcional entre la ECM y los actuadores principales, destacando las señales PWM y la retroalimentación sensorial.....	11
Figura 3 Diagrama funcional del sistema propuesto para el banco de pruebas.	24
Figura 4 Diseño de metodología.....	25
Figura 5 Diagrama funcional del bloque de control manual y visualización de estados.....	33
Figura 6 Diagrama de bloques de generación, acondicionamiento e inyección de fallas de señales.....	34
Figura 7 Conexión del módulo relé de 8 canales para simulación de carga de inyección e ignición.	35
Figura 8 Diagrama de alimentación del sistema.....	36
Figura 9 Diseño preliminar para el banco de pruebas.....	37
Figura 10 Dimensiones generales-vista frontal.....	38
Figura 11 Dimensiones generales - vista lateral	38
Figura 12 Base del banco de pruebas para ECU.....	39
Figura 13 Cubierta mecánica superior del banco de pruebas	40
Figura 14 Diseño preliminar de la interfaz	41
Figura 15 Diagrama de flujo del diseño de la interfaz gráfica.....	42
Figura 16 Panel principal de la interfaz gráfica del banco de pruebas	43
Figura 17 Visualización de señales CKP y CMP en la interfaz gráfica.....	44
Figura 18 Módulo de inyección de fallas de la interfaz gráfica.....	45
Figura 19 Ventana de supervisión de salidas de la ECU	46
Figura 20 Arquitectura general del módulo electrónico de simulación de señales del banco de pruebas	49
Figura 21 Modulo de simulación de señales automotrices implementado	50
Figura 22 Modulo de simulación y visualización de la respuesta de la ECU.....	50
Figura 23 Esquema del módulo de alimentación y regulación de voltaje del banco de pruebas para diagnóstico de ECU	51
Figura 24 Señales CKP y CMP medidas mediante osciloscopio durante la simulación del patrón 60-2	53
Figura 25 Vista explotada de la carcasa del banco de pruebas para diagnóstico de ECU.....	54
Figura 26 Estructura mecánica y carcasa del banco de pruebas para diagnóstico de ECU.....	55

Figura 27 Simulación manual de señales de sensores automotrices mediante el banco de pruebas físico	56
Figura 28 Control digital y visualización de sensores automotrices a través de la interfaz gráfica del banco de pruebas.....	57
Figura 29 Señales CKP y CMP medidas mediante osciloscopio en la ECU del vehículo	58
Figura 30 Señales CKP y CMP simuladas mediante Arduino durante las pruebas del banco de pruebas	58
Figura 31 Visualización del estado lógico de inyectores y bobinas desde la GUI	59
Figura 32 Validación del banco de pruebas mediante escáner de diagnóstico OBD-II.....	60
Figura 33 Interfaz gráfica para la simulación de condiciones de falla y visualización de la respuesta de la ECU	61
Figura 34 Verificación de la falla simulada mediante diagnóstico OBD-II	61
Figura 35 Simulación de falla por inyector desconectado en el cilindro 1 desde la GUI.....	62
Figura 36 Verificación de la falla por inyector desconectado OBD-II.....	63
Figura 37 Identificación y numeración de pines del conector de la ECU	88

Índice de tablas

Tabla 1 Clasificación y función de los sensores automotrices	9
Tabla 2 Actuadores automotrices.....	10
Tabla 3 Fallas comunes en ECM	12
Tabla 4 Normas aplicables al diseño de banco de pruebas	13
Tabla 5 Requerimientos del proyecto	18
Tabla 6 Restricciones de diseño.....	20
Tabla 7 Criterios de selección.....	21
Tabla 8 Ponderación de criterios de selección	22
Tabla 9 Matriz de decisión de alternativas de solución	22
Tabla 10 Alternativas de controlador del sistema.....	26
Tabla 11 Matriz de decisión de alternativas de controlador del sistema	28
Tabla 12 Alternativas de DAC para la simulación de señales automotrices	29
Tabla 13 Matriz de selección de componentes	30
Tabla 14 Componentes electrónicos para los bloques de circuitos.....	31
Tabla 15 Análisis de costos por componentes eléctricos y mecánicos.....	64
Tabla 16 Desglose de costos por unidad y por mayor	66
Tabla 17 Criterios de selección de controlador.....	78
Tabla 18 Ponderación de criterios de la Tabla 14.....	78
Tabla 19 Criterios de selección de DAC.....	79
Tabla 20 Ponderación de criterios de la Tabla 16.....	79
Tabla 21 Distribución de pines de conexión de la ECU	88
Tabla 22 Fallas internas comunes: tipos, causas y consecuencias.....	93

Índice de planos

PLANO 1	Circuito de simulación de señales
PLANO 2	Circuito de simulación de carga
PLANO 3	Circuito regulador de voltaje
PLANO 4	Renderizado general del banco de pruebas
PLANO 5	Vista isométrica del banco de pruebas
PLANO 6	Vista explotada general del banco de pruebas
PLANO 7	Subconjunto interno del banco de pruebas
PLANO 8	Pieza superior de la carcasa – vista de detalle
PLANO 9	Pieza base – vista de detalle
PLANO 10	Pieza base – vista lateral de detalle
PLANO 11	Pieza base – vista posterior de detalle
PLANO 12	Pieza base – vista frontal de detalle 1
PLANO 13	Pieza base – vista frontal de detalle 2
PLANO 14	Pieza soporte para PCB – vista de detalle
PLANO 15	Pieza divisor interior – vista de detalle

Capítulo 1

1.1 Introducción

La electrónica automotriz ha transformado de manera significativa el funcionamiento de los vehículos modernos. Las Unidades de Control Electrónico (ECU) son el eje principal del control del motor, garantizando eficiencia energética [1]. Según reportes internacionales, el mercado de las ECUs continúa en crecimiento, siendo favorecido por la expansión del parque vehicular eléctrico, los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS) y el infoentretenimiento [2] [3].

Este avance tecnológico se refleja en la complejidad de los vehículos actuales. Un automóvil convencional integra entre 30 y 50 unidades de control, mientras que modelos de alta gama superan las 100 [4]. Esta dependencia de los sistemas electrónicos ha incrementado la demanda de herramientas de diagnóstico, pues la reparación de ECUs se ha vuelto indispensable. Estudios recientes, indican que las fallas en los sistemas electrónicos pueden alterar la mezcla aire-combustible, elevar las emisiones contaminantes [5].

Por ello, metodologías como Hardware-in-Loop (HIL) cobran relevancia, al validar el desempeño de las ECUs en entornos seguros y simulados, tanto industriales [6], como académicos, donde se utilizan como recurso didáctico para electrónica automotriz [7]. En paralelo, la formación técnica se ha vuelto clave: informes de ZipDo, revelan que más del 50% de empresas de posventa automotriz invierten capacitación digital y electrónica para sus técnicos. Además, la creciente oferta de equipos para diagnóstico de ECUs impulsa a los talleres a priorizar la capacitación técnica. Entonces, el banco de pruebas se plantea como una solución práctica para talleres y entornos académicos [8] [9].

Esta propuesta se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), al reflejar como la modernización del sector automotriz contribuye a una industria más eficiente y responsable. Se relaciona con el ODS 9, al impulsar tecnologías locales que fortalecen la

competitividad del sector automotriz. También con el ODS 12, al favorecer la detección temprana de fallas, y prolongar la vida útil de los componentes, reduciendo el impacto ambiental.

Este trabajo busca optimizar los procesos de diagnóstico electrónico automotriz, mediante la integración de recursos de electrónica, programación y visualización, generando herramientas aplicables tanto en el ámbito laboral como educativo para mejorar el análisis y aprendizaje técnico en situaciones reales.

1.2 Descripción del problema

El crecimiento del sector automotriz ha generado nuevos desafíos en el diagnóstico electrónico [10] [11]. En ciudades de alta densidad vehicular, como Guayaquil, los talleres enfrentan limitaciones para realizar diagnósticos eficientes y mantener la eficiencia operativa.

Aunque no existen estadísticas locales sobre fallas en ECUs, estudios internacionales estiman su impacto. La revista Acta FIH reporta que hasta el 21 % de las fallas eléctricas y electrónicas están asociadas directamente a la ECU. Mientras que la industria de semiconductores advierte sobre fallas electrónicas recurrentes, incluso bajo estrictos controles de calidad. Estos reportes señalan la creciente complejidad electrónica de los vehículos modernos y posibles errores de acoplamiento entre hardware y software. Estas cifras sugieren que, en ciudades como Guayaquil, la incidencia de fallas podría ser mayor, evidenciando la necesidad de diagnóstico especializado [12] [11].

En este contexto, los problemas internos en circuitos vinculados a sensores como el Sensor de Posición del Acelerador (TPS) o en los drivers de inyectores no siempre son detectados por los escáneres OBD-II (On-Board Diagnósticos II) [13], generando diagnósticos empíricos, reemplazo innecesario de módulos y pérdidas económicas para talleres y clientes.

La falta de herramientas para evaluar la ECU fuera del vehículo limita la capacidad de los talleres, por lo cual este servicio técnico sigue siendo escaso en el mercado local. Situación

que afecta no solo a la rentabilidad del servicio y la calidad de las reparaciones.

El proyecto surge de una problemática identificada en un taller electromecánico local, cuya limitación para evaluar ECUs externamente, restringe su capacidad de atención ante el aumento de fallas electrónicas. Esto destaca la importancia de desarrollar un sistema replicable, adaptable y alineado con las demandas del sector.

1.3 Justificación del problema

En Guayaquil, el número de talleres especializados en diagnóstico de ECUs sigue siendo limitado frente al crecimiento del parque automotor y la complejidad de los sistemas electrónicos actuales. Esto genera dependencia de equipos importados y limita el diagnóstico local. La falta de herramientas adecuadas provoca tiempos muertos, derivaciones y errores por ensayo-error, afectando la rentabilidad del servicio.

Aunque el país cuenta con más de 20 000 trabajadores registrados en el área de reparación automotriz [14], muchos no disponen de herramientas asequibles para simular condiciones de la ECU. Equipos económicos, como el MST-9000+, rondan los 330 USD sin funciones avanzadas; los intermedios superan los 450 USD: y los profesionales, como EngineDance X5Pro+, pasan de 4 000 USD e incluyen un software especializado [15]. A esto se suman impuestos e importación, pues sólo están disponibles en línea, bajo regímenes como el de mensajería acelerada y courier [16]. Incluso soluciones virtuales, como Synopsys Silver o INCA-FLOW, requieren una interfaz física. Esta dependencia tecnológica encarece el servicio, limita la competitividad de talleres pequeños y medianos [17][18].

Además, estudios recientes muestran que simular señales como TPS, sensor de posición del cigüeñal (CKP), sensor de posición del árbol de levas (CMP), sensor de temperatura del aire de admisión (IAT), sensor de presión absoluta del múltiple (MAP) y sensor de temperatura del refrigerante (ECT) en entornos controlados mejora la precisión del diagnóstico y reduce los tiempos de atención [19][20]. También se ha demostrado que fallas en sensores como TPS [21]

o ECT afectan la dosificación de combustible y aumentan las emisiones, especialmente en arranque en frío [22]. Asimismo, se ha comprobado que diferentes estrategias de diagnóstico tienen un impacto económico y ambiental significativo, lo que refuerza la necesidad de soluciones más eficientes [23].

Por lo tanto, se identifica la necesidad de contar con un sistema local de simulación de señales que permita realizar diagnósticos electrónicos con mayor precisión y seguridad. Su desarrollo representa una alternativa práctica frente a la dependencia de equipos importados y contribuye al fortalecimiento de la formación técnica y del desarrollo tecnológico en Ecuador.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar un banco de pruebas para la simulación de señales de sensores automotrices, mediante la integración de módulos electrónicos y programación de un microcontrolador, con el fin de facilitar el diagnóstico de fallas en el circuito del sensor TPS y en el control de inyectores dentro de las ECUs.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Integrar los módulos DAC y los circuitos de acondicionamiento, mediante el diseño electrónico del banco de pruebas, para la correcta interacción con la ECU.
2. Desarrollar una interfaz gráfica para controlar virtualmente los sensores y visualizar las señales generadas de los sensores CKP y CMP, optimizando el diagnóstico técnico.
3. Evaluar el desempeño del banco de pruebas mediante una validación experimental bajo condiciones simuladas, para confirmar su utilidad en el diagnóstico de fallas de la ECU.
4. Diseñar una arquitectura modular mediante una estructura adaptable y escalable, con el fin de permitir futuras modificaciones.

1.5 Marco teórico

1.5.1 Crecimiento del parque automotor en Ecuador

La transición de sistemas de control mecánicos a electrónicos transformó la industria automotriz, impulsada por exigencias de eficiencia y regulación ambiental. En este contexto surgió la ECU, que evolucionó hacia un sistema capaz de gestionar múltiples señales en tiempo real. Con la llegada del estándar OBD-II, se estandarizó el diagnóstico y se incorporaron funciones de autoevaluación [24][25][26][27].

En Ecuador, esta tendencia global se refleja en el crecimiento sostenido del parque automotor. Según el INEC, en 2024 se registraron 3 138 562 vehículos matriculados, lo que representó un aumento del 1,96 % respecto al año anterior. La provincia del Guayas concentra el 24 % de este total, con más de 750 000 unidades, siendo Guayaquil la ciudad con mayor número de automotores [28].

De acuerdo con la ATM, el parque vehicular de la ciudad asciende a 693 161 vehículos, con una tasa de motorización de 250 por cada mil habitantes, aunque solo 240 000 cumplen con el proceso de revisión técnica [29][30]. Este crecimiento evidencia una mayor demanda de servicios de mantenimiento y diagnóstico especializado, así como la necesidad de infraestructura y tecnologías adecuadas para responder a la complejidad de los sistemas electrónicos modernos.

1.5.2 ECU y subsistemas asociados

La inyección electrónica de combustible sustituyó al carburador con el fin de mejorar la eficiencia de combustión, mejorando el rendimiento del motor y reduciendo emisiones [31]. Este sistema se basa en sensores que miden variables esenciales para el control electrónico.

La ECU, un microordenador, procesa estas señales mediante mapas de calibración y activa los actuadores encargados del control de inyección, encendido y recirculación de gases, manteniendo así una mezcla aire-combustible óptima [13][32].

1.5.3 Estructura y funcionamiento general

Una ECU moderna está conformada por un microcontrolador central, memorias internas, conversores analógicos-digitales (ADC/DAC), etapas de acondicionamiento de señal y módulos de comunicación. Las memorias internas se clasifican en [13][32]:

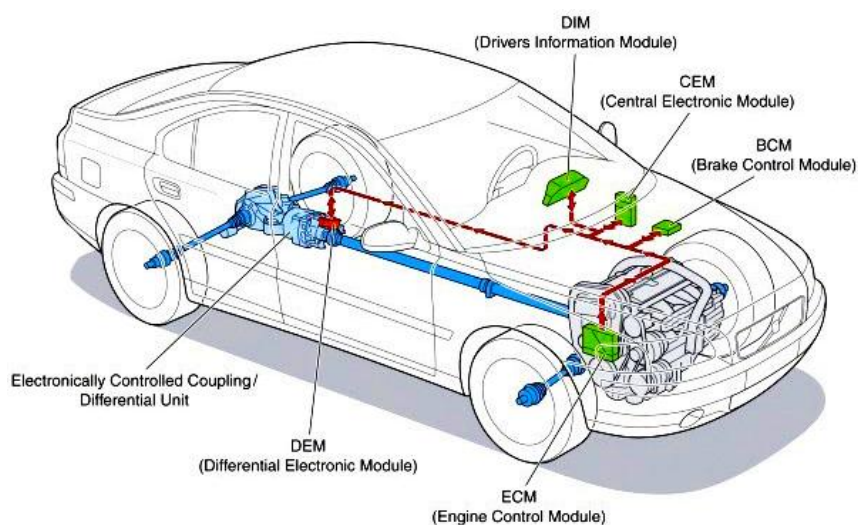
- ROM, almacenamiento de firmware y mapas de calibración.
- EEPROM, para guardar parámetros de corrección o códigos de diagnóstico.
- RAM, donde se gestionan las operaciones temporales del procesador.

Estos componentes procesan en tiempo real las señales de los sensores para accionar los actuadores según las condiciones del motor [31]. Además, la ECU actúa como nodo de comunicación, gestionando señales analógicas y digitales para el intercambio de información entre módulos del vehículo [33].

La Figura 1 muestra la disposición de las ECUs en un vehículo moderno. La Unidad de Control del Motor (ECM), ubicada en el compartimento del motor, controla la inyección y el encendido, mientras que otras unidades de control supervisan sistemas de seguridad, tracción y confort, evidenciando su coordinación para el funcionamiento integral del vehículo.

Figura 1

Ubicación de la ECM en el vehículo



Adaptado de [34]. *Nota.* La figura presenta la ubicación del módulo ECM y la conexión con otros módulos del vehículo.

1.5.4 Tipos de ECU

Los vehículos modernos integran varios tipos de ECU, cada una dedicada a funciones como motor, transmisión, frenos, confort o asistencia avanzada. Este proyecto se enfoca en el ECM, por su relevancia directa en el diagnóstico electrónico.

La ECM calcula la cantidad de combustible y el momento del encendido, usando datos de sensores como CKP, CMP, MAP, TPS y ECT para mantener una mezcla aire-combustible estequiométrica. También regula la presión de combustible, la recirculación de gases y ralentí del motor. Las demás unidades y sus funciones se detallan en el **Apéndice D.1**, como referencia complementaria [13][33].

1.5.4.1 Protocolos de comunicación

La comunicación entre los módulos electrónicos del vehículo se realiza mediante buses de datos, que garantizan el intercambio rápido y confiable de información. El más utilizado es el CAN Bus (Controller Area Network), desarrollado por Bosch, que organiza los mensajes por prioridad y ofrece alta inmunidad al ruido [31].

Otros protocolos complementarios son:

- LIN, para subsistemas de baja velocidad.
- FlexRay, de alta velocidad y redundancia.
- Ethernet, empleado en sistemas avanzados con cámaras o radares.

Además, el diagnóstico de fallas se efectúa mediante el estándar OBD-II, que permite leer códigos de error y monitorear en tiempo real el funcionamiento de la ECU [32][33].

1.5.5 Software y control

El software de la ECU contiene algoritmos encargados de calcular los tiempos de inyección, encendido y control de actuadores. Según Bosch, un software calibrado puede

mejorar la eficiencia de combustión hasta un 10%. Las memorias Flash, EEPROM y RAM, almacenan mapas de control, registros de fallas y datos operativos, lo que permite a la ECU adaptarse a las condiciones de conducción [36].

El estudio se enfoca en la ECM, dado que concentra las funciones críticas de control del motor y representa la base para el diagnóstico mediante simulación de señales automotrices.

1.5.6 Sensores automotrices

La gestión electrónica del motor depende de sensores que convierten magnitudes físicas en señales eléctricas interpretadas por la ECU [36]. Estas señales permiten definir las estrategias de inyección, encendido y control de emisiones [37].

En la Tabla 1 se resumen los principales sensores automotrices y sus funciones; la información detallada se incluye en el **Apéndice D.2**

Tabla 1

Clasificación y función de los sensores automotrices

Tipo de sensor	Descripción general
Sincronización y Caudal	Detectan la posición y velocidad del motor, así como el caudal y presión del aire de admisión. Incluyen sensores CKP y CMP, y sensores Masa de flujo de aire (MAF) y MAP que permiten calcular la cantidad de aire para ajustar la inyección y el encendido.
Condición, Posición y Retroalimentación	Permiten a la ECM regular la mezcla aire-combustible y el tiempo de encendido. Incluyen el TPS, los sensores térmicos ECT e IAT, la sonda Lambda (O ₂) y el sensor de detonación (KS), que proporcionan información sobre temperatura, posición del acelerador y calidad de combustión.

Subsistema de Combustible y Presión	Mantienen la presión adecuada en el sistema de inyección y controlan las emisiones evaporativas. Comprenden el sensor de presión del riel (FPS), el sensor FTPS y la válvula de purga del canister del sistema EVAP.
Diagnóstico y Seguridad Estructural	Contribuyen al control dinámico y la seguridad del vehículo. Incluyen sensores de ángulo de dirección (SAS), velocidad de rueda (ABS/ESP), presión y pedal de freno, que permiten regular el par motor y activar funciones de seguridad.

Nota: Adaptado de [13], [31], [32], [36], [38], [39].

1.5.7 Actuadores automotrices

Los actuadores ejecutan las órdenes de la ECM, convirtiendo señales eléctricas en acciones sobre los sistemas de inyección, encendido y emisiones [13][31].

A continuación, en la Tabla 2 se resumen los principales actuadores automotrices y sus funciones dentro del sistema de control del motor; la información detallada se encuentra en el **Apéndice D.3**.

Tabla 2

Actuadores automotrices

Tipo de Actuador	Descripción
Combustible y aire	Regulan el flujo de aire y combustible del motor mediante inyectores PWM, válvulas EGR, motores de mariposa electrónica (ETC) y válvulas IAC controladas por la ECM.
Encendido y auxiliares	Generan la chispa y controlan cargas eléctricas como bobinas de encendido, relés y ventiladores, accionados por drivers MOSFET o señales PWM.

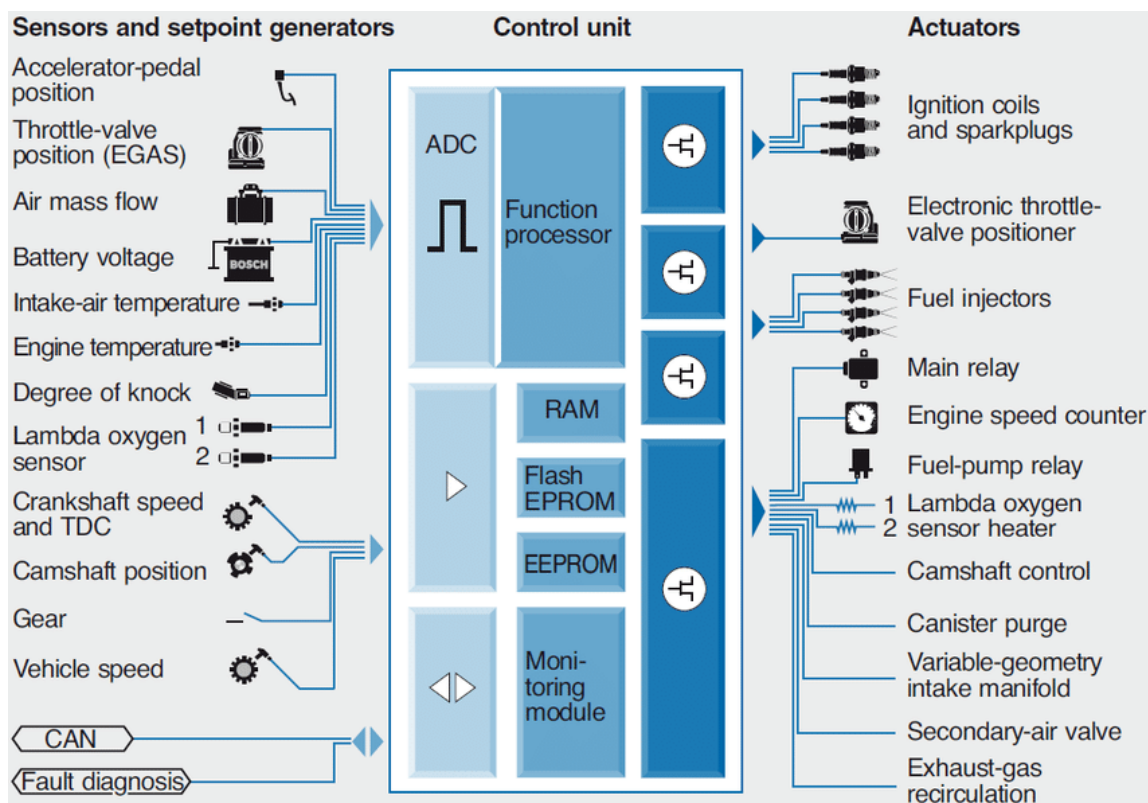
Supervisados (interacción con otros módulos) Incluyen la bomba de combustible eléctrica y la válvula de purga del canister (EVAP), supervisadas por la ECM mediante el sensor FTPS.

Nota: Adaptado de [13], [31], [32], [37], [38].

La Figura 2 muestra la relación entre la ECM, los sensores y los actuadores del motor. A la izquierda se representan las señales de entrada provenientes de los sensores, que la unidad de control procesa para generar las salidas hacia los actuadores ubicados a la derecha, encargados de regular la inyección, el encendido y otros sistemas del motor.

Figura 2

Relación funcional entre la ECM y los actuadores principales, destacando las señales PWM y la retroalimentación sensorial



Adaptado de [31]. Nota. Figura obtenida de Bosch Motronic.

1.5.8 Fallas comunes e impacto

Las fallas más comunes en las ECU provienen de su circuitería interna, afectando la lectura de sensores y el control de actuadores. La Tabla 3 resume las más representativas; su descripción detallada, con causas y efectos, se encuentra en el **Apéndice D.4**.

Tabla 3

Fallas comunes en ECM

Etapa	Tipo de falla	Causa o descripción	Consecuencias principales
Entrada	Degradación de resistencias o filtros RC	Afecta sensores TPS y MAP, generando señales inestables	Mezcla aire-combustible incorrecta, fallos de encendido
Procesamiento	Sobretensión o picos de corriente	Alternador o baterías defectuosas	Daño en reguladores internos o capacitores
Salida	Falla en MOSFET del circuito de inyectores	Cortes o activación parcial en salidas de potencia	Pulsos de inyección interrumpidos o mezcla incorrecta
Comunicación y red	Falla en transceptores o resistencias de terminación	Pérdida de sincronía en la red de datos	ECU entra en modo seguro

Nota: Adaptado de [13], [31], [38].

Las fallas más críticas se presentan en el circuito del sensor TPS, donde interferencias o desgaste generan lecturas erráticas [60] y en el control de inyectores, donde transistores defectuosos interrumpen los pulsos de inyección, afectando directamente la estabilidad del motor y el diagnóstico de la ECM [61].

1.5.9 Normativas y requisitos para equipos de pruebas electrónico

Las normas de seguridad son esenciales para garantizar la protección del usuario, la integridad del sistema y la confiabilidad del diagnóstico. En Ecuador, su cumplimiento se rige por el INEN y el Código Eléctrico Ecuatoriano (CEE-INEN), los cuales adoptan estándares internacionales ISO e IEC aplicables a equipos electrónicos y de laboratorio.

Se presentan las normas aplicables al diseño del banco de pruebas electrónico [48],[49],[56]-[59]:

Las principales normas relacionadas con el diseño del banco de pruebas son:

- **ISO 26262**, que regula la seguridad funcional en sistemas eléctricos y electrónicos
- **IEC 60204-1**, sobre protección y conexión a tierra en instalaciones eléctricas industriales.
- **IEC 61010-1**, que define condiciones de seguridad para equipos de laboratorio.
- **IEC 61000**, enfocada en compatibilidad electromagnética e inmunidad a interferencias.

En la Tabla 4 se resumen las normas aplicables al diseño del banco de pruebas y sus equivalentes ecuatorianos, organizadas por criterios técnicos de seguridad y aplicación.

Tabla 4

Normas aplicables al diseño de banco de pruebas

Categoría	Norma Internacional	Aplicación
Generales (Seguridad y operación segura)	ISO 26262 / INEN vehicular	Seguridad funcional y conexión a tierra, evitando daños a la ECU o al operador.
Materiales (Aislamiento)	IEC 60204-1 / RTE INEN 057 (2017)	Regula el aislamiento, fusibles y materiales certificados en fuentes de 5 V y 12 V.

Construcción (Diseño físico)	IEC 61010-1 (2010) / INEN laboratorio	Determina bordes redondeados, ventilación y disposición segura de controles.
Funcionales (Compatibilidad)	IEC 61000 / RTE INEN 167 (2016)	Asegura precisión de señales TPS, MAP, CKP y CMP frente a interferencias.

Nota: Elaborado a partir de las normas ISO e IEC reconocidas por el INEN [56]-[59].

1.5.10 Estudios previos y equipos del mercado

Se han propuesto diversas soluciones para el diagnóstico de ECU. En [40], de la Universidad del Azuay, se desarrolló un banco comprobador con Arduino Mega para emular señales TPS, MAP y CKP en vehículos Chevrolet, Mazda y Toyota. Presenta limitaciones por modelo y control manual, aunque podría mejorarse con un sistema DAC y una interfaz de monitoreo para generar y visualizar señales dinámicas. Según [41], se diseñó un banco con interfaz HMI que genera señales DAC y PWM mediante microcontrolador, probado en un Volkswagen Gol 1.6. Aunque se limitó a un solo modelo, representa un referente clave de control virtual. Como mejora podría agregarse un módulo físico para ajuste de señales directo.

Además, [42] plantea un comprobador portable con ESP32, pantalla y microSD, que aporta accesibilidad, pero se limita a la comprobación de sensores físicos, sin funciones de emulación ni comunicación con ECUs. y sugiere mejoras en GUI, adquisición paralela y conectividad.

En Turín, se desarrolló un banco didáctico para simular el funcionamiento del motor controlado por ECU. Analiza variables físicas, pero no emula sensores electrónicos como CKP o CMP, por lo que se limita al ámbito educativo y teórico [43].

En equipos comerciales, los bancos probadores Lucas Nulle ofrecen diagnóstico estandarizado y compatibilidad con diversos modelos, aunque su costo y licenciamiento restringen su adquisición en talleres pequeños [44].

Los bancos comerciales Ilide Mark50 y Pro integran diagnóstico y simulación de ECUs mediante pantalla táctil y módulos PWM con comunicación OBD; sin embargo, su software cerrado y costo superior a 1 000 USD limitan su uso académico. De forma similar, el MetSim PRO / PRO MAX ofrece alta precisión y compatibilidad con protocolos OBD, CAN y LIN, aunque su precio (2 000 EUR) y arquitectura cerrada restringen su aplicación educativa [45]-[47].

Los bancos HIL, a nivel industrial, son usados para la detección temprana de fallos y verificación en ECUS, reduciendo tiempo y errores, pero su uso se restringe a fabricantes y centros de investigación por sus altos costos y complejidad técnica [47].

Los antecedentes revisados muestran una evolución progresiva en el desarrollo de bancos automotrices para diagnóstico de ECUs. Los primeros diseños emplearon microcontroladores de bajo costo para emular señales básicas, aportando soluciones accesibles pero limitadas en alcance. Luego, se incorporaron interfaces gráficas que permitieron un control más preciso y la simulación virtual de sensores, mientras que otras propuestas priorizaron la portabilidad y el registro digital de datos. En el ámbito educativo, también surgieron bancos orientados al estudio del funcionamiento del motor más que a la interacción electrónica [40]-[43].

Por su parte, los equipos comerciales destacan por su alta integración, precisión y compatibilidad con diversos protocolos, aunque sus costos elevados y arquitecturas cerradas restringen su aplicación académica. A nivel industrial, los bancos HIL marcan la dirección hacia la automatización total y la validación en tiempo real, reservados a entornos especializados [44]-[47].

En conjunto, estos desarrollos evidencian avances significativos, pero también limitaciones comunes relacionadas con la falta de modularidad, la dependencia de ajustes manuales y la ausencia de comunicación estandarizada con la ECU. No obstante, ofrecen

referentes útiles en aspectos de diseño, ergonomía y control digital, que pueden servir como base para el desarrollo de soluciones más abiertas, económicas y orientadas al diagnóstico funcional de la ECM.

Capítulo 2

2. Metodología.

El desarrollo del banco de pruebas se realizó mediante una metodología estructurada que abarca desde la identificación de necesidades del taller automotriz hasta la validación funcional del prototipo.

2.1 Requerimientos y restricciones del diseño

2.1.1 *Requerimientos de diseño*

Los requerimientos del banco de pruebas se definieron a partir de reuniones con el cliente y del análisis de las condiciones reales de operación en un taller automotriz, permitiendo identificar las funciones necesarias para una simulación del sistema.

En la Tabla 5 se presentan los requerimientos principales, definidos para asegurar la simulación adecuada de señales automotrices y una correcta interacción con la ECU durante el proceso de diagnóstico.

Tabla 5

Requerimientos del proyecto

Requerimientos	Descripciones
Simulación de Señales Automotrices	Debe generar señales analógicas de 0–5 V para simular TPS, MAP, IAT, ECT y O ₂ . Las señales deben representar valores reales de operación del motor.
Generación de señales CKP–CMP	Debe generar señales digitales de sincronización en RPM. Debe mantener la relación de fase correcta entre CKP y CMP para permitir el cálculo de inyección y encendido por parte de la ECU.
Simulación de actuadores	Debe generar señales PWM o digitales para simular las condiciones de operación de los actuadores controlados por la ECU.

	Las salidas deben permitir supervisar el comportamiento de la ECU, y facilitar la detección de fallas en los drivers internos.
	Debe permitir modificar parámetros del sistema en tiempo real.
Interfaz gráfica y supervisión	Debe visualizar las señales generadas y el estado general del equipo. Debe indicar errores, y límites de operación.
Desempeño eléctrico y estabilidad	El nivel de ruido de la señal debe ser menor o igual a 50 mV. Debe indicar errores, límites de operación y condiciones inseguras.
	Debe ser intuitivo y de fácil comprensión.
Usabilidad	Debe ser resistente al ambiente del taller. Debe facilitar la identificación de fallas electrónicas internas en la ECU, permitiendo orientar procesos de reparación

Nota: Se resumen los requerimientos funcionales y operativos necesarios para el diseño del banco de pruebas.

2.1.2 Restricciones de diseño

En la Tabla 6 se presentan las restricciones que condicionan el diseño del banco de pruebas, las cuales deben ser consideradas durante la selección de componentes, la arquitectura electrónica y la implementación del prototipo final. Estas restricciones permiten que el sistema sea seguro, viable y esté acorde al entorno real de trabajo.

Tabla 6*Restricciones de diseño*

Restricción	Descripción
Seguridad eléctrica	El diseño debe cumplir normas ISO 26262, IEC 60204-1 e INEN aplicables para evitar riesgos eléctricos y proteger la ECU.
Presupuesto	Los componentes deben ajustarse al presupuesto disponible y priorizar componentes comerciales accesibles localmente.
Disponibilidad de materiales	Los circuitos se diseñarán considerando componentes de fácil adquisición en el mercado ecuatoriano.
Límites térmicos	El sistema deberá operar sin sobrecalentamiento bajo las condiciones del taller.
Alimentación disponible	La alimentación estará limitada por fuentes de 12 V, 9 V y 5 V, evitando el uso de voltajes industriales.

2.2 Alternativas de solución

En esta sección se analizaron distintas alternativas de solución para el desarrollo del banco de pruebas, considerando enfoques analógicos, industriales y digitales.

2.2.1 Alternativas de arquitectura del sistema**Alternativa 1: Sistema Analógico manual**

Sistema basado en circuitos analógicos y generador de funciones para simular señales automotrices. La respuesta de la ECU se verifica mediante cargas directas

Alternativa 2: Sistema con verificación mediante módulo externo de monitoreo

Genera señales de prueba y permite observar la respuesta de la ECU mediante un módulo de monitoreo externo, ofreciendo alta robustez.

Alternativa 3: Sistema modular con microcontrolador

Esta alternativa se basa en una arquitectura híbrida que combina una unidad central de control con una interfaz gráfica desarrollada en software. El sistema permite generar señales simuladas digitalmente y monitorear en tiempo real la respuesta de la ECU, ofreciendo mayor control.

2.2.2 Criterios de selección para alternativas de arquitectura de sistema

En la **Tabla 7** se presentan los criterios definidos para la comparación de alternativas, los cuales fueron empleados como base para la comparación y la selección de la arquitectura final.

Tabla 7

Criterios de selección

Criterio	Definición
Mantenibilidad	El banco debe poseer una estructura de fácil mantenimiento, con componentes accesibles y conexiones estandarizadas.
Facilidad de uso	El sistema debe ser intuitivo y sencillo de operar, permitiendo realizar pruebas sin requerir configuraciones complejas.
Escalabilidad	El sistema debe permitir la incorporación futura de nuevos sensores o protocolos de comunicación sin alterar su estructura base.
Confiabilidad operativa	El banco debe garantizar funcionamiento continuo y estable durante las pruebas de diagnóstico, sin variaciones abruptas en las señales.
Costo	La solución propuesta debe mantener un equilibrio entre costo, desempeño y facilidad de construcción, aprovechando componentes disponibles localmente.

La Tabla 8 presenta la ponderación de los criterios de selección establecidos para evaluar las alternativas de solución.

Tabla 8

Ponderación de criterios de selección

Nivel de prioridad	Criterio	Peso	Porcentaje de decisión %
1	Confiabilidad Operativa	6,5	23,214
2	Costo	6	21,429
3	Mantenibilidad	4	14,286
3	Facilidad de uso	4,5	16,071
5	Escalabilidad	3,5	12,500
6	Eficiencia energética	2,5	8,929

Nota: Se presentan la priorización y el peso de decisión asignado a cada criterio.

2.2.3 Selección de alternativas

Las soluciones fueron evaluadas en función de los criterios considerados en la Tabla 9, siendo la alternativa híbrida digital la que obtuvo la mayor puntuación final, resultando la más adecuada para responder a los requerimientos del proyecto.

Tabla 9

Matriz de decisión de alternativas de solución

Alternativa	Confiabilidad Operativa	Facilidad de Uso	Mantenibilidad	Escalabilidad	Costo	Eficiencia Energética	Puntuación Final
-------------	-------------------------	------------------	----------------	---------------	-------	-----------------------	------------------

Alt. 1: Analógica Manual	0,037	0,027	0,026	0,021	0,06	0,023	0,197
Alt. 2: PLC Industrial	0,111	0,069	0,04	0,043	0,04	0,023	0,327
Alt. 3: Híbrida Digital	0,092	0,069	0,08	0,064	0,121	0,046	0,475

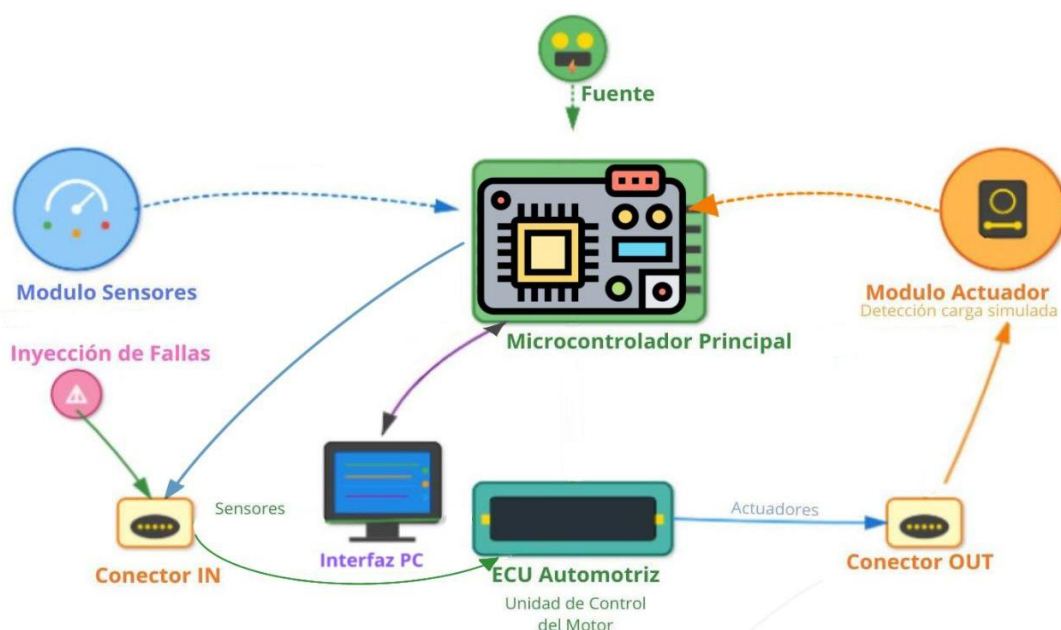
2.2.4 Diseño conceptual de la solución

El diseño conceptual definió la estructura general del banco de pruebas y la relación entre sus componentes para simular, controlar y supervisar el funcionamiento de una ECU automotriz. El sistema se organizó en tres bloques principales: un módulo de generación de señales para producir sensores automotrices mediante DAC y circuitos de acondicionamiento; un módulo de control y procesamiento basado en un microcontrolador controló la lógica de simulación y mantuvo las señales dentro de rangos seguros; y una interfaz gráfica que permitió visualizar valores, ajustar parámetros en tiempo real e inyectar fallas sin necesidad de manipular el hardware.

En la Figura 3 se muestra el diagrama funcional del sistema, donde el microcontrolador actúa como unidad central de control, coordinando durante las pruebas diagnóstico.

Figura 3

Diagrama funcional del sistema propuesto para el banco de pruebas.



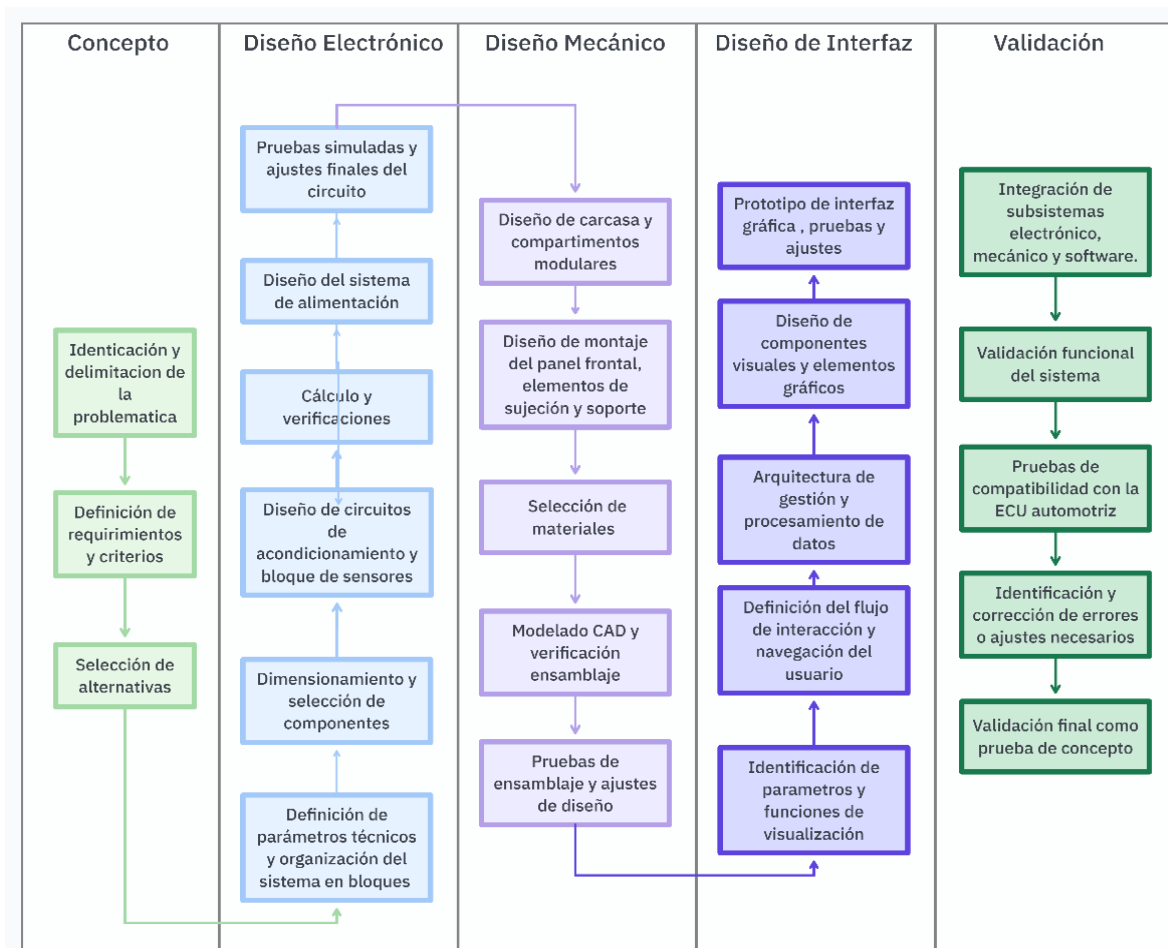
2.3 Metodología de diseño

En esta sección se describe el proceso metodológico aplicado para el desarrollo del banco de pruebas, desde la identificación de necesidades y requisitos del sistema hasta la selección de la solución y el diseño conceptual.

En la Figura 4 se presentó la secuencia de actividades desde la definición de requisitos técnicos, el modelado y construcción, hasta las pruebas funcionales con la ECU automotriz, enfoque que permitió organizar el desarrollo del proyecto de manera coherente y facilitó la integración de los componentes del sistema para su validación, verificando la respuesta esperada durante las pruebas.

Figura 4

Diseño de metodología



2.4 Diseño electrónico

El diseño electrónico se estableció a partir de una arquitectura modular organizada en bloques funcionales. Se fijaron parámetros técnicos: alimentación de 12 V DC, niveles de señal de 0–5 V, resolución mínima de 10 bits para conversión digital–analógica, uso de interfaces I2C, PWM y USB serial, protección mediante aislamiento y filtrado.

Bajo estas condiciones, el sistema se estructuró en la etapa de regulación de voltaje, módulo simulador de sensores, el módulo simulador de actuadores y el módulo inyector de falla.

La unidad de control gestionó el flujo de señales entre los distintos bloques y la comunicación con la interfaz gráfica, mientras los conectores IN y OUT organizaron el enlace

físico con la ECU. La Figura 5 resume la organización general del sistema y el flujo de energía y datos entre la fuente, reguladores, módulos, unidad de control y la ECU.

2.4.1 Selección del controlador principal

El controlador principal es el núcleo del banco de pruebas, encargado de coordinar la generación de señales simuladas y supervisar la respuesta de la ECU. Por lo que, se evaluaron distintas alternativas considerando capacidad de procesamiento, alimentación y facilidad de integración. La Tabla 10 compara las alternativas de controlador del sistema, según sus características técnicas y operativas.

Tabla 10

Alternativas de controlador del sistema

Alternativas	Ventajas	Desventajas
Alternativa 1: Raspberry Pi (Modelo 4)	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema operativo completo. • Capacidad de procesamiento muy alta. • Permite programación avanzada. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor consumo de energía. • Requiere más tiempo de configuración. • Sobrecoste para funciones esenciales del banco.
Alternativa 2: Arduino Mega (ATmega2560)	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador de 32 bits. • Wi-Fi y Bluetooth integrados. • Mayor capacidad de procesamiento. • Buen rendimiento/costo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sin comunicación inalámbrica integrada. • Procesador de 8 bits con velocidad limitada.

<p>Alternativa 3: ESP32</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Procesador de 32 bits. • Wi-Fi y Bluetooth integrados. • Mayor capacidad de procesamiento. • Buen rendimiento y costo. • Alta confiabilidad. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere adaptación de niveles. • Menos robusto ante ruido si no se condiciona bien la señal. • Costo elevado.
<p>Alternativa 4: PLC Industrial (Siemens S7-1200)</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo de señales industriales. • Protocolos industriales integrados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Programación más compleja. • Menor portabilidad.

Para la selección del controlador, se definieron cuatro criterios de evaluación: Recursos de E/S, costo, disponibilidad local y capacidad de procesamiento, ponderados considerando las necesidades del proyecto. La descripción de los criterios y la ponderación se detallan en el **Apéndice A**. La Tabla 11 muestra la matriz de decisión, donde se evidencia que el Arduino Mega obtiene la mayor puntuación, destacando por su equilibrio entre recursos E/S, costo y disponibilidad en el mercado local.

Tabla 11*Matriz de decisión de alternativas de controlador del sistema*

Alternativa	Recursos de E/S (0,3)	Costo (0,25)	Disponibilidad Local (0,25)	Capacidad de Procesamiento (0,2)	Puntuación Final
Raspberry	0,090	0,050	0,038	0,063	0,241
Mega	0,105	0,088	0,088	0,074	0,354
Esp32	0,045	0,088	0,088	0,074	0,294
PLC 1200	0,060	0,025	0,038	0,042	0,165

Nota: Se presenta la evaluación ponderada de las alternativas de controlador.

2.4.2 Selección de conversor digital-analógico

Para la generación de señales analógicas de sensores automotrices, el sistema requiere dispositivos convertir información digital en niveles de voltaje estables y controlables. En la Tabla 12 se presentan las diferentes alternativas de DAC evaluadas para el diseño electrónico, comparando sus características, ventajas y limitaciones.

Esta tabla resume las opciones consideradas durante el proceso de selección, mostrando las principales desventajas en cuanto a cantidades de canales, tipos de comunicación y la complejidad de su implementación en el sistema.

Tabla 12*Alternativas de DAC para la simulación de señales automotrices*

Componente	Descripción	Ventajas	Desventajas
MPC4728	Multicanal, comunicación I2C.	<ul style="list-style-type: none"> • Cuatro canales • Favorece a la reducción componentes. • Estabilidad en las señales 	<ul style="list-style-type: none"> • Ligeramente más compleja • Velocidad limitada por el bus I2C
MCP4725	Monocanal, dos direcciones, comunicación I2C.	<ul style="list-style-type: none"> • Integración sencilla. • Bajo costo • Estabilidad para señales de sensores. • 3.3 V – 5v 	<ul style="list-style-type: none"> • Un solo canal por dispositivo. • Velocidad limitada por I2C • Requiere de múltiples módulos.
MCP4922	Dos canales, comunicación SPI.	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor velocidad de actualización • Mejor respuesta dinámica • Dos canales por dispositivo 	<ul style="list-style-type: none"> • Uso de mayor cantidad de pines. • Mayor complejidad de conexión. • Menor flexibilidad de expansión
AD5628	Multicanal, ideal para control.	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión y estabilidad • Múltiples canales integrados • Bajo nivel de ruido 	<ul style="list-style-type: none"> • Costo elevado • Complejidad de diseño.

Para la selección del conversor digital-analógico, se establecieron cuatro criterios de evaluación: Cantidad de Canales, Costo, Disponibilidad Local y Facilidad de Integración. Los criterios y la tabla de ponderación se detallan en el **Apéndice A**.

La Tabla 13 muestra la matriz de decisión de los DAC. El MCP4725 obtuvo la mayor puntuación con 0.343 puntos, por su disponibilidad en el mercado ecuatoriano y su costo. Su integración mediante protocolo I2C y su precio, permiten una arquitectura modular y escalable.

Tabla 13

Matriz de selección de componentes

Alternativa	Costo (0,35)	Disponibilidad Local (0,25)	Facilidad de Integración (0,2)	Cantidad de Canales (0,2)	Puntuación Final
MCP4922	0,050	0,088	0,030	0,030	0,198
MCP4725	0,100	0,140	0,080	0,040	0,360
MCP4728	0,063	0,070	0,060	0,040	0,233
AD5628	0,038	0,053	0,030	0,080	0,200

2.4.3 Componentes electrónicos del sistema

Los componentes mostrados en la Tabla 14 se usaron para el diseño del banco de pruebas y su posterior prueba de concepto. En esta tabla se resumieron los elementos electrónicos considerados dentro de los distintos bloques del sistema electrónico, indicando su función general en el banco de pruebas.

Tabla 14

Componentes electrónicos para los bloques de circuitos

Componente	Descripción	Uso en el banco de pruebas
ATmega2560	Microcontrolador principal de 8 bits con buses UART/I ² C/SPI.	Generación de señales, control del sistema y lectura de estados.
PCA9548	Multiplexor de bus I ² C de 8 canales.	Permite direccionar múltiples DAC MCP4725 en paralelo.
MCP4725 (DAC)	Convertidor digital-analógico de 12 bits vía I ² C.	Genera señales analógicas que simulan sensores (TPS, MAP, etc.).
LM358	Amplificador operacional doble.	Acondiciona y ajusta niveles de señal.
CD4052	Multiplexor analógico doble de 4 canales	Permite elegir entre múltiples señales de entrada analógicas hacia un mismo canal.
LEDs indicadores 5 mm	Indicadores visuales con resistencias limitadoras.	Señalización del estado de salidas y condiciones de prueba.
Módulo relé 8 canales (5V)	Relés electromecánicos de aislamiento y conmutación.	Simula cargas de bobinas e inyectores para pruebas de activación.
Módulo relé 2 canales (5V)	Relés de menor capacidad para líneas auxiliares.	Conmuta alimentación principal/auxiliar o salidas adicionales.

Transistores NPN (N1441)	Etapas de conmutación de propósito general.	Adaptación de nivel y accionamiento de relés/indicadores.
Optoacopladores PC817	Aislamiento óptico LED–fototransistor.	Lectura segura de señales.
IRFN520	MOSFET canal N para potencia.	Conmutación de cargas en 12 V.
Potenciómetro	Elementos variables de resistencia.	Selección manual de señales.

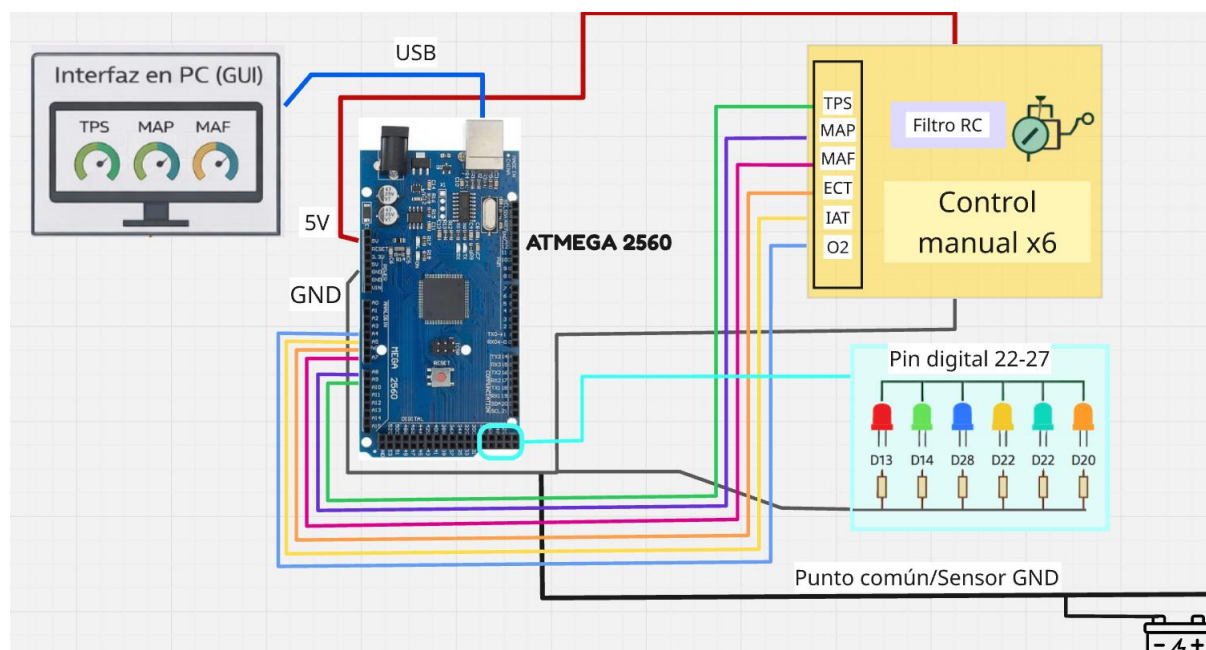
2.4.4 Diseño del circuito de simulación de sensores

El circuito de simulación de sensores incluye un bloque de control manual y visualización de estados, el cual permite variar las señales representativas de sensores automotrices y supervisar su comportamiento durante las pruebas. También, facilita la interacción del usuario con el sistema.

En la Figura 5, el diagrama del bloque de control manual integra potenciómetros que se conectan a los pines analógicos del Atmega2560, permitiendo el ajuste de los valores de los sensores. Los estados de las señales se visualizan mediante indicadores y a través de la interfaz gráfica del sistema.

Figura 5

Diagrama funcional del bloque de control manual y visualización de estados

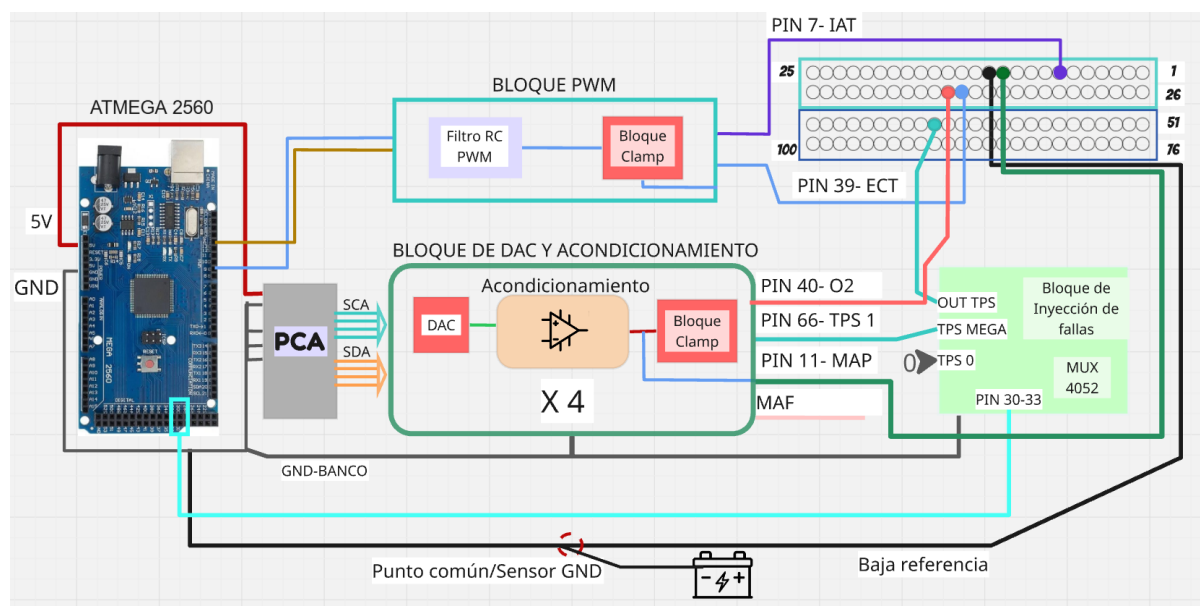


En la Figura 6 se muestra el diagrama de salida de señales analógicas y simulación de fallas. Este bloque empleó módulos DAC MCP 4725 para reproducir señales de sensores como TPS, MAP, MAF y O2, mientras que las señales de ECT, IAT, CKP Y CMP se generaron mediante salidas PWM.

Asimismo, se incluyó una etapa de acondicionamiento y selección de señales que dirigió las salidas hacia los pines correspondientes de la ECU, junto con un bloque de inyección de fallas que facilitó la conmutación entre condiciones normales y escenarios de prueba dentro del banco.

Figura 6

Diagrama de bloques de generación, acondicionamiento e inyección de fallas de señales



El consumo total de este bloque de circuitos de entrada es de 40.478 mA y una potencia de 218.39 mW, calculados mediante las ecuaciones 2.9 y 2.10, manteniéndose dentro de rangos seguros para la operación continua del banco de pruebas.

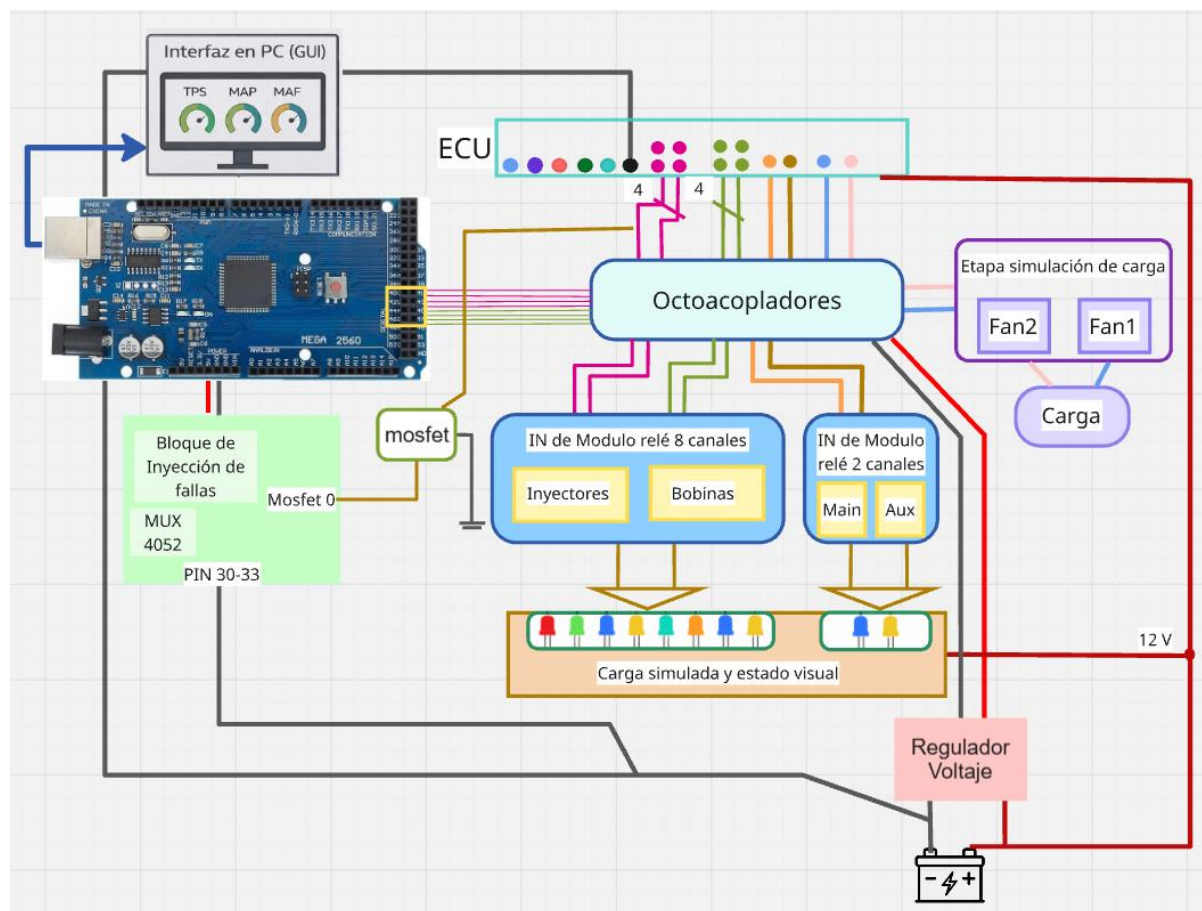
2.4.5 Diseño de circuito de simulación de carga.

Se diseñó el bloque de simulación de carga para comprobar la respuesta de la ECU, permitiendo verificar el comportamiento de los circuitos de simulación de inyección, ignición y actuadores auxiliares en un entorno controlado. Este bloque integra módulos relés, optoacopladores PC817, y dispositivos de conmutación, para activar las cargas simuladas y visualizar estados de activación.

En la figura 7 se presenta el diagrama de simulación de carga, donde se muestra la interconexión entre ECU y los componentes del circuito, las señales de salida de la ECU ingresan a los optoacopladores para luego distribuirse a los módulos relés y a entradas digitales del Atmega2560, permitiendo activar las cargas y visualizar su estado.

Figura 7

Conexión del módulo relé de 8 canales para simulación de carga de inyección e ignición.



La inducción de fallas se realizó mediante un multiplexor CD4052 y un transistor MOSFET. La señal de inyección se toma antes del optoacoplador y, puede seguir su recorrido normal o ser desviada hacia el MOSFET, permitiendo simular la interrupción de la señal. Este método permitió evaluar la respuesta de la ECU ante fallas inducidas. Este bloque presenta un consumo aproximado de 1.28 A y una potencia de 9.95 W, que se determinó mediante las sumas de las corrientes obtenidas a partir de las ecuaciones 2.13 y 2.15, y de las potencias de las ecuaciones 2.14 y 2.16.

2.4.6 Bloque de circuito de alimentación

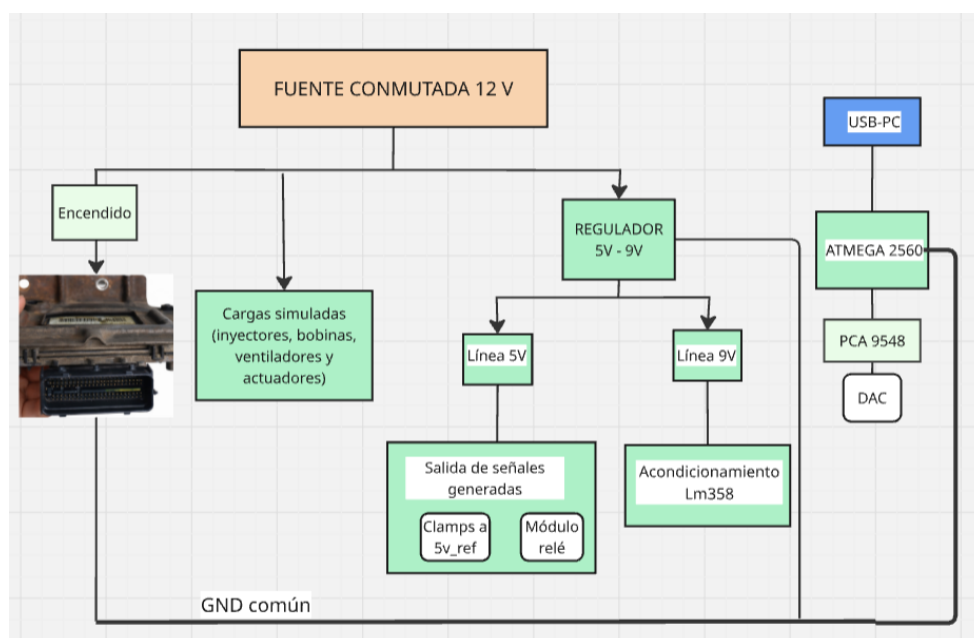
En la Figura 8, se mostró el diagrama de conexión de la alimentación, partiendo de una fuente de 12 V, la cual se distribuyó hacia la ECU y las cargas simuladas, y mediante un circuito

regulador de voltaje se obtuvieron las líneas de 5V y 9V para los módulos de control y acondicionamiento.

Considerando el consumo total de corriente del sistema, determinado mediante la ecuación 2.17, y la potencia total calculada a partir de la ecuación 2.18, desarrolladas en el Apéndice B, con valores de 1.32 A y 10.16 W, se seleccionó una fuente conmutada de 12V DC, 5A y 60 W para alimentación del sistema, considerando adaptaciones futuras.

Figura 8

Diagrama de alimentación del sistema



2.5 Diseño mecánico

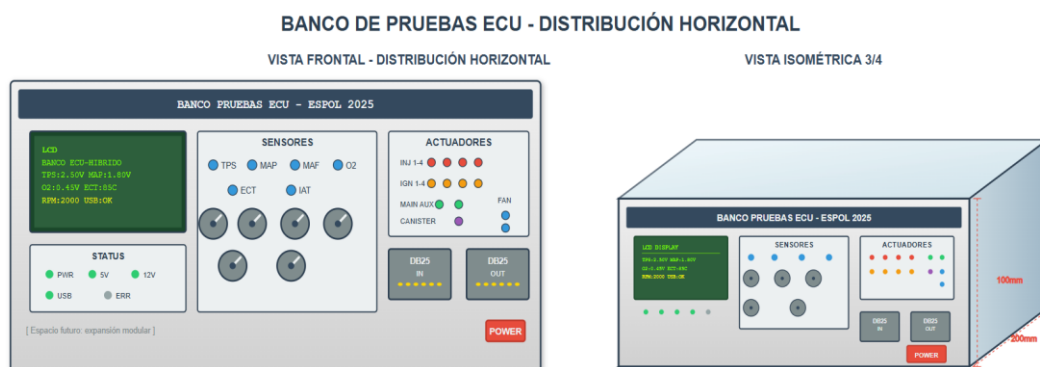
El diseño del banco de pruebas se planteó como una estructura compacta y manipulable, conformada por paneles rígidos que permitieron proteger los componentes internos y facilitar futuras ampliaciones sin necesidad de modificar la carcasa principal.

Los módulos electrónicos se distribuyeron en zonas separadas dentro del gabinete, lo que permitió mantener un orden en el cableado, mejorar la ventilación y asegurar la separación entre las etapas de potencia y señal. Los mandos e indicadores se agruparon en el panel frontal

por bloques funcionales, con el fin de facilitar su identificación y operación segura durante las pruebas. En la Figura 9 se presentó el diseño preliminar del panel frontal, donde se definió la disposición de sensores, actuadores, indicadores y controles del sistema.

Figura 9

Diseño preliminar para el banco de pruebas

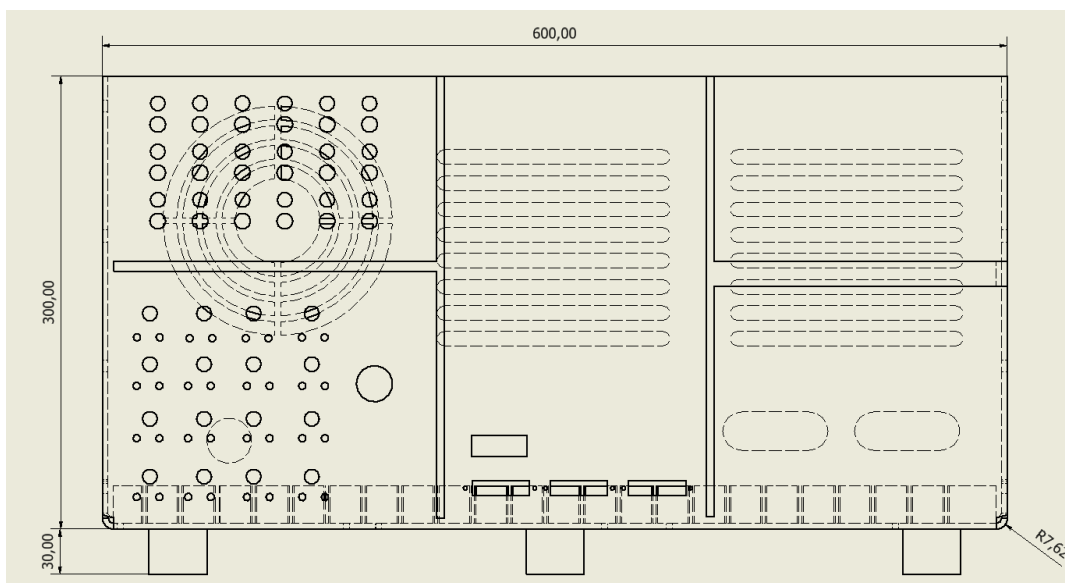


Nota: Diseño tentativo del banco de pruebas que muestra la organización preliminar de los módulos en el panel frontal.

A partir de este diseño se definieron las dimensiones generales del banco de pruebas, considerando espacio interno, facilidad de montaje y expansión futura. Cuenta con 600 mm de largo, y 300 de alto y ancho como se muestra en la Figura 10. El panel frontal se dividió en secciones funcionales para la simulación de sensores y actuadores, incorporando además espacios reservados para la integración de nuevos sensores, actuadores y módulos adicionales.

Figura 10

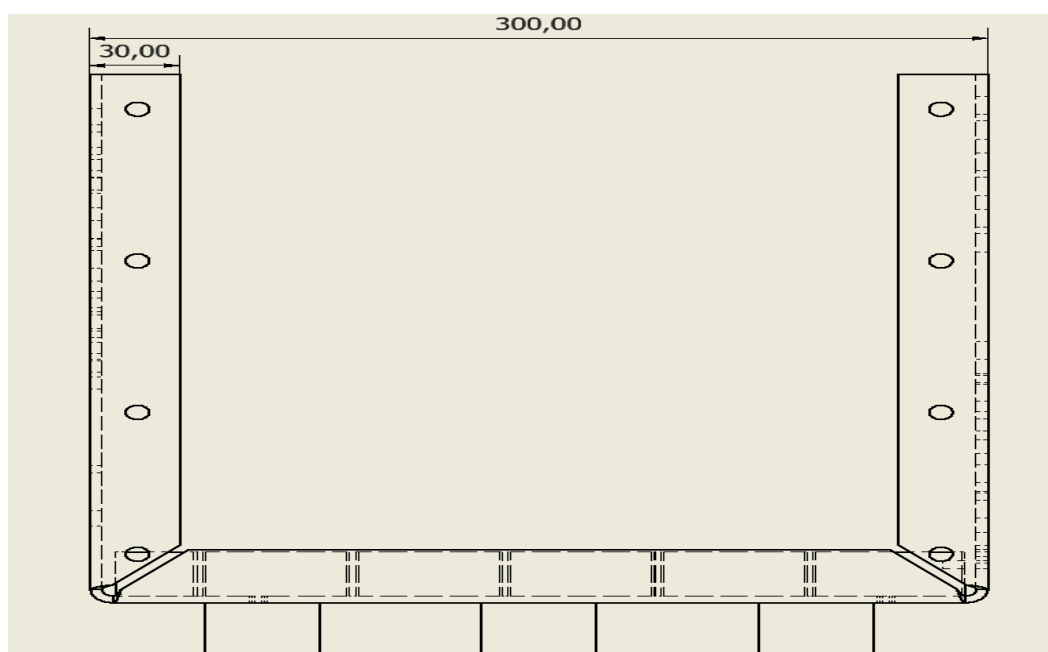
Dimensiones generales-vista frontal



Se observa en la Figura 11 el ancho del banco de pruebas de 300 mm, así como el diseño de las aristas y pliegues considerados para el ensamblaje del gabinete.

Figura 11

Dimensiones generales - vista lateral



En la Figura 12 se presentó la vista isométrica del diseño mecánico de la estructura base del banco de pruebas. En la base se dispusieron rejillas inferiores para permitir reconfigurar la distribución interna, así como el panel posterior con ranuras de ventilación y orificios para el paso de cables.

Figura 12

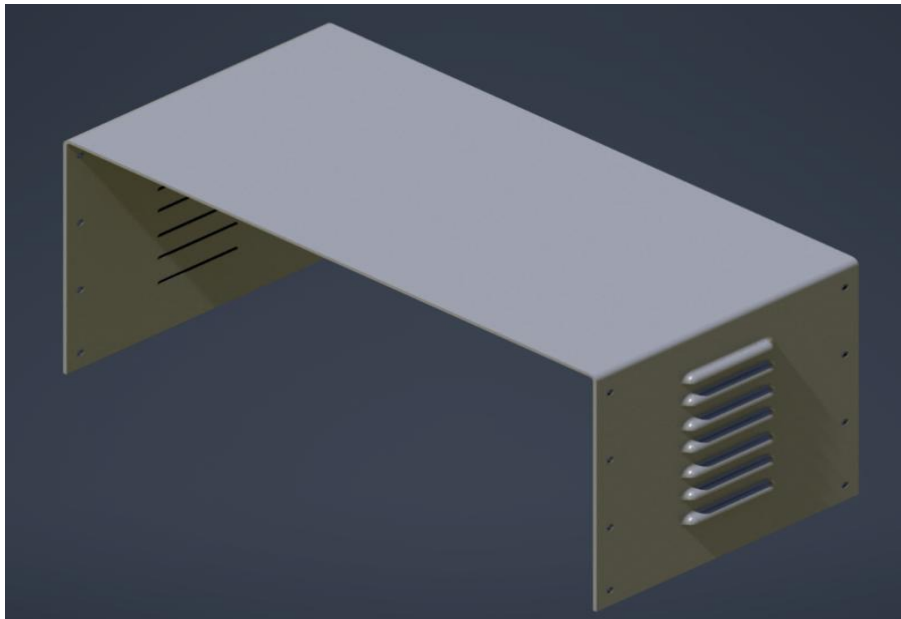
Base del banco de pruebas para ECU



En la Figura 13 se ilustró el diseño de la tapa superior del gabinete, donde se identifican las ranuras de ventilación lateral y los orificios para el ensamblaje mediante tornillería.

Figura 13

Cubierta mecánica superior del banco de pruebas

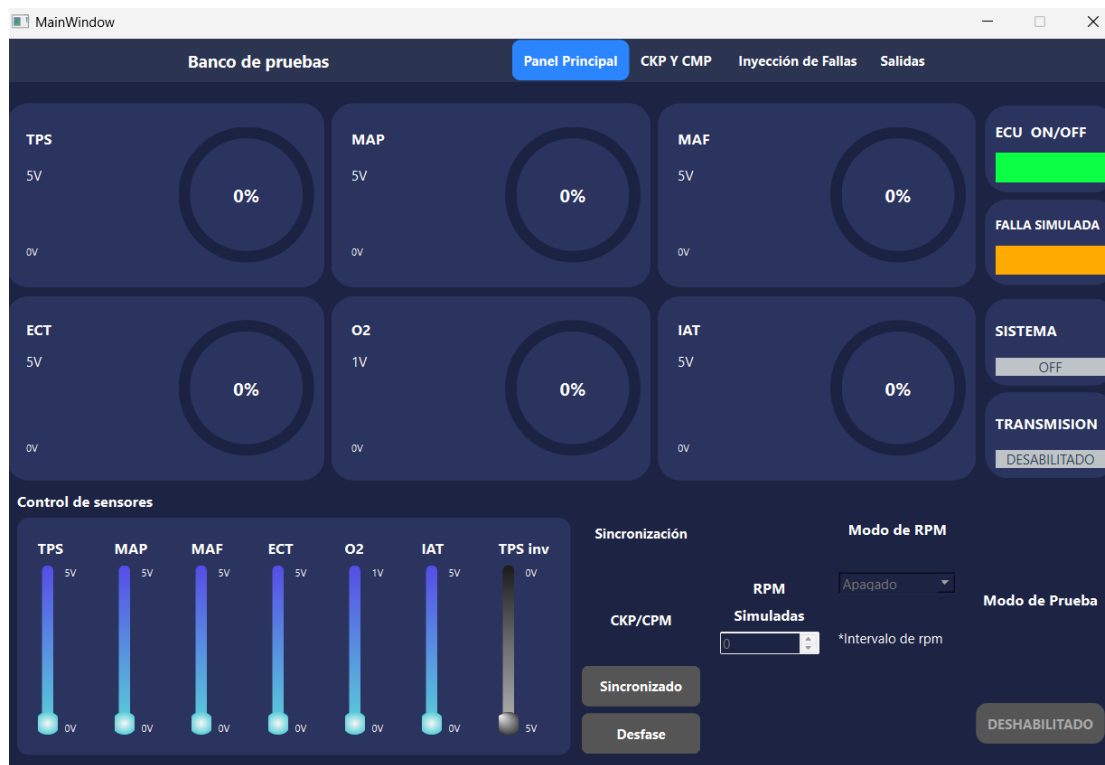


2.6 Diseño de interfaz

La Figura 14 presenta el diseño preliminar de la una interfaz gráfica para controlar y supervisar el banco de pruebas, permitiendo al usuario visualizar las señales generadas y ajustar sus parámetros en tiempo real. La GUI organiza las funciones principales mediante un panel superior y presenta tarjetas informativas, indicadores y diagramas donde se representan señales automotrices simuladas, como TPS, MAP, MAF, O₂, IAT, ECT y las señales de sincronización CKP y CMP.

Figura 14

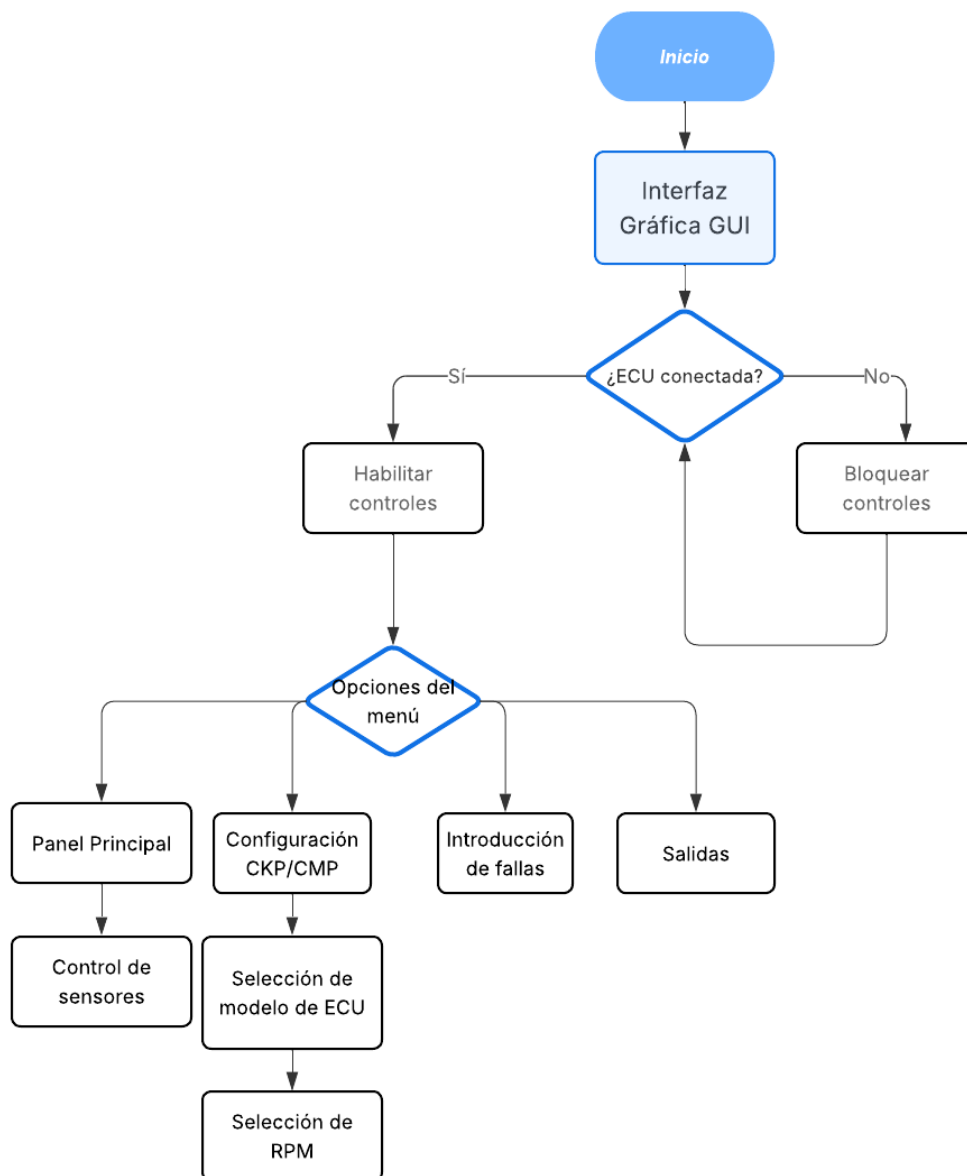
Diseño preliminar de la interfaz



La Figura 15 presenta el diagrama de flujo del diseño de la interfaz gráfica del banco de pruebas, en el cual se define la lógica de habilitación de funciones según el estado de conexión de la ECU. Este flujo impide la ejecución de pruebas cuando la ECU no está conectada, garantizando una operación segura y sirviendo como referencia para la implementación y validación de la lógica de control de la interfaz gráfica.

Figura 15

Diagrama de flujo del diseño de la interfaz gráfica



Nota: El diagrama representa la secuencia general de interacción del usuario con la interfaz gráfica y la habilitación de funciones según el estado de conexión de la ECU

2.6.1 Interfaz gráfica de usuario (GUI)

A continuación, se presentan la implementación de la interfaz gráfica (GUI), que fue diseñada para facilitar el control del sistema, la simulación de señales automotrices y la visualización del comportamiento de la ECU en entornos controlados.

La GUI fue desarrollada en lenguaje Python utilizando el framework PyQt, estableciendo una comunicación bidireccional en tiempo real con el hardware a través de un enlace serial USB, permitiendo el envío de comandos de control hacia el microcontrolador, la recepción de datos y la operación del sistema.

En la Figura 16 se muestra el panel principal de la interfaz gráfica, que permite el control en tiempo real de los sensores automotrices simulados (TPS, MAP, MAF, ECT, IAT y O₂) mediante deslizadores, cada uno con indicadores gráficos que representan el porcentaje de señal aplicado.

Figura 16

Panel principal de la interfaz gráfica del banco de pruebas

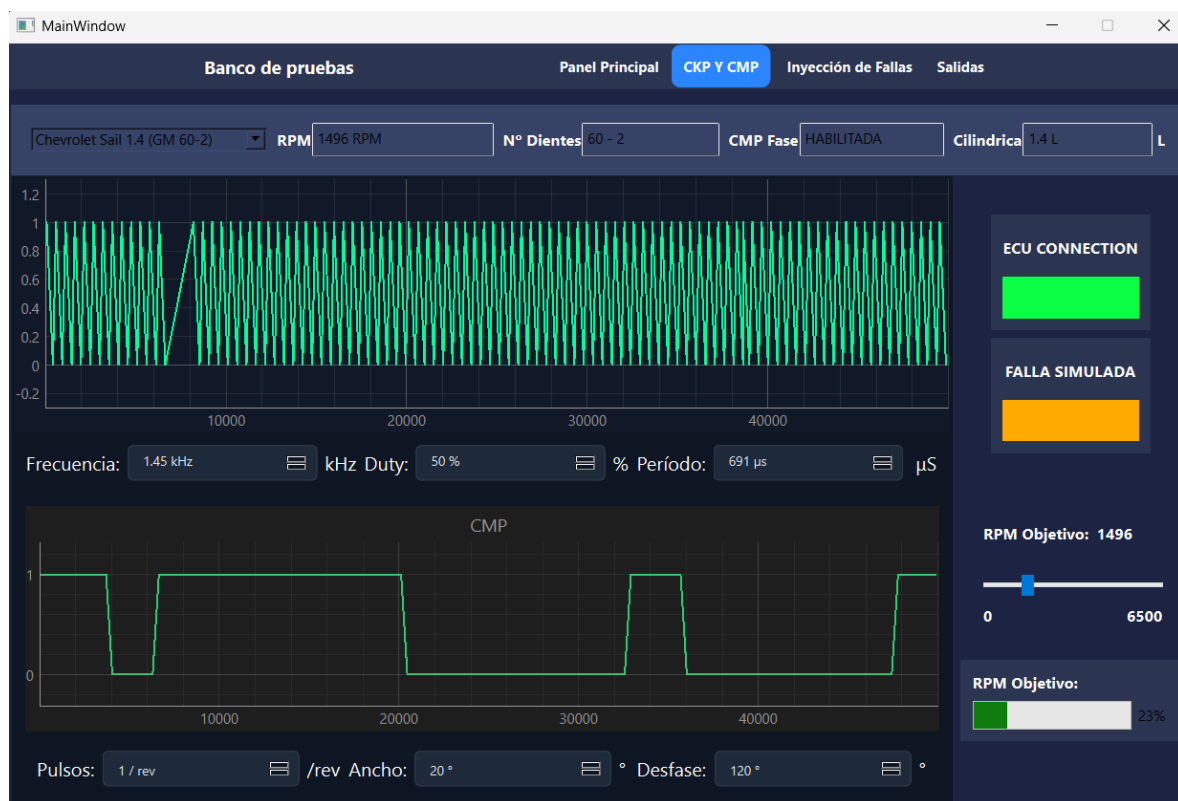


En la Figura 17 se presenta el módulo de visualización de las señales CKP y CMP en el dominio del tiempo, el cual permite analizar parámetros como frecuencia, período y relación de fase, fundamentales para la sincronización del motor.

La generación y visualización de las señales se realizó para la configuración GM 60-2 correspondiente al motor Chevrolet Sail 1.4, utilizada para la validación experimental del sistema. La arquitectura modular del banco de pruebas permite la incorporación futura de otras configuraciones de ruedas fónicas y motores sin modificar su estructura base.

Figura 17

Visualización de señales CKP y CMP en la interfaz gráfica

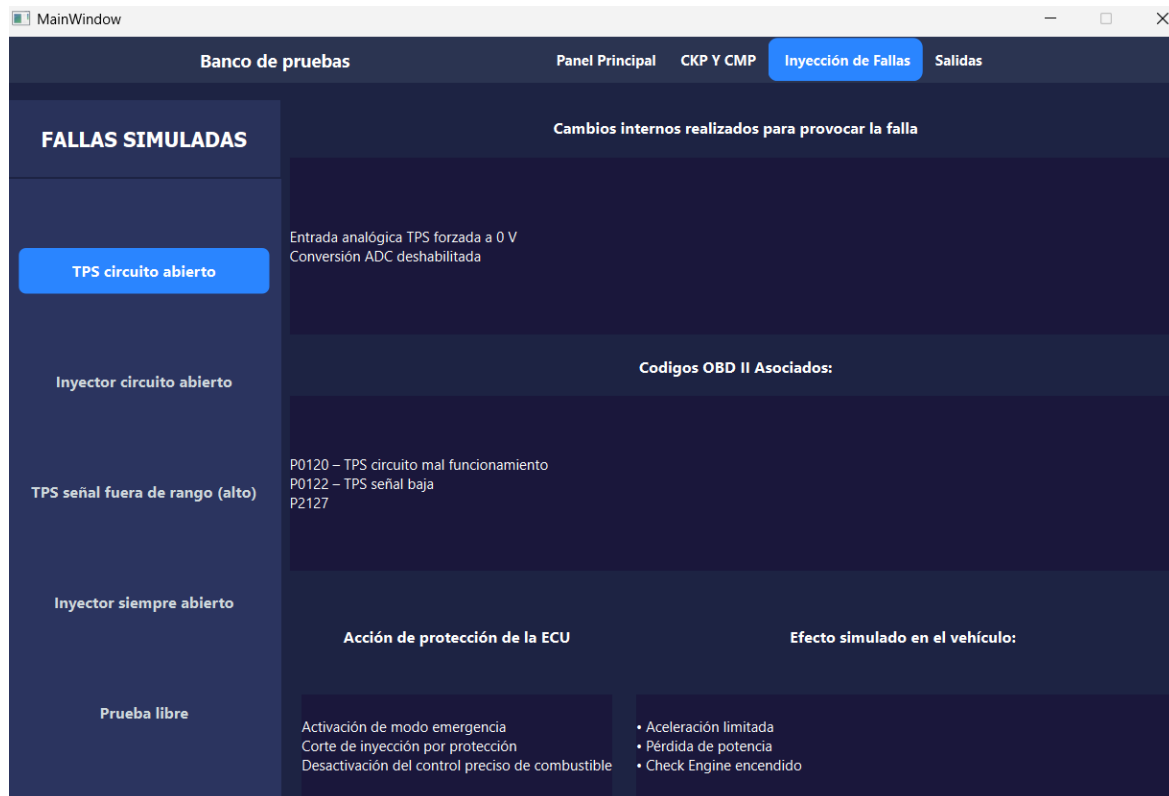


En la Figura 18 se presenta el módulo de inyección de fallas de la interfaz gráfica, el cual permite simular de forma controlada fallas electrónicas comunes, tales como circuito abierto en sensores, señales fuera de rango o fallas en el sistema de inyección. Al activar una falla, la interfaz ajusta automáticamente las señales simuladas y presenta información asociada, como posibles códigos OBD-II y efectos esperados en el vehículo, permitiendo analizar la

respuesta de la ECM sin intervenir un sistema real. Para la definición de estas fallas en circuitos de la ECU, se tomaron como guía ejemplos técnicos relacionados, especialmente en etapas de entrada de sensores y drivers de inyección [62][63].

Figura 18

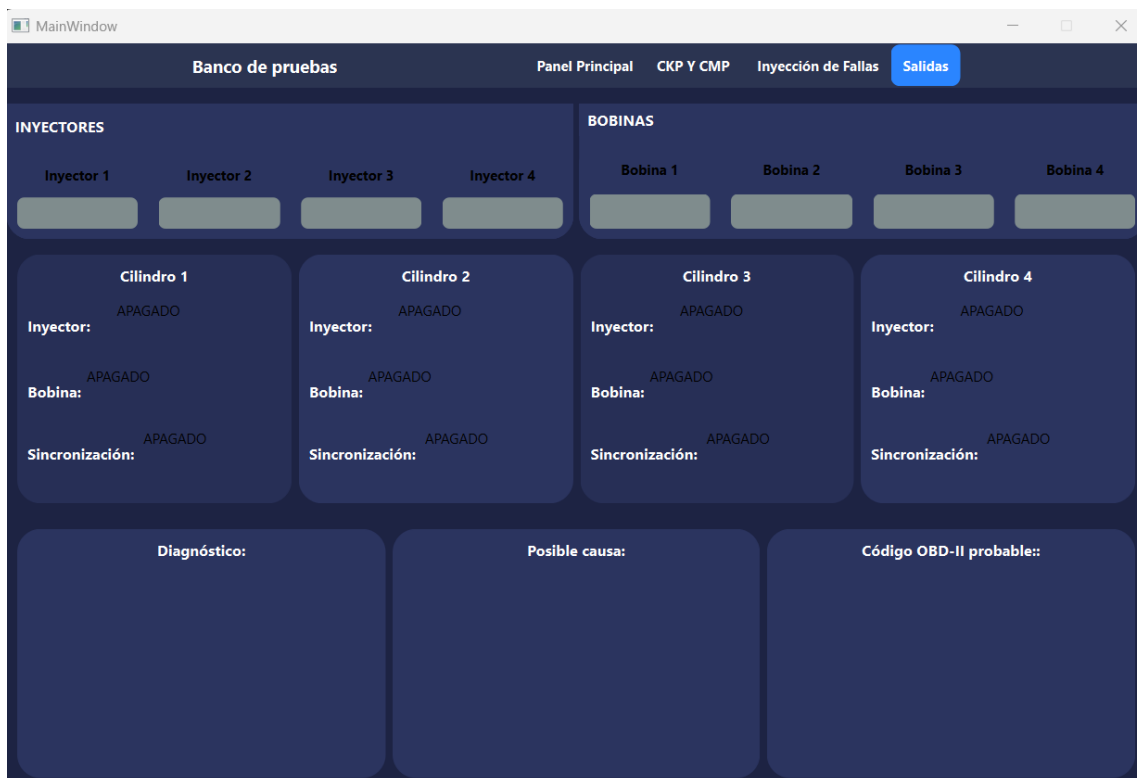
Módulo de inyección de fallas de la interfaz gráfica



En la Figura 19 se muestra el módulo de respuesta de la ECU, donde se visualiza el comportamiento del sistema de inyectores y bobinas, mediante indicadores LEDs. Este módulo presenta el estado de activación por cilindro, así como la sincronización del sistema, permitiendo evaluar la respuesta de la ECU frente a diferentes escenarios de operación y falla.

Figura 19

Ventana de supervisión de salidas de la ECU



Capítulo 3

3. Resultados y análisis

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la implementación y puesta en funcionamiento del banco de pruebas electrónico para diagnóstico de ECU. Las pruebas realizadas permitieron evaluar el desempeño del sistema bajo condiciones controladas y verificar la integración entre hardware y software.

3.1 Estructura del componente electrónico

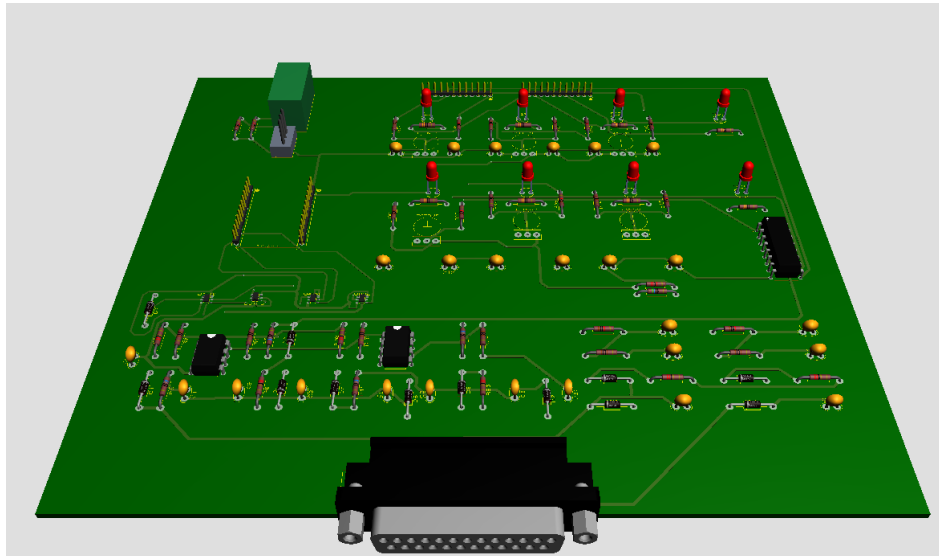
3.1.1 Arquitectura general del sistema

El componente electrónico del banco de pruebas fue implementado siguiendo una arquitectura modular, la cual permitió integrar los bloques necesarios para la simulación de sensores automotrices y su interacción con una ECU real. Esta arquitectura facilitó la evaluación de cada módulo durante las pruebas funcionales y aseguró una operación estable del sistema.

En la Figura 20 se presenta el circuito electrónico desarrollado, donde se identifican los bloques de generación de señales, acondicionamiento, protección y conexión hacia la ECU. Durante las pruebas realizadas, esta organización permitió una correcta distribución de señales y una comunicación adecuada entre los distintos módulos, evitando interferencias eléctricas y garantizando la compatibilidad con la ECU evaluada.

Figura 20

Arquitectura general del módulo electrónico de simulación de señales del banco de pruebas



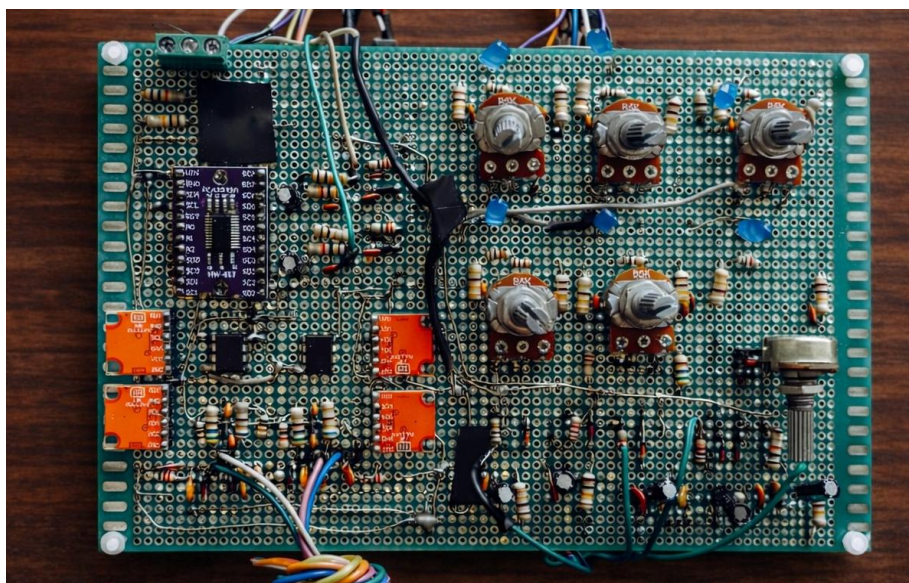
3.1.2 Módulos electrónicos implementados

Los módulos electrónicos implementados permitieron la simulación de señales automotrices y la evaluación de la respuesta lógica de la ECU bajo condiciones controladas. Durante las pruebas funcionales, los módulos operaron de manera independiente y coordinada, facilitando la identificación de comportamientos normales y anómalos del sistema.

En la Figura 21 se presenta el módulo de simulación de señales automotrices implementado, donde se integran circuitos de acondicionamiento, módulos DAC y elementos de control manual. Permitiendo la generación de señales de los sensores como TPS, MAP, MAF, ECT e IAT, garantizando voltajes compatibles con la ECU durante las pruebas realizadas.

Figura 21

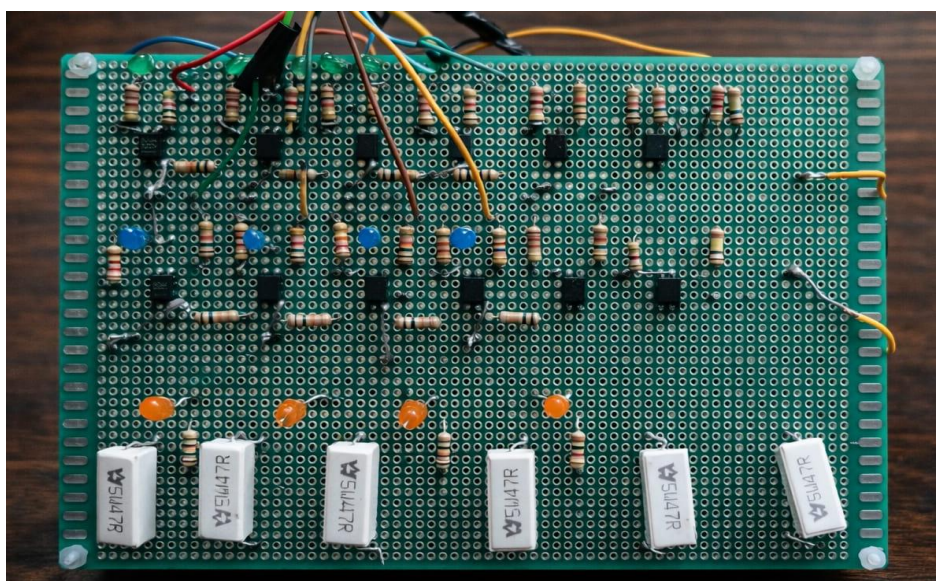
Módulo de simulación de señales automotrices implementado



Por otro lado, el módulo de simulación de carga está encargado de reproducir el comportamiento eléctrico de inyectores y bobinas de encendido. En la Figura 22, se integra etapas de conmutación mediante relés, aislamiento eléctrico mediante optoacopladores y señalización visual del estado de cada salida.

Figura 22

Módulo de simulación y visualización de la respuesta de la ECU



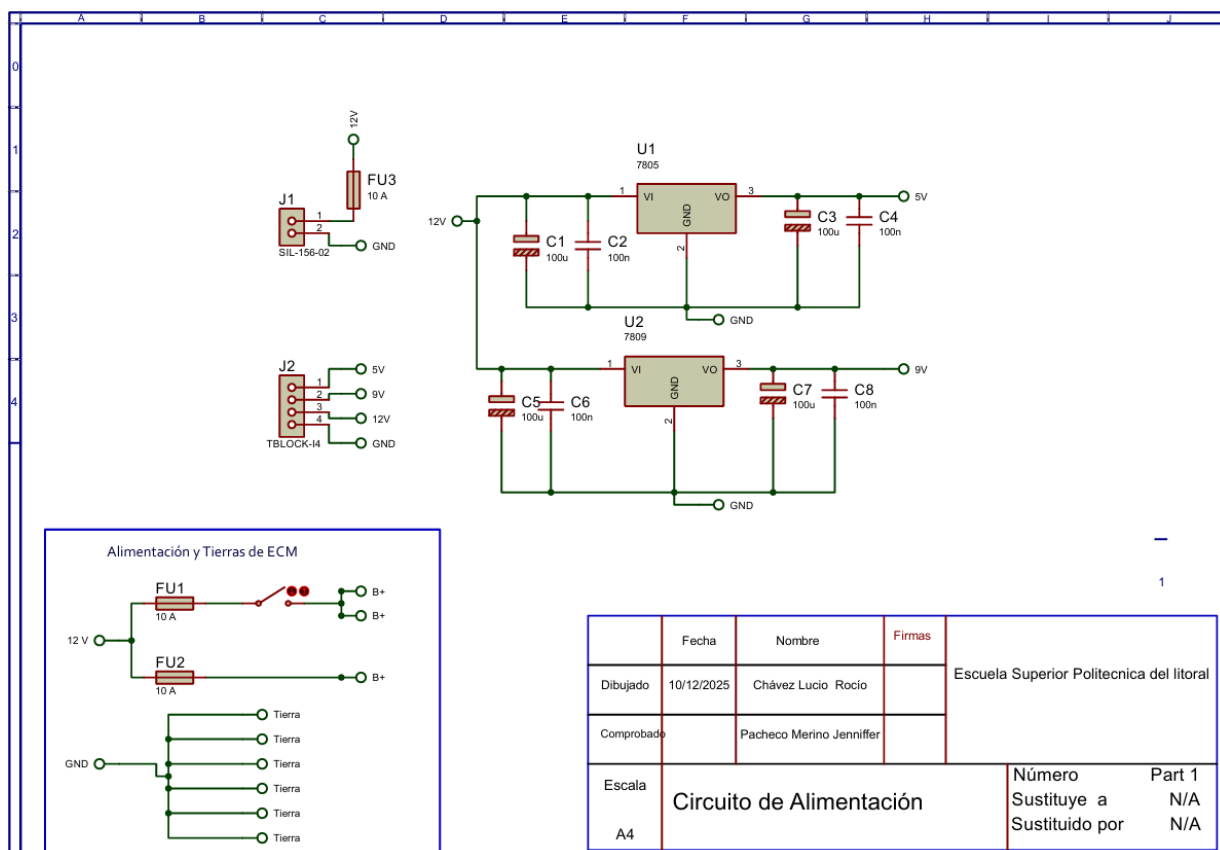
3.1.3 Módulo de alimentación y regulación de voltaje

El banco de pruebas incorpora un módulo de alimentación encargado de suministrar niveles de voltaje estables para el funcionamiento de los distintos circuitos electrónicos. A partir de una fuente principal de 12 V, se obtienen tensiones reguladas de 5 V y 9 V, destinadas a los circuitos digitales y analógicos del sistema, respectivamente.

Como se muestra en la Figura 23, el módulo emplea reguladores lineales para la reducción de voltaje, acompañados de capacitores de filtrado en las etapas de entrada y salida. El diseño garantizó una distribución adecuada de la alimentación hacia los distintos bloques del sistema, contribuyendo a un funcionamiento confiable durante las pruebas y evitando variaciones de voltaje que puedan afectar a la simulación de las señales.

Figura 23

Esquema del módulo de alimentación y regulación de voltaje del banco de pruebas para diagnóstico de ECU



3.2 Generación de señales CKP y CMP

A continuación, se presenta el proceso de generación de las señales CKP y CMP, considerado uno de los resultados clave del proyecto, debido a que estas señales permiten que la ECU interprete que el motor se encuentra en funcionamiento aun sin estar instalado en el vehículo.

Inicialmente, se realizaron mediciones reales en el lugar de trabajo del cliente, donde se obtuvieron las señales CKP y CMP directamente desde la ECU del motor utilizando un osciloscopio Hantek 1008. Estas mediciones permitieron identificar el patrón de la rueda dentada tipo 60-2, la presencia del diente faltante y la relación temporal entre ambas señales.

Con base en estos datos, las señales fueron replicadas mediante un microcontrolador Arduino Mega 2560, empleando un temporizador interno en modo comparación (CTC). Este método permitió controlar con precisión el período de los pulsos del CKP en función de la velocidad del motor simulada, generando un tren de pulsos digitales que reproduce el número de dientes y el diente faltante. De manera complementaria, la señal CMP fue generada de forma sincronizada a lo largo de dos ciclos completos del motor, asegurando la que la ECU la identifique de forma correcta.

La correcta alineación temporal entre las señales CKP y CMP garantiza que la ECU reciba información equivalente a la obtenida en condiciones reales de operación, permitiendo la activación de inyección y encendido en un entorno controlado.

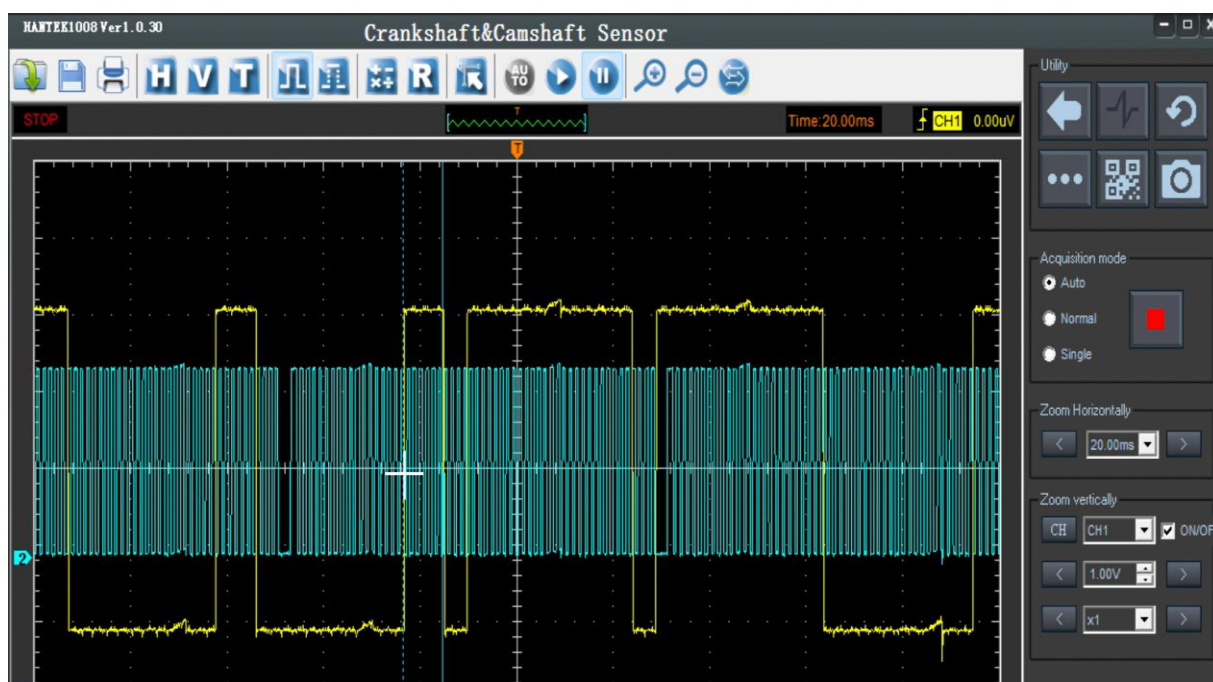
La validación de esta etapa se realizó comparando las formas de onda simuladas con las señales reales medidas, verificando la correspondencia en frecuencia, sincronización y patrón de pulsos, confirmando la correcta emulación del funcionamiento del motor.

En la Figura 24 se presentan las señales CKP y CMP capturada mediante el osciloscopio durante la etapa de medición, donde se observa el señalamiento correspondiente al diente faltante del CKP y la sincronización del CMP a lo largo de dos ciclos del motor. El eje

horizontal representa el tiempo en milisegundo, mientras que el eje vertical corresponde al nivel de voltaje de las señales. La señal CKP se identifica mediante una línea de color amarillo mientras que la señal CMP se representa mediante la línea de color azul, la cual actúa como señal de sincronización de fase.

Figura 24

Señales CKP y CMP medidas mediante osciloscopio durante la simulación del patrón 60-2

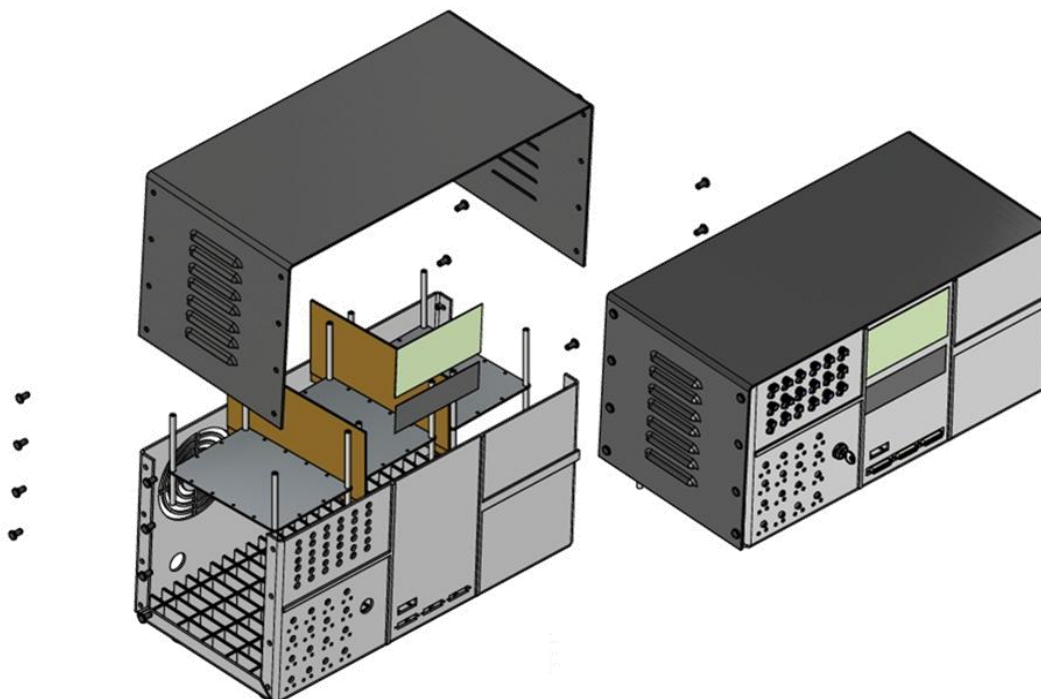


3.3 Estructura mecánica del banco de pruebas

La estructura mecánica del banco de pruebas fue diseñada para proporcionar un soporte físico estable y funcional a los módulos electrónicos del sistema, garantizando orden, facilidad de operación y protección de los componentes. La carcasa integra el sistema electrónico, los elementos de control y las interfaces de conexión en un conjunto compacto. La distribución de los elementos estructurales y paneles que conforman la carcasa se presentan en la Figura 25.

Figura 25

Vista explotada de la carcasa del banco de pruebas para diagnóstico de ECU



En la Figura 26 se presenta la estructura mecánica y la carcasa del banco de pruebas desarrollado, donde se observa la disposición frontal de los controles asociados a la simulación de sensores automotrices, así como los indicadores visuales y conectores destinados a la interacción con la ECU. Esta distribución facilita la identificación de los elementos durante la operación y el proceso de diagnóstico.

La organización modular del panel ayuda a que cada zona del sistema sea reconocida con facilidad, permitiendo ubicar con rapidez los controles y conexiones durante pruebas, lo que contribuye a una operación más ordenada.

Figura 26

Estructura mecánica y carcasa del banco de pruebas para diagnóstico de ECU



La implementación física presenta un diseño rectangular, adecuado para su uso sobre superficies de trabajo en entornos académicos y de taller. El panel frontal concentra los controles de los sensores simulados (TPS, MAP, MAF, ECT, O₂ e IAT), mientras que las conexiones correspondientes a actuadores y entradas/salidas del sistema se ubican de forma lateral.

La carcasa protege los circuitos internos frente a manipulaciones accidentales y contactos no deseados. Asimismo, el diseño favorece una interacción intuitiva con el banco de pruebas, complementando el funcionamiento electrónico y de software del sistema.

3.4 Resultados de pruebas funcionales y cumplimiento de requerimientos

3.4.1 Simulación de señales de sensores automotrices

Durante las pruebas funcionales se evaluó la capacidad del banco de pruebas para simular señales de sensores automotrices fundamentales del sistema de control del motor, específicamente TPS, MAP, MAF, ECT, IAT y O₂. En todos los casos se verificó la generación

de señales analógicas y digitales dentro de rangos de voltaje compatibles con los valores esperados por la ECM.

La variación de las señales se realizó mediante dos métodos. En el control manual, los valores de los sensores fueron ajustados directamente por potenciómetros físicos dentro del banco de pruebas, como se observa en la Figura 27. Por otro lado, el control digital se llevó a cabo mediante la GUI, desde la cual se permitió modificar y visualizar los valores de los sensores en tiempo real, como se muestra en la Figura 28.

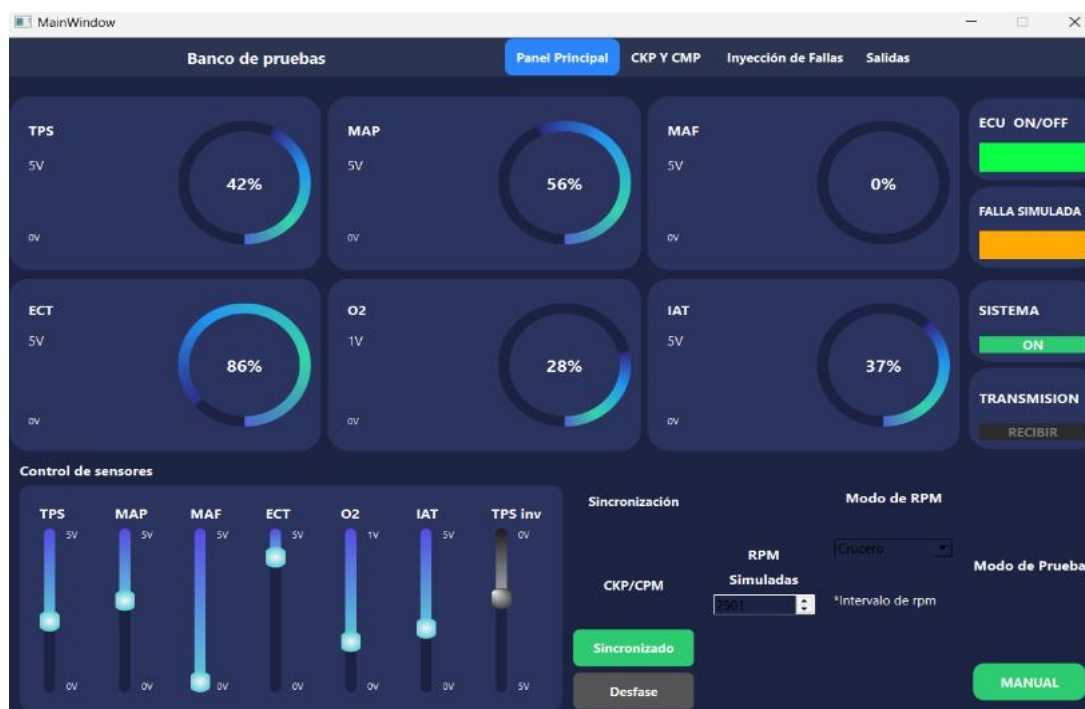
Figura 27

Simulación manual de señales de sensores automotrices mediante el banco de pruebas físico



Figura 28

Control digital y visualización de sensores automotrices a través de la interfaz gráfica del banco de pruebas



3.4.2 Resultados de la simulación de señales CKP y CMP

Las señales CKP y CMP corresponde a un aspecto crítico del sistema, ya que es permiten a la ECM identificar la posición y sincronización del motor. Durante las pruebas se verificó la correcta generación del patrón de rueda dentada tipo GM 60-1, incluyendo el diente faltante y la sincronización correspondiente al ciclo del motor.

En la Figura 29 se muestran las señales CKP y CMP medidas mediante osciloscopio directamente desde la ECU montada en el vehículo, las cuales fueron utilizadas como referencia para el diseño del sistema. En la Figura 30 se presenta la replicación de dichas señales, generadas mediante el microcontrolador Arduino, conservando el patrón y la relación temporal entre ambas.

Figura 29

Señales CKP y CMP medidas mediante osciloscopio en la ECU del vehículo

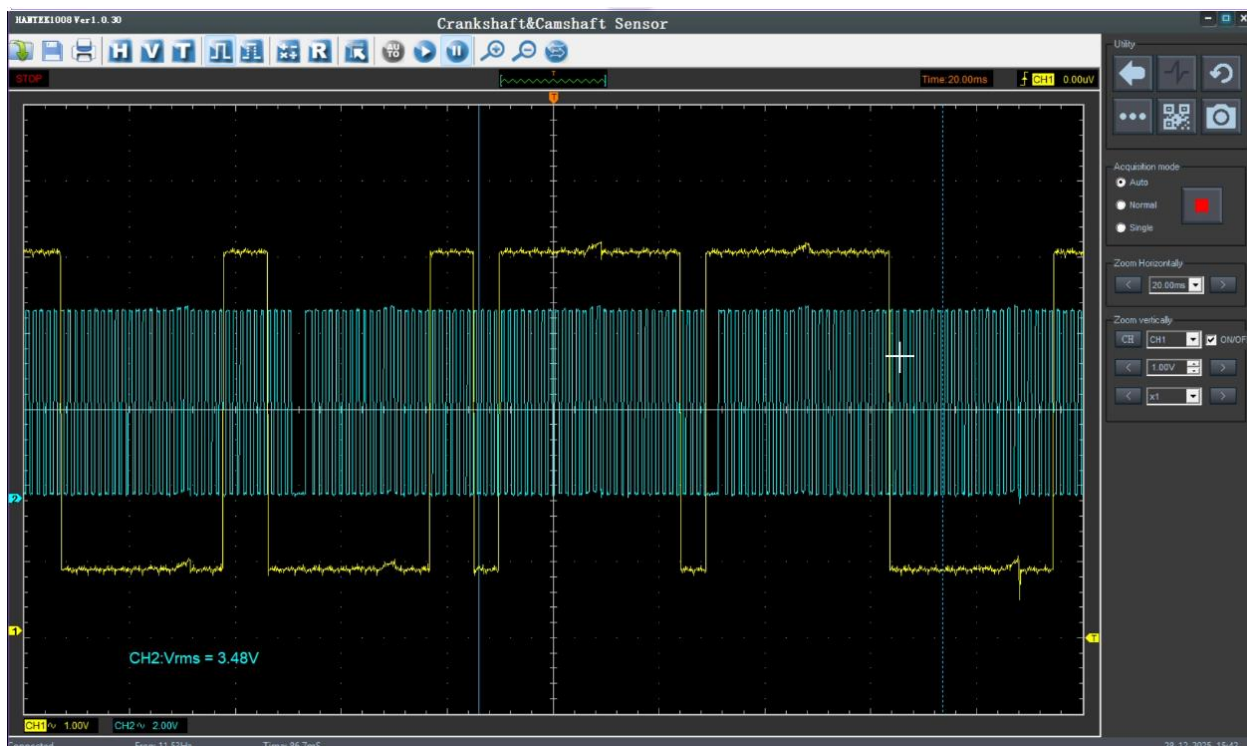
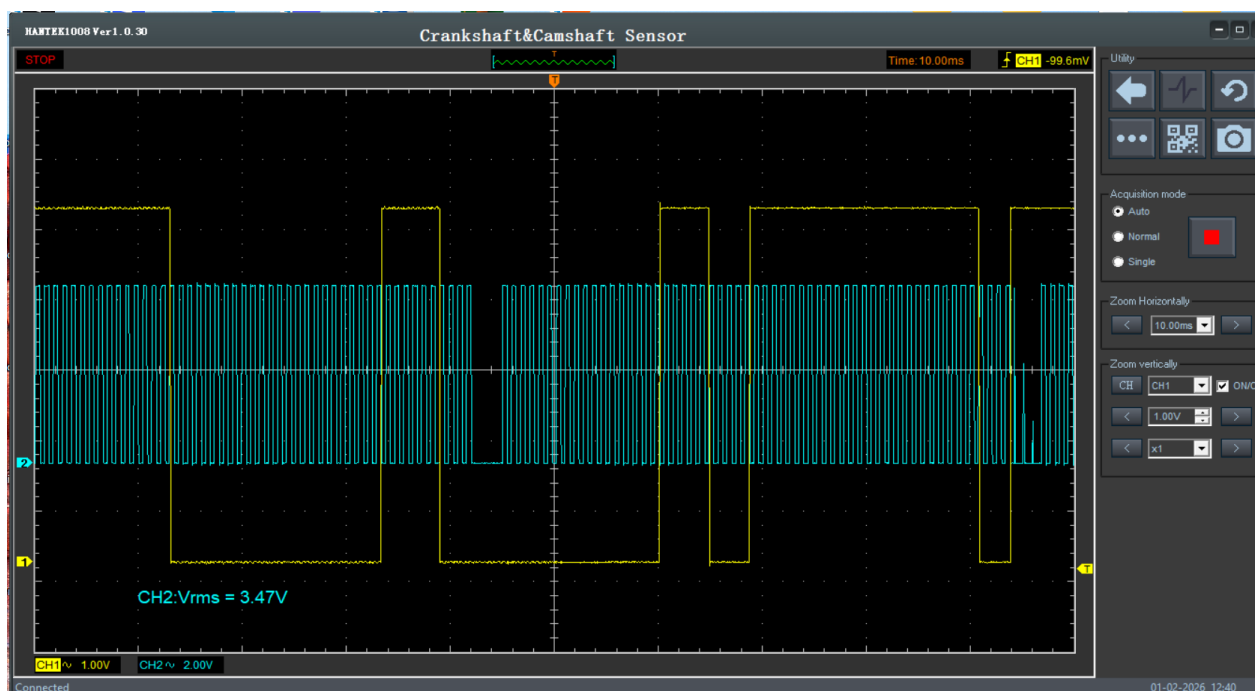


Figura 30

Señales CKP y CMP simuladas mediante Arduino durante las pruebas del banco de pruebas

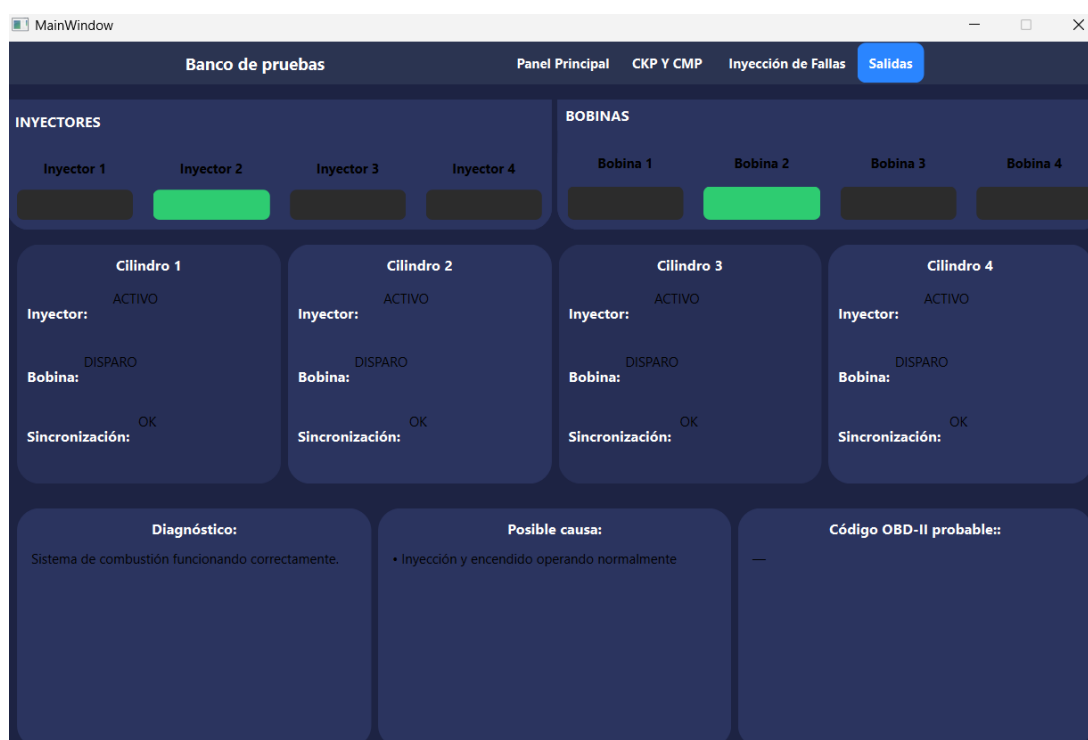


3.4.3 Encendido lógico de la ECU y activación de salidas

Como resultado de la correcta generación de las señales de sensores y de referencia del motor, se verificó el encendido lógico de la ECM. En la Figura 31 se presenta el funcionamiento de la unidad de control, la cual activó las salidas correspondientes a los inyectores y bobinas de encendido según el orden lógico 1-3-4-2, evidenciando la correcta interpretación de las señales CKP y CMP y su adecuada integración en el sistema.

Figura 31

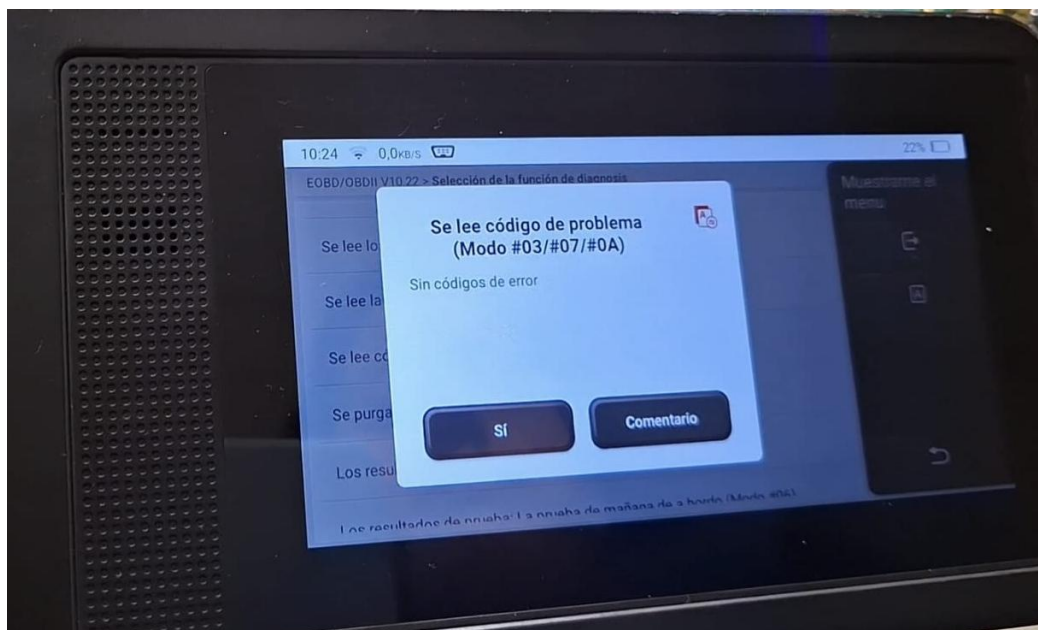
Visualización del estado lógico de inyectores y bobinas desde la GUI



Para la validación de datos generados, se utilizó un escáner de diagnóstico OBD-II conectado directamente a la ECM mediante el bus de comunicación CAN. Durante esta verificación, el banco de pruebas fue configurado en una fase neutra, sin fallas activas simuladas. Como se muestra en la Figura 32, el escáner OBD-II no registró códigos de falla, confirmando que la ECM reconoció las señales simuladas y validando el correcto funcionamiento del banco de pruebas.

Figura 32

Validación del banco de pruebas mediante escáner de diagnóstico OBD-II



3.4.4 Simulación de condiciones de falla

Durante las pruebas funcionales se evaluó la capacidad del banco de pruebas para inyectar fallas controladas en el sistema y analizar la respuesta de la ECU ante condiciones anómalas simuladas. Tal como se observa en la Figura 33, se seleccionó la falla TPS circuito abierto, la cual representa una condición de error típica del sensor de posición del acelerador.

Esta condición fue generada forzando la señal del sensor a nivel inválido, con el fin de que fuera detectada por la ECM. La validación de la falla simulada se realizó mediante el OBD-II, como se presenta en la Figura 34, confirmando la detección de la anomalía y el registro del código de falla correspondiente.

Figura 33

Interfaz gráfica para la simulación de condiciones de falla y visualización de la respuesta de la ECU

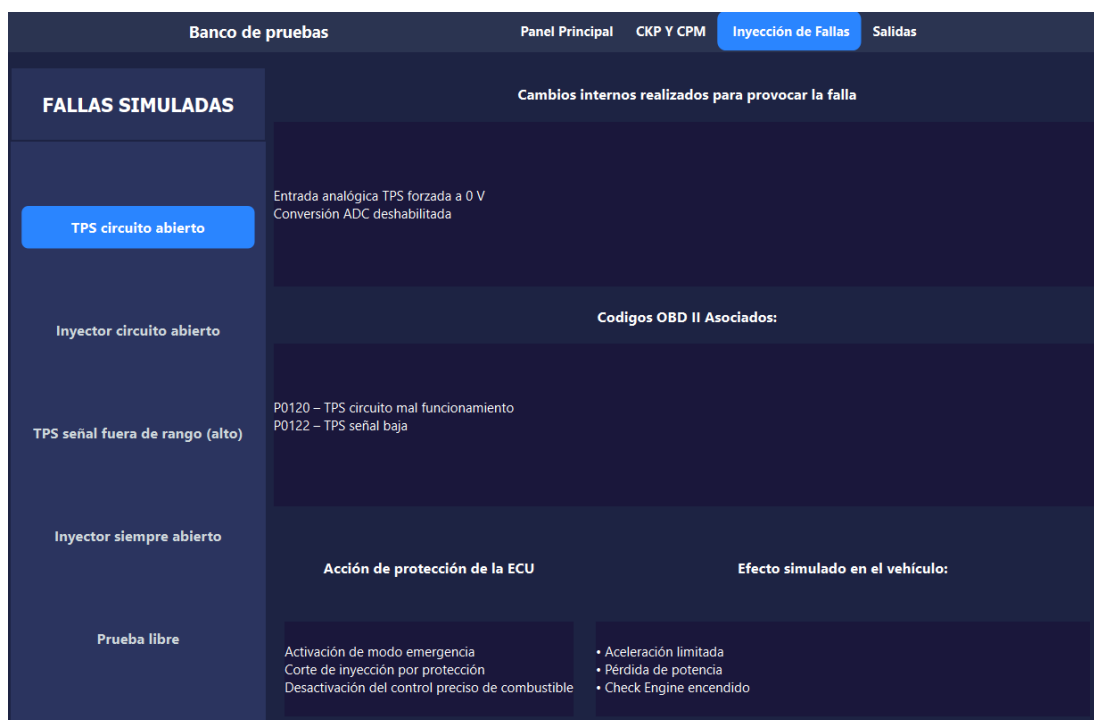
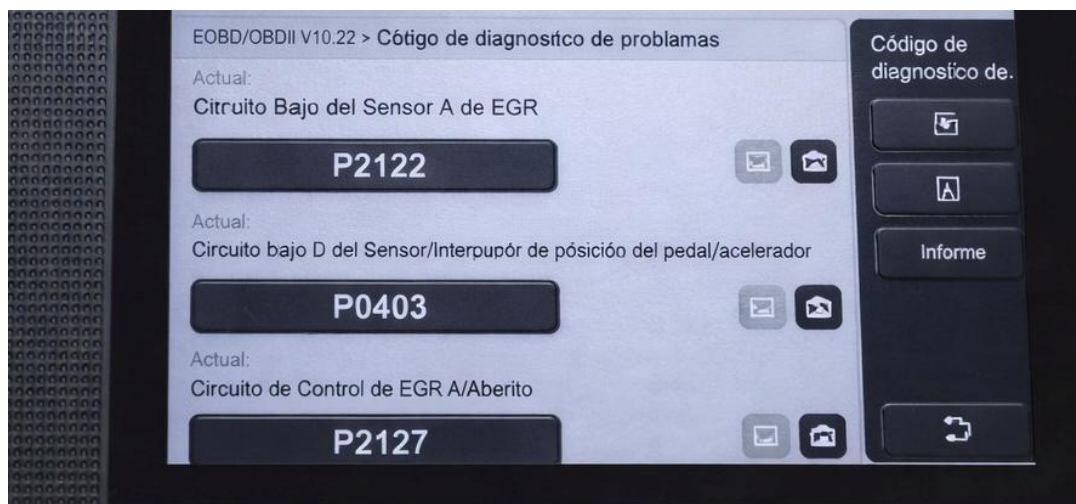


Figura 34

Verificación de la falla simulada mediante diagnóstico OBD-II



3.4.5 Simulación de falla por inyector desconectado

Con el propósito de analizar la respuesta de la ECU ante fallas críticas en el sistema de inyección, se simuló una falla por inyector desconectado. Como se muestra en la Figura 35, se

desactivo el inyector 1 desde la interfaz gráfica del banco de pruebas, Esta condición, fue generada mediante el uso de MOSFET, interrumpiendo la señal del inyector. La detección de la falla fue verificada mediante diagnostico OBD-II, como se presenta en la Figura 36.

Figura 35

Simulación de falla por inyector desconectado en el cilindro 1 desde la GUI

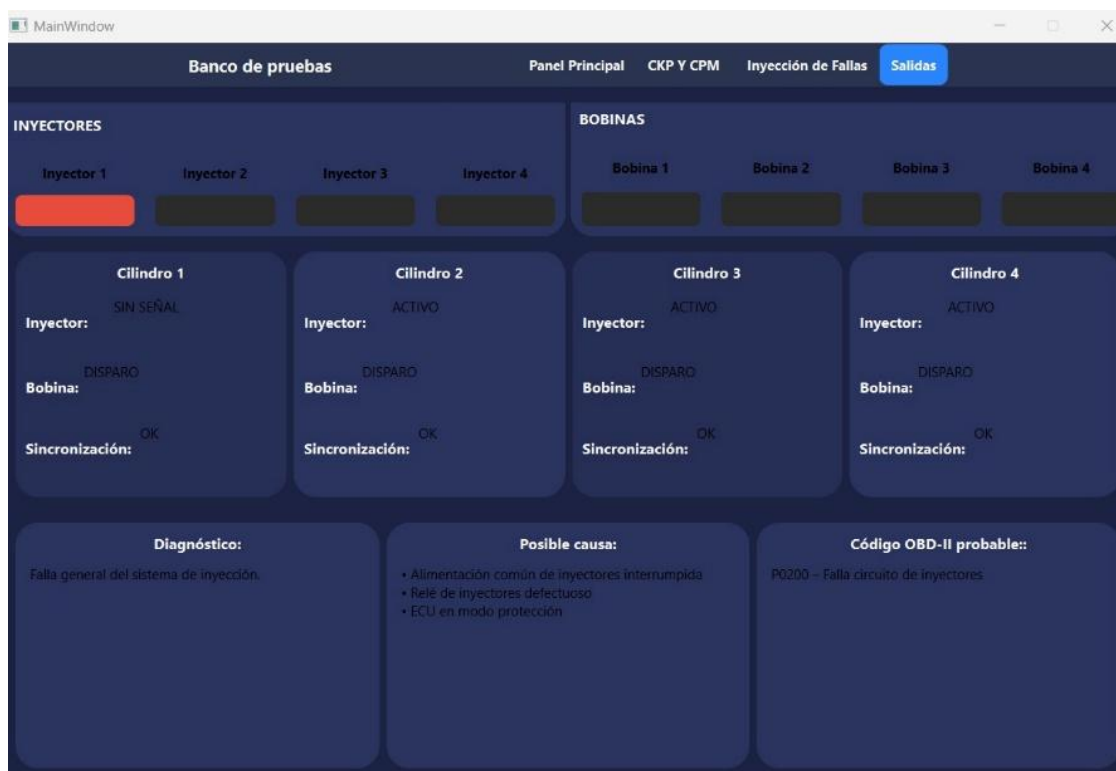
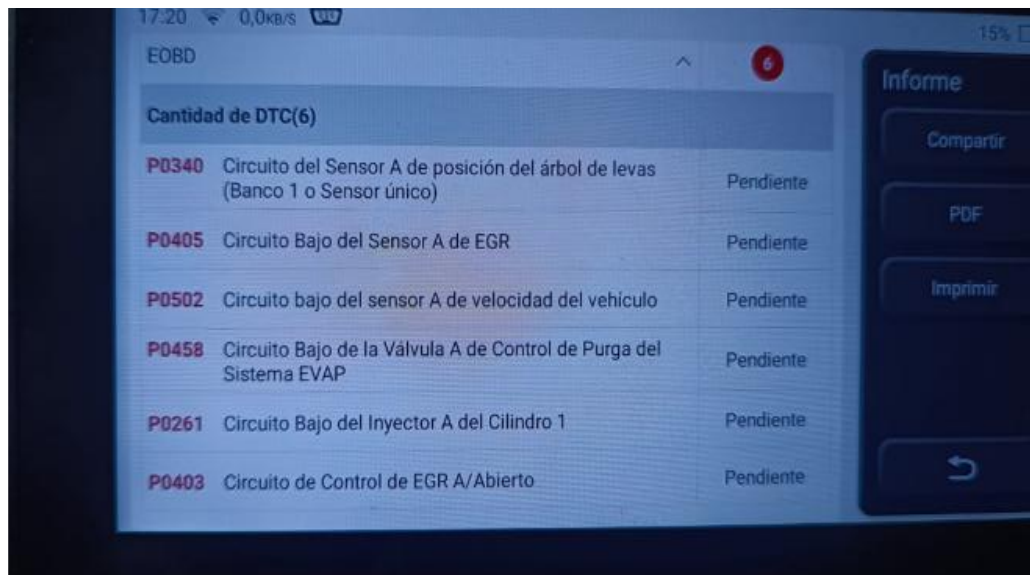


Figura 36

Verificación de la falla por inyector desconectado OBD-II



3.4.6 Visualización del estado del sistema y diagnóstico

Los resultados obtenidos demuestran que el banco de pruebas desarrollado cumple satisfactoriamente con los objetivos y requerimientos establecidos en la etapa de diseño, especialmente en la simulación de señales automotrices y la evaluación funcional de la ECU en un entorno controlado. La correcta generación de señales analógicas correspondientes a los sensores TPS, MAP, MAF, ECT, IAT y O₂, dentro de rangos compatibles con la ECU, confirma la viabilidad del sistema para reproducir condiciones reales de operación sin el uso de sensores físicos.

La generación de las señales CKP y CMP bajo un patrón tipo GM 60-1, incluyendo el diente faltante y la sincronización por ciclos, permitió que la ECU interpretara un estado de giro válido del motor. La activación lógica de inyectores y bobinas confirmó la correcta interpretación de las señales necesarias para los cálculos de inyección y encendido. Además, el sistema demostró la capacidad de inyectar fallas controladas de señales de sensores y actuadores, permitiendo observar respuestas de la ECU, y la asociación de códigos OBD-II

esperados. Estos resultados confirman la utilidad del banco de pruebas como herramienta para facilitar el diagnóstico funcional.

En conjunto, el banco de pruebas se presenta como una alternativa más accesible, modular y adaptable frente a equipos comerciales de mayor costo, con aplicación tanto en entornos académicos como en talleres automotrices, así como posibilidades de ampliación futura.

3.5 Análisis de costos

3.5.1 Análisis de costos por unidad

La Tabla 15 presenta el análisis consolidado de costos del banco de pruebas para diagnóstico de ECU, integrando tanto los componentes electrónicos como los componentes mecánicos empleados en el desarrollo del prototipo. El análisis considera los elementos necesarios para la generación y acondicionamiento de señales, la simulación de cargas, la protección eléctrica y la implementación de una estructura física funcional y segura.

Tabla 15

Análisis de costos por componentes eléctricos y mecánicos

Análisis de costo por unidad					
Tipo	Componente	Descripción	Costo U.	Cantidad	Costo T.
	PCA 9548	Placa de expansión IIC I2C multicanal de 8 vías	3,58	1	3,58
Componente Electrónico	Atmega 2560	Microcontrolador base arduino	26	1	26
	DAC MCP 4725	Módulo DAC MCP4725 I2C	3,95	4	15,8
	LM358	Amplificador operacional	0,44	2	0,88
	Modulo rele de 8 canales	Relés electromecánicos	10,79	1	10,79

	Modulo relé de 2 canales	Relés electromecánicos	2,9	1	2,9
	Modulo IRF520	Modulo Mosfet Irf520 Irf 520 pw	3	2	6
	CD4052	Multiplexor	0,66	1	0,66
	Potenciómetro	5K OHMS de perilla	0,30	6	1,8
	Resistor fusible	220,330,1k,10k,560,22,22k	0,08	73	5,84
	Resistor cerámico	47 ohm 5W	0,15	6	0,9
	Capacitores cerámicos	104,103	0,10	28	2,8
	Capacitores electrolíticos	0,47, 100 uF	0,10	6	0,6
	Diodo 1N4148	Diodo de señal para protección y conmutación	0,05	10	0,50
	Porta Fusible	Soporte para fusibles y protección	0,50	3	1,50
	Fusibles	Protección contra sobre corriente	0,60	3	1,80
	Borneras	Borneras de 3 pines	0,50	6	3
	Reguladores de voltaje	7805-7809	0,80	2	1,60
	Cables jumper	Cableado para señales x 40	1,96	5	9,8
	Cables automotrices	Cableado para potencia de arnés automotriz	-	-	60
	Baquelita perforada 18X12	Placa perforada para módulos auxiliares	3,50	3	10,5
Componente Mecánico	Baquelita perforada 10X10	Placa perforada para módulos auxiliares	2,5	1	2,5
	Material carcasa	Material acrílico para paneles de carcasa	45	1	45
	Soportes para PCB	Separadores impresos	0,60	24	14,40
Total					229,15

3.5.2 Costos al por mayor

Con objetivo de analizar el comportamiento económico del banco de pruebas en un escenario de producción al por mayor, se realizó una comparación de costos considerando la

fabricación del equipo, logrando una reducción de costos mediante la compra de componentes por volumen.

Como resultado, el costo de materiales se redujo de 229,15 USD a 183 USD. La mano de obra se limita a actividades de ensamblaje, cableado, soldadura y pruebas, estimando aproximadamente 10 horas por unidad, lo que equivale a un costo de 30,00 USD por equipo, considerando el salario básico unificado (SBU) vigente en el Ecuador.

3.5.3 *Análisis comparativo de costos por unidad y al por mayor*

La Tabla 16 muestra la comparación de costos del banco de pruebas en los escenarios de producción por unidad y al por mayor. En el desarrollo por unidad, el costo total asciende a 1536,15 USD, siendo la mano de obra el mayor aporte con 1200 USD, calculados a partir de 400 horas de trabajo considerando el SBU vigente. La ganancia estimada por unidad es de 107 USD, por lo que la venta de 12 unidades permite recuperar la inversión inicial.

Tabla 16

Desglose de costos por unidad y por mayor

Concepto	Desarrollo por unidad	Producción al mayor
Costo de materiales	229,15	183,00
Mano de obra	1200	30
Ganancia por unidad	107	107
Precio estimado	1536,15	320

En el escenario de producción al por mayor, se considera un descuento del 20 % en los componentes, lo que reduce el costo unitario y mejora la rentabilidad del proyecto. Esta comparación permite visualizar como la adquisición conjunta de materiales para un lote limitado de unidades contribuye a optimizar los costos sin modificar la propuesta técnica del banco de pruebas.

Capítulo 4

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

1. Se diseñó e implementó un banco de pruebas capaz de simular señales de sensores automotrices, lo que permitió analizar el comportamiento de una ECU en un entorno controlado y repetible. La eliminación de variables mecánicas y ambientales facilitó el diagnóstico electrónico, especialmente en el análisis del sensor TPS y control de inyectores.
2. La implementación práctica demostró que la confiabilidad del sistema depende principalmente del diseño del acondicionamiento eléctrico y de la arquitectura modular, más que de la capacidad de procesamiento del microcontrolador. Esto confirmó la importancia del diseño electrónico en sistemas de diagnóstico.
3. Se comprobó que la ECU habilita sus salidas de control únicamente cuando existe coherencia temporal entre las señales CKP y CMP. Este resultado demostró que la sincronización del motor es un criterio clave de validación para la lógica interna de la ECU, por lo que el diagnóstico debe enfocarse en el análisis de las señales y no solo en niveles de voltajes.
4. La arquitectura modular del banco de pruebas, tanto electrónica como mecánica, demostró ser funcional y escalable, permitiendo un acceso sencillo a los módulos, un mantenimiento seguro y la posibilidad de una futura expansión.
5. El desarrollo de una interfaz gráfica basada en PyQt6 permitió el control virtual de los sensores y la visualización en tiempo real, facilitando la visualización de las formas de onda de los sensores CKP y CMP, y el análisis del comportamiento de la ECU. Sumado a esto, la comparación con mediciones realizadas usando osciloscopio confirmó la coherencia entre simulación y la señal real.

6. El proyecto fortalece el diagnóstico electrónico automotriz a nivel local al demostrar que es posible desarrollar una solución técnica replicable, alineada con normativas de seguridad, capaz de reducir la dependencia de equipos cerrados y de ampliar el acceso a herramientas de diagnóstico tanto en talleres automotrices como en entornos de formación académica.

4.2 Recomendaciones

1. Se recomienda ampliar el sistema para incluir protocolos de comunicación automotriz, como CAN o LIN, con el fin de evaluar no solo señales analógicas, sino también la comunicación digital entre la ECU y otros módulos del vehículo.
2. Para futuras versiones, se sugiere incorporar medición y registro de datos históricos, permitiendo almacenar curvas de señales y respuestas de la ECU para análisis comparativos y generación de reportes técnicos.
3. Es recomendable desarrollar módulos intercambiables por modelo de vehículo, lo que permitiría adaptar el banco de pruebas a distintas ECUs sin modificar la estructura principal del sistema.
4. Se sugiere optimizar el diseño mecánico final mediante materiales más robustos y sellados, que incrementen la durabilidad del equipo frente a vibraciones, polvo y humedad propios del ambiente de taller.
5. Se recomienda integrar modos de aprendizaje guiado para su uso en la e, donde la interfaz explique el efecto de cada sensor sobre el funcionamiento del motor, fortaleciendo el uso didáctico del banco de pruebas.
6. Finalmente, se aconseja realizar validaciones adicionales con diferentes ECUs reales, a fin de ampliar el rango de compatibilidad del sistema y su aplicabilidad en escenarios reales de diagnóstico automotriz.

Referencias

- [1] AutoExpress. (2024, oct. 1). What is an ECU? Functions, problems, and tuning [Online].
Disponibile en: <https://www.autoexpress.co.uk/tips-advice/366497/what-ecu-car-electronic-control-units-functions-problems-and-tuning>.
- [2] Future Market Insights. (2024, oct. 2). Automotive ECU Market Report [Online].
Disponibile en: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/automotive-ecu-market>.
- [3] Fortune Business Insights. (2024, oct. 2). Automotive Electronic Control Unit (ECU) Market [Online].
Disponibile en: <https://www.fortunebusinessinsights.com/reports/automotive-electronic-control-unit-ecu-market-101595>.
- [4] Strategic Market Research. (2024, oct. 2). Automotive ECU Market Analysis [Online].
Disponibile en: <https://www.strategicmarketresearch.com/market-report/automotive-ecu-market>.
- [5] B. Šekara et al., “Influence of engine electronic management fault,” *Sensors*, vol. 22, no. 5, pp. 2054–2066, 2022.
- [6] N. Ahmad, A. Meng, y M. Sultan, “Applications of hardware-in-the-loop simulation in automotive embedded systems,” en *Proc. IEEE Conf.*, 2020.
- [7] P. C. Nissimagoudar, S. S. Patil, y S. B. Patil, “Hardware-in-the-loop simulation technique for an automotive electronics course,” *Procedia Computer Science*, vol. 172, pp. 105–110, 2020.
- [8] ZipDo. (2025, oct. 2). Upskilling and reskilling in the automotive aftermarket industry [Online].
Disponibile en: <https://zipdo.co/upskilling-and-reskilling-in-the-automotive-aftermarket-industry-statistics>.

- [9] Accio. (2024, oct. 3). ECU repair tools and trends [Online]. Disponible en: <https://www.accio.com/t-v2/business/ecu-repair-tools-trends>.
- [10] C. Himabindu, V. Sumalatha, y A. Anilkumar, “Reliability analysis of electronic control unit and remote unit used in decoy launcher defence system,” *Int. J. Adv. Res. Ideas Innov. Technol.*, vol. 5, no. 3, pp. 495–498, 2020.
- [11] Acta FIH, “Estudio de fallas eléctricas y electrónicas en vehículos por modelo,” Fac. de Ing. Mecánica y Eléctrica, 2019.
- [12] SE Staff. (2019, feb. 12). Reliability becomes the top concern in automotive [Online]. Disponible en: <https://www.semiengineering.com/reliability-becomes-the-top-concern-in-automotive/>.
- [13] T. Denton, *Advanced Automotive Fault Diagnosis*, Routledge ed. Abingdon, U.K.: Routledge, 2017.
- [14] Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS), “Registro Estadístico de Empleo en la Seguridad Social (REESS) – Boletín Agosto 2024,” Quito, Ecuador, 2024.
- [15] Shenzhen Zhenchebao Vehicle Diagnostics Technology Co. Ltd. (2025). EngineDance X5pro+ Ultimate Diagnostic Tool ECU. Alibaba [Online]. Disponible en: https://www.alibaba.com/product-detail/EngineDance-X5pro-Ultimate-Diagnostic-Tool-Ecu_1601272518547.html.
- [16] Servicio Nacional de Aduana del Ecuador (SENAE), “Régimen de Mensajería Acelerada y Courier,” Quito, Ecuador, 2023.
- [17] Synopsys Inc. (2025). Virtual Prototyping: Silver [Online]. Disponible en: <https://www.synopsys.com/verification/virtual-prototyping/silver.html>
- [18] ETAS GmbH. (2025). INCA-FLOW: Guided Calibration & Test Automation [Online]. Disponible en: <https://www.etas.com/ww/en/products-services/data-acquisition-processing-tools/software-products/inca-flow/>

- [19] J. R. Gómez Laconcha. (2023). System of emulation outside the vehicle of engine control ECUs for their subsequent diagnosis [Online]. Disponible en: <https://www.ni.com/en/solutions/transportation/case-studies/system-of-emulation-outside-the-vehicle-of-engine-control-ecus-for-their-subsequent-diagnosis.html>
- [20] Softing Automotive. (2023). Diagnostic Simulation of ECUs [Online]. Disponible en: <https://automotive.softing.com/applications/simulation.html>
- [21] EuroTaller. (2025). Cuando el sensor TPS falla: síntomas y soluciones [Online]. Disponible en: <https://www.eurotaller.com/blog/cuando-el-sensor-tps-falla-sintomas-y-soluciones>
- [22] A. Mancarella y O. Mareello, “Effect of coolant temperature on performance and emissions of a compression ignition engine running on diesel and HVO,” *Energies*, vol. 16, p. 144, 2023.
- [23] I. Lakatos, “Environmental and economic performance of different vehicle diagnostic strategies,” *Sustainability*, vol. 17, no. 4, pp. 1–17, Feb. 2025, doi: 10.3390/su17041662.
- [24] J. G. Morales Escobar, “Funcionamiento y localización de fallas en componentes utilizados en los sistemas de inyección de combustible Bosch en motores de ciclo Otto,” Tesis de grado, Fac. Ing. Mecánica, Univ. de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2015.
- [25] R. X. Vera Cabrera, “Diseño y construcción de un comprobador de ECUs para los sistemas de inyección a gasolina,” Tesis de grado, Fac. Ing., Univ. del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2014.
- [26] Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), *Diagnostic Connector Equivalent to ISO/DIS 15031-3: Road Vehicles—Communication Between Vehicle and External*

Test Equipment for Emissions-Related Diagnostics—Part 3: Diagnostic Connector and Related Electrical Circuits. SAE International, 2002.

- [27] S. A. Yerera et al., *Sistemas de Inyección Electrónica*. Univ. Nacional de La Plata, Argentina.
- [28] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), “Boletín Técnico N° 01-2025 – Transporte,” Quito, Ecuador, 2024.
- [29] Ecuavisa. (2024, sep. 6). Parque automotor ecuatoriano creció 7.49 % en nueve años [Online]. Disponible en: <https://www.ecuavisa.com/noticias/ecuador/parque-automotor-ecuador-crecio-749-por-ciento-nueve-anos-KH7955590>
- [30] Autoridad de Tránsito Municipal (ATM), “Informe de gestión del parque automotor de Guayaquil,” Guayaquil, Ecuador, 2024.
- [31] R. Bosch, *Automotive Electrics and Automotive Electronics: Systems and Components, Networking and Hybrid Drive*. Springer Vieweg, 2014.
- [32] A. W. M. Bonnick, *Automotive Computer Controlled Systems: Diagnostic Tools and Techniques*. Butterworth-Heinemann, 2001.
- [33] AutoPi. (2024). What Is an Electronic Control Unit (ECU) [Online]. Disponible en: <https://www.autopi.io/blog/what-is-electronic-control-unit-definition/>.
- [34] A. Granell. (2025). ¿Qué averías pueden aparecer en el módulo de control de motor o centralita? RO-DES [Online]. Disponible en: <https://www.ro-des.com/mecanica/averias-modulo-control-de-motor-o-centralita/>.
- [35] S. Müller et al., *Zonal Architecture Development with Evolution of Artificial Intelligence*, 2024.
- [36] SuperAuto. (2025, oct.). Tipos de memorias de la ECU del automóvil [Online]. Disponible en: <https://superauto.com.ar/tipos-de-memorias-de-la-ecu-del-automovil/>.

- [37] A. W. M. Bonnicksen, *Vehicle Electronic Systems and Fault Diagnosis: A Practical Guide for Vehicle Technicians*. Abingdon, U.K.: Routledge, 2011.
- [38] W. B. Ribbens, *Understanding Automotive Electronics*, 8th ed. Cambridge, MA, USA: Newnes, 2017.
- [36] EMD, *Electrónica Automotriz: Fundamentos, circuitos, controladores, sensores, ECU*, 2023.
- [40] S. F. Cajísaca y J. M. Pinos, “Diseño y construcción de un banco comprobador de ECUs de sistemas de inyección de gasolina usando Arduino Mega,” Tesis de grado, Fac. Ing., Univ. del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2016.
- [41] F. A. Luis Corrales, “Diseño y construcción de un banco de pruebas para la emulación de las señales generadas por los sensores empleados en el sistema de inyección electrónica automotriz,” Tesis de grado, Fac. Ing. Eléctr. y Electrón., Esc. Politéc. Nac., Quito, Ecuador, 2017.
- [41] I. Barrera, “Diseño y construcción de un equipo para prueba y diagnóstico aplicado a sensores automotrices del sistema de inyección electrónica,” Tesis de grado, Dept. Ing. Automotriz, Univ. Politéc. Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [43] H. Ying, “Didactic Test-Bench of a Car’s Engine,” Tesis de Maestría, Dept. Ing. de Control y Computación, Politécnica de Turín, Italia, 2020.
- [44] Lucas-Nülle, *Training and Further Education in Automotive Engineering*. Kerpen, Germany: Tech. Rep., 2009.
- [45] Tecno Electronics JAKY. (2025, nov. 1). MARK50 ECU Test Bench — Professional Automotive Diagnostic Equipment [Online]. Disponible en: <https://www.jaky47.com/equipos/mark50/>.

- [46] BalticDiag Diagnostics. (2024). Metsim PRO MAX | ECU Repair and Testing Tool [Online]. Disponible en: <https://www.balticdiag.com/es-es/herramienta-de-reparacion-y-comprobacion-de-la-ecu-metsim-pro-max/>.
- [47] A. A. B. Ferreira et al., “Automotive ECU basic test & validation for XIL in ADAS: A comprehensive overview on HIL bench phase,” *EPJ Web Conf.*, vol. 330, p. 02008, Ene. 2025. doi:10.1051/epjconf/202533002008.
- [48] International Organization for Standardization (ISO), *ISO 26262 — Road Vehicles: Functional Safety*. Geneva, Switzerland: ISO, 2018.
- [49] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), *RTE INEN 167 — Compatibilidad Electromagnética (CEM)*. Quito, Ecuador, 2016.
- [50] W. B. Ribbens, *Understanding Automotive Electronics: An Engineering Perspective*, 7th ed. Oxford, U.K.: Elsevier, 2012.
- [51] M. Broy et al., “E/E architecture synthesis: Challenges and technologies,” *Electronics*, 2022.
- [52] U. Kiencke y L. Nielsen, *Automotive Control Systems for Engine For Driveline and Vehicle*, 2th ed. Berlin, Germany: Springer, 2005.
- [53] S. Dargahi. (2024, dic. 19). What is the main cause of engine control module failure? [Online]. Disponible en: <https://npcautomotive.com/what-is-the-main-cause-of-ecm-engine-control-module-failure-blog>.
- [54] G. Lira. (2025, ene. 31). Mi auto y su ECU. Autofact Blog [Online]. Disponible en: <https://www.autofact.cl/blog/mi-auto/mantencion/ecu>.
- [55] D. Jenner. (2023, abr. 29). Common reasons for failure in engine control modules. J-Ball Electronics Blog [Online]. Disponible en: <https://jballectronics.com/blogs/resources/common-reasons-for-failure-in-engine-control-modules>.

- [56] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 60204-1 — Safety of Machinery: Electrical Equipment of Machines*. Geneva, Switzerland: IEC, 2016.
- [57] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61010-1 — Safety Requirements for Electrical Equipment for Measurement, Control, and Laboratory Use – Part 1*. Geneva, Switzerland: IEC, 2010.
- [58] International Electrotechnical Commission (IEC), *IEC 61000 Series — Electromagnetic Compatibility Standards*. Geneva, Switzerland: IEC, 2019.
- [59] Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), *RTE INEN 057 — Tableros, Gabinetes y Accesorios Eléctricos*. Quito, Ecuador, 2017.
- [60] EuroTaller. (2025). *Cuando el sensor TPS falla: síntomas y soluciones* [Online]. Disponible en: <https://www.eurotaller.com>
- [61] Burger Tuning. (2025). *N54 MSD80 ECU MOSFET* [Online]. Disponible en: <https://burgertuning.com/products/n54-msd80-ecu-mosfet>
- [62] S1INC. (s. f.). *DTC P0226 Throttle/Pedal Position Sensor/Switch C Circuit Range/Performance* [Online]. Disponible en: <https://www.fs1inc.com/blog/dtc-p0226-throttlepedal-position-sensorswitch-c-circuit-rangeperformance/>

Apéndices

Apéndice A

Criterios de selección

Tabla 17

Criterios de selección de controlador

Criterios	Descripción
Costo	Presupuesto económico accesible, considerando la relación costo-beneficio de las funcionalidades requeridas.
Disponibilidad Local	Facilidad de adquisición en el mercado ecuatoriano, evitando costos adicionales y largos tiempos de espera.
Interfaz E/S y escalabilidad	Cantidad suficiente de pines digitales y analógicos para gestionar las señales del sistema con capacidad de expansión futura.
Capacidad de procesamiento	Recursos necesarios para ejecutar control en tiempo real, generación de señales PWM y gestión de subsistemas.

Tabla 18

Ponderación de criterios de la Tabla 14

Nivel de prioridad	Criterio	Peso	Decisión %
1	Costo	2,5	30
2	Disponibilidad Local	2,5	25
2	Interfaz y escalabilidad	3	25
3	Capacidad de procesamiento	2	20

Tabla 19*Criterios de selección de DAC*

Criterio	Descripción
Disponibilidad Local	Facilidad de adquisición en el mercado ecuatoriano, minimizando tiempos de espera por importación y costos adicionales de envío que puedan afectar el cronograma de desarrollo.
Costo	Precio unitario del componente considerando las restricciones presupuestarias y la necesidad de adquirir múltiples unidades para el sistema completo.
Facilidad de Integración	Simplicidad de implementación en el diseño electrónico, protocolo de comunicación (I2C/SPI), cantidad de pines requeridos y compatibilidad con el microcontrolador seleccionado.
Cantidad de Canales	Número de salidas analógicas independientes por dispositivo, lo cual influye en la cantidad total de módulos necesarios y la complejidad del sistema.

Tabla 20*Ponderación de criterios de la Tabla 16*

Nivel de prioridad	Criterio	Peso	Decisión %
1	Costo	2,5	30
2	Disponibilidad Local	2,5	25
2	Interfaz y escalabilidad	3	25
3	Capacidad de procesamiento	2	20

Apéndice B

Consumo Energético

Ecuaciones base para el cálculo energético

$$I = \frac{V}{R} \quad (2.1)$$

$$P = V * I \quad (2.2)$$

$$P = I^2 * R \quad (2.3)$$

$$I_{Total} = n * I \quad (2.4)$$

$$P_{Total} = n * P \quad (2.5)$$

1. Cálculo de consumo energético y potencia del bloque de simulación de sensores

Circuito de entrada TPS, MAP, MAF, ECT, IAT

a) Corriente según la ecuación 2.1

R33

$$I_{R33} = \frac{5V}{1k\Omega} = 5mA$$

Potenciómetro RV11

$$I_{RV11} = \frac{5V}{5k\Omega} = 1mA$$

$$I_{Total} = 5mA + 1mA$$

Corriente total a 5V de las 5 conexiones:

$$I_{5V,Total} = 5(6mA)$$

$$I_{5V,Total} = 30mA$$

b) Potencia según la ecuación (2.3)

En R33

$$P_{R33} = (5mA)^2 * 1k\Omega = 25mW$$

Potenciómetro

$$P_{RV11} = (1mA)^2 * 5k\Omega = 5mW$$

$$P_{Total} = 25 \text{ mW} + 5 \text{ mW} = 30 \text{ mW}$$

Potencia a 5V de las 5 conexiones:

$$P_{5V,Total} = 5(30 \text{ mW})$$

$$P_{5V,Total} = 150 \text{ mW}$$

Circuito de Salida del Atmega 2560

a) Circuito de salida de simulación IAT-ECT-TPS2

Aplicando la ecuación (2.1), correspondiente a la relación de corriente eléctrica se determinaron los siguientes valores.

Corriente LED azul:

$$I_{LED} = \frac{(5 - 3)[V]}{4700\Omega} = 0.426 \text{ mA}$$

Corriente por R37, Pin en LOW:

$$I_{R37,max} = \frac{5}{10\Omega K} = 0.5 \text{ mA}$$

Consumo total del circuito a 5V:

$$I_{SALIDA.ECT-IAT-TPS2} = n(I_{LED} + I_{R37,max}) \quad (2.6)$$

$$I_{SALIDA.ECT-IAT-TPS2} = (0.426 \text{ mA} + 0.5 \text{ mA})3 = 2.778 \text{ mA}$$

Aplicando ecuación (2.2):

$$P_{TOTAL,max} = (5 * 1.852) = 13.89 \text{ mW}$$

$$I_{SALIDA.ECT-IAT-TPS2} = 2.778 \text{ mA}$$

$$P_{SALIDA.ECT-IAT} = 13.89 \text{ mW}$$

b) Salida digital TPS-MAP-MAF-O2

Aplicando ecuación (2.1), se determinó el consumo de las líneas I2C y de los módulos asociados al circuito de salida de DACs.

Pull-up I2C de PCA948 líneas en LOW aplicando ecuación (2.4)

$$I = \frac{5V}{10k} = 0.5 \text{ mA}$$

Corriente total del PCA9548:

$$I_{PCA} = 2(0.5 \text{ mA}) = 1 \text{ mA}$$

Corriente total de resistencias pull-up:

$$I_{pull\ ups} = 2(0.5 \text{ mA}) = 1 \text{ mA}$$

Consumo de módulos DAC y amplificadores aplicando ecuación (2.4)

MCP4725 a 5V corriente típica de 0.4 mA

$$I_{DACs} = 4(0.4 \text{ mA}) = 1.6 \text{ mA}$$

LM358 a 9V

$$I_{LM358} = 4(1 \text{ mA}) = 4 \text{ mA}$$

Potencia total de las conexiones de DAC

T_CSD = Total circuito de Salida de DACs

Consumo total:

$$\begin{aligned} I_{5V} &= I_{pull\ ups} + I_{PCA} + I_{DACs} \\ I_{5V} &= 3.6 \text{ mA} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Sustituyendo en (2.2):

$$P_{5V} = 5V (3.6 \text{ mA}) = 18 \text{ mW}$$

$$P_{9V} = 9V * (4 \text{ mA}) = 36 \text{ mW}$$

Potencia del bloque:

$$\begin{aligned} P_{T_CSD} &= P_{5V} + P_{9V} \\ P_{T_CSD} &= (18 + 36) \text{ mW} = 54 \text{ mW} \end{aligned} \quad (2.8)$$

c) CD4053

Consumo típico:

$$I_{CD4053} = 0.1 \text{ mA}$$

Aplicando ecuación (2.2):

$$P_{CD4053} = 5V * 0.1 \text{ mA}$$

$$P_{CD4053} = 0.5 \text{ mW}$$

Consumo total de bloque simulación de sensores sustituyendo en (2.4):

BSS= Bloque Simulación de Sensores

$$I_{BSS} = I_{5V,Total} + I_{SALIDA.ECT-IAT-TPS2} + I_{5V} + I_{LM358} + I_{CD4053} \quad (2.9)$$

$$I_{BSS} = (30 + 2.778 + 3.6 + 4 + 0.1) \text{ mA}$$

$$I_{BSS} = 40.478 \text{ mA}$$

Potencia total Bloque de Simulación de Sensores

$$P_{BSS} = P_{5V,Total} + P_{SALIDA.ECT-IAT-TPS2} + P_{5V} + P_{T_CSD} + P_{CD4053} \quad (2.10)$$

$$P_{BSS} = (150 + 13.89 + 54 + 0.5) \text{ mW}$$

$$P_{BSS} = 218.39 \text{ mW}$$

2. Cálculo de consumo energético del bloque de simulación de carga.

Circuitos de simulación de carga de inyectores, bobinas, relé principal y relé auxiliar

Para el cálculo de consumo se aplican las ecuaciones principales, (2.1) y (2.2), definidas previamente.

a) Módulo relé de 8 canales y 2 canales

Corriente:

$$I_{Relé} = \frac{5V}{70\Omega} = 71 \text{ mA}$$

$$I_{Relé8C} = 8 (71 \text{ mA}) = 568 \text{ mA}$$

$$I_{Relé2C} = 2 (71 \text{ mA}) = 142 \text{ mA}$$

$$I_{Relé10C} = I_{Relé8C} + I_{Relé2C} \quad (2.11)$$

$$I_{Relé10C} = [568 + 142] \text{ mA} = 710 \text{ mA}$$

Potencia aplicando:

$$P_{Relé} = 5V * 0.071 \text{ A} = 0.35 \text{ W}$$

$$P_{Relé8C} = 5V * 568 \text{ mA} = 2.84 \text{ W}$$

$$P_{Relé2C} = 5V * 142 \text{ mA} = 0.71 \text{ W}$$

$$P_{Relé10C} = P_{Relé8C} + P_{Relé2C} \quad (2.12)$$

$$P_{Relé10C} = [2.84 + 0.71]W = 3.55W$$

b) Led indicador

$$I_{LED} = \frac{5V - 2V}{2.2k\Omega} = 1.36 \text{ mA}$$

$$P_{LED} = 5V * 1.36mA = 6.8mW$$

c) Optoacoplador PC817

$$I_{PC817} = \frac{5V - 1.2V}{1k\Omega} = 3.8 \text{ mA}$$

$$P_{PC817} = 5V * 3.8mA = 19mW$$

d) Pull-up salida al atmega

$$I_{PULL} = \frac{5V}{10k\Omega} = 0.5 \text{ mA}$$

$$P_{PULL} = 5V * 0.5mA = 2.5mW$$

e) Corriente y Potencia de bloque de simulación de inyectores y bobinas

$$I_{BSBI} = I_{Relé10C} + 8(I_{LED}) + 10(I_{PC817}) + 10(I_{PULL}) \quad (2.13)$$

$$I_{BSBI} = 710 \text{ mA} + 10(1.36 \text{ mA}) + 10(3.8 \text{ mA}) + 10(0.5 \text{ mA})$$

$$I_{BSBI} = 766.6 \text{ mA}$$

$$P_{BSBI} = P_{Relé10C} + 10(P_{LED}) + 10(P_{PC817}) + 10(P_{PULL}) \quad (2.14)$$

$$P_{BSBI} = 3.55W + (68m W) + (190 mW) + (25 mW)$$

$$P_{BSBI} = 3.83 W$$

Módulo de ventiladores

Aplicando las ecuaciones definidas (2.1) y (2.2), se determinó el consumo de los elementos del módulo.

a) LED indicador

$$I_{LED} = \frac{5V - 2V}{2.2k\Omega} = 1.36 \text{ mA}$$

$$P_{LED} = 5V * 1.36mA = 6.8mW$$

b) Optoacoplador

$$I_{PC817} = \frac{5V - 1.2V}{1k\Omega} = 3.8 mA$$

$$P_{PC817} = 5V * 3.8mA = 19mW$$

c) Pull up salida a atmega 2560

$$I_{PULL} = \frac{5V}{10k\Omega} = 0.5 mA$$

$$P_{PULL} = 5V * 0.5mA = 2.5mW$$

d) Carga simulada del ventilador

$$I_{FAN} = \frac{12V}{47\Omega} = 255 mA$$

$$P_{FAN} = 12V * 0.225 A = 3.06W$$

e) Corriente y potencia totales del bloque de simulación de carga de ventiladores

$$I_{BSCV} = 2(I_{LED}) + 2(I_{PC817}) + 2(I_{PULL}) + 2(I_{FAN}) \quad (2.15)$$

$$I_{BSCV} = 2(1.36mA) + 2(3.8mA) + 2(0.5mA) + 2(255mA)$$

$$I_{BSCV} = 521.32 mA$$

$$P_{BSCV} = 2(6.8 mW) + 2(19 mW) + 2(2.5 mW) + 2(3.06 W) \quad (2.16)$$

$$P_{BSCV} = 6.12 W$$

3. Consumo y potencia totales del sistema electrónico

Corriente consumida por el sistema

$$I = I_{BSS} + I_{BSBI} + I_{BSCV} \quad (2.17)$$

$$I = 40.478mA + 766.6 mA + 521.32 mA$$

$$I = 1.327 A$$

Potencia total del sistema

$$P = P_{BSS} + P_{BSBI} + P_{BSCV} \quad (2.18)$$

$$P = 213.76 mW + 3.83W + 6.12 W$$

$$P = 10.16 W$$

4. Resolución del DAC (MCP4725, 12 bits) a 5 VDD

$$2^{12} = 4096 \text{ niveles}$$

$$\Delta V_{LSB} = \frac{5V}{4095} = 1.22mV \quad (2.19)$$

5. Filtrado

Conexiones de entrada TPS-MAP-MAF-IAT-ECT

a) Etapa 1: R + C = RC pasa-bajo (Se toma de referencia circuito de IAT)

$$R_{36} = 1k\Omega$$

$$C_{15} = 10nF$$

Constante de tiempo

$$\tau_1 = R_{36}C_{15} \quad (2.20)$$

$$\tau_1 = (1k\Omega)(10nF) = 10 \mu s$$

Frecuencia de Corte

$$f_{cl} = \frac{1}{2\pi\tau_i} = \frac{1}{2\pi R_{36}C_{15}} \quad (2.21)$$

$$f_{cl} = \frac{1}{2\pi(1000\Omega)(10nF)}$$

$$f_{cl} \approx 15.9 \text{ kHz}$$

b) Etapa 2: R35 + C14 = RC pasa-bajo

Constante de tiempo

$$\tau_2 = R_{35}C_{14} = (10K\Omega)(100nF)$$

$$\tau_2 = 1 \text{ ms}$$

Frecuencia de Corte

$$f_{c2} = \frac{1}{2\pi R_{35}C_{14}} = \frac{1}{2\pi(10K\Omega)(100nF)}$$

$$f_{c2} \approx 159 \text{ Hz}$$

Conexiones DAC salida de Atmega 2560

a) Polo 1: R18 con C5

$$\tau_3 = R18 * C5 = 1k\Omega * 47nF = 47\mu s$$

$$f_{c3} = \frac{1}{2\pi\tau_3} = \frac{1}{2\pi(47\mu s)}$$

$$f_{c3} \approx 3.39 \text{ kHz}$$

b) Polo 2: R19 con C13

$$\tau_4 = R19 * C13 = 680\Omega * 100nF = 68\mu s$$

$$f_{c4} = \frac{1}{2\pi\tau_4} = \frac{1}{2\pi(68\mu s)}$$

$$f_{c4} \approx 2.34 \text{ kHz}$$

6. Cálculos CKP Y CMP

Relación RPM – Frecuencia

Rueda 60-2 Chevrolet Sail

$$f_{CKP} = \frac{RPM * (60 - 2)}{60} \text{ Hz} \quad (2.22)$$

Tiempo por Flanco (High/LOW)

$$t_{flanco} = \frac{1}{2f_{ckp}} \mu s \quad (2.23)$$

Registro del timer

$$OCR1A = \frac{t_{flanco} * F_{CPU}}{P} \quad (2.24)$$

Apéndice C

Módulo de control de motor, Chevrolet Sail 2014 1.4 LT

Figura 37

Identificación y numeración de pines del conector de la ECU

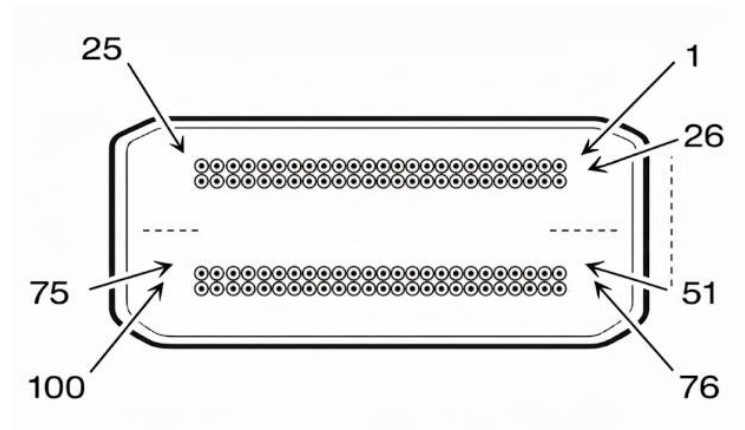


Tabla 21

Distribución de pines de conexión de la ECU

Clavija	Pin Atmega 2560	Función
1	47	Señal de control de ignición 4
2	46	Señal de control de ignición 3
3	45	Señal de control de ignición 2
26	44	Señal de control de ignición 1
4	-	Tierra
5	12 PWM	Señal del sensor de posición del árbol de levas (CMP)
7	10 PWM	Sensor de temperatura de admisión (IAT)
11	CH_DAC_O2 1	Señal del sensor de presión absoluta del distribuidor (MAP)
17	-	Voltaje
25	-	Voltaje Encendido
27	-	Tierra

28	-	Tierra
29	-	Tierra
30	11 PWM	Señal del sensor de posición del cigüeñal (CKP)
39	9 PWM	Señal del sensor de temperatura del refrigerante del motor (ECT)
40	CH_DAC_O2 3	Señal Oxígeno delantero (O2)
45	-	B+ (12 V)
47	-	B+ (12 V)
50	-	Voltaje Encendido
54	-	Datos Seriales altos CAN
55	-	Datos seriales bajos CAN
65	6 PWM	Señal TPS 2
66	CH_DAC_O2 0	Señal TPS 1
74	-	Tierra
75	-	Tierra
78	41	Señal de control de inyector 2
79	42	Señal de control de inyector 3
80	40	Señal de control de inyector 1
81	43	Señal de control de inyector 4
94	-	Señal control del relevador principal

Apéndice D

Apéndice D.1

Descripción ampliada de los tipos de ECU

Esta información complementa el marco teórico, amplía presentando los principales tipos de ECU y sus funciones dentro del sistema vehicular.

- **Control de Transmisión (TCU):** Controla los cambios de marcha y la presión hidráulica en las transmisiones automáticas, coordinando el par con la ECU del motor. Las versiones modernas incorporan estrategias adaptativas que ajustan el cambio según el estilo de conducción [32].
- **Control de Frenos y Estabilidad (ABS):** Gestiona el cambio de marchas en vehículos semiautomáticos. Modula la presión de frenado para evitar bloqueos. Los sistemas de estabilidad integran control de tracción y compensación de trayectoria mediante la intervención del motor y los frenos [31].
- **Control de carrocería (BCM):** Administra funciones de confort y seguridad como el cierre centralizado, limpiaparabrisas, luces, espejos eléctricos y los airbags. Actúa como intermediario entre usuario y sistemas distribuidos por la carrocería [13] [33].
- **Control de climatización y confort (Gateway Modules):** Regula la temperatura interior mediante sensores ambientales y de cabina, controlando ventiladores, válvulas y compresores de aire acondicionado. En vehículos modernos, también regula asientos calefactables y recirculación de aire [31].
- **Infoentretenimiento:** Integra funciones multimedia, navegación, comunicación y conectividad con el teléfono móvil. Estas unidades se comunican con las redes del vehículo mediante Ethernet o Media Oriented Systems Transport (MOST) [35][33].
- **Asistencia avanzada al conductor:** Recibe datos de cámaras, radares y sensores ultrasónicos, los utiliza para detectar el entorno y los procesa mediante algoritmos de inteligencia artificial para asistir en funciones como frenado automático, control de carril y cruce adaptativo [35].
- **Zonales y de dominio:** Representan la evolución actual de las arquitecturas electrónicas. Las zonales agrupan sensores y actuadores por zonas físicas, reduciendo el cableado; mientras que las de dominio centralizan funciones completas (motor, seguridad, infoentretenimiento) y se comunican con una Unidad Central de Alto Rendimiento (HPCU) [35].

Apéndice D.2

Tipos de sensores

- **Sensores de Sincronización y Caudal:** Los sensores CKP y CMP proporcionan información de sincronización fundamental para el cálculo de la inyección y el encendido. Los sensores inductivos generan señales senoidales proporcionales a la velocidad angular, mientras que los de efecto Hall entregan trenes de pulsos cuadrados [33][32]. La ECM interpreta el patrón de la rueda fónica (por ejemplo, 60-2 dientes) para determinar la posición angular y la secuencia de combustión, lo que obliga al simulador a sintetizar formas de onda de alta precisión [31]. Los sensores MAF (flujo de masa de aire) y MAP (presión del múltiple de admisión) son leídos también por la ECM para calcular la masa de aire aspirada y ajustar el ancho de pulso de los inyectores, asegurando una mezcla aire-combustible óptima [13][32].
- **Sensores de Condición, Posición y Retroalimentación:** Estos sensores permiten que la ECM mantenga el equilibrio entre eficiencia, potencia y emisiones. El sensor de posición del acelerador (TPS) convierte el movimiento del pedal en una señal analógica de 0.5 V a 4.5 V, utilizada para calcular la carga del motor y el avance del encendido [32]. El sensor ECT (Temperatura del refrigerante) y el sensor IAT (Temperatura del aire de admisión), ambos de tipo NTC, disminuyen su resistencia con el aumento de la temperatura, formando parte de un divisor resistivo cuya caída de tensión es medida por la ECM para ajustar la mezcla durante el arranque en frío [13][38]. El sensor de detonación (KS), basado en un cristal piezoeléctrico, detecta vibraciones anómalas que permiten a la ECM modificar el tiempo de encendido y evitar el golpeteo del motor. Por su parte, la sonda Lambda (O₂) proporciona retroalimentación continua sobre el contenido de oxígeno en los gases de escape, asegurando una combustión estequiométrica [31][33].
- **Sensores del Subsistema de Combustible y Presión:** En los sistemas de inyección directa de gasolina (GDI), la ECM necesita información constante sobre la presión del combustible para garantizar una atomización adecuada. El sensor de presión del riel (FPS) mide la diferencia entre la presión del combustible y la atmosférica, generando una señal de 0.5 a 4.5 V que la ECM utiliza para controlar el tiempo de apertura del inyector [31] [13]. Asimismo, el sensor de presión del tanque (FTPS) y el sensor de

purga del canister forman parte del sistema EVAP, encargado de monitorear las emisiones evaporativas. El ECM activa la válvula de purga y compara la lectura del FTPS para detectar fugas equivalentes a orificios de 1 mm dentro del sistema sellado de combustible, conforme al protocolo de diagnóstico OBD-II [31] [32].

- **Sensores para el Diagnóstico y Seguridad Estructural:** Estos sensores no intervienen directamente en el proceso de combustión, pero su comunicación con la ECM es fundamental para coordinar el par motor y la tracción. El sensor de ángulo de dirección (SAS), los sensores de velocidad de rueda (ABS/ESP) y el sensor de presión de freno transmiten información al módulo ESP, el cual envía comandos de corrección de torque a la ECM para evitar derrapes. Este sistema se describe como un lazo cerrado de control dinámico, donde la ECM actúa como unidad subordinada que ajusta el acelerador electrónico (ETC) y la ignición en respuesta a las condiciones de conducción [31]. Además, el sensor del pedal de freno envía una señal directa a la ECM que provoca la interrupción temporal de la inyección (fuel cut-off), mejorando la eficiencia y la seguridad [39]. En un banco de pruebas, estos sensores pueden ser emulados para verificar la respuesta de la ECM ante condiciones críticas, como el frenado o la pérdida de adherencia [38].

Apéndice D.3

Tipos de Actuadores

- **Actuadores de combustible y aire (controlados por la ECM):** Incluyen los elementos que regulan el flujo de aire y combustible del motor. Los inyectores son solenoides controlados por pulsos PWM que determinan el tiempo y caudal de inyección según las señales MAF, MAP y Lambda [38][13]. La válvula EGR, también modulada por PWM, recircula gases de escape para reducir emisiones [38]. El motor de mariposa electrónica (ETC) ajusta la apertura del acelerador mediante un motor DC con sensores Hall, mientras que la válvula IAC regula el flujo de aire en ralentí con control PWM [32].
- **Actuadores de encendido y auxiliares (controlados por la ECM):** Estos elementos generan la chispa y gestionan dispositivos eléctricos del motor. Las bobinas de encendido son activadas por la ECM según el ángulo de avance sincronizado con los sensores CKP y CMP [32]. Los relés y solenoides controlan cargas como la bomba de

combustible o los ventiladores del radiador mediante etapas conmutadas electrónicamente [31].

- **Actuadores supervisados por la ECM (interacción con otros módulos):** Comprenden elementos cuya operación se monitorea de forma continua. La bomba de combustible eléctrica es regulada por la ECM variando el voltaje según la demanda [37][38], mientras que la válvula de purga del canister, controlada por PWM, permite el paso de vapores del sistema EVAP y su funcionamiento se verifica mediante el sensor FTPS, que mide la presión del tanque para detectar fugas [38].

Tabla 22

Fallas internas comunes: tipos, causas y consecuencia

Etapa	Tipo de falla	Causa o descripción	Consecuencias principales
Entrada	Degradación de resistencias o filtros RC	Afecta sensores TPS y MAP, generando señales inestables	Mezcla aire-combustible incorrecta, fallos de encendido
	Corrosión o humedad en conectores	Alteran impedancia en sensores ECT/IAT o MAF	Señales erráticas, fallas intermitentes
	Interferencia electromagnética (EMI)	Induce pulsos falsos en CKP y CMP	Pérdida de chispa o desfase de inyección
Procesamiento	Desgaste o contaminación	Genera resistencias parásitas o desconexiones	Fallas de lectura y comunicación con ECU
	Sobretensión o picos de corriente	Alternador o baterías defectuosas	Daño en reguladores internos o capacitores
	Daño térmico o vibracional	Microfisuras en PCB o soldaduras BGA	Interrupción intermitente o total del circuito
	Corrupción de memoria EEPROM/Flash	Fluctuaciones de voltaje o errores en actualización	Pérdida de calibraciones y datos de control

Etapa	Tipo de falla	Causa o descripción	Consecuencias principales
	Error de software o firmware	Actualización incompleta o incompatibilidad	Códigos DTC falsos o pérdida de comunicación
	Falla en MOSFET o IGBT	Cortes o activación parcial en salidas de potencia	Ausencia de chispa o mezcla incorrecta
Salida	Desgaste o corrosión en pistas	Pérdida de continuidad en canales de alta corriente	Activación irregular de actuadores
	Falla del control PWM	Activación continua de bobinas o válvulas	Sobrecalentamiento y daño de componentes
Comunicación y red	Falla en transeptores o resistencias de terminación	Pérdida de sincronía en la red de datos	ECU entra en modo seguro
	Conectores sucios o flojos	Desconexión parcial de pines	Fallas intermitentes de comunicación

Apéndice D.4

Descripción detallada de fallas internas en la ECU

En este apéndice se amplía la información del apartado 1.5.5, presentando las fallas internas más relevantes en cada etapa del circuito de la ECU, sus causas y las consecuencias generadas sobre el funcionamiento del motor.

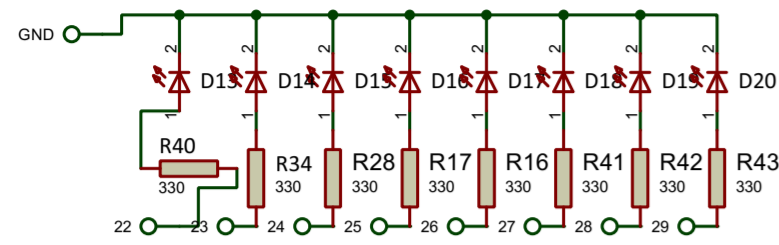
Nota: Elaboración con base a [13], [31], [32], [38], [50], [52], [53], [54], [55]

Apéndice E

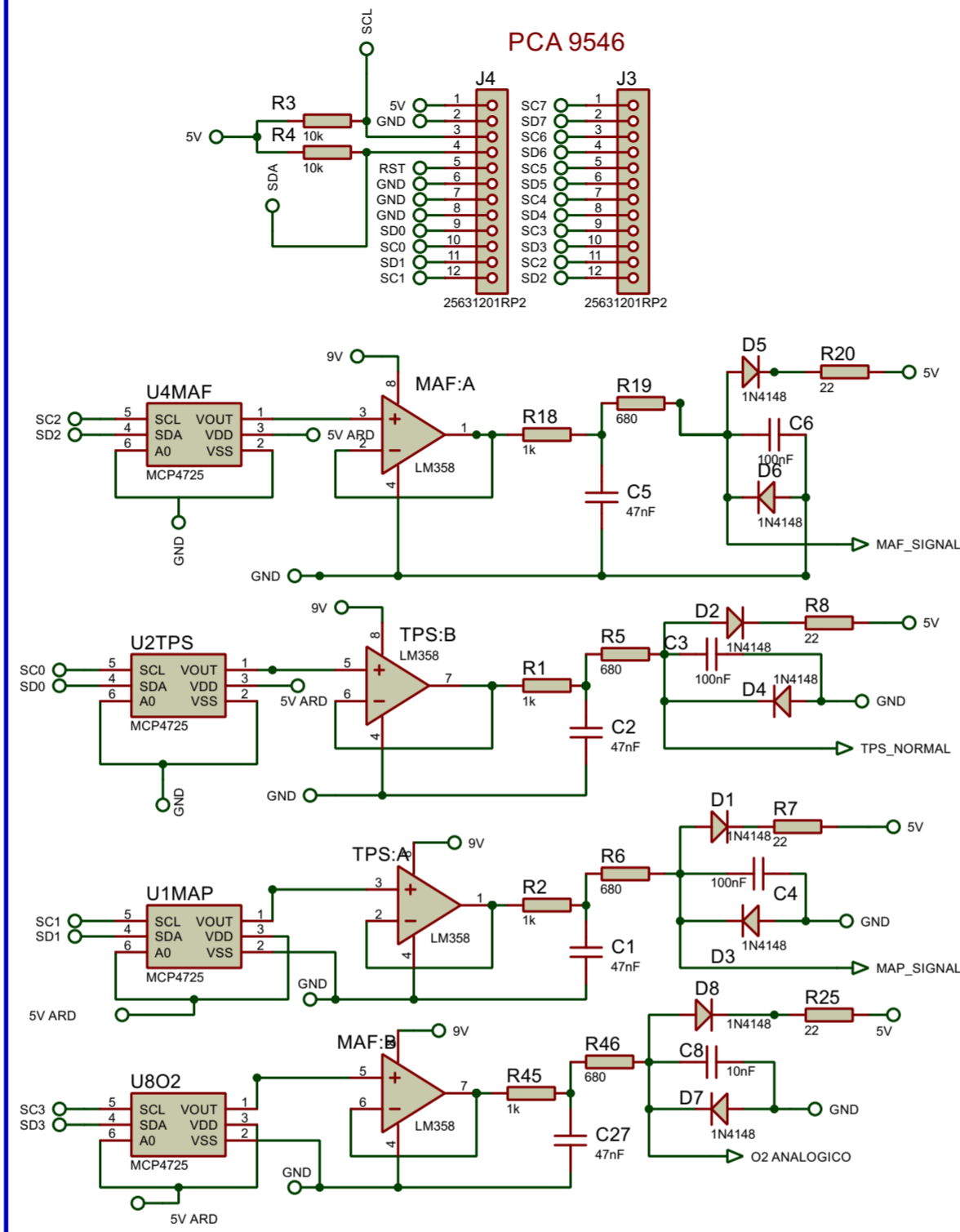
En esta sección se presentan los circuitos electrónicos desarrollados en el software Proteus, los diseños mecánicos realizados en Inventor, y así como la implementación de la programación del sistema.

Planos Electrónico

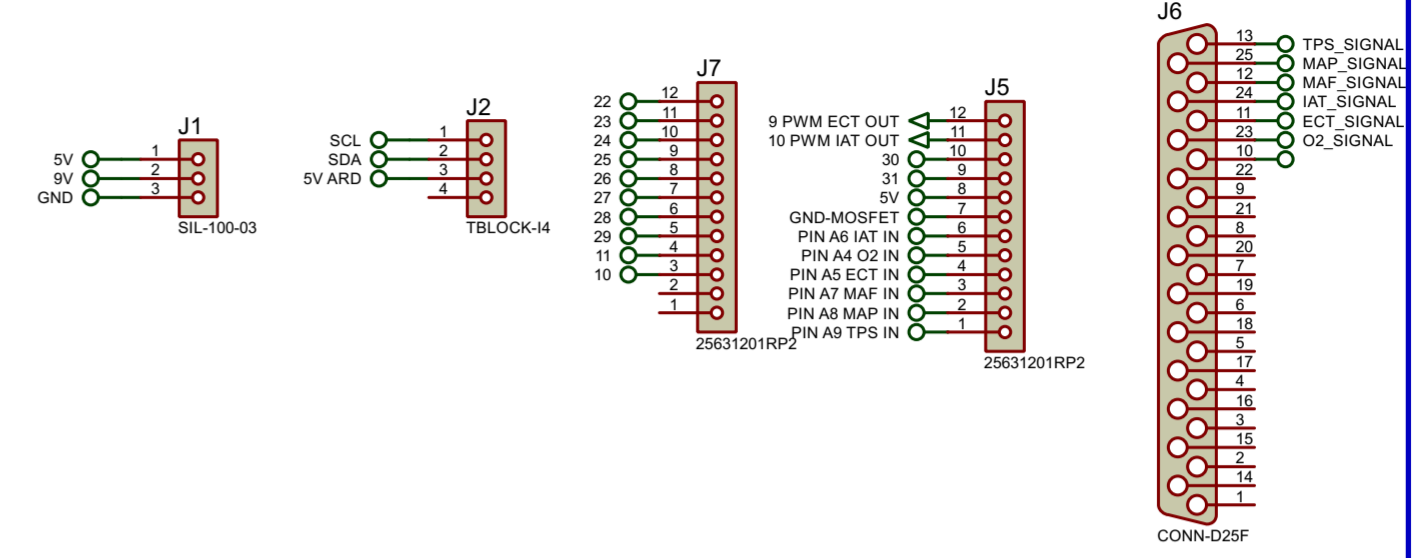
Visualización de Estados



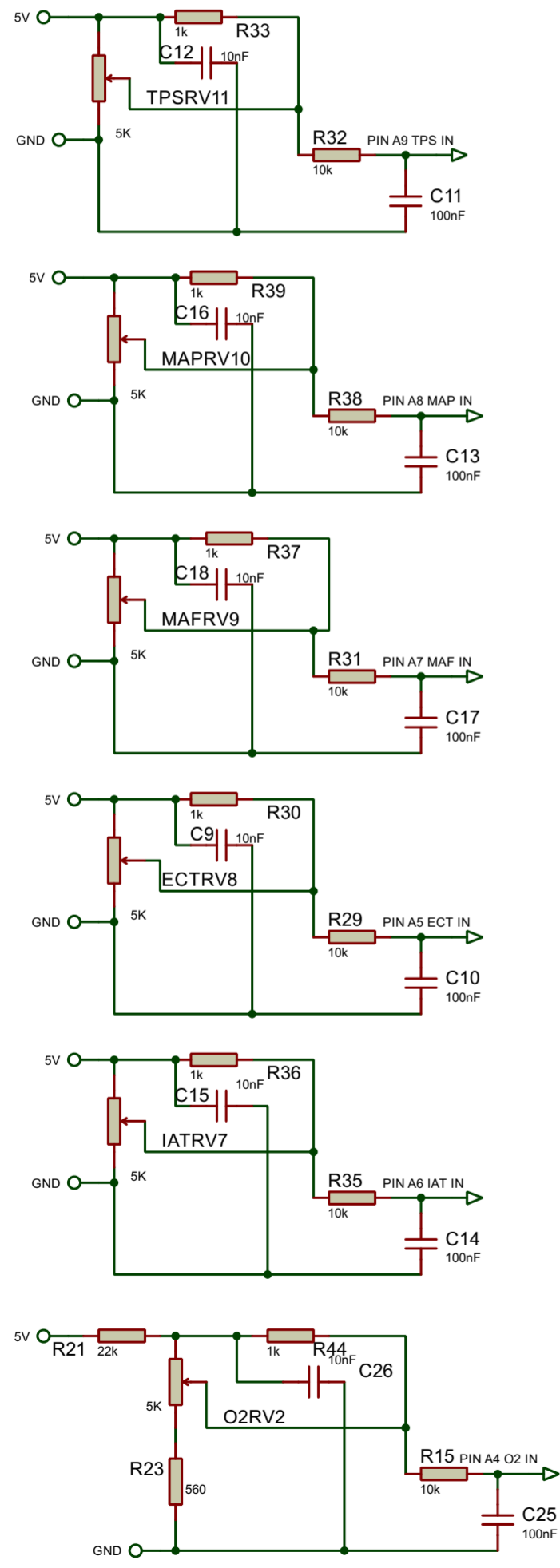
Bloque de salida de señales digitales



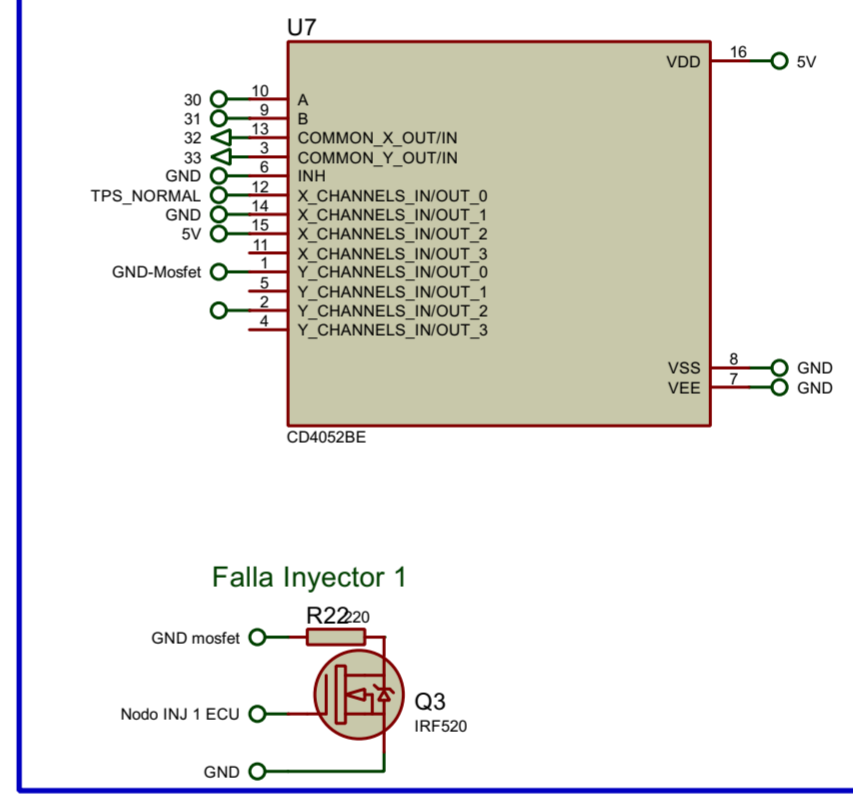
Bloque Distribución de Señales y Alimentación



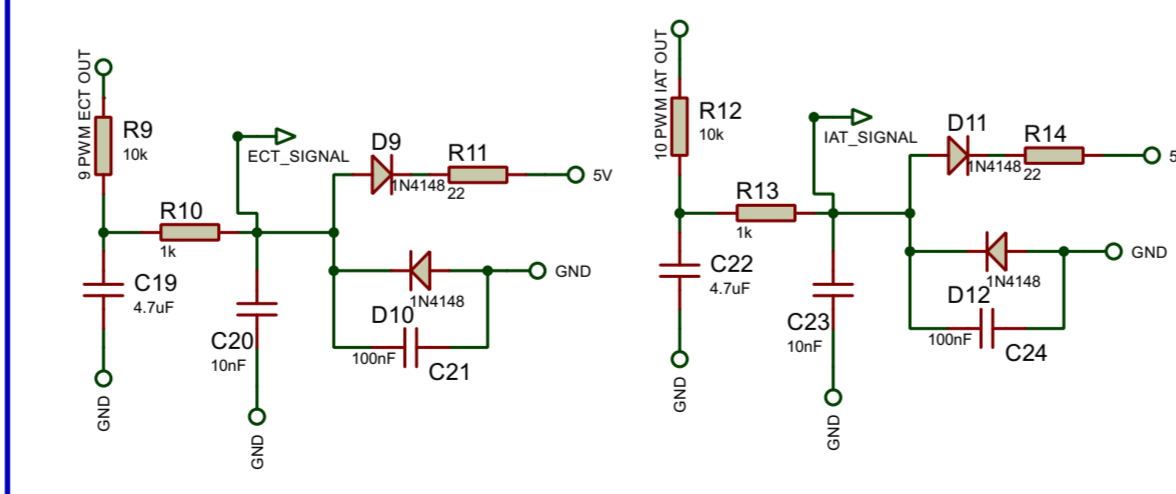
Bloque de Generación de Señales Analógicas



Bloque de Selección de Falla

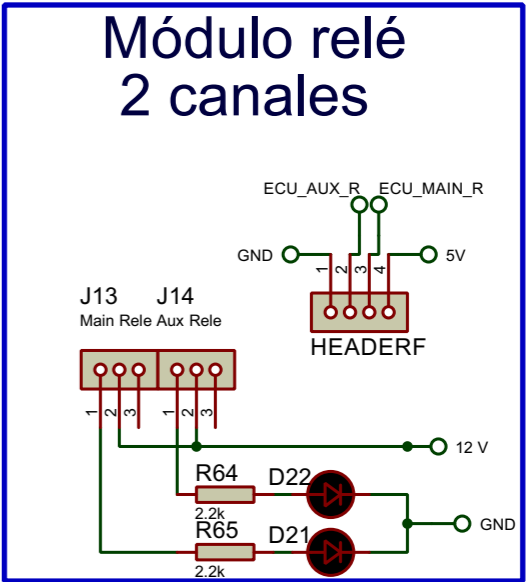
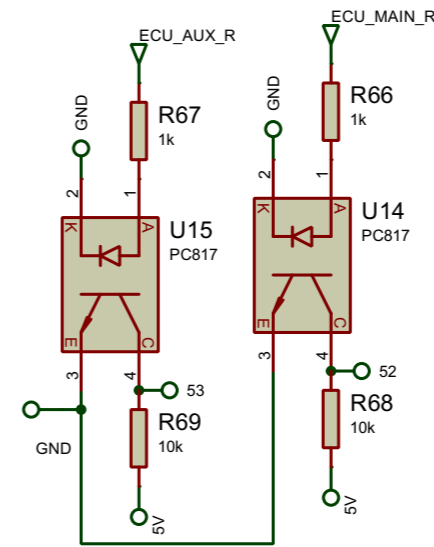
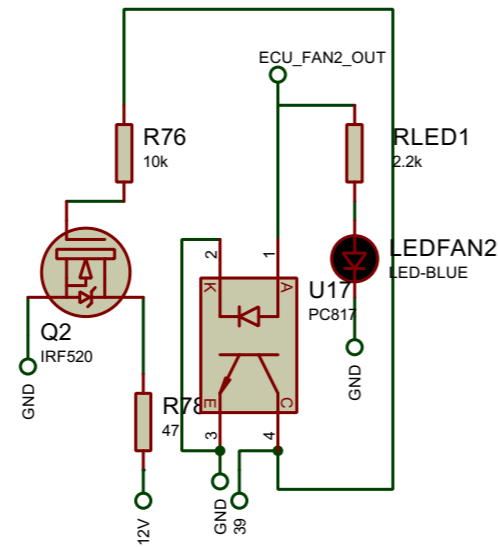
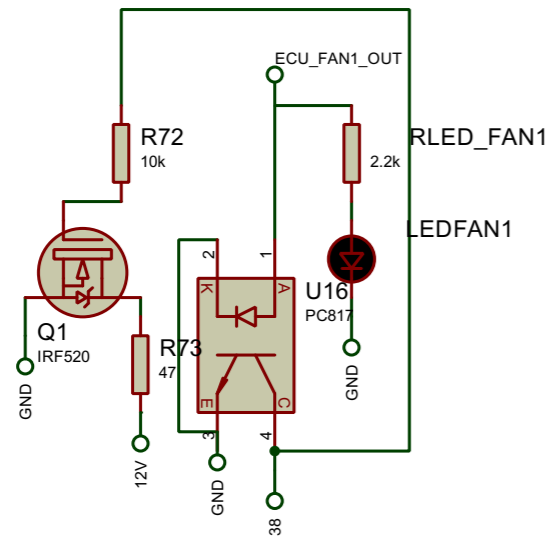
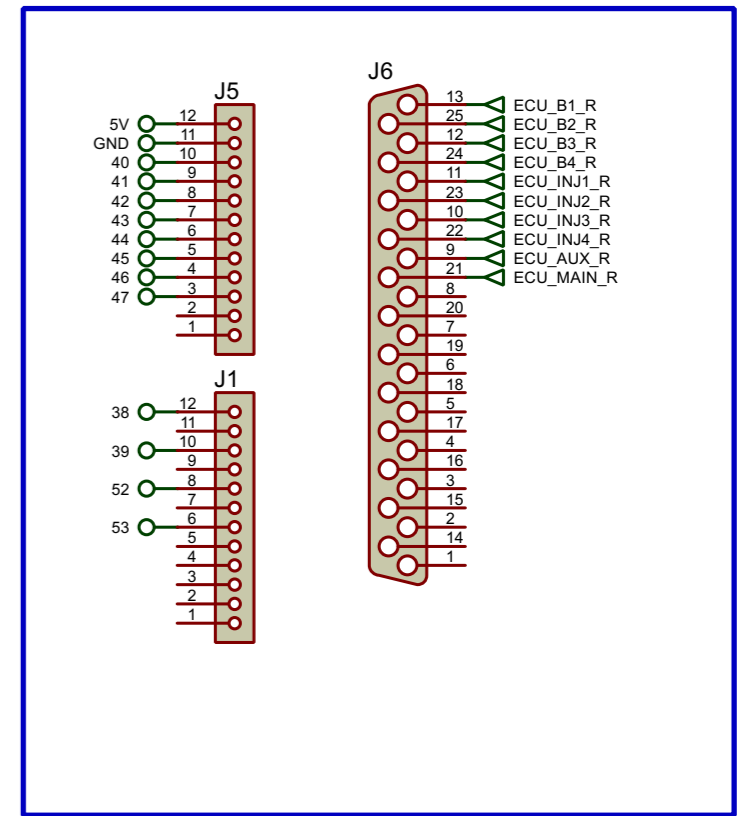
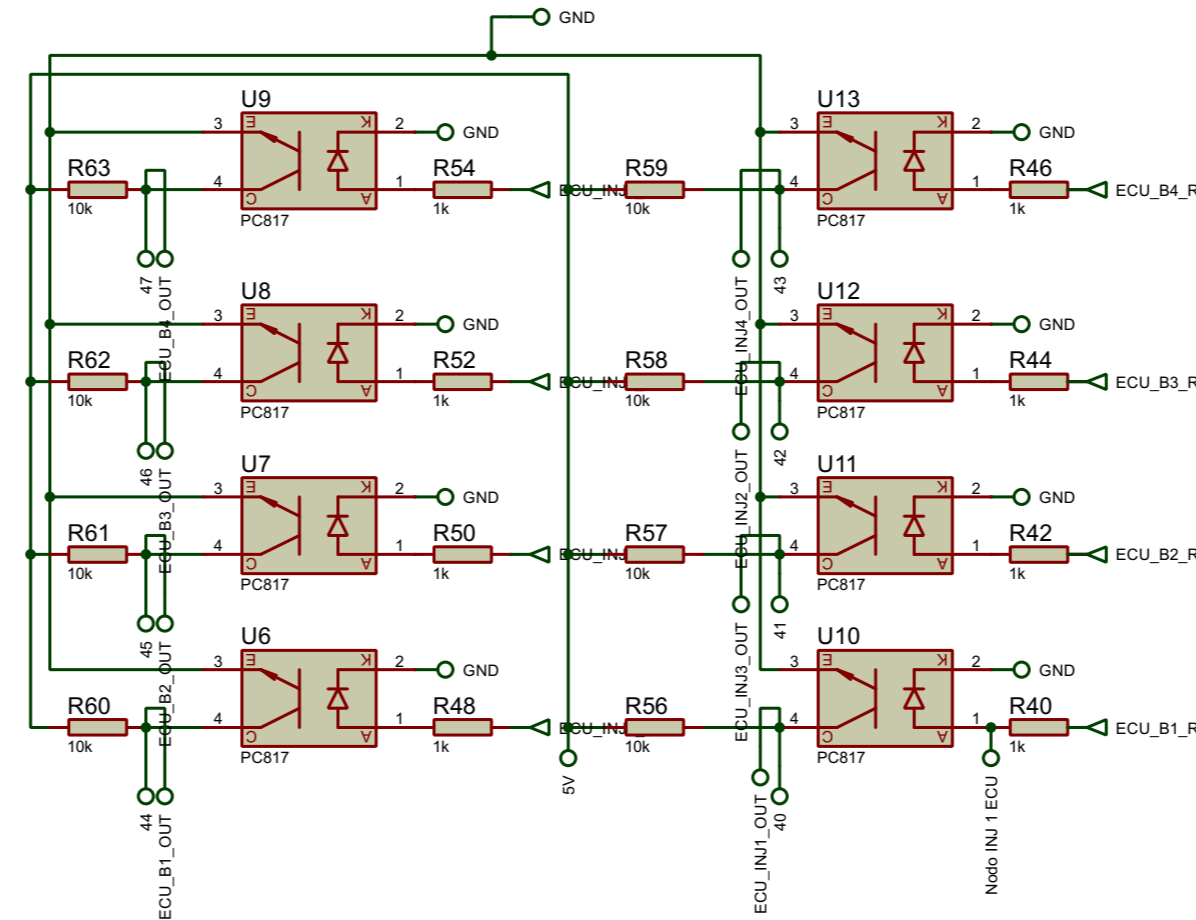
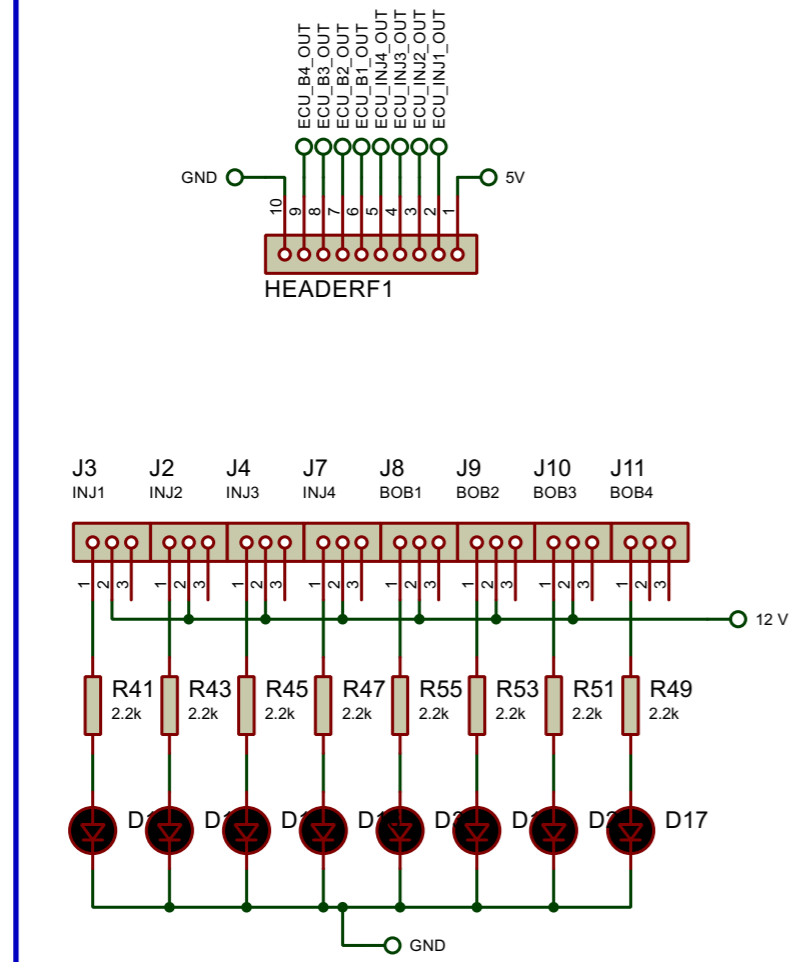


Bloque de Acondicionamiento de Señales PWM y Protección

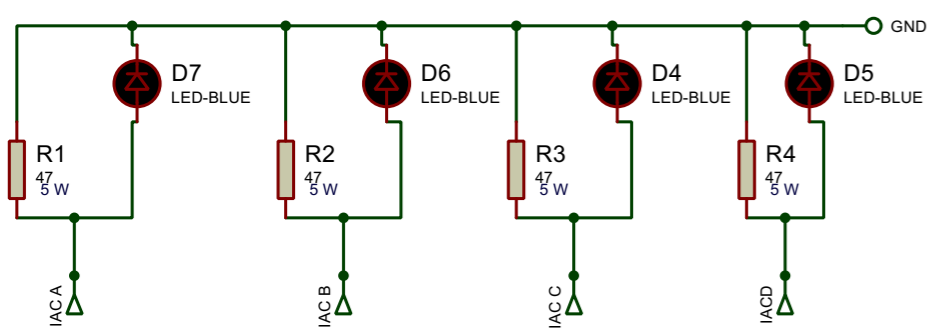


	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politecnica del litoral	
Dibujado	10/12/2025	Chávez Lucio Rocío		Número	Part 1
Comprobado		Pacheco Merino Jennifer		Sustituye a	N/A
Escala	Circuito de simulación de sensores			Sustituido por	N/A
A3					

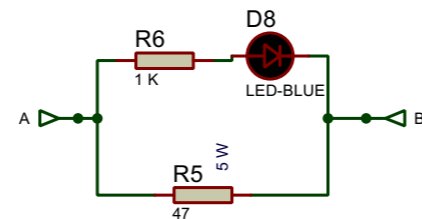
Módulo relé 8 canales



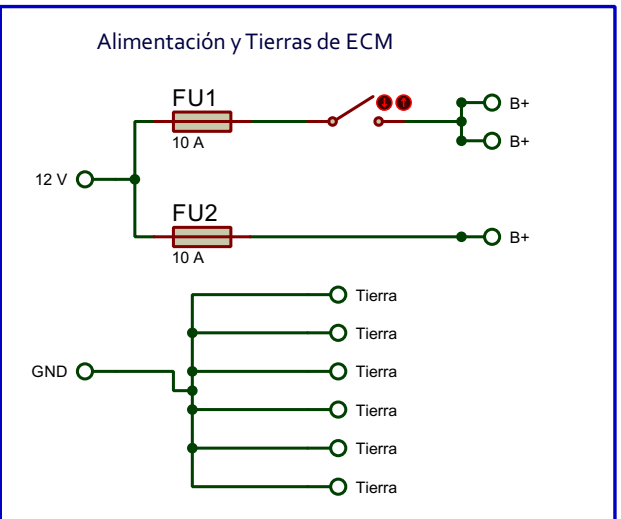
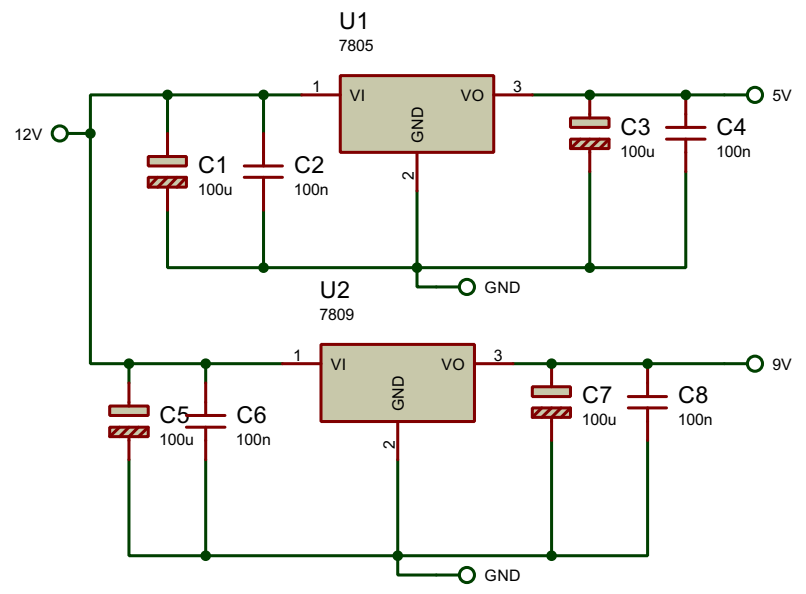
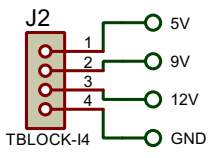
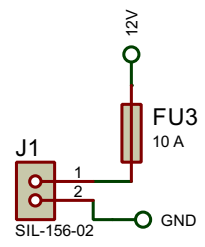
BLOQUE IAC



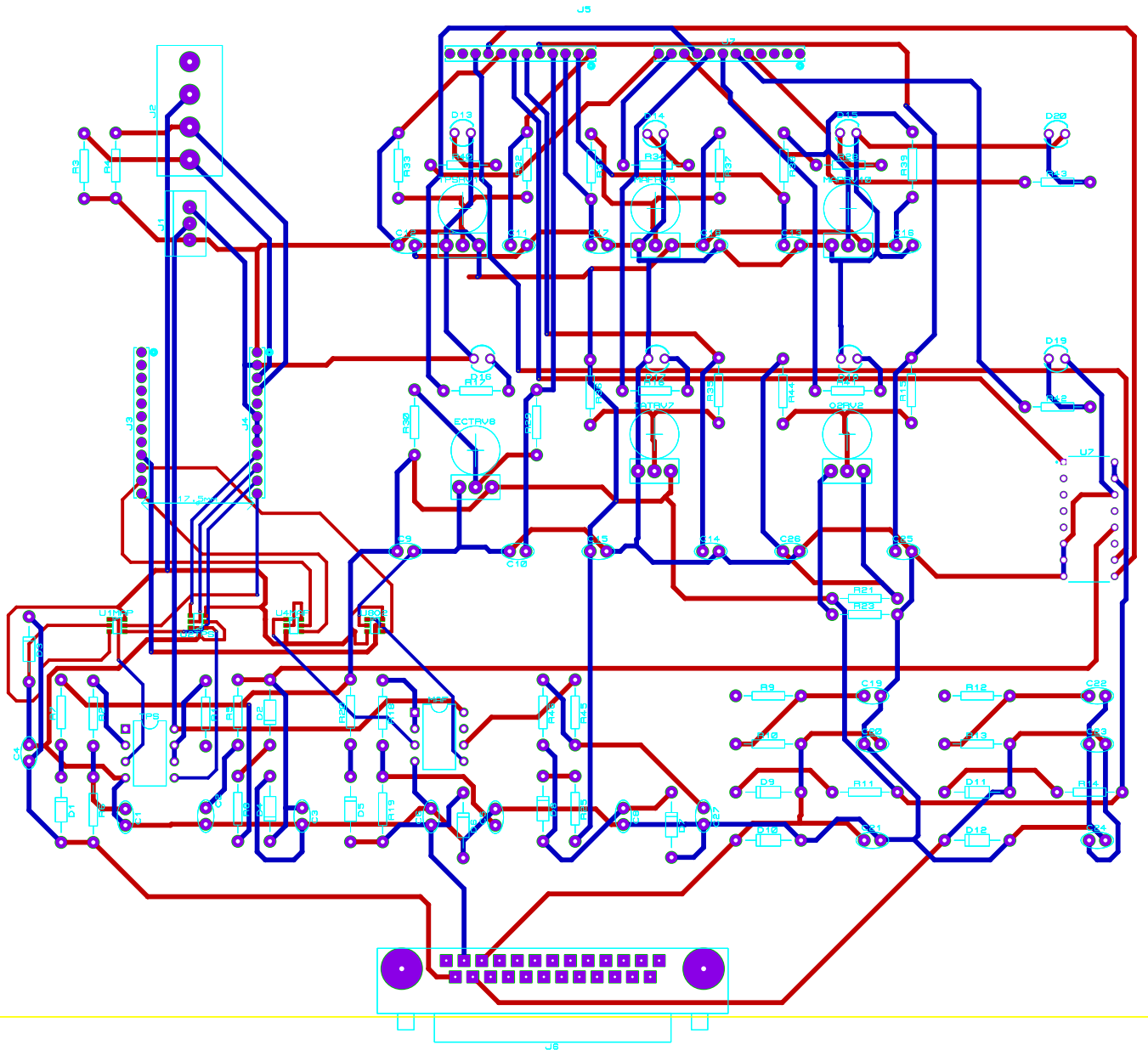
BLOQUE DRIVE BY WIRE



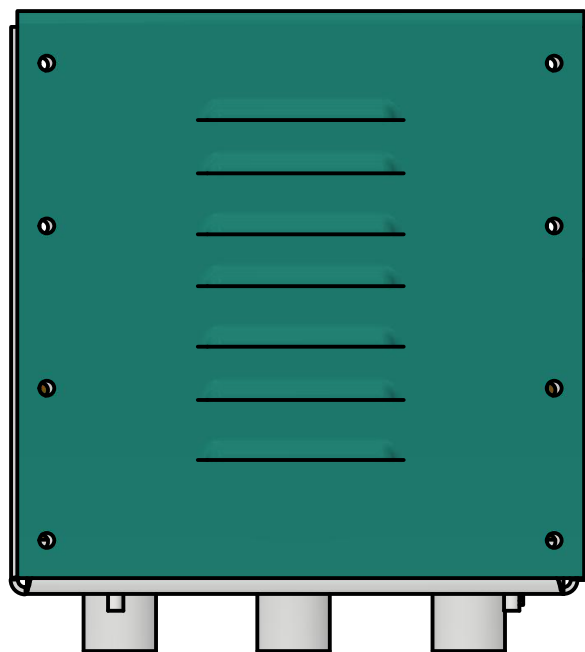
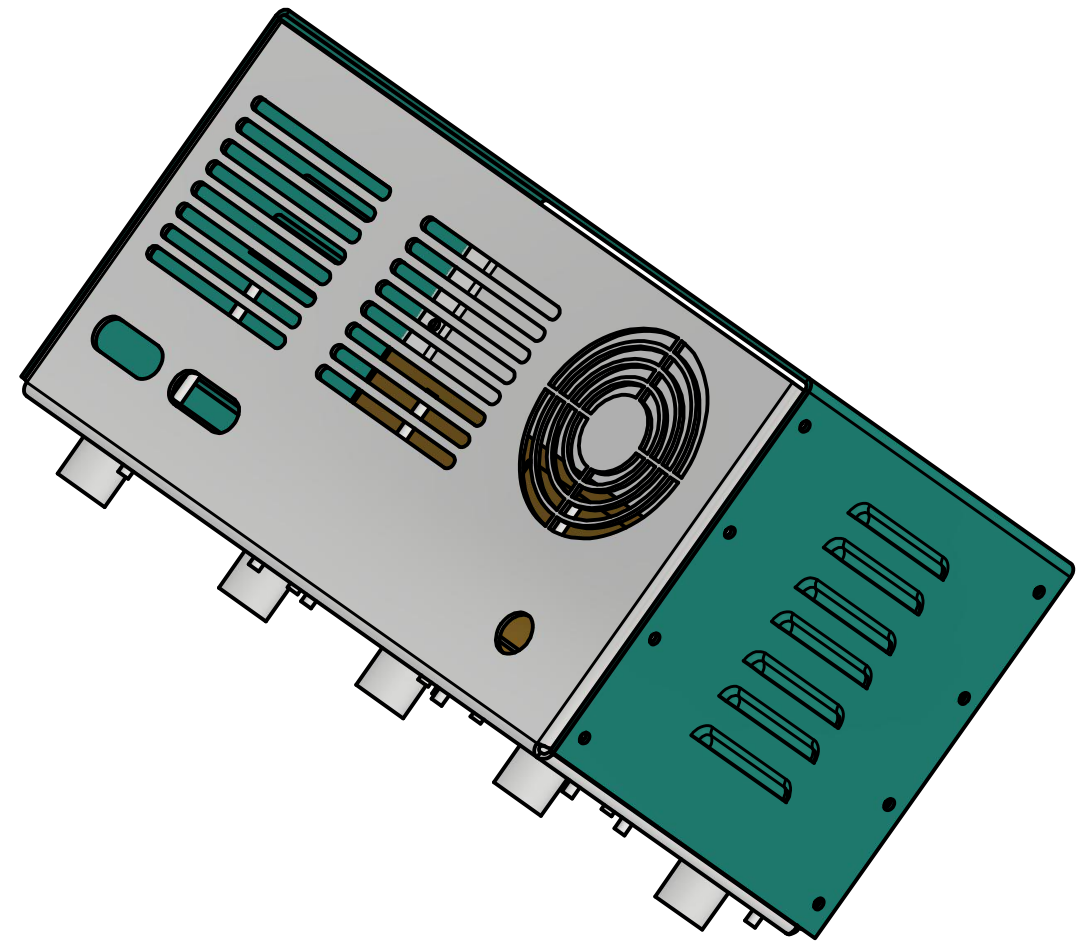
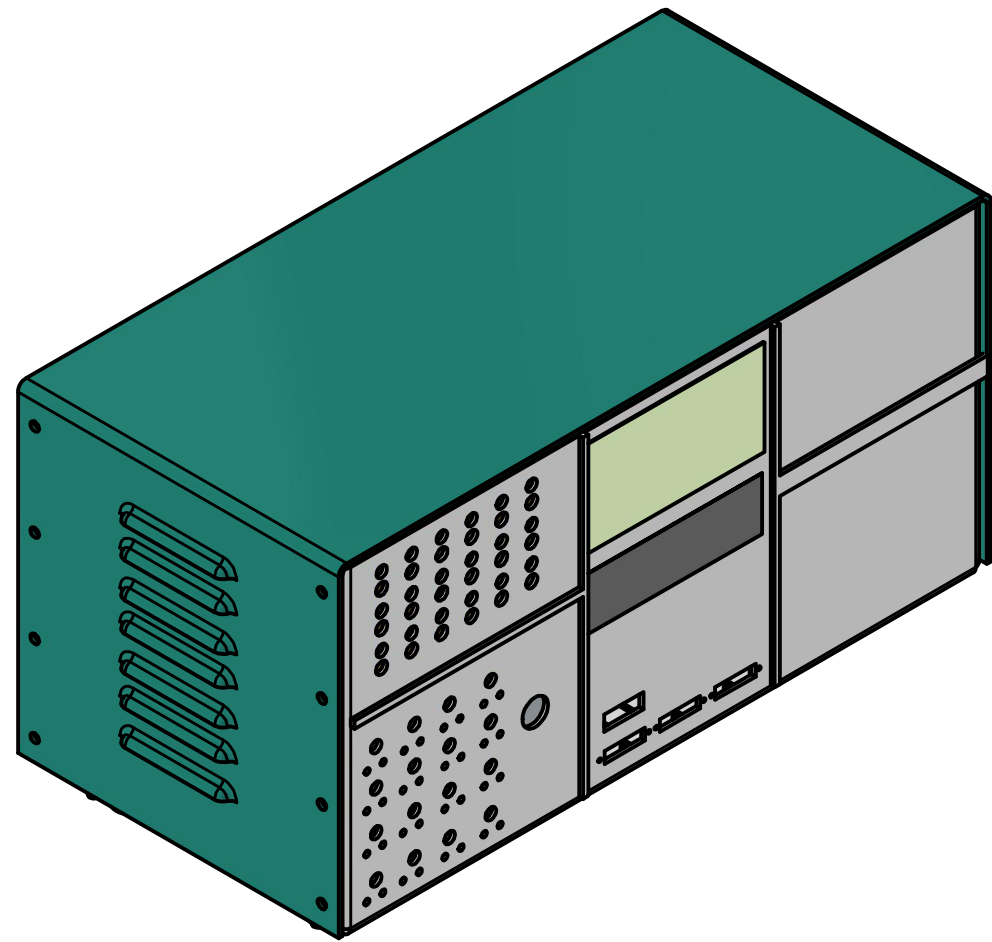
	Fecha	Nombre	Firmas		
Dibujado	10/12/2025	Chávez Lucio Rocío		Escuela Superior Politecnica del litoral	
Comprobado		Pacheco Merino Jenniffer			
Escala	Circuito de simulación de carga			Número	Part 1
A3				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



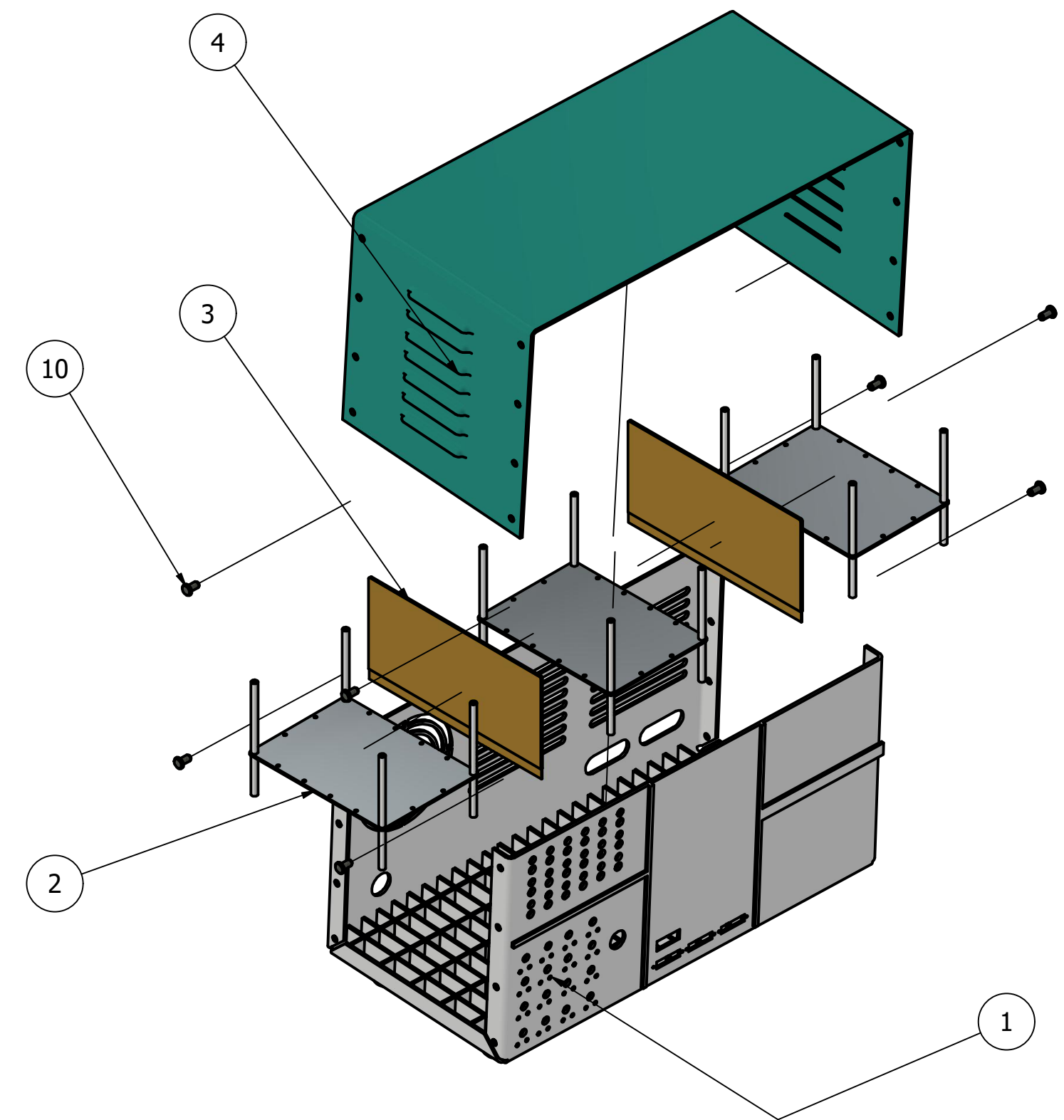
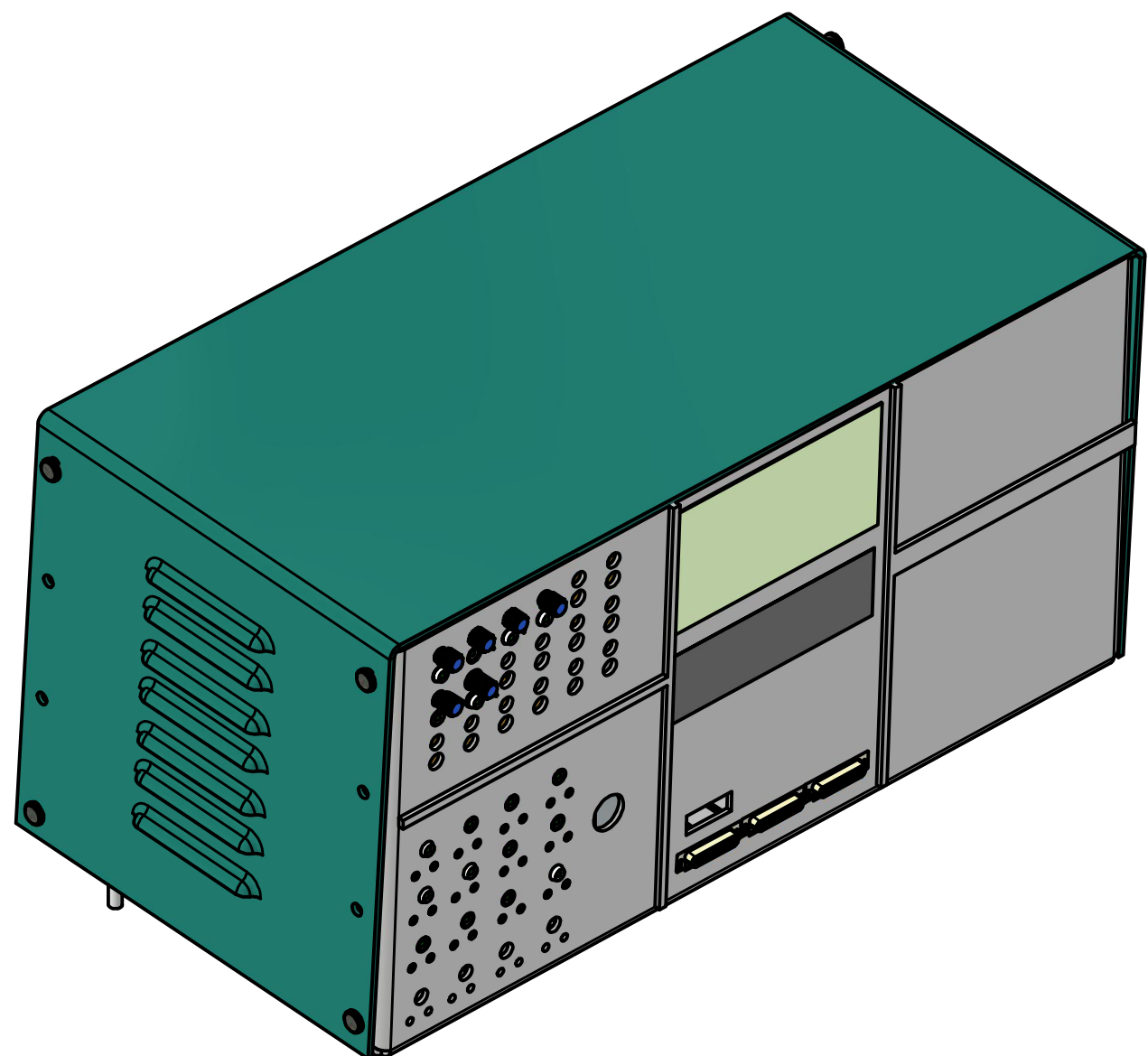
	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politecnica del litoral	
Dibujado	10/12/2025	Chávez Lucio Rocío			
Comprobado		Pacheco Merino Jennifer			
Escala	Circuito regulador de voltaje			Número	Part 1
A4				Sustituye a	N/A
		Sustituido por	N/A		



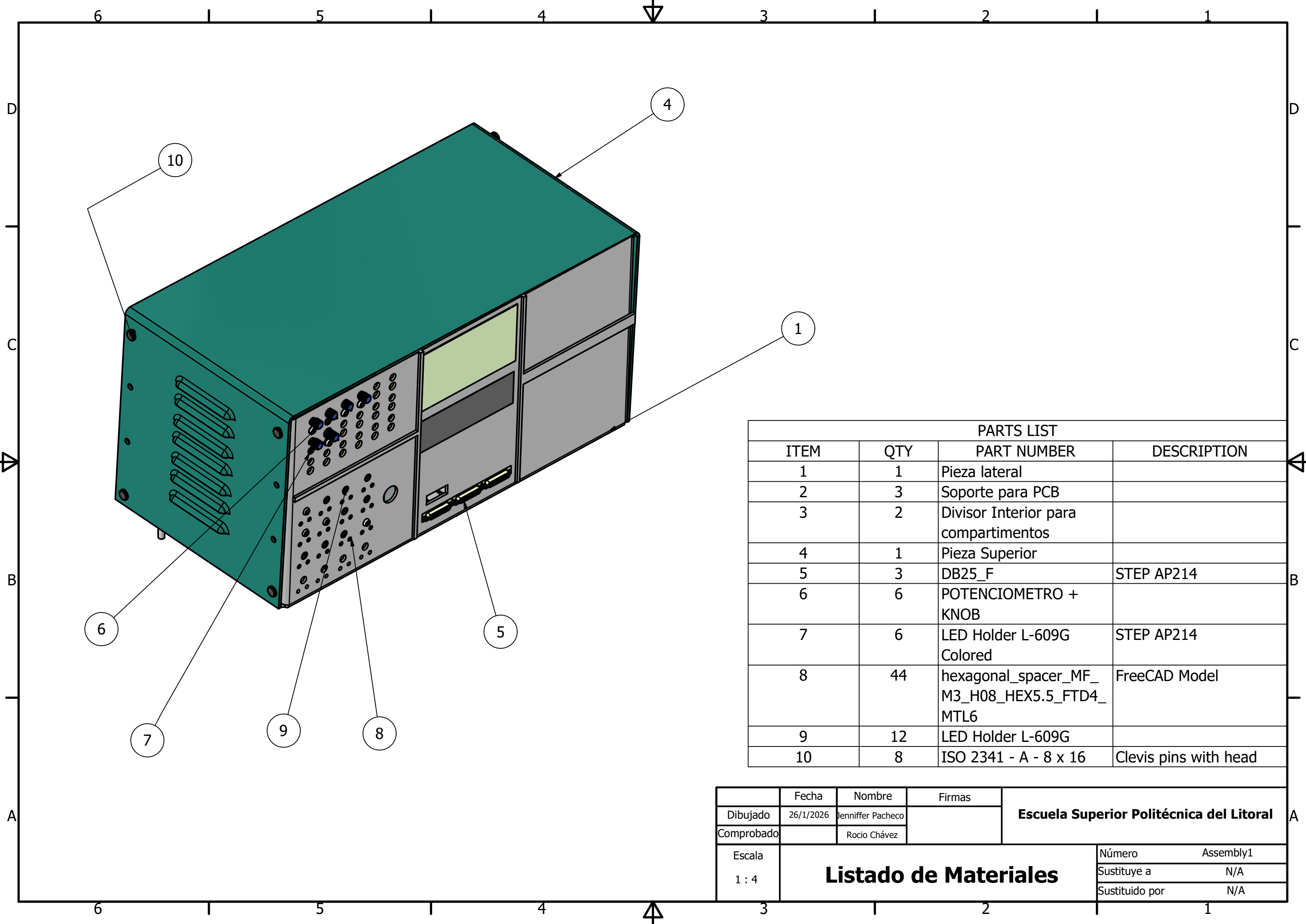
Planos mecánicos



	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	26/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Banco de Pruebas Automotriz			Número	Assembly1
1 : 5				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A

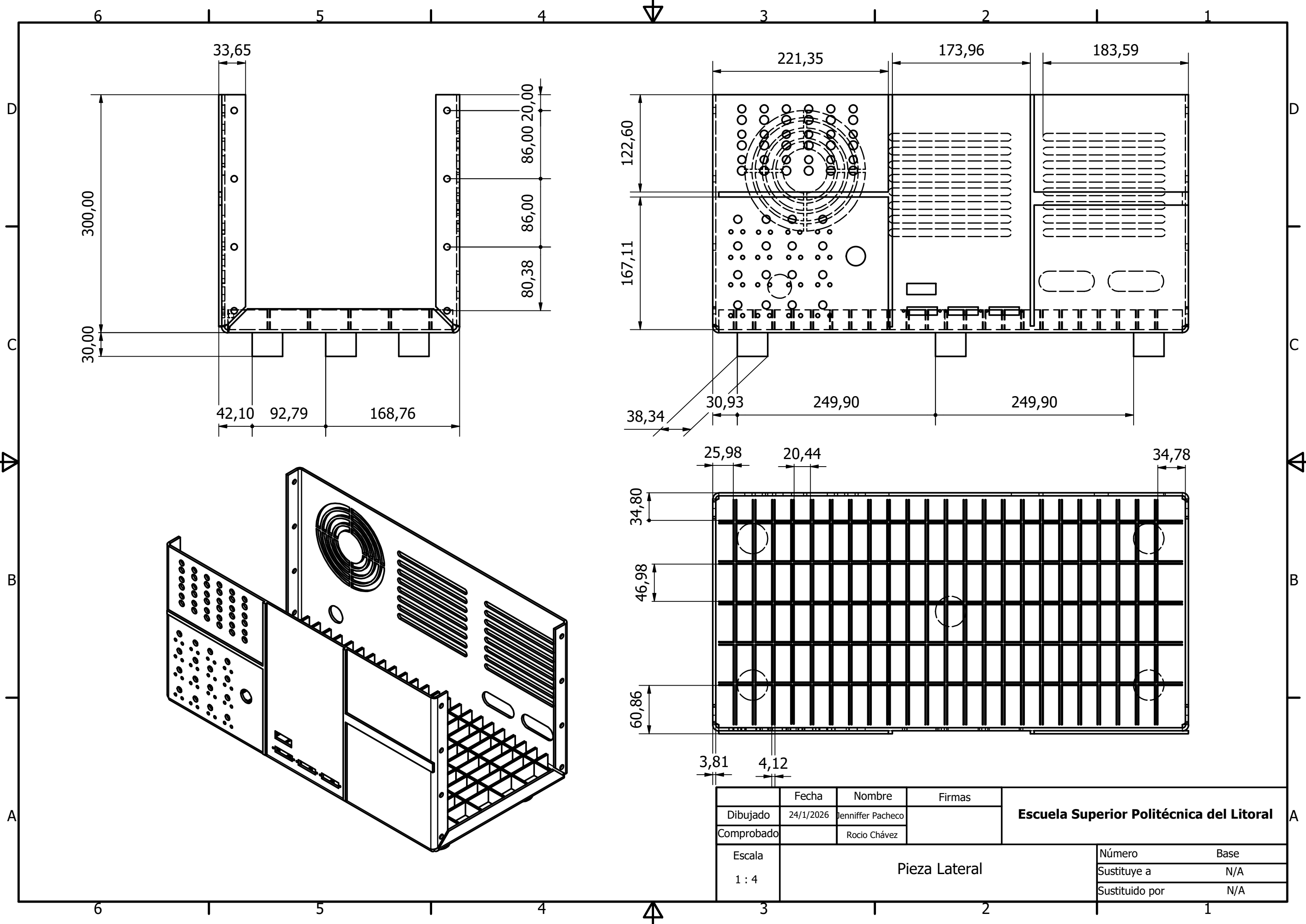


	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	26/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Explotado General			Número	Assembly1
0,16 : 1				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A

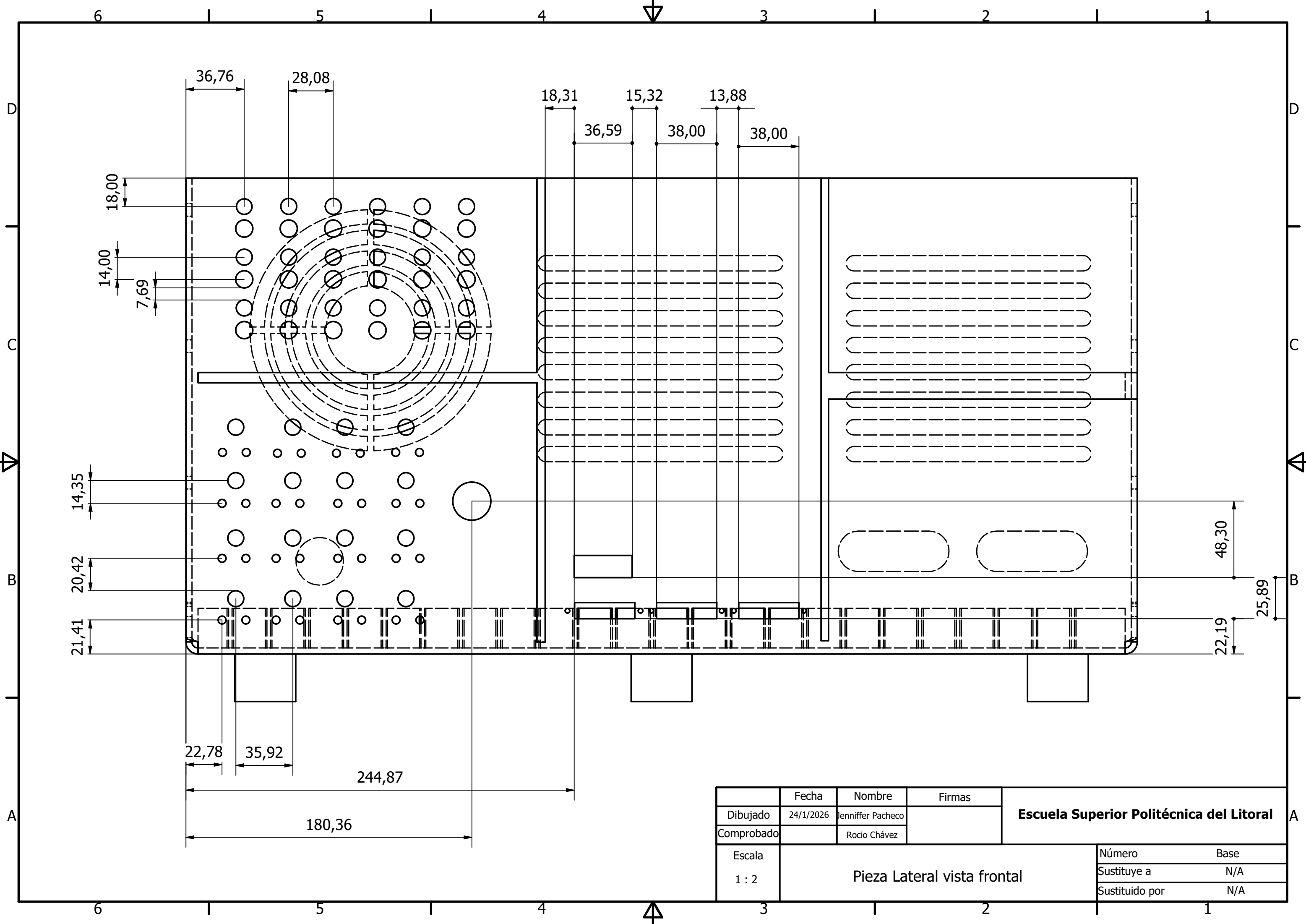


PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	Pieza lateral	
2	3	Soporte para PCB	
3	2	Divisor Interior para compartimentos	
4	1	Pieza Superior	
5	3	DB25_F	STEP AP214
6	6	POTENCIOMETRO + KNOB	
7	6	LED Holder L-609G Colored	STEP AP214
8	44	hexagonal_spacer_MF_M3_H08_HEX5.5_FTD4_MTL6	FreeCAD Model
9	12	LED Holder L-609G	
10	8	ISO 2341 - A - 8 x 16	Clevis pins with head

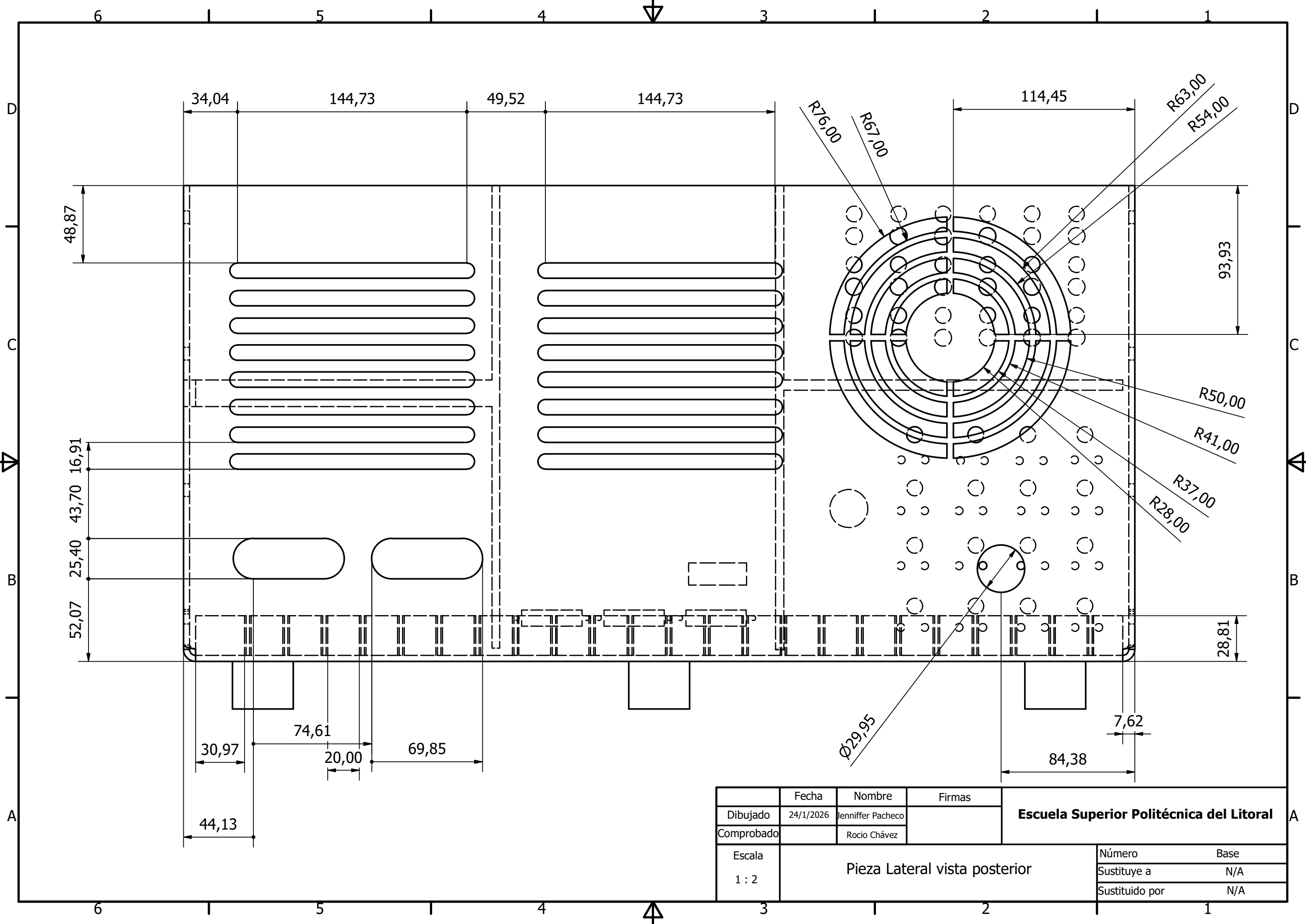
	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	26/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Listado de Materiales			Número	Assembly1
1 : 4				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



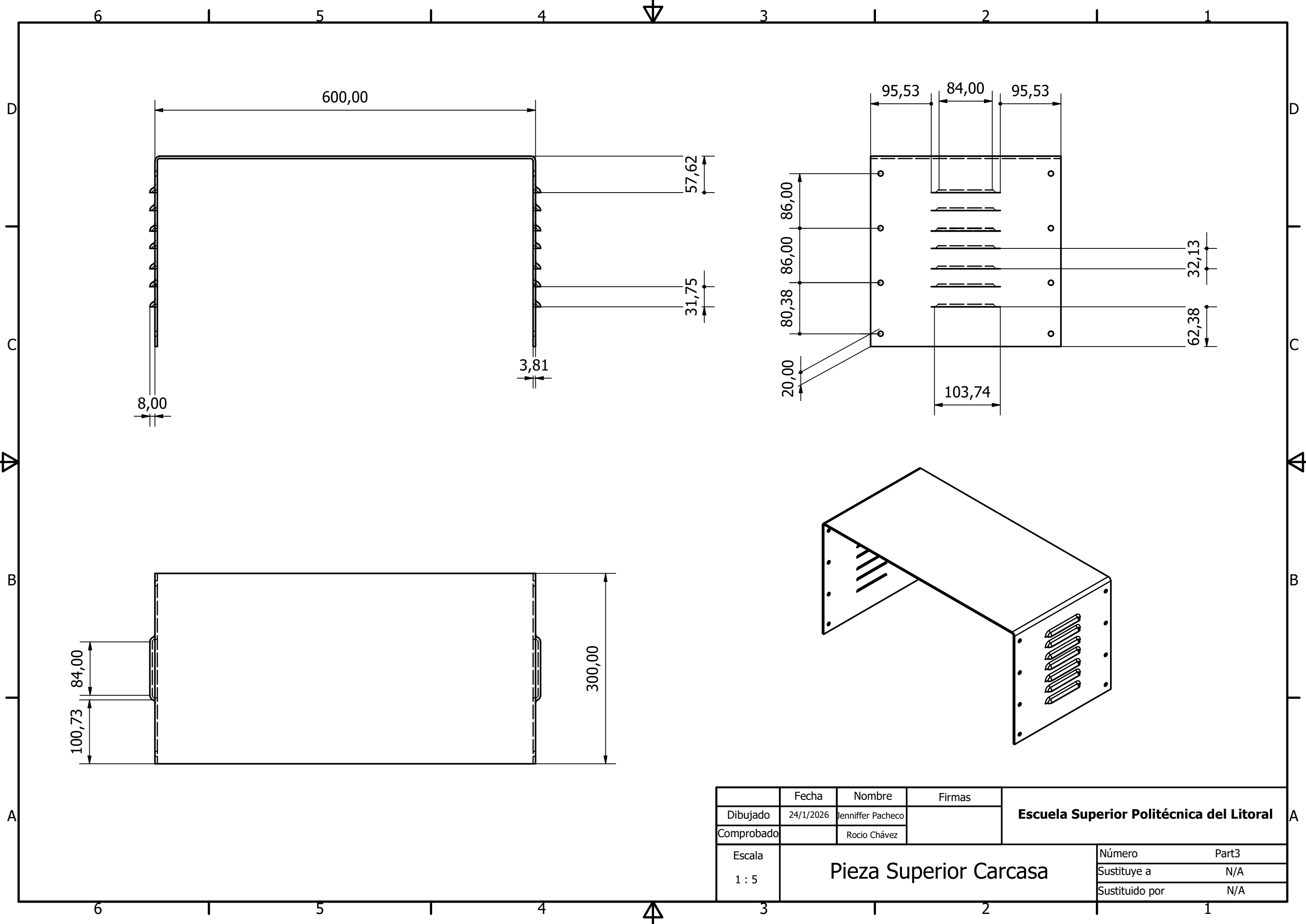
	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	24/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Pieza Lateral			Número	Base
1 : 4				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



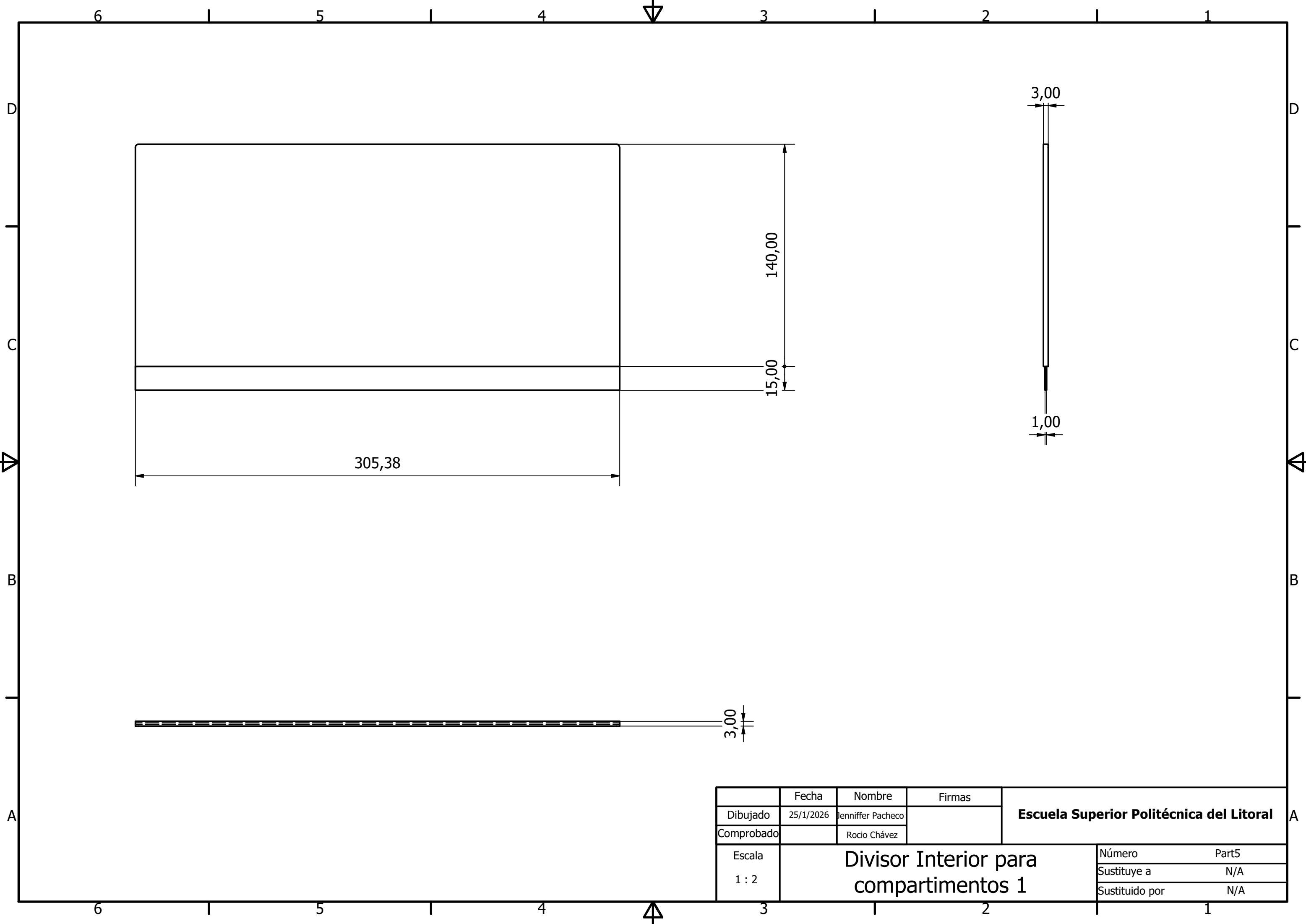
	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral
Dibujado	24/1/2026	Jennifer Pacheco		
Comprobado		Rocio Chávez		
Escala	Pieza Lateral vista frontal			Número
1 : 2				Base
				Sustituye a
				Sustituido por
				N/A
				N/A



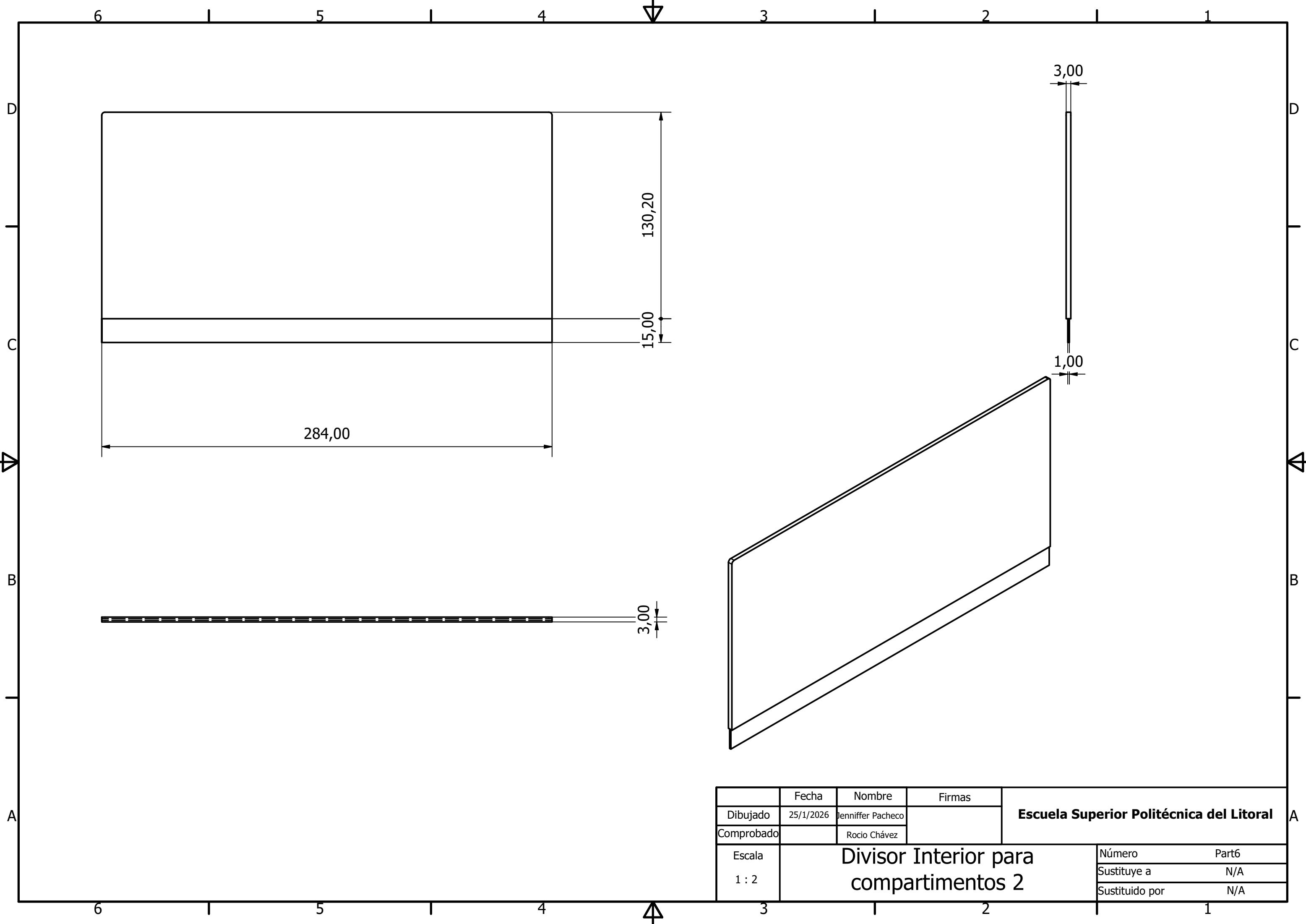
	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	24/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Pieza Lateral vista posterior			Número	Base
1 : 2				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



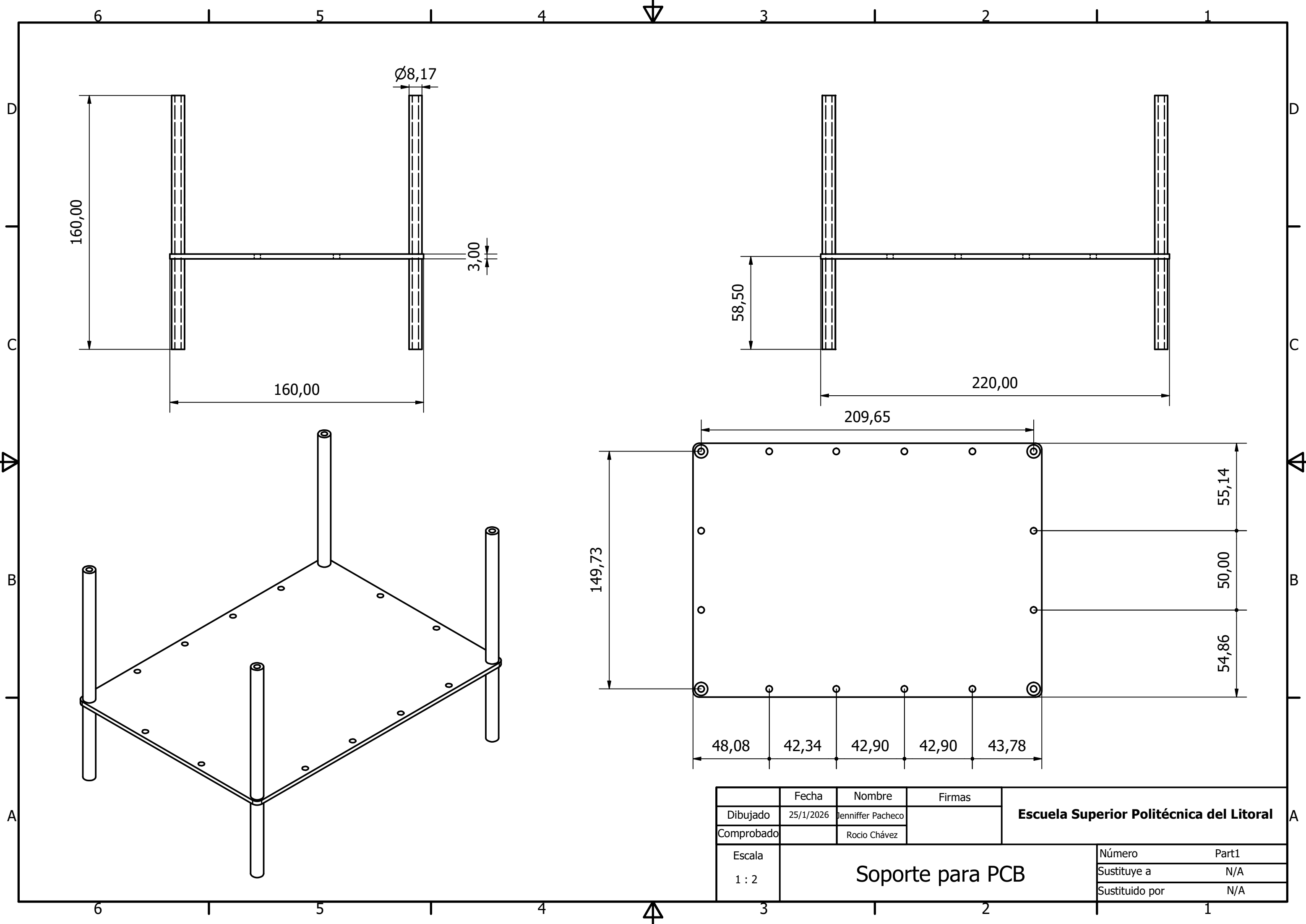
	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	24/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Pieza Superior Carcasa			Número	Part3
1 : 5				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	25/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Divisor Interior para compartimentos 1			Número	Part5
1 : 2				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	25/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Divisor Interior para compartimentos 2			Número	Part6
1 : 2				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A



	Fecha	Nombre	Firmas	Escuela Superior Politécnica del Litoral	
Dibujado	25/1/2026	Jennifer Pacheco			
Comprobado		Rocio Chávez			
Escala	Soporte para PCB			Número	Part1
1 : 2				Sustituye a	N/A
				Sustituido por	N/A

Diseño de Interfaz y programación

Los archivos son pesados por lo cual se subió en dos ramas, en la primera rama se visualiza el archivo main.py y el programa cargado al microcontrolador Atmega2560. En la rama Maestro se encuentra el zip de la interfaz diseñada.

<https://github.com/jdpachec/Banco-de-pruebas-Diagnostico-ECU/>