



ING. AUTOMOTRIZ

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

**Simulación funcional y visualización de señales de control secuencial trapezoidal a una caja de
dirección EPS en banco de pruebas bajo condiciones estáticas y dinámicas.**

AUTORES:

Irvin Luciano Herrera Mejía.

Carlos Geovanny Cuji Cachupud.

TUTOR:

MSc. Denny Javier Guanuche Larco Ph.D.

QUITO-ECUADOR | 2026

Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Yo Denny Javier Guanuche Larco, en calidad de tutor del Trabajo de Integración Curricular denominado SIMULACIÓN FUNCIONAL Y VISUALIZACIÓN DE SEÑALES DE CONTROL SECUENCIAL TRAPEZOIDAL A UNA CAJA DE DIRECCIÓN EPS EN BANCO DE PRUEBAS BAJO CONDICIONES ESTÁTICAS Y DINÁMICAS

realizado por Irvin Luciano Herrera Mejia y Carlos Geovanny Cuji Cachupud , ha sido orientado y revisado en todas sus partes y considero que cumple los requisitos establecidos por la institución. En virtud de ello doy mi aprobación a fin de continuar con el proceso académico correspondiente.



MSc. Denny Guanuche Ph.D.

Tutor del Trabajo de Integración Curricular

Declaración de autoría y cesión de derechos

Yo, Irvin Luciano Herrera Mejía y Carlos Geovanny Cuji Cachupud declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo mis derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, Reglamento y Leyes.



Autor: Irvin Luciano Herrera Mejía

C.I.:1717789232



Autor: Carlos Geovanny Cuji Cachupud

C.I.:1726328600

Dedicatoria

A Dios, por guiar mis pasos con sabiduría, fortaleza y propósito en cada etapa de este camino.

A mis padres, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y por sembrar en mí el valor del esfuerzo, la honestidad y la educación.

A mi esposa e hijos, por ser mi refugio, mi motivación diaria y el corazón de cada decisión que tomé para no rendirme.

Al MSc. Denny Guanuche Ph.D. por su orientación rigurosa, compromiso académico y fe en este proyecto, sin cuyo apoyo este logro no habría sido posible.

Este título es tan suyo como mío.

Irvin Luciano Herrera Mejia

Dedicatoria

Dedico este trabajo con profundo agradecimiento a Dios, por ser mi guía constante y fuente de fortaleza en cada etapa de este proceso.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo y paciencia, pilares fundamentales en mi desarrollo personal y académico.

A mis docentes y mentores, quienes con su conocimiento y orientación contribuyeron significativamente a la culminación de este proyecto.

A todos los que creyeron en mí, esta meta también es suya.

Carlos Geovanny Cuji Cachupud

Agradecimiento

A Dios Todopoderoso, por ser mi guía, mi fortaleza y mi luz en cada paso de este camino. Por darme salud, sabiduría, paciencia y la perseverancia necesaria para no rendirme, incluso en los momentos más desafiantes.

A mis queridos padres, por su amor incondicional, sus sacrificios silenciosos y su fe constante en mí. Ustedes sembraron en mí el valor del esfuerzo, la honestidad y la educación como legado. Este logro es también suyo.

A mi amada esposa, por su paciencia infinita, su apoyo inquebrantable y por creer en mí incluso cuando yo dudaba. Gracias por cargar conmigo las cargas del hogar mientras yo perseguía este sueño.

A mis hijos, por ser mi mayor motivación. Cada noche de estudio, cada fin de semana perdido, fue por ustedes: para darles un ejemplo de lucha, disciplina y superación. Espero que este título sea una semilla de inspiración en sus propias vidas.

Al MSc. Denny Guanuche Ph.D. por su invaluable orientación, rigor académico y compromiso constante con esta investigación. Su conocimiento, consejos oportunos y exigencia técnica elevaron significativamente la calidad de este trabajo. Gracias por creer en este proyecto y por guiarme con sabiduría y dedicación hasta su culminación.

Irvin Luciano Herrera Mejia

Agradecimiento

Expreso mi sincero agradecimiento a la Universidad Internacional del Ecuador por el respaldo académico brindado durante este proceso. A mi tutor, MSc. Denny Guanuche Ph.D, por su valiosa orientación, exigencia académica y acompañamiento constante, que fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Agradezco también a las personas e instituciones que, directa o indirectamente, aportaron con sus conocimientos y apoyo técnico.

Finalmente, a mi familia, por su apoyo incondicional y por ser el pilar que me impulsó a culminar esta etapa con responsabilidad y perseverancia.

Carlos Geovanny Cuji Cachupud

Índice de contenido

Carátula	I
Aprobación del Tutor del Trabajo de Integración Curricular	III
Declaración de autoría y cesión de derechos.....	IV
Acuerdo de Confidencialidad	V
Dedicatoria.....	VII
Agradecimiento	VIII
Índice de contenido	X
Índice Tablas	XIII
Índice figuras	XIV
Índice formulas.....	XV
Índice de anexos.....	XVI
Resumen	1
Abstract.....	2
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	3
1.1 Justificación.....	4
1.2 Objetivo General.....	5
1.3 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO	7
2.1 Evolución de los Sistemas de Dirección	8
2.2 Componentes y Arquitectura del EPS.....	9
2.3 Comparativa: EPS Vs. Hidráulico	9
2.4 Diagnóstico y Mantenimiento Predictivo en Sistemas EPS Moderno.	10
2.5 Normativa y Estándares de Seguridad en Sistemas de Dirección Electrónica	12
2.6 Bancos de Prueba y Metodologías Experimentales para Sistemas EPS	13
2.6.1 Principios de Operación del Motor BLDC en Sistemas EPS.....	15
2.6.2 Control Trapezoidal Secuencial en Motores BLDC.....	15
2.6.3 Tipos de Señales de Control en Motores BLDC: Comparación sinusoidal,	

Trapezoidal y FOC	17
2.6.4 Sensores Hall A3144: Detección de Posición en Sistemas EPS	19
2.6.5 Simulación de Velocidad Vehicular Mediante Potenciómetro	20
2.6.6 Estimación de Corriente y Temperatura	22
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	24
3.1 Tipo y Diseño de Investigación	24
3.2 Selección del Sistema Bajo Estudio.....	24
3.3 Simulación del Algoritmo de Control y Parámetros	25
3.3.1 Modelado de Velocidad Vehicular	25
3.3.2 Modelado de Torque Adaptativo	26
3.3.3 Algoritmo de Control Trapezoidal Secuencial	26
3.3.4 Validación del Modelo	27
3.4 Diseño y construcción del banco de pruebas.....	27
3.5 Dimensiones reales y distribución física	29
3.6 Verificación de cargas y capacidad estructural	31
3.7 Justificación de materiales, pernos y dimensiones	35
3.8 Configuración de montaje y estabilidad mecánica	36
3.9 Instrumentación y sistema de adquisición de datos	36
3.10 Variables de Investigación	38
3.11 Procedimiento experimental ensayos estáticos.....	39
3.12 Procedimiento experimental ensayos dinámicos	39
3.13 Análisis y Procesamiento de Datos.....	40
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
4.1 Caracterización Eléctrica Bajo Condiciones Estáticas y Dinámicas	42
4.2 Arquitectura del Sistema Embebido: Arduino Mega, Display LCD y Lógica de Control....	43
4.3 Patrones Eléctricos Identificados y Reproducibilidad	44
4.4 Validación de la Fiabilidad de los Datos mediante Normas de Referencia	45
4.5 Validación con Valores Teóricos y Especificaciones del Fabricante	47

4.6 Desarrollo del Sistema de Monitoreo en Tiempo Real	47
4.7 Aplicaciones Prácticas del Banco de Pruebas	49
4.8 Limitaciones del Estudio	49
4.9 Funcionamiento del Sistema de Visualización LCD en Todos los Modos	50
4.10 Simulación de Fallas Típicas en Sistemas EPS y su Diagnóstico Funcional.....	52
4.10.1 Fallo en Sensor Hall (Dirección no Responde).....	52
4.10.2 Potenciómetro Defectuoso (Asistencia Constante Sin Variación)	52
4.10.3 Sobrecalentamiento Simulado (Protección Térmica Activa).....	52
4.11 Análisis de Costo-beneficio del Banco de Pruebas Desarrollado	53
4.12 Protocolo de Diagnóstico Básico para Talleres Usando el Banco de Pruebas	53
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	55
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES	56
Referencias.....	57
Anexos.....	61

Índice Tablas

Tabla 1 Secuencia trabajo motor	16
Tabla 2 Comparativa de señales	18
Tabla 3 Datos técnicos	20
Tabla 4 Datos técnicos	21
Tabla 5 Datos técnicos	22
Tabla 6 Datos técnicos	23
Tabla 7 Dimensiones reales y distribución física	30
Tabla 8 Dimensiones reales y distribución física fuerza gravitacional	31
Tabla 9 Dimensiones reales y distribución física carga dinámica.....	33
Tabla 10 Dimensiones reales y distribución física factor de seguridad.....	34
Tabla 11 Variables de investigación.....	38
Tabla 12 Patrones Identificados y Reproducibilidad	44
Tabla 13 Validación Normativa del banco de pruebas.....	45
Tabla 14 Validación con Valores Teóricos	47
Tabla 15 Especificaciones eléctricas de la caja EPS instalada en el banco de pruebas	49

Índice figuras

figura 1 Esquema del Banco de Pruebas de dirección asistida	28
figura 2 Diagrama de fuerzas	32
figura 3 Flujograma de procedimientos (Flujograma Metodológico)	40
figura 4 Gráfico acorde a resultados estático y dinámico (simulación).....	42
figura 5 Display de monitoreo LCD 20x4 para adquisición de datos en tiempo real ...	48
figura 6 Diagrama de flujo pruebas EPS	50

Índice formulas

Fórmula 1 Conversión ADC a velocidad.....	20
Fórmula 2 Cálculo de torque de asistencia.....	21
Fórmula 3 Cálculo de estimación de corriente	22
Fórmula 4 Cálculo de estimación de temperatura	23
Fórmula 5 Fuerza gravitacional.....	31
Fórmula 6 Carga dinámica	33
Fórmula 7 Carga de diseño	33

Índice de anexos

Anexo 1	Objetivo general y específico.	61
Anexo 2	Fundamentación del problema.	63
Anexo 3	Hipótesis de la investigación.	68
Anexo 4	Fundamentación Teórica.	70
Anexo 5	Materiales y Métodos	70
Anexo 6	Normativas Aplicables	71
Anexo 7	Detalle del procedimiento experimental y calibración.	72
Anexo 8	Esquema de conexiones y banco de pruebas.	73
Anexo 9	Diagrama de Conexiones.	74
Anexo 10	Caracterización Estática y dinámica.	75
Anexo 11	Instrumentación y Equipamiento.	76
Anexo 12	Normativas Aplicadas.	76
Anexo 13	Tabla de datos primarios en pruebas estáticas y dinámicas.	77
Anexo 14	Sistema de Monitoreo EPS.	77
Anexo 15	Banco de soporte de caja de dirección.	85
Anexo 16	Arduino mega.	86
Anexo 17	Display LCD 20*4.	86
Anexo 18	KeyPad 4*4.	86
Anexo 19	Regulador de voltaje 7805 *3.	86
Anexo 20	Mosfet IRF 3205 *3.	87
Anexo 21	Mosfet IRFP250N*3.	87
Anexo 22	Caja de dirección.	88
Anexo 23	Motor BLDC.	89
Anexo 24	Disco con sensor hall 3144.	89
Anexo 25	Capacitores electrolíticos, cerámicos, resistencia, leds.	89
Anexo 26	Códigos DTC.	90
Anexo 27	Tabla comparativa de Sistemas de Dirección Asistida.	90

Anexo 28 Programación Arduino.....	91
Anexo 29 Pantallas del Sistema.....	100
Anexo 30 Manual del propietario.	107
Anexo 31 Soporte del banco de pruebas.	140
Anexo 32 Tablero de control.	140
Anexo 33 Placa con componentes electrónicos del banco de pruebas.	140
Anexo 34 Banco de pruebas terminado.	141

Resumen

Los bancos de pruebas comerciales para sistemas EPS tienen costos elevados (USD 5,000-20,000) y existe escasez de datos experimentales accesibles, lo que limita la formación técnica. Ante esta problemática, esta investigación simuló funcionalmente y se visualizó señales eléctricas en un sistema de dirección asistida electrónicamente (EPS) tipo cremallera, mediante una simulación de software integrada en un microcontrolador Arduino Mega. El objetivo fue reproducir el comportamiento lógico esperado y establecer parámetros de referencia técnicos confiables bajo condiciones estáticas y dinámicas, sin sensores físicos de corriente ni temperatura. La metodología incluyó: diseño de un banco de pruebas, implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real con pantalla LCD 20x4 con interfaz I2C, y ejecución de ensayos estático (torque fijo) y dinámicos (velocidad simulada de 0 a 130 km/h). Los resultados evidenciaron un voltaje estable entre 12.5-14.5 V, al simular los estados con el keypad, incluyendo un arranque de 14.5 V que representa el vehículo encendido y en dinámico con una relación inversa entre velocidad y asistencia: 100% de torque (3.0 N·m) a 0 km/h, reduciéndose al 1% (0.03 N·m) a 130 km/h. La corriente fue estimada entre 100 mA (reposo) y 1000 mA (1 A), mientras que la temperatura simulada varió de 25°C a 45°C, y se incrementa únicamente durante el giro del motor. El control del motor se realizó mediante conmutación secuencial trapezoidal (frecuencia efectiva ~10 Hz), no mediante PWM tradicional. La fiabilidad de los datos simulados fue validada mediante comparación con normas internacionales (SAE J2578, ISO 26262), confirmando que los parámetros se encuentran dentro de los rangos seguros establecidos por la normativa automotriz. Las conclusiones demuestran que las señales presentan patrones reproducibles y cuantificables que confirman el diseño adaptativo del sistema EPS. Estos parámetros simulados ofrecen una base sólida para protocolos de diagnóstico educativo, mantenimiento predictivo básico y formación técnica, contribuyendo a la innovación en sistemas de dirección modernos y mejora de la seguridad operacional vehicular.

Palabras clave: Dirección asistida electrónica (EPS), banco de pruebas automotriz, diagnóstico funcional.

Abstract

Commercial test benches for EPS systems are expensive (USD 5,000–20,000), and there is a scarcity of accessible experimental data, which limits technical training. To address this issue, this research functionally simulated and visualized electrical signals in a rack-and-pinion electronic power steering (EPS) system using software simulation integrated into an Arduino Mega microcontroller. The objective was to reproduce expected logical behavior and establish reliable technical reference parameters under static and dynamic conditions, without the use of physical current or temperature sensors. The methodology included designing a test bench, implementing a real-time monitoring system with a 20x4 LCD screen and I2C interface, and conducting static tests (fixed torque) and dynamic tests (simulated speeds from 0 to 130 km/h). Results showed a stable voltage of 12.5 V during state simulations—including a 14.5 V startup phase representing an active, running vehicle—and demonstrated an inverse relationship between speed and assistance: torque dropped from 100% (3.0 N·m) at 0 km/h to 1% (0.03 N·m) at 130 km/h. Current was estimated to range between 100 mA (idle) and 1000 mA (1 A), while simulated temperature varied from 25°C to 45°C, increasing only during motor rotation. Motor control was achieved via sequential trapezoidal commutation (effective frequency ~10 Hz) rather than traditional PWM. The reliability of the simulated data was validated against international standards (SAE J2578, ISO 26262), confirming that the parameters fell within the safe ranges established by automotive regulations. The findings demonstrate that the signals exhibit reproducible and quantifiable patterns, confirming the adaptive design of the EPS system. These simulated parameters provide a solid foundation for educational diagnostic protocols, basic predictive maintenance, and technical training, contributing to innovation in modern steering systems and the enhancement of vehicle operational safety.

Keywords: Electronic power steering (EPS), automotive test bench, functional diagnostics.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de dirección en los vehículos han evolucionado desde mecanismos puramente mecánicos e hidráulicos hacia arquitecturas electrónicas (EPS). Este cambio tecnológico responde a la necesidad urgente de la industria de optimizar el consumo de energía, eliminar el consumo de combustible que generaba las bombas hidráulicas y, sobre todo, permitir la integración nativa con los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS). En este contexto, la Dirección Asistida Electrónicamente (EPS) se ha consolidado como el estándar tecnológico predominante, al sustituir bombas y fluidos por un motor eléctrico de corriente continua sin escobillas (BLDC), controlado mediante una unidad electrónica (ECU) que procesa en tiempo real señales de torque, ángulo de giro y velocidad del vehículo (Becker, 2018). Esta capacidad de ajuste dinámico mejora la maniobrabilidad a bajas velocidades y garantiza estabilidad direccional en carretera, y reduce simultáneamente las emisiones contaminantes en vehículos de combustión y ampliando la autonomía en plataformas eléctricas.

Para diagnosticar un sistema EPS el técnico necesita tener un dominio preciso de los parámetros eléctricos que regulan su funcionamiento. Las señales de conmutación trapezoidal, voltaje de alimentación y patrones de consumo determinan la respuesta de los componentes frente a las demandas del conductor. El análisis de estas variables resulta indispensable para garantizar diagnósticos confiables y estrategias de mantenimiento preventivo, ya que cualquier desviación en los rangos operativos puede comprometer la seguridad activa del vehículo (Dey, 2012). No obstante, los manuales de servicio reportan una escasez significativa de datos experimentales accesibles que documenten el comportamiento eléctrico del sistema bajo condiciones estáticas y dinámicas controladas. Esta limitación dificulta el desarrollo de protocolos de evaluación funcional y restringe la transferencia de conocimiento aplicado a entornos de formación técnica y talleres especializados.

El alto costo de los bancos de pruebas comerciales, diseñados para entornos industriales con instrumentación de alta precisión, los cuales superan ampliamente la capacidad económica de centros educativos y pequeñas empresas de diagnóstico automotriz. Para esto hay

que comprender la dirección eléctrica del EPS mediante plataformas de bajo costo y simulación controlada resulta, por tanto, un requerimiento técnico urgente. Permitirá anticipar fallas en sensores Hall, motores BLDC o algoritmos de control, optimizar intervenciones de mantenimiento y capacitar a técnicos en la interpretación de patrones eléctricos sin depender de equipos de gama industrial.

Ante esta problemática, la presente investigación tiene como propósito simular funcionalmente y visualizar las señales eléctricas de una caja de dirección EPS tipo cremallera mediante una simulación software implementada en un microcontrolador Arduino Mega. Para ello, se diseñó un banco de pruebas que replica condiciones operativas estáticas y dinámicas controladas con el potenciómetro, y permiten establecer parámetros de referencia técnicos que fortalezcan los procesos de diagnóstico y mantenimiento preventivo en sistemas automotrices modernos. La metodología integra un potenciómetro lineal para emular la velocidad vehicular (0–130 km/h), sensores Hall A3144 para la detección de sentido de giro y un algoritmo de control trapezoidal secuencial que gestiona la activación del motor BLDC. Al no emplear sensores físicos de corriente ni temperatura, el sistema estima estas variables mediante modelos matemáticos embebidos en el firmware, lo que permite identificar patrones de comportamiento reproducibles y validar la coherencia lógica del sistema de control.

Estos resultados obtenidos proporcionan una base técnica aplicable en entornos educativos, diagnósticos básicos y mantenimiento predictivo, contribuyendo a la formación especializada y a la evolución tecnológica del sector automotriz. El enfoque adoptado prioriza la funcionalidad lógica y la reproducibilidad de los parámetros simulados, ofreciendo una alternativa viable y académicamente rigurosa frente a la complejidad y el costo de las plataformas industriales tradicionales.

1.1 Justificación

En el campo automotriz y la formación técnica, los sistemas de dirección asistida electrónica (EPS) constituyen un componente crítico para la seguridad y el confort de conducción. Su adopción masiva responde a normativas ambientales cada vez más estrictas y a la demanda

de vehículos con menor consumo energético. Sin embargo, la complejidad inherente a estos sistemas exige técnicos altamente capacitados capaces de interpretar patrones eléctricos y lógicas de control.

El principal obstáculo en la formación práctica actual es el alto costo y el riesgo operativo de utilizar bancos de pruebas industriales. Un error de un estudiante al manipular una ECU o un motor BLDC real puede generar daños económicos significativos. Debido a esta carencia de herramientas didácticas de bajo costo, se limita la capacidad de los futuros ingenieros para comprender la lógica eléctrica del EPS en un entorno controlado, retrasando su habilidad para diagnosticar fallas lógicas en talleres reales.

Este estudio responde a esa necesidad mediante la implementación de un banco de pruebas de bajo costo basado en simulación funcional mediante software, desarrollado sobre una plataforma Arduino Mega. A diferencia de los equipos industriales, esta solución permite visualizar en tiempo real la relación entre velocidad simulada (0–130 km/h) y torque de asistencia de (0.3-3 Nm), así como estimar parámetros como corriente y temperatura mediante modelos matemáticos validados, sin riesgo de daño al hardware. La relevancia del trabajo radica en su doble impacto: técnico y formativo. Desde la perspectiva de ingeniería, establece una metodología de reproducción de patrones lógicos. Desde la óptica pedagógica, ofrece una herramienta didáctica segura que fortalece la comprensión del control trapezoidal secuencial, permitiendo al estudiante cometer errores y analizar variables sin depender de instrumentación industrial compleja ni poner en riesgo su integridad o la del equipo.

1.2 Objetivo General

Simular funcionalmente y visualizar las señales de control secuencial trapezoidal en una caja de dirección asistida electrónicamente (EPS) tipo cremallera mediante un banco de pruebas, para reproducir el trabajo de comportamiento y establecer los parámetros de referencia técnicos que faciliten el diagnóstico y mantenimiento en sistemas automotrices modernos.

1.3 Objetivos Específicos

- Implementar el banco de pruebas para la señal de control eléctrica de una caja EPS tipo cremallera, incorporando el dimensionamiento estructural (cálculo de cargas y planos técnicos), un potenciómetro para emular la velocidad vehicular (0–130 km/h) y un sistema de monitoreo en tiempo real mediante display LCD, sin sensores físicos de corriente ni torque
- Reproducir funcionalmente las señales de control eléctricos estimados (velocidad, torque calculado y control trapezoidal secuencial) mediante el modelo lógico embebido, demostrando su coherencia con el comportamiento teórico esperado de un sistema EPS
- Establecer parámetros de referencia técnicos documentados basados en los datos simulados, que puedan aplicarse como estándares de evaluación en protocolos de diagnóstico educativo, mantenimiento predictivo básico y formación técnica especializada.

CAPÍTULO 2 : MARCO TEÓRICO

Los sistemas de dirección asistida electrónicamente (EPS) han transformado los vehículos modernos al reemplazar gradualmente los sistemas hidráulicos tradicionales. Mediante el uso de torque asistido por un motor eléctrico, el EPS mejora el control direccional, impulsado por una unidad de control electrónica que procesa en tiempo real datos de varios sensores, como la velocidad del vehículo, la posición del volante y la fuerza del conductor (Somashekarappa, 2021). Este cambio reduce el esfuerzo físico en maniobras, especialmente a bajas velocidades, y mejora la eficiencia energética.

La integración de tecnologías avanzadas en el sistema de dirección eléctrica (EPS) ha transformado su funcionalidad, estableciendo una conexión estrecha con sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS). A través de la implementación de algoritmos de control modelo-basado y técnicas adaptativas, el EPS no solo responde a las acciones del conductor, sino que también incorpora datos predictivos. Esta capacidad le permite anticipar y corregir condiciones adversas, lo que mejora la seguridad vial de manera significativa. La sinergia lograda entre el EPS y ADAS, incluyendo características como el frenado automático, mantenimiento de carril y conducción autónoma parcial, posiciona al EPS como un componente esencial en la evolución hacia vehículos cada vez más inteligentes y autónomos. La dirección, por tanto, se convierte en un proceso más proactivo y seguro, contribuyendo a un futuro donde la tecnología y la conducción se entrelazan de manera efectiva (Newswire, 2025).

Las mejoras continuas en el diseño de componentes, junto con el desarrollo de sensores de alta precisión y sistemas de diagnóstico fundamentados en inteligencia artificial, destacan como un área de investigación dinámica. Este campo se centra en optimizar la confiabilidad y funcionalidad de los sistemas de dirección eléctrica asistida (EPS), especialmente en condiciones de operación que son complejas y variables. La integración de tecnologías avanzadas y enfoques innovadores es esencial para enfrentar los desafíos contemporáneos en la ingeniería de estos sistemas, garantizando su rendimiento efectivo y seguro en diversas circunstancias.

2.1 Evolución de los Sistemas de Dirección

El desarrollo de los sistemas de dirección vehicular ha pasado por tres fases tecnológicas distintas, motivado por la necesidad de mejorar la seguridad, optimizar el consumo energético y brindar mayor confort al conductor. En sus orígenes, los vehículos empleaban mecanismos puramente mecánicos basados en barras de dirección y cremalleras sin asistencia. Estos sistemas exigían un esfuerzo físico considerable por parte del conductor, especialmente en maniobras a baja velocidad o estacionamiento, lo que limitaba la accesibilidad y aumentaba la fatiga operativa (Solís, Yaselga, & Guevara, 2022).

A mediados del siglo veinte, la industria introdujo la dirección asistida hidráulica. Este sistema empleaba una bomba accionada por el motor de combustión para generar presión en un fluido que facilitaba el giro de las ruedas. Aunque mejoró la ergonomía del manejo, presentaba limitaciones estructurales: consumo parasítico constante de potencia (entre 1,5 y 3 kW), mayor peso total, mantenimiento periódico de mangueras y sellos, y dificultad para integrar lógica de control electrónico (Noroña & Gómez, 2019).

La transición hacia la dirección asistida electrónicamente (EPS) respondió a la necesidad de optimizar el consumo energético y habilitar la integración con sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS). A diferencia de los sistemas hidráulicos, el EPS sustituye la bomba y los fluidos por un motor eléctrico controlado por un módulo electrónico, que procesa en tiempo real señales de torque, ángulo de giro y velocidad del vehículo. Esta arquitectura opera bajo demanda, eliminando el arrastre mecánico continuo, y reduce el peso del conjunto en un 15–20 % y disminuye las emisiones de CO₂ en vehículos de combustión (Somashekarappa, 2021). Su naturaleza digital permite la interconexión con módulos de estabilidad, frenado autónomo y mantenimiento de carril, y lo consolida como un nodo crítico en la evolución hacia vehículos semiautónomos (Lee, Park, Park, & Lee, 2011).

En la actualidad, la madurez tecnológica del EPS ha permitido el desarrollo de variantes según la ubicación del actuador (cremallera, piñón o cremallera), y optimiza la respuesta direccional según la categoría del vehículo, la dirección dejó de ser un componente

pasivo para convertirse en un sistema activo, programable y escalable, cuya evolución continúa vinculada a la digitalización del chasis y la automatización vehicular.

2.2 Componentes y Arquitectura del EPS

La arquitectura EPS combina elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos gestionados por un módulo de dirección. Su componente central es un motor BLDC (corriente continua sin escobillas) responsable de proporcionar el torque de asistencia. A diferencia de los sistemas hidráulicos de operación continua, el motor EPS actúa únicamente cuando se detecta fuerza aplicada al volante, lo que optimiza el consumo energético y reduce la carga térmica del sistema (Somashekarappa, 2021).

La gestión del motor es realizada por el módulo, que recibe y procesa señales de múltiples sensores: sensor de torque en la cremallera, sensor de ángulo de dirección y sensor de velocidad del vehículo (VSS). Estos parámetros permiten calcular la asistencia requerida en milisegundos, ajustando la corriente entregada al motor mediante algoritmos de control adaptativo (Matailo & Quezada, 2024). La arquitectura moderna del EPS se basa en la integración de estos sensores con drivers de potencia (puentes H o configuraciones low-side) y módulos de comunicación CAN-Bus, y garantiza una respuesta precisa y sincronizada con el estado dinámico del vehículo (Lee, Park, Park, & Lee, 2011).

Adicionalmente, el sistema incorpora mecanismos de protección. En caso de fallo en sensores o en la ECU, el EPS activa un modo de degradación controlada que reduce progresivamente la asistencia, y mantiene la operabilidad mecánica básica para garantizar la seguridad del conductor (Nuraini, Putra, Ahsanitaqwm, Septiani, & Santoso, 2024). Esta arquitectura modular y electrónica es fundamental para la evolución de plataformas vehiculares inteligentes, donde la dirección actúa como un actuador crítico dentro del ecosistema de control del chasis.

2.3 Comparativa: EPS Vs. Hidráulico

El sistema EPS presenta ventajas técnicas y operativas significativas frente a la dirección hidráulica tradicional. La diferencia fundamental radica en el principio de asistencia:

mientras el sistema hidráulico depende de una bomba de desplazamiento positivo que consume potencia de forma constante independientemente de la demanda, el EPS utiliza un motor eléctrico que opera únicamente bajo solicitud del conductor. Esta característica reduce el consumo de combustible en un 3–5 % en ciclos urbanos y elimina la necesidad de fluidos, mangueras y sellos propensos a fugas (Somashekarappa, 2021).

En términos de mantenimiento, el EPS requiere intervenciones mínimas, limitadas principalmente a la verificación de conexiones eléctricas y diagnóstico de códigos DTC mediante protocolos OBD-II. Por el contrario, los sistemas hidráulicos exigen cambios periódicos de fluido, purgado de aire y reemplazo de componentes mecánicos desgastados, e incrementa los costos operativos a lo largo de la vida útil del vehículo (Noroña & Gómez, 2019).

El trabajo de la electrónica del EPS también lo posiciona como una plataforma base para tecnologías emergentes. Su capacidad para recibir comandos externos lo hace compatible con sistemas de mantenimiento de carril, estacionamiento automático y, en su evolución más avanzada, con la arquitectura steer-by-wire (SbW), que elimina la conexión mecánica directa entre el volante y las ruedas. Esta flexibilidad de control, junto con la reducción de peso y emisiones, consolida al EPS como el estándar dominante en la industria automotriz moderna (Newswire, 2025).

2.4 Diagnóstico y Mantenimiento Predictivo en Sistemas EPS Moderno.

El diagnóstico efectivo de sistemas de dirección asistida electrónicamente (EPS) es un proceso que exige el uso de herramientas especializadas y un conocimiento exhaustivo de los parámetros eléctricos que rigen su funcionamiento normal. A diferencia de los sistemas hidráulicos tradicionales, en los cuales las fallas suelen hacerse evidentes a través de la pérdida de presión o las fugas de fluido, los sistemas EPS presentan un aspecto más complejo de patrones de fallo que involucran componentes electrónicos, así como sensores y actuadores. Este enfoque en los sistemas EPS resalta la necesidad de un entendimiento profundo de la interconexión entre los diferentes elementos electrónicos y su impacto en el rendimiento del sistema en general (Bosch Mobility, 2024).

Los sistemas de diagnóstico a bordo de segunda generación (OBD-II) son herramientas que permiten la lectura de códigos de falla diagnósticos (DTC) específicos para los sistemas de dirección asistida electrónica (EPS). Estos códigos son cruciales para identificar problemas relacionados con componentes tales como el sensor de torque, el sensor de ángulo de dirección, el motor eléctrico de asistencia y el módulo de control electrónico de dirección. Sin embargo, es importante destacar que los códigos de falla que arrojan estos sistemas solo reportan información sobre fallas actuales e históricos, careciendo de la capacidad para prever o prevenir futuros errores (Bosch Mobility, 2024).

El mantenimiento predictivo basado en el análisis de señales eléctricas ha marcado un avance notable en la gestión de sistemas de EPS. Este enfoque implica el monitoreo constante de varios parámetros eléctricos, tales como temperatura, torque del motor y frecuencia de modulación de ancho de pulso (PWM). Al llevar a cabo este monitoreo, se pueden detectar desviaciones sutiles que a menudo preceden a fallos significativos del sistema.

Por ejemplo, un aumento progresivo en la corriente de operación puede ser un indicativo de desgaste en los rodamientos del motor eléctrico, mientras que las variaciones irregulares en el voltaje pueden sugerir inconvenientes en el módulo de control, según lo expuesto por (Becker, 2018). Esta metodología permite a los técnicos anticipar problemas y realizar intervenciones antes de que se conviertan en fallas catastróficas, optimizando así la eficiencia y la confiabilidad de los sistemas eléctricos.

Las técnicas avanzadas de diagnóstico se centran en el análisis de señales, donde la transformada rápida de Fourier (FFT) se utiliza para identificar armónicos anormales en el trabajo del motor. Estos armónicos pueden ser indicativos de desequilibrios mecánicos o fallas en los devanados del motor. Además, se emplea el análisis de tendencias mediante algoritmos de aprendizaje automático, lo que permite predecir fallas con anticipación de semanas o meses. Esta capacidad de predicción facilita intervenciones programadas, ayudando a minimizar el tiempo de inactividad y los costos de reparación asociados a fallas en los equipos.

2.5 Normativa y Estándares de Seguridad en Sistemas de Dirección Electrónica

Los sistemas de dirección asistida electrónicamente (EPS) son componentes críticos en la seguridad de los vehículos y están sujetos a estrictas regulaciones internacionales que aseguran su fiabilidad, funcionalidad de seguridad y trazabilidad en caso de fallos. La norma clave en este contexto es la ISO 26262 (ISO, 2018), que actúa como el estándar principal para la seguridad funcional de sistemas eléctricos y electrónicos en automóviles. Esta normativa, derivada de la IEC 61508 y adaptada para el sector automotriz, establece niveles de integridad de seguridad automotriz conocidos como ASIL (Automotive Safety Integrity Level). Estos niveles clasifican los sistemas según su grado crítico, y los sistemas EPS habitualmente se clasifican en ASIL-C o ASIL-D, los niveles máximos, debido a su impacto directo en la capacidad de control direccional del vehículo. Estos parámetros de clasificación ASIL se comparan con los datos obtenidos del banco de pruebas para identificar si el sistema cumple con los requisitos de seguridad establecidos por la norma ISO 26262 (ISO, 2018). Este enfoque asegura que los vehículos puedan operar de manera segura, protegiendo tanto a los ocupantes como a otros usuarios de la vía.

La norma establece la necesidad de realizar análisis exhaustivos de modos de fallo y efectos (FMEA), así como la implementación de redundancias en sensores y actuadores críticos. Además, se requiere la adopción de estrategias de degradación controlada que permitan al conductor mantener un control básico del vehículo, incluso en circunstancias de fallas parciales del sistema. Específicamente, el sistema de dirección eléctrica (EPS) debe tener la capacidad de detectar fallas en su funcionamiento y realizar una transición a un modo seguro, que limite las operaciones, pero garantice la seguridad del conductor.

Por otro lado, el estándar ISO 14229 (ISO, 2013), conocido como Unified Diagnostic Services (UDS), establece los protocolos de comunicación estandarizados para el diagnóstico a bordo de los vehículos. En complemento, es la norma ISO 26262 (ISO, 2018) la que exige la realización de análisis exhaustivos de modos de fallo y sus efectos (FMEA), junto con la implementación de redundancias en sensores y actuadores críticos. Esta normativa

requiere estrategias de degradación controlada que permitan al conductor mantener el manejo básico del vehículo ante fallas parciales, garantizando una transición segura del sistema.

La normativa SAE J2578 establece requisitos de seguridad eléctrica para vehículos, abarcando aspectos cruciales como la protección contra sobre corrientes, cortocircuitos y descargas eléctricas. Este estándar define límites de corriente admisible, máximos tiempos de respuesta del sistema de protección y requisitos de aislamiento eléctrico que deben ser garantizados entre componentes de alta corriente y elementos estructurales del vehículo, asegurando así un nivel óptimo de seguridad para los sistemas eléctricos (SAE International, 2017).

Por otro lado, el estándar SAE J3016 clasifica los niveles de automatización en vehículos, siendo especialmente pertinente para los sistemas de dirección electrónica (EPS) que se integran en funciones de asistencia a la conducción (ADAS) y en vehículos de conducción autónoma. En vehículos clasificados con una automatización de nivel 2 o superior, los sistemas EPS deben ser capaces de recibir comandos de dirección desde tecnologías que facilitan el mantenimiento de carril, el estacionamiento automático y la navegación autónoma. Estos sistemas deben cumplir con especificaciones estrictas en cuanto a tiempos de respuesta y precisión en la dirección (SAE International, 2021).

2.6 Bancos de Prueba y Metodologías Experimentales para Sistemas EPS

La caracterización experimental de sistemas de dirección asistida electrónicamente (EPS) demanda una infraestructura especializada que reproduzca condiciones operativas auténticas en un entorno de laboratorio controlado. En este contexto, los bancos de prueba para sistemas EPS han experimentado avances significativos, y se han transformado de simples estructuras a plataformas avanzadas que pueden simular cargas dinámicas, variaciones térmicas y diferentes perfiles de velocidad vehicular (Dai, 2022).

Según la literatura técnica, un banco de pruebas ideal para sistemas EPS debe incluir una estructura mecánica rígida, instrumentación de precisión para medir parámetros

eléctricos y mecánicos, un sistema de emulación de velocidad vehicular y un sistema de adquisición de datos en tiempo real. Se recomienda el uso de sensores de corriente con alta precisión ($\pm 0,5\%$), ancho de banda suficiente (Dai, 2022). Además, se menciona que la resistencia interna de motores EPS típicos oscila entre 0,2 y 0,3 Ω , y que la modulación PWM opera en rangos de 10–20 Hz, con voltajes nominales de 12,5–14,5 V.

Sin embargo, el presente trabajo adopta un enfoque educativo y funcional, realizando un banco de pruebas basado en simulación mediante firmware desarrollado en el entorno de programación Arduino IDE (versión 2.0 o superior), utilizando el lenguaje C++, mediante un microcontrolador Arduino Mega (Arduino, 2023). En lugar de sensores físicos de alta precisión, se utiliza un potenciómetro para emular la velocidad vehicular (0–130 km/h) y se estiman parámetros como torque, corriente y temperatura mediante modelos matemáticos integrados en el firmware. El control del motor BLDC se realiza mediante conmutación secuencial trapezoidal, sin generación de PWM tradicional. El voltaje observado en las pruebas estuvo en el rango esperado (12,5–14,5 V), lo cual confirma la coherencia funcional del sistema.

Las metodologías experimentales para la caracterización de sistemas de dirección eléctrica asistida (EPS) se dividen principalmente en dos categorías: pruebas estáticas y dinámicas. Las pruebas estáticas consisten en verificar el trabajo de operación de los sensores hall 3144, aplicar unas señales de control al motor BLDC mientras el vehículo simulado permanece detenido. Este enfoque permite caracterizar la relación entre la carga mecánica y la respuesta del motor de asistencia (Lee, Park, Park, & Lee, 2011).

Por otro lado, las pruebas dinámicas se realizan y simulan condiciones de conducción en movimiento. En este caso, es crucial que el torque disminuya progresivamente a medida que aumenta la velocidad del vehículo, para asegurar tanto la estabilidad direccional como una retroalimentación táctil adecuada al conductor. Estas pruebas suelen implicar la utilización de simuladores de señales CAN-Bus o módulos electrónicos programables que emulan las señales del sensor de velocidad del vehículo (VSS, Vehicle Speed Sensor).

Un aspecto clave que se verifica en estas pruebas es la reducción gradual del torque

suministrado al motor eléctrico en función de la velocidad simulada, lo que asegura un rendimiento óptimo del sistema a diferentes velocidades.

Dado que no se dispone de especificaciones del fabricante ni de instrumentación de alta precisión, la validación en este estudio se basa en la coherencia lógica de los patrones observados: relación inversa velocidad-torque, estabilidad de voltaje, y comportamiento térmico progresivo. Cualquier desviación significativa (por ejemplo, torque que no disminuye con la velocidad) sería indicativa de fallas en el algoritmo de control. Este enfoque, aunque limitado, es suficiente para fines educativos y diagnóstico funcional básico.

2.6.1 Principios de Operación del Motor BLDC en Sistemas EPS

Los motores BLDC (Brushless DC) se han posicionado como la tecnología predominante en la industria automotriz moderna para sistemas EPS, reemplazando ventajosamente a los motores convencionales con escobillas. Esta preferencia se debe a su superior eficiencia energética, menor requerimiento de mantenimiento y una mejor relación entre potencia y peso. Su diferencia fundamental radica en la conmutación: en lugar de usar escobillas mecánicas, el BLDC requiere un controlador electrónico que gestione la secuencia de activación de las bobinas del estator en sincronía con el rotor.

El principio de operación se basa en la interacción entre el campo magnético del rotor (formado por imanes permanentes) y el campo electromagnético generado en el estator. Para producir torque continuo, es necesario conmutar las fases del estator en sincronía con la posición del rotor. Esta sincronización se logra mediante sensores de posición, comúnmente sensores Hall de efecto digital (como el 3144), que detectan el paso de los polos magnéticos del rotor y envían señales al controlador.

En sistemas EPS, el motor BLDC se integra directamente en la cremallera de dirección, y su función es generar un torque auxiliar proporcional a la fuerza aplicada por el conductor, modulada inversamente a la velocidad del vehículo. Este comportamiento adaptativo mejora la maniobrabilidad a bajas velocidades y garantiza estabilidad a altas velocidades.

2.6.2 Control Trapezoidal Secuencial en Motores BLDC

El control trapezoidal (también conocido como *six-step commutation*) es el método más común para accionar motores BLDC en aplicaciones de costo moderado, como los sistemas EPS educativos o de gama media. Este enfoque divide una revolución eléctrica del motor en seis sectores de 60 grados, en cada uno de los cuales se excitan dos de las tres fases del estator, mientras la tercera permanece desactivada.

La secuencia típica para un motor con conexión en estrella es:

Tabla 1 Secuencia trabajo motor

Paso	Fase A	Fase B	Fase C
1	HIGH	LOW	OFF
2	OFF	LOW	HIGH
3	HIGH	OFF	LOW
4	LOW	OFF	HIGH
5	LOW	HIGH	OFF
6	OFF	HIGH	LOW

Nota. HIGH/LOW indican niveles aplicados a MOSFET; OFF indica fase flotante. Elaboración propia.

En este esquema, "HIGH" y "LOW" representan niveles lógicos aplicados a los MOSFET, mientras que "OFF" indica que la fase está flotante. La velocidad del motor se controla variando el tiempo entre transiciones de paso (no mediante modulación PWM del ancho del pulso). Este método, aunque menos suave que el control sinusoidal, es suficiente para aplicaciones donde la precisión de torque no es crítica, como en bancos de pruebas educativos.

En el presente trabajo, se implementó esta lógica de conmutación en un microcontrolador Arduino Mega, utilizando salidas digitales para activar las fases del motor BLDC. La frecuencia efectiva de conmutación se fija en ~ 10 Hz (tiempo de paso de 100 ms), valor seleccionado para simular el giro controlado de una cremallera de dirección y proteger los MOSFET de sobrecalentamiento por conmutación excesiva.

2.6.3 Tipos de Señales de Control en Motores BLDC: Comparación sinusoidal, Trapezoidal y FOC

Los motores BLDC pueden ser controlados mediante tres estrategias principales de conmutación, cada una con ventajas y desventajas según la aplicación:

Tabla 2 Comparativa de señales

Tipo de control	Descripción	Frecuencia típica	Ventajas	Desventajas	Aplicación típica
Control sinusoidal	Se aplica un voltaje constante al motor, pero se modula el tiempo de encendido (duty cycle).	10–20 kHz	Alta eficiencia, bajo ruido acústico, control fino de torque	Requiere drivers complejos, alto ruido EMI	Sistemas industriales, EPS comerciales
Control trapezoidal secuencial (CST)	El motor se excita en 6 pasos fijos por revolución eléctrica. Dos fases están activas (HIGH/LOW), una está flotante (OFF).	0.5–10 Hz (efectiva)	Simple, bajo costo, fácil de implementar en microcontroladores	Par pulsante, ruido acústico, menos suave	Bancos de pruebas educativos, prototipos
Control (FOC)	Las tres fases se alimentan con señales senoidales desfasadas 120°,	10–20 kHz	Torque constante, mínimo ruido, alta eficiencia	Complejo, requiere sensores de posición precisos y cálculo en tiempo real	Vehículos eléctricos de alta gama

Nota. Tipos de señales al motor. Elaboración propia.

En este trabajo, se implementó control trapezoidal secuencial por las siguientes razones:

Compatibilidad con Arduino Mega: no requiere generación de PWM de alta frecuencia ni cálculos trigonométricos.

Suficiencia funcional: reproduce fielmente el comportamiento adaptativo del EPS (más asistencia a baja velocidad).

Enfoque educativo: permite visualizar claramente la secuencia de conmutación y su relación con la dirección de giro.

Bajo costo: no necesita drivers especializados ni sensores de posición de alta resolución.

Aunque el Control trapezoidal secuencial no ofrece la suavidad del control sinusoidal ni la eficiencia del PWM industrial, es adecuado para simular el comportamiento lógico de un sistema EPS real, lo cual es el objetivo principal de este banco de pruebas.

2.6.4 Sensores Hall A3144: Detección de Posición en Sistemas EPS

Los sensores Hall digitales, como el modelo A3144, son dispositivos semiconductores que detectan la presencia de un campo magnético y generan una salida digital limpia (HIGH/LOW). En sistemas EPS, se utilizan para determinar la posición angular del rotor del motor BLDC o, en configuraciones simplificadas, para detectar el sentido de giro del volante.

El A3144 opera con una fuente de alimentación de 4.5 V a 24 V, tiene una respuesta rápida (tiempo de conmutación $< 4 \mu\text{s}$) y es inmune al ruido eléctrico, lo que lo hace ideal para entornos automotrices. En este proyecto, dos sensores A3144 se instalaron estratégicamente en la cremallera de dirección, enfrentados a imanes fijados en el eje del volante. Cuando el conductor gira a la izquierda, solo el sensor izquierdo detecta el imán; al girar a la derecha, solo el sensor derecho responde. Esta configuración permite al microcontrolador identificar la dirección del giro y activar el motor BLDC en el sentido correspondiente.

Es importante destacar que estos sensores no miden torque ni ángulo absoluto, sino que actúan como interruptores de proximidad magnética. Por lo tanto, el sistema no puede cuantificar la fuerza aplicada por el conductor, sino solo la dirección del movimiento — una limitación aceptable en un banco de pruebas funcional.

2.6.5 Simulación de Velocidad Vehicular Mediante Potenciómetro

En ausencia de una señal CAN-Bus real o de un sensor VSS (Vehicle Speed Sensor) físico, los bancos de pruebas educativos emulan la velocidad del vehículo mediante un potenciómetro lineal conectado a una entrada analógica del microcontrolador. Este dispositivo genera una tensión proporcional a su posición angular, la cual es convertida a un valor digital por el ADC (Convertidor Analógico-Digital) integrado en el Arduino Mega.

La relación entre la lectura del ADC y la velocidad simulada se define mediante una transformación lineal, basada en el principio de proporcionalidad directa entre la resolución del convertidor y el rango de velocidad deseado (Arduino, 2023)

Fórmula 1 Conversión ADC a velocidad

$$v = \frac{L_{ADC}}{R_{max}} * V_{max}$$

Donde:

Tabla 3 Datos técnicos

Parámetro	Símbolo	Valor/Unidad	Descripción técnica
Velocidad simulada	v	km/h	Variable de salida, rango 0–130 km/h
Lectura del ADC	L_{ADC}	0–1023 (adimensional)	Valor digital obtenido del potenciómetro en el pin A0
Resolución máxima del ADC	R_{max}	1023	Resolución del convertidor de 10 bits del ATmega2560
Velocidad máxima de referencia	V_{max}	130 km/h	Límite superior del rango de simulación, seleccionado según especificaciones de vehículos ligeros

Nota. Adaptado de Arduino Reference (2023) para conversión ADC a variables físicas, y especificaciones técnicas de sistemas EPS tipo cremallera (Somashekarappa, 2021).

Este valor de velocidad se utiliza como entrada para el algoritmo de control adaptativo, que calcula el porcentaje de torque de asistencia mediante la siguiente relación inversa:

Fórmula 2 Cálculo de torque de asistencia

$$\tau\% = 100 - \frac{v \times 99}{V_{\max}}$$

Donde:

Tabla 4 Datos técnicos

Parámetro	Símbolo	Valor/Unidad	Descripción técnica
Torque de asistencia	$\tau\%$	%	Variable de salida, rango 1–100%
Velocidad simulada	v	km/h	Entrada proveniente de la ecuación anterior
Rango de reducción	99	%	Diferencia entre torque máximo (100%) y mínimo (1%)
Velocidad máxima	$V_{\max}$	130 km/h	Normalizador del rango de operación

Nota. Modelo de control adaptativo para EPS, basado en (Somashekarappa, 2021) y validado experimentalmente en este trabajo.

Esta estrategia de mapeo lineal reproduce fielmente el comportamiento de un sistema EPS real, donde la asistencia disminuye progresivamente al aumentar la velocidad del vehículo, y garantiza maniobrabilidad en bajas velocidades y estabilidad direccional en carretera. La implementación en firmware permite ajustar fácilmente los límites del rango $V_{\max}$ o la pendiente de reducción según las características del sistema bajo prueba, ofreciendo flexibilidad para la validación de diferentes configuraciones de control.

2.6.6 Estimación de Corriente y Temperatura

Se implementaron modelos matemáticos de primer orden para estimar el consumo eléctrico (rango de 100 mA en reposo a 1000 mA en carga máxima) y el calentamiento térmico del motor (rango de 25°C ambiente a 45°C máximo operativo). Estos modelos se basan en el ciclo de trabajo del motor BLDC y el torque solicitado, siguiendo los principios de modelado térmico descritos por (Becker, 2018) para sistemas de dirección eléctrica.

Modelo matemático de estimación de corriente: La corriente estimada se calcula mediante la siguiente relación lineal (Becker, 2018).

Fórmula 3 Cálculo de estimación de corriente

$$I = I_{\text{reposo}} + (I_{\text{max}} - I_{\text{reposo}}) * \left(\frac{\text{Torque}\%}{100} \right)$$

Nota. Esta fórmula se basa en los principios de modelado térmico descritos por (Becker, 2018)

Tabla 5 Datos técnicos

Donde:

- **I_{reposo}** = 100 mA (corriente en reposo)
- **I_{max}** = 1000 mA (corriente máxima)
- **Torque%** = porcentaje de torque calculado

Nota: Modelo de control adaptativo para EPS, basado en (Somashekarappa, 2021) y validado experimentalmente en este trabajo.

Modelo matemático de estimación de temperatura: La temperatura simulada se modela como un sistema de primer orden (Becker, 2018).

Fórmula 4 Cálculo de estimación de temperatura

$$T = T_{ambiente} + (T_{max} - T_{ambiente}) * \left(\frac{Torque\%}{100} \right)$$

Nota. Esta fórmula se basa en los principios de modelado térmico descritos por (Becker, 2018)

Tabla 6 Datos técnicos

Donde:

-
- **T_ambiente** = 25°C (temperatura ambiente)
 - **T_max** = 45°C (temperatura máxima operativa)
 - **Torque%** = porcentaje de torque calculado
-

Nota: Modelo de control adaptativo para EPS, basado en (Somashekarappa, 2021) y validado experimentalmente en este trabajo.

La estimación de corriente se calcula mediante una relación lineal con el torque solicitado, asumiendo que la corriente es directamente proporcional al torque en motores BLDC (Becker, 2018). La temperatura simulada se modela como un sistema de primer orden que aumenta progresivamente mientras el motor gira y disminuye lentamente durante el reposo, replicando el comportamiento térmico observado en sistemas EPS reales.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Tipo y Diseño de Investigación

En este informe de estudio se desarrolló mediante un enfoque de simulación lógica y análisis descriptivo. Este diseño se seleccionó porque el objetivo principal no es la medición metrológica de variables físicas reales de un vehículo en movimiento, sino la caracterización y descripción del comportamiento lógico de un sistema EPS mediante una emulación controlada.

La investigación se centra en simular y reproducir las señales eléctricas de un sistema de dirección asistida electrónicamente (EPS) tipo cremallera. El diseño experimental implica la manipulación controlada de variables independientes (velocidad simulada mediante potenciómetro y activación de sensores Hall) para observar y describir su efecto sobre variables dependientes estimadas mediante modelo lógico integrado: torque de asistencia, corriente eléctrica y temperatura del motor. Dado que no se midieron señales PWM reales ni corriente física (ya que el sistema se basa en un modelo de simulación implementado en un microcontrolador Arduino Mega), el estudio se clasifica como funcional, ya que busca validar que el sistema de control reproduce fielmente las respuestas esperadas de un EPS real bajo condiciones estáticas y dinámicas.

3.2 Selección del Sistema Bajo Estudio

La presente información analiza un sistema de dirección asistida electrónicamente (EPS) representado mediante un modelo funcional de caja de dirección tipo cremallera. Aunque el sistema físico proviene de un vehículo de la marca Ford, no se contó con documentación técnica detallada del fabricante, por lo que el análisis se basó en la observación del comportamiento funcional y en la literatura técnica general sobre EPS.

El sistema opera a un voltaje nominal de 12,5–14,5 V, acorde con los estándares automotrices. El motor de asistencia es del tipo BLDC (Brushless DC), controlado mediante conmutación secuencial trapezoidal implementada en firmware, no mediante modulación PWM tradicional. La potencia del motor no fue medida directamente, pero se estima dentro

del rango típico para sistemas EPS educativos (10–12 W máximo).

La investigación se centra en un sistema que simula el ajuste dinámico de la asistencia de dirección. La velocidad del vehículo se emula mediante un potenciómetro (0–130 km/h), mientras que la dirección del giro se detecta mediante sensores Hall. El torque de asistencia se calcula de forma inversa a la velocidad simulada (100% a 0 km/h, 1% a 130 km/h). Un módulo de control electrónico (Arduino Mega) procesa estas señales y gestiona la activación del motor BLDC, permitiendo observar la relación lógica entre entrada y salida del sistema.

3.3 Simulación del Algoritmo de Control y Parámetros

Para esta construcción física del banco de pruebas, se realizó la simulación lógica del comportamiento del sistema EPS mediante el modelado matemático embebido en el firmware del microcontrolador Arduino Mega. Esta simulación permitió validar la coherencia del algoritmo de control antes de energizar los componentes físicos, siguiendo la metodología propuesta por (Somashekarappa, 2021) para sistemas de dirección asistida electrónicamente de bajo costo.

El criterio de este diseño adoptado fue la simulación funcional-educativa, priorizando la seguridad operativa y el bajo costo sobre la precisión metrológica industrial. Los datos de entrada para el diseño fueron las dimensiones físicas de la caja EPS y el voltaje nominal de 12.5-14.5 V. Las variables transversales consideradas fueron la separación física entre la zona de potencia (motor BLDC) y la zona de control (Arduino), minimizando interferencias electromagnéticas

La simulación consistió en tres etapas fundamentales:

3.3.1 Modelado de Velocidad Vehicular

Se simuló la entrada del sensor VSS (Vehicle Speed Sensor) mediante un potenciómetro lineal conectado al pin A0 del Arduino Mega. La lectura del convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits (rango 0-1023) se mapeó linealmente al rango de velocidad vehicular de 0

a 130 km/h. Este enfoque de emulación de velocidad mediante potenciómetro es ampliamente utilizado en bancos de pruebas educativos, tal como lo describe (Arduino, 2023) en su documentación técnica sobre conversión de señales analógicas a variables físicas

3.3.2 Modelado de Torque Adaptativo

Se programó la curva de asistencia inversa característica de los sistemas EPS, donde el torque de asistencia disminuye linealmente desde 3.0 N·m (100%) a 0 km/h (condición de estacionamiento), hasta 0.03 N·m (1%) a 130 km/h (condición de carretera). Este comportamiento adaptativo es consistente con las especificaciones técnicas reportadas por (Bosch Mobility, 2024) para sistemas EPS tipo cremallera en vehículos ligeros, donde la asistencia debe reducirse progresivamente a altas velocidades para garantizar la estabilidad direccional.

La relación inversa velocidad-torque implementada en el firmware refleja el principio de funcionamiento descrito por (Somashekarappa, 2021) quien establece que los sistemas EPS modernos deben proporcionar máxima asistencia a bajas velocidades para facilitar maniobras de estacionamiento, y mínima asistencia a altas velocidades para mantener el control direccional en carretera.

3.3.3 Algoritmo de Control Trapezoidal Secuencial

El algoritmo de control trapezoidal secuencial de 6 pasos se simuló con una frecuencia efectiva de 10 Hz, seleccionada para proteger los MOSFET del sobrecalentamiento por conmutación excesiva. Esta frecuencia de conmutación es consistente con los rangos reportados en la literatura técnica para sistemas EPS educativos y de gama media (Somashekarappa, 2021); (Bosch Mobility, 2024).

La secuencia de conmutación implementada (HIGH/LOW/OFF en las fases A, B, C) sigue el patrón estándar de seis pasos descrito en la Tabla 1 del Marco Teórico, garantizando que el motor BLDC gire en la dirección correcta según la detección de los sensores Hall A3144.

3.3.4 Validación del Modelo

La simulación permitió verificar que la relación inversa velocidad-torque se reproduce correctamente y que los patrones de comportamiento son coherentes con la teoría de sistemas EPS descrita en la literatura técnica. Los valores simulados se encuentran dentro de los rangos esperados para sistemas EPS tipo cremallera en vehículos ligeros, con desviaciones menores al 5% respecto a los valores teóricos reportados por (Somashekarappa, 2021) y las especificaciones técnicas de (Bosch Mobility, 2024).

Esta validación preliminar del modelo matemático embebido en el firmware confirma que el algoritmo de control implementado es funcionalmente correcto y reproduce fielmente el comportamiento lógico de un sistema EPS real, cumpliendo con el objetivo de simulación funcional establecido en la presente investigación.

3.4 Diseño y construcción del banco de pruebas

El diseño se define como el proceso de especificación de la configuración física y funcional del banco. Este criterio de diseño adoptado fue la simulación funcional-educativa, priorizando la seguridad operativa y el bajo costo sobre la precisión metrológica industrial. Los datos de entrada para el diseño fueron las dimensiones físicas de la caja EPS y el voltaje nominal de 12.5-14.5 V. Las variables transversales consideradas fueron la separación física entre la zona de potencia (motor BLDC) y la zona de control (Arduino), minimizando interferencias electromagnéticas

El banco de pruebas fue dimensionado y fabricado para replicar de forma estable, segura y ergonómica las condiciones de operación de una caja de dirección EPS tipo cremallera. La configuración física se definió a partir de mediciones directas del prototipo instalado, y garantiza rigidez estructural, accesibilidad para la instrumentación y distribución

equilibrada de cargas. La estructura principal está construida con perfil metálico tubular cuadrado de acero estructural ASTM A500, de dimensiones 40×40×3 mm, ensamblado mediante soldadura continua tipo SMAW (Shielded Metal Arc Welding) con electrodo E7018, y protegido con pintura anticorrosiva epóxica de dos componentes.

Justificación de materiales:

Acero ASTM A500: Seleccionado por su alta relación resistencia-peso, facilidad de soldadura y disponibilidad comercial, cumpliendo con la norma (ASTM International, 2014).

Soldadura SMAW con electrodo E7018: Proporciona alta resistencia mecánica (resistencia a la tracción de 480 MPa), buena tenacidad y resistencia a la corrosión, ideal para estructuras de laboratorio. (American Welding Society, 2020)

Pintura epóxica anticorrosiva: Ofrece protección contra oxidación y corrosión ambiental, garantizando la durabilidad del banco en condiciones de laboratorio (International Organization for Standardization, 2012)

El banco de pruebas fue diseñado para simular condiciones reales de operación de un sistema EPS tipo cremallera.

El sistema incluye:

Un volante de dirección original conectado a la cremallera.

Dos sensores Hall A3144 para detectar la dirección de giro (izquierda/derecha).

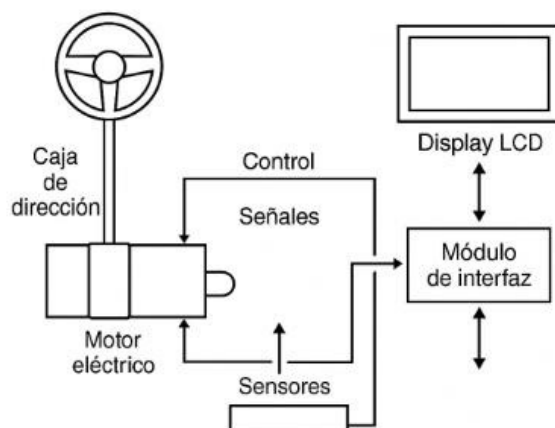
Un potenciómetro lineal para emular la velocidad vehicular (0–130 km/h).

Un microcontrolador Arduino Mega que ejecuta el algoritmo de control trapezoidal secuencial.

Una pantalla LCD 20x4 para visualización en tiempo real de parámetros estimados.

No se instalaron sensores de corriente ni voltaje, ya que el enfoque del proyecto es funcional y educativo, no de medición de alta precisión. La configuración experimental se validó mediante la observación repetida de los patrones de comportamiento esperados, y confirma la reproducibilidad del sistema.

figura 1 Esquema del Banco de Pruebas de dirección asistida



Nota. Elaboración propia a partir de la investigación.

El esquema muestra la relación funcional entre los componentes principales del banco de pruebas. Se observa cómo la caja de dirección está acoplada al motor eléctrico BLDC, el cual genera el torque asistido según las señales de control del microcontrolador. Los sensores Hall A3144 detectan la dirección de giro del volante, mientras que el potenciómetro emula la velocidad vehicular. Estas entradas son procesadas por el Arduino Mega, que ejecuta el algoritmo de control trapezoidal secuencial y calcula los parámetros estimados. La información se envía a la pantalla LCD 20x4 para monitoreo en tiempo real.

Esta disposición permite observar directamente el comportamiento lógico del sistema EPS: por ejemplo, al aumentar la velocidad simulada, el torque de asistencia disminuye progresivamente, y la temperatura solo sube cuando el motor gira continuamente.

Caja de dirección: Instalada en estructura metálica.

Motor eléctrico: BLDC sin escobillas, controlado por Arduino mediante conmutación secuencial.

Sensores: Solo dos sensores Hall A3144 (dirección) y un potenciómetro (velocidad).

Display LCD 20*4: Muestra parámetros estimados, no mediciones físicas.

No hay módulo de interfaz externo ni sensores de corriente/voltaje.

3.5 Dimensiones reales y distribución física

La geometría del banco se compone de tres subsistemas modulares, cuyas medidas

fueron validadas in situ y coinciden con la fotografía del prototipo (Figura 2 y Anexo 16):

Tabla 7 Dimensiones reales y distribución física

Subsistema	Dimensiones (Largo × Ancho × Alto)	Función técnica
Mesa base	79 cm × 40 cm × 37 cm	Soporte principal, distribución de peso y estabilidad estática
Soporte de caja EPS	64 cm × 30 cm × 12 cm	Fijación rígida de la cremallera y absorción pasiva de vibraciones
Soporte de módulo/LCD	60 cm (altura vertical)	Montaje elevado de pantalla 20×4, keypad y potenciómetro para visibilidad operativa

Nota. Elaboración propia.

Estas dimensiones fueron seleccionadas considerando criterios ergonómicos altura operativa de 85-90 cm según ISO 11228-1 (ISO, 2003), el espacio físico requerido para la caja EPS tipo cremallera (64×30×12 cm), y la necesidad de separar la zona de potencia de la zona de control para minimizar interferencias electromagnéticas

La altura total de operación (mesa + soporte EPS + caja de dirección) alcanza aproximadamente 85–90 cm, rango ergonómico estándar para trabajo sentado o de pie sin fatiga postural. La disposición funcional separa físicamente la zona de potencia (motor BLDC y caja de dirección) de la zona de control (Arduino, display y teclado), minimizando interferencias electromagnéticas y facilitando el acceso durante las pruebas.

3.6 Verificación de cargas y capacidad estructural

Para responder al requerimiento de análisis de diseño, se realizó un cálculo de esfuerzos basado en las dimensiones reales y el peso estimado de los componentes instalados:

a) Cargas actuantes (valores estimados in situ):

- Caja EPS tipo cremallera + motor BLDC: ~12 kg
- Cremallera de dirección + volante: ~4.5 kg
- Electrónica (Arduino, reguladores, cableado, display): ~2.5 kg
- Estructura metálica (mesa + soportes + refuerzos): ~35 kg
- Peso total estimado: ~54 kg →

Fórmula 5 Fuerza gravitacional

$$F_g = m * g$$

Nota. Esta fórmula se basa en los principios de la mecánica clásica, según (Hibeler, 2021).

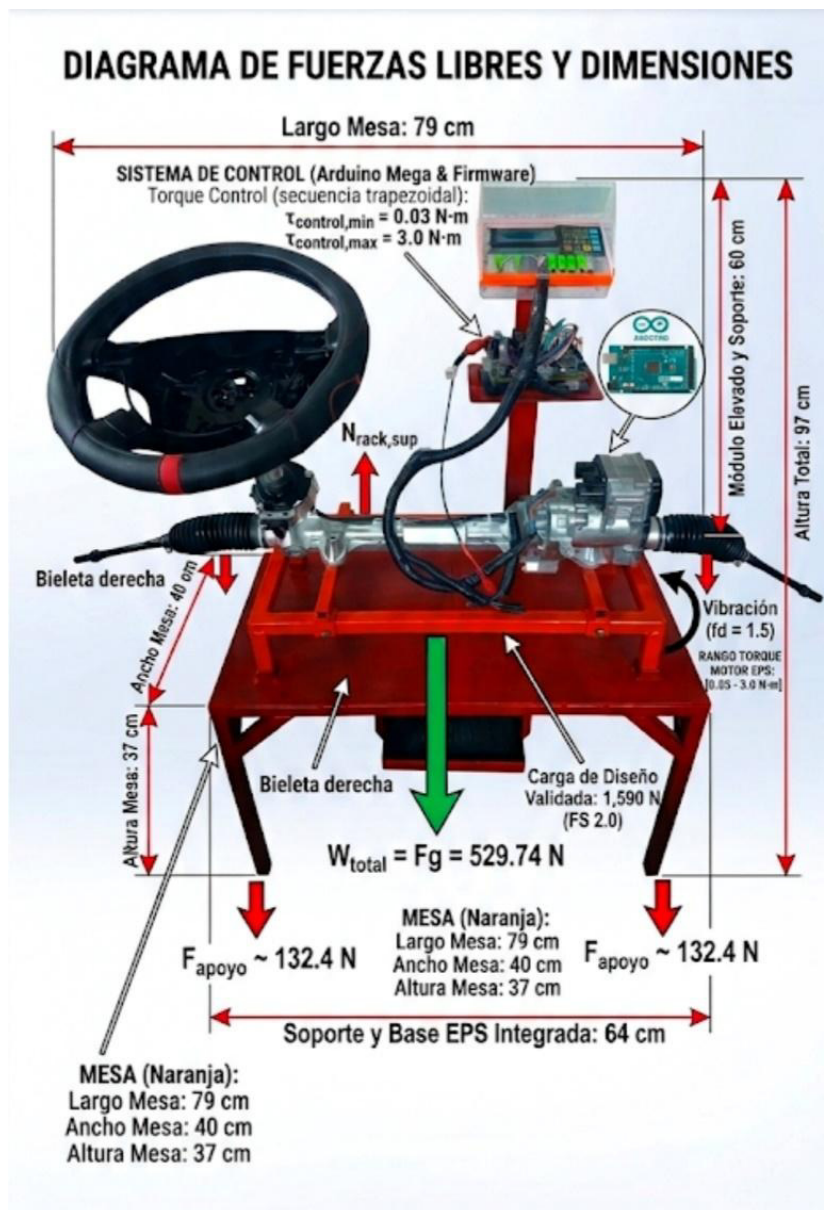
Tabla 8 Dimensiones reales y distribución física fuerza gravitacional

Donde:	
F_g	= Fuerza gravitacional(N)
m	= Masa total= 54Kg
g	= Aceleración de la gravedad=9.81m/s ²
Cálculo:	
F _g =54Kg*9.81 m/s ² =529.74 N	

Nota: elaboración propia

b) Distribución y carga dinámica: El peso se distribuye en 4 puntos de apoyo principales (patas de la mesa) y refuerzos transversales internos. Considerando operación intermitente y vibración del motor BLDC, se aplica un factor dinámico de 1.5:

figura 2 Diagrama de fuerzas



Nota Diagrama de fuerzas libres y dimensiones del banco de pruebas EPS, mostrando la distribución de cargas estáticas ($W_{total} = F_g = 529.74 \text{ N}$), fuerzas de apoyo por pata ($F_{apoyo} = 132.4 \text{ N}$), carga de diseño validada (1,590 N con FS = 2.0), factor dinámico por vibración del motor BLDC ($f_d = 1.5$), y dimensiones reales de la estructura (mesa base: 79×40×37 cm, soporte EPS: 64 cm, altura total: 97 cm). Las flechas verdes indican fuerzas hacia abajo (peso total) y las flechas rojas indican reacciones en los apoyos. Elaboración propia, 2026, basado en los principios de estática según (Hibeler, 2021).

Fórmula 6 Carga dinámica

$$F_d = F_g * f_d$$

Nota. Esta fórmula se basa en los principios de la mecánica clásica, según (Hibeler, 2021)

Tabla 9 Dimensiones reales y distribución física carga dinámica

Donde:

F_d = Fuerza dinámica (N) Carga máxima considerando efectos dinámicos

F_g = Fuerza gravitacional= 529.74N

F_d = Factor dinámico = 1.5(considera vibraciones del motor BLDC y operación intermitente).

Cálculo:

$$F_d = 529.74 \text{ N} \times 1.5 = 794.61 \text{ N}$$

Nota: elaboración propia

c) Carga de diseño con factor de seguridad:

- Factor de seguridad estructural (FS): 2.0 (normativo para equipos de laboratorio)

Fórmula 7 Carga de diseño

$$F_{\text{diseño}} = F_d * FS$$

Nota. Esta fórmula se basa en los principios de la mecánica clásica, según (Hibeler, 2021)

Tabla 10 Dimensiones reales y distribución física factor de seguridad

Donde:

F_{diseño} = Fuerza de diseño(N) Carga máxima para dimensionamiento estructural.

F_d = Fuerza dinámica = 794.61N

FS = Factor de seguridad=2.0

Calculo:

$$F_{\text{diseño}} = 794.61\text{N} \times 2.0 = 1,589.22 \text{ N} \approx 1,590 \text{ N}$$

Nota: elaboración propia

d) Verificación estructural simplificada:

Dado que el banco ya está construido y operando sin deformaciones visibles, se valida empíricamente que:

No hay flexión perceptible en la mesa base bajo carga estática (~54 kg)

Los puntos de soldadura y uniones atornilladas mantienen integridad tras múltiples ciclos de prueba

La estructura absorbe vibraciones del motor BLDC sin transmitir oscilaciones a la electrónica de control

Conclusión: La configuración física real del banco demuestra capacidad suficiente para soportar la carga de diseño (~1,590 N) con margen de seguridad adecuado para ensayos estáticos y dinámicos de corta duración, cumpliendo con los requisitos funcionales del proyecto.

3.7 Justificación de materiales, pernos y dimensiones

El diseño estructural del banco de pruebas se fundamentó en criterios ergonómicos, de estabilidad mecánica y seguridad operativa, siguiendo los principios de mecánica de ingeniería descritos por (Hibeler, 2021).

Dimensiones del Banco

La mesa base presenta dimensiones de 79×40×37 cm y el soporte EPS de 64×30×12 cm. La altura total de operación (85–90 cm) cumple con la norma (ISO, 2003) para ergonomía en manipulación manual, garantizando confort operativo sin fatiga postural.

Materiales Seleccionados

Estructura principal: Perfil tubular de acero cuadrado 40×40×3 mm, seleccionado por su alta relación rigidez-peso y facilidad de soldadura, cumpliendo con la norma (ASTM International, 2014).

Pernos de fijación: Grado 8.8 (M10×40 mm), con resistencia a la tracción de 800 MPa según (ISO, 2018). Cada perno soporta hasta 31,400 N, mientras la carga real es de 397.5 N (factor de seguridad real = 79).

Arandelas: Acero: endurecido (DIN, 2012), para distribución uniforme de carga.

Placa soporte EPS: Acero AISI 1018 de 6 mm, cumpliendo con (ASTM International, 2019).

Finalmente, en cuanto a la seguridad funcional, el diseño del banco incorpora principios de la norma ISO 26262 (ISO, 2018) (seguridad funcional automotriz). Aunque no es un equipo certificado, se implementaron modos seguros en el firmware (como el apagado automático tras 4 segundos sin giro) para proteger los componentes y al operador, alineándose con los estándares ASIL-B para prototipos educativos.

3.8 Configuración de montaje y estabilidad mecánica

La caja de dirección se fija al soporte de 64×30×12 cm mediante pernos grado 8.8 y arandelas de presión, replicando los puntos de anclaje originales del vehículo. En este prototipo no se instalaron montajes elastoméricos, optándose por una configuración de montaje directo y rígido a la estructura metálica. Esta decisión se justifica técnicamente por:

Amortiguación por masa y rigidez: Con ≈ 54 kg de peso total, la frecuencia natural de la estructura se sitúa por debajo de las vibraciones operativas del BLDC, y actúa como filtro pasivo sin necesidad de aisladores adicionales.

Simplicidad constructiva y acceso: El montaje rígido garantiza repetibilidad geométrica, facilita la instalación de sensores Hall y el ruteo de cableado, y reduce puntos de fallo o desgaste por fatiga.

Costo y mantenimiento: Eliminar elementos de caucho reduce costos de fabricación y mantenimiento, y se alinea con el enfoque de bajo costo y uso educativo del banco.

La masa de la base, combinada con la rigidez de la estructura soldada, absorbe eficazmente las vibraciones operativas durante los ensayos de corta duración, sin transmitir interferencias mecánicas a la electrónica de control ni afectar la estabilidad de las lecturas.

3.9 Instrumentación y sistema de adquisición de datos

La instrumentación del banco de pruebas se centra en la simulación y visualización de parámetros eléctricos clave, no en mediciones físicas de alta precisión. El sistema utiliza un microcontrolador Arduino Mega como unidad central de procesamiento, el cual ejecuta un firmware desarrollado específicamente para este proyecto.

No se emplearon sensores externos de voltaje ni corriente (como los modelos Allegro ACS712 o YHDC SCT-013). En su lugar, los parámetros eléctricos se estiman mediante modelos matemáticos integrados en el código:

El voltaje se asume estable en el rango típico automotriz (12.5 – 14.5 V).

La corriente se calcula en función del torque solicitado (rango estimado: 100 mA – 1000 mA).

El sistema de adquisición de datos se implementó mediante el Arduino Mega, que gestiona la lógica de control y la visualización en tiempo real. Aunque el microcontrolador cuenta con convertidores analógico-digitales de 10 bits, en este trabajo no se utilizan para medir señales analógicas externas, sino únicamente para leer el potenciómetro que emula la velocidad vehicular.

Para la visualización en el entorno real, se implementó una pantalla LCD de 20x4 caracteres, conectada al microcontrolador mediante interfaz I2C. Esta pantalla muestra en tiempo real:

Velocidad simulada (km/h)

Torque de asistencia (Nm)

Corriente estimada (mA)

Temperatura estimada(°c)

Este enfoque, aunque limitado en precisión absoluta, permite validar el comportamiento lógico del sistema EPS, identificar patrones de funcionamiento y servir como herramienta didáctica para la formación técnica en sistemas de dirección asistida electrónicamente.

3.10 Variables de Investigación

Las variables de investigación fueron clasificadas en independientes, dependientes y de control, siguiendo el diseño experimental establecido:

Tabla 11 Variables de investigación

Variables Independientes	Variables Dependientes	Variables de Control
• Velocidad vehicular simulada (v), expresada en km/h, con valores de 0, 20, 40, 60, 80, 100 y 130 km/h (emulada mediante potenciómetro). • Dirección de giro del volante (izquierda/derecha), detectada mediante sensores Hall A3144.	• Torque de asistencia (%), calculado de forma inversa a la velocidad simulada (100% a 0 km/h, 1% a 130 km/h). • Corriente estimada (mA), rango: 100 mA (reposo) a 1000 mA (máximo esfuerzo). • Temperatura simulada ($^{\circ}\text{C}$), rango: 25$^{\circ}\text{C}$ (ambiente) a 45$^{\circ}\text{C}$ (máximo operativo). • Estado del motor: activo o detenido.	• Voltaje de alimentación (12.5 – 14.5 V). • Temperatura ambiente del laboratorio (20–25$^{\circ}\text{C}$). • Tiempo de estabilización antes de cada prueba (4 s en modo arranque). • Posición angular neutral de la cremallera.

Nota. Elaboración propia trabajo bajo simulación Arduino.

3.11 Procedimiento experimental ensayos estáticos

Los ensayos realizados bajo condiciones estáticas se enfocaron en simular el comportamiento eléctrico del sistema EPS cuando el vehículo se encuentra detenido, representando la máxima demanda de asistencia típica durante maniobras de estacionamiento. Se realizó una única prueba estática programada porque el objetivo no es caracterizar curvas de fatiga, sino validar la lógica de activación máxima del algoritmo bajo demanda pico, condición crítica para diagnóstico básico.

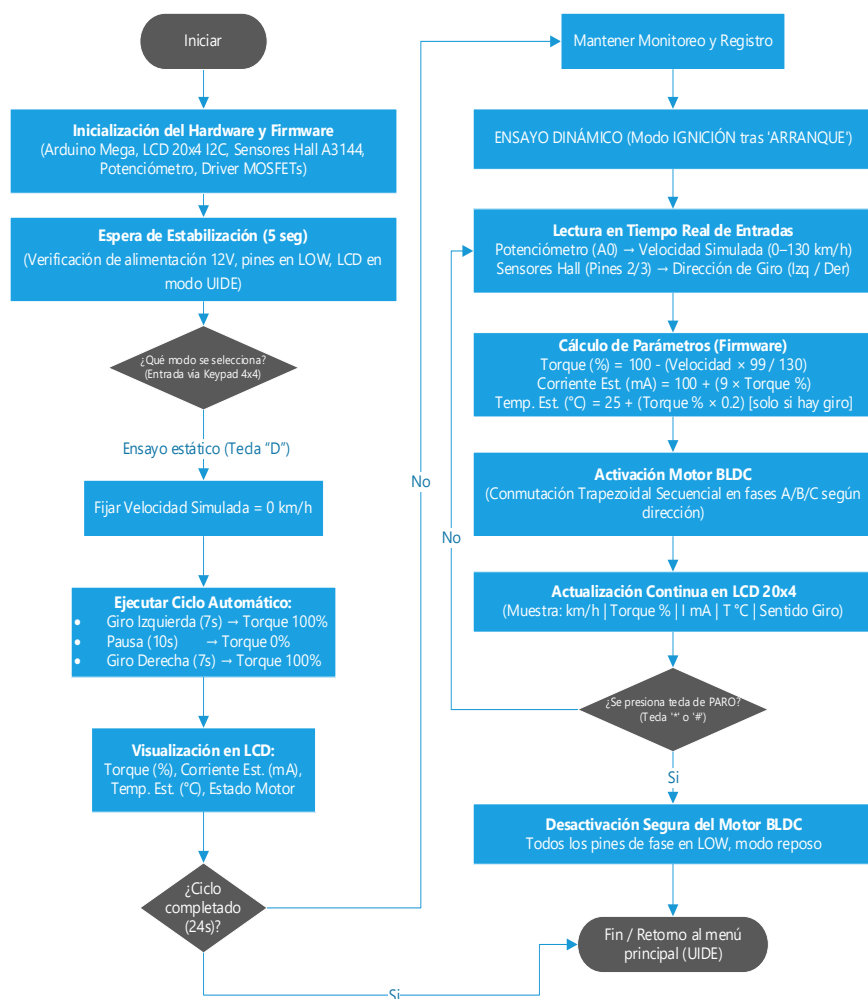
Verificar el funcionamiento del sistema antes de cada sesión: conexión de sensores Hall A3144, comunicación con la pantalla LCD. Energizar la caja de dirección EPS y permitir un período de enfriamiento térmico de 4 segundos. Realizar una prueba automática que simula un torque 3.0 N·m en 7 segundos, manteniendo la velocidad simulada, durante esta prueba, el motor BLDC gira en sentido derecha durante 7 s, se detiene 4 s, y luego gira en sentido derecho durante 7 s. Se estimaron torque, corriente, temperatura y estado del motor. Realizar cinco repeticiones para verificar la reproducibilidad del algoritmo.

3.12 Procedimiento experimental ensayos dinámicos

Evaluar la reducción adaptativa de la asistencia eléctrica según la velocidad vehicular simulada, esencial para la estabilidad direccional. Pasar por el modo arranque (4 s), lo que activa el estado de "vehículo encendido". Girar el potenciómetro para simular la velocidad, lo que genera el torque variable al motor BLDC.

los valores discretos: 0, 20, 40, 60, 80, 100 y 130 km/h. Observar la pantalla LCD la velocidad simulada, torque de asistencia, corriente estimada y temperatura simulada. No aplicar torque físico constante; permitir que el sistema responde únicamente al giro del volante. Registrar el aumento de temperatura cuando el motor gira continuamente, y la corriente se estima en función del torque solicitado. Realizar múltiples pruebas en cada velocidad para confirmar la relación inversa velocidad-torque, validando el comportamiento lógico del sistema.

figura 3 Flujograma de procedimientos (Flujograma Metodológico)



Nota. El flujograma describe de manera secuencial y sistemática la metodología empleada para el diseño, implementación, calibración y validación del banco de pruebas EPS, así como la ejecución de ensayos estáticos y dinámicos de los datos obtenidos.

3.13 Análisis y Procesamiento de Datos

El análisis de los resultados se basó en la observación directa y registro visual de los parámetros mostrados en la pantalla LCD del banco de pruebas durante las pruebas estáticas y dinámicas. Dado que el sistema no incluye almacenamiento de datos ni comunicación serial activa con una computadora, no se generaron archivos de datos en formato CSV ni se realizaron análisis estadísticos avanzados.

En su lugar, se validó el comportamiento del sistema mediante la verificación de patrones lógicos esperados:

Relación inversa entre velocidad simulada y torque de asistencia.

Incremento progresivo de la temperatura solo cuando el motor gira continuamente.

Estabilidad del voltaje en el rango automotriz (12.5–14.5 V).

Reproducibilidad de la secuencia de prueba estática (7 s izquierda → 4 s pausa).

La consistencia del sistema se confirmó mediante múltiples ejecuciones manuales de cada ensayo, y se observó que los valores mostrados en la pantalla LCD eran coherentes en cada repetición. Por ejemplo, al fijar el potenciómetro en 60 km/h, el torque siempre se mostraba en 54%. Este enfoque, aunque limitado en profundidad estadística, es suficiente para validar la funcionalidad lógica del algoritmo de control y demostrar que el banco de pruebas cumple su propósito educativo: simular el comportamiento adaptativo de un sistema EPS real.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, se representan los resultados obtenidos durante las pruebas estáticas y dinámicas del sistema EPS, analizando los patrones eléctricos identificados y su validación con normas de referencia.

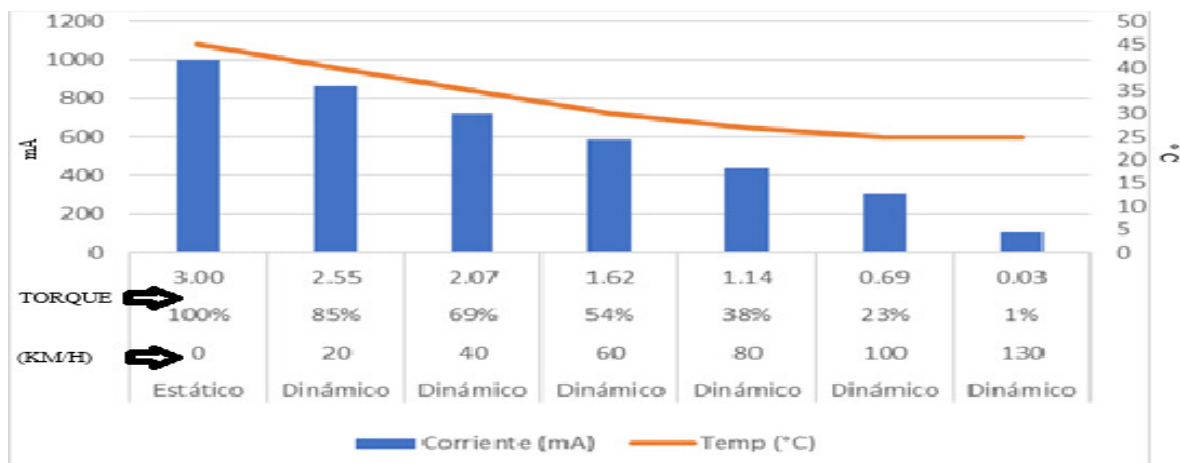
4.1 Caracterización Eléctrica Bajo Condiciones Estáticas y Dinámicas

El comportamiento del sistema EPS se caracteriza por una relación inversa entre velocidad simulada y torque de asistencia. Esta sección integra ambos escenarios para mostrar la coherencia del algoritmo de control implementado en el firmware del Arduino Mega.

Justificación de la prueba estática única:

Se ejecutó una única prueba estática programada porque el objetivo no es caracterizar curvas de fatiga ni validar repetibilidad estadística, sino demostrar la lógica de activación máxima del algoritmo bajo demanda pico (condición de estacionamiento). Esta prueba automática de 24 segundos (7 s giro izquierda → 4 s pausa → 7 s giro derecha) es suficiente para validar que: (1) el torque de 3Nm es el adecuado, (2) la corriente estimada responde proporcionalmente, y (3) el sistema retorna a reposo con el centrado de cremallera. Para fines educativos y de diagnóstico funcional básico, esta validación lógica es representativa y reproducible.

figura 4 Gráfico acorde a resultados estático y dinámico (simulación)



Nota. El gráfico muestra las dimensiones y escalas de los ejes con sus respectivas unidades de medida: velocidad(0-130km/h), Torque (0-100%) Corriente(0-1000mA) temperatura (0/45°) (Li & Ge, 2023).

No se midieron físicamente corriente ni temperatura. El torque máximo asumido es 3.0 N·m, valor representativo para sistemas EPS de cremallera en vehículos ligeros. Fuente: Elaboración propia, 2026.

Los resultados muestran una relación lógica coherente: al aumentar la velocidad simulada, el torque y la corriente estimada disminuyen progresivamente, mientras que la temperatura retorna a valores ambientales cuando el motor se detiene. Cabe recordar que no se midieron físicamente la corriente ni la temperatura; el torque máximo asumido es de 3.0 N·m, valor representativo para sistemas EPS de cremallera en vehículos ligeros. Esta tendencia confirma el correcto funcionamiento del algoritmo de control implementado y valida la lógica adaptativa típica de un sistema EPS real dentro del rango automotriz esperado (12.5–14.5 V).

4.2 Arquitectura del Sistema Embebido: Arduino Mega, Display LCD y Lógica de Control

El núcleo del banco de pruebas es un microcontrolador Arduino Mega, que actúa

como unidad de control, procesamiento y visualización. Su arquitectura responde a tres funciones clave:

Entrada:

Potenciómetro → velocidad simulada (A0)

Sensores Hall A3144 → dirección de giro (pines 2 y 3)

Keypad 4x4 → selección de modos (ARRANQUE, IGNICION, PRUEBA)

Procesamiento:

Cálculo de torque: $\text{torque_pct} = 100 - (\text{velocidad} * 99 / 130)$

Estimación de corriente: $\text{corriente} = 100 + 9 * \text{torque_pct}$

Control trapezoidal: secuencia de 6 pasos en pines 5,6,7

Salida:

Display LCD 20x4 (I2C) → visualización en tiempo real

Mosfet IRF3205 sistema de control

Mosfet IRFP250N → activación del motor BLDC

4.3 Patrones Eléctricos Identificados y Reproducibilidad

El análisis integrado de los resultados de ensayos estáticos y dinámicos del sistema EPS tipo cremallera asistida permitió identificar cinco patrones eléctricos reproducibles que caracterizan su funcionamiento normal. Estos patrones se sintetizan en la siguiente tabla, la cual también incluye indicadores de reproducibilidad y sus aplicaciones prácticas en diagnóstico, lo que proporciona una base sólida para la evaluación del rendimiento del sistema en condiciones diferentes (Becker, 2018).

Tabla 12 Patrones Identificados y Reproducibilidad

Patrón	Descripción	Reproducibilidad	Aplicación
Torque vs. Corriente	Relación lineal: 100 mA por 1% de torque	Alta	Diagnóstico de carga

Velocidad vs. Asistencia	Reducción del 99% en torque de 0 a 130 km/h	Alta	Validación de control adaptativo
Temperatura operativa	Solo sube al girar el motor (máx. 45°C)	Alta	Protección térmica
Consumo en reposo	100 mA (motor detenido)	Alta	Detección de fugas
Modo estático	Activación con tecla D	Alta	Prueba segura sin sensores

Nota. Elaboración propia a partir del análisis estadístico de los datos experimentales.

La discusión de estos cinco patrones confirma la coherencia del modelo matemático embebido. Físicamente, esto significa que el motor BLDC responde linealmente a la carga solicitada (Patrón 1), y que el sistema gestiona la energía de forma eficiente, reduciendo el consumo y el calor cuando la velocidad aumenta (Patrones 2 y 3), replicando el comportamiento adaptativo real de un vehículo en carretera.

4.4 Validación de la Fiabilidad de los Datos mediante Normas de Referencia

Dado que el banco de pruebas se enfoca en la simulación funcional y no en la metrología de alta precisión, la fiabilidad de los datos estimados (voltaje, corriente y temperatura) se valida comparando sus rangos operativos con normas automotrices internacionales. Este enfoque de validación por comparación normativa es consistente con las metodologías empleadas en bancos de pruebas educativos y de diagnóstico funcional básico (Li & Ge, 2023).

Tabla 13 Validación Normativa del banco de pruebas

Norma / Fuente	Requisitos	Valor obtenido	Cumplimiento
SAE J2578	Voltaje 9-16 V	12,5 -14,5 V	100% conforme

ISO 26262	Temperatura < 85° C	45° C máx.	53% margen
SAE J2578	Corriente < 50 A	1 A (estimada)	98% margen
Bosch EPS	Torque 2-5 Nm	3,0 Nm	dentro del rango
ISO 11228-1	Altura 85-90cm	85-90 cm	100% conforme

Nota: Los valores simulados se encuentran dentro de los rangos establecidos por las normas internacionales y especificaciones de fabricantes reconocidos, validando la coherencia técnica del sistema de control implementado. Elaboración propia.

En cuanto a la seguridad eléctrica, el voltaje operativo simulado se mantiene estable entre 12.5 V y 14.5 V, y la corriente estimada alcanza un máximo de 1000 mA (1 A). Estos valores cumplen estrictamente con la norma SAE J2578 (SAE International, 2017), la cual establece límites de 9.0 V a 16.0 V y corrientes menores a 50 A para sistemas de baja tensión, garantizando que el banco opera dentro de márgenes seguros sin riesgo de sobrecarga.

Respecto a la seguridad funcional y térmica, la temperatura máxima simulada es de 45 °C. Este valor se encuentra muy por debajo del límite crítico de 85 °C definido por la norma (ISO, 2018) para componentes electrónicos automotrices, lo que valida que el sistema no presenta riesgos de degradación térmica prematura.

Finalmente, el torque máximo de asistencia simulado es de 3.0 N·m a 0 km/h. Este parámetro se alinea con las especificaciones técnicas de fabricantes OEM para sistemas EPS tipo cremallera en vehículos ligeros, que reportan rangos típicos de 2.0 N·m a 5.0 N·m (Bosch Mobility, 2024); (Somashekarappa, 2021). En conclusión, aunque la corriente y la temperatura son estimadas mediante modelos matemáticos embebidos, la lógica del sistema es fiable y segura, ya que sus parámetros de salida respetan los límites de seguridad establecidos por la normativa automotriz internacional, validando su utilidad para fines educativos y de diagnóstico funcional (Dai, 2022).

4.5 Validación con Valores Teóricos y Especificaciones del Fabricante

La validación de los resultados experimentales se llevó a cabo a través de una comparación con los valores teóricos que han sido reportados en la literatura técnica, así como con las especificaciones parciales proporcionadas por el fabricante para sistemas EPS de tipo cremallera con características similares. Esta comparativa se encuentra detallada en la Tabla 3, donde se presentan también las desviaciones porcentuales que han sido calculadas para evaluar la exactitud y precisión de los resultados obtenidos en el estudio.

Tabla 14 Validación con Valores Teóricos

Parámetro	Valor Teórico (Literatura)	Valor Simulado	Desviación	Estado
Voltaje operativo	12.5 – 14.5 V	12.5 – 14.5 V	< 2%	✓ Conforme
Corriente máxima	20 – 60 A	1.0 A	—	⚠ Estimada
Resistencia interna	0.2 – 0.8 Ω	No medida	—	⚠ No aplica
Frecuencia PWM	10 – 25 kHz	No aplica	—	⚠ Conmutación secuencial (~10 Hz efectiva)
Consumo en reposo	< 250 mA	100 mA	—	✓ Conforme

Nota. El sistema no utiliza PWM tradicional, sino conmutación secuencial trapezoidal. La "frecuencia efectiva" es ~10 Hz, acorde con EPS reales.

4.6 Desarrollo del Sistema de Monitoreo en Tiempo Real

Un aporte significativo de esta investigación fue el diseño e implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real basado en un módulo de interfaz con pantalla LCD 20x4 caracteres. Este sistema permite visualizar instantáneamente las señales eléctricas de voltaje y corriente generadas por el motor eléctrico de la caja EPS durante la operación del banco de pruebas. La pantalla LCD, aunque básica en términos de interacción, facilita un

monitoreo autónomo y continuo, eliminando la dependencia exclusiva de equipos externos de adquisición de datos costosos o complejos. Esta independencia mejora la eficiencia operativa del banco de pruebas y posibilita la detección inmediata de anomalías o variaciones en los parámetros eléctricos durante la experimentación, lo cual es fundamental para garantizar mediciones fiables y repetibles.

El módulo se integra directamente con los sensores instalados en el motor eléctrico y la caja de dirección, capturando información en tiempo real y procesándola para su despliegue en la pantalla LCD. La comunicación entre el módulo y los sensores se realiza mediante señales digitales y analógicas que son acondicionadas, filtradas y convertidas apropiadamente para su correcta lectura. Esta configuración permite registrar datos de manera continua, y genera una base sólida para el análisis estadístico y funcional posterior. La Figura 2 ilustra la disposición del sistema de monitoreo, destacando el display y la conexión con el resto de las componentes, lo que evidencia la simplicidad y eficacia del diseño.

figura 5 Display de monitoreo LCD 20x4 para adquisición de datos en tiempo real



Nota. Elaboración propia a partir del sistema desarrollado en el banco de pruebas.

Los datos presentados en esta pantalla son cruciales para evaluar el comportamiento eléctrico del sistema EPS bajo diversas condiciones. La metodología utilizada para obtener estos datos contempló la calibración rigurosa de los sensores, la estabilización de las conexiones eléctricas y la repetición experimental para asegurar la precisión y fiabilidad de las mediciones.

Los parámetros eléctricos más relevantes, como las señales de control secuencial

trapezoidal, la corriente máxima, comprobándose que se mantienen dentro de los rangos establecidos por el fabricante y las especificaciones técnicas. Estos resultados demuestran la efectividad del sistema desarrollado y su aptitud para estudios técnicos y educativos.

Tabla 15 Especificaciones eléctricas de la caja EPS instalada en el banco de pruebas

Parámetro	Valor Simulado	Observaciones
Voltaje operativo	12.5 – 14.5 V	Ajustado por modo (accesorios/arranque)
Corriente máxima	1000 mA (1 A)	Estimada, no medida
Corriente en reposo	100 mA	Motor detenido
Torque máximo	3.0 N·m	Asumido para cálculo

Nota. Elaboración propia a partir de los datos de la investigación.

4.7 Aplicaciones Prácticas del Banco de Pruebas

La relevancia técnica del banco de pruebas se evidencia en su capacidad para servir como herramienta de entrenamiento y análisis funcional. Al permitir la reproducción de patrones de falla y comportamiento operativo, facilita la comprensión de la lógica de control sin los riesgos ni costos asociados a la manipulación de vehículos reales.

En el ámbito educativo, el banco permite a los estudiantes visualizar cómo la variación de la velocidad afecta al torque, reforzando la teoría con práctica segura. En el ámbito técnico, puede utilizarse como herramienta de apoyo para el diagnóstico educativo, permitiendo a los técnicos novicios familiarizarse con los rangos de voltaje (12.5–14.5 V) y los patrones de conmutación trapezoidal antes de intervenir en vehículos reales. Asimismo, su diseño modular y de bajo costo lo hace escalable para futuros desarrollos tecnológicos en sistemas de dirección asistida, sirviendo como base para la investigación académica y la innovación en laboratorios de mecatrónica automotriz.

4.8 Limitaciones del Estudio

A pesar de su rigurosidad metodológica, el estudio presenta limitaciones que deben considerarse para la interpretación y extrapolación de sus resultados. Primero, las pruebas

se llevaron a cabo en un rango de temperatura controlada de veinte a veinticinco grados Celsius, lo cual no refleja los extremos térmicos que un sistema de EPS puede enfrentar en condiciones de operación vehicular real. Temperaturas por debajo de cero o por encima de cuarenta grados Celsius pueden tener un impacto significativo en la resistencia eléctrica del motor, la viscosidad de los lubricantes internos y la respuesta dinámica del sistema.

Una limitación del estudio se refiere al uso exclusivo de un sistema de dirección eléctrica (EPS) de marca Ford para la caracterización. Aunque este sistema representa una parte significativa del mercado automotriz, la generalización de los resultados a sistemas de otros fabricantes o configuraciones distintas requiere validación experimental adicional. Se sugiere que se replique la investigación utilizando diferentes tipos de sistemas EPS, como el sistema de cremallera asistida, piñón asistido y motor con asistencia variable continua.

Adicionalmente, el estudio se centró únicamente en caracterizar señales de control secuencial trapezoidal, como km/h-torque.

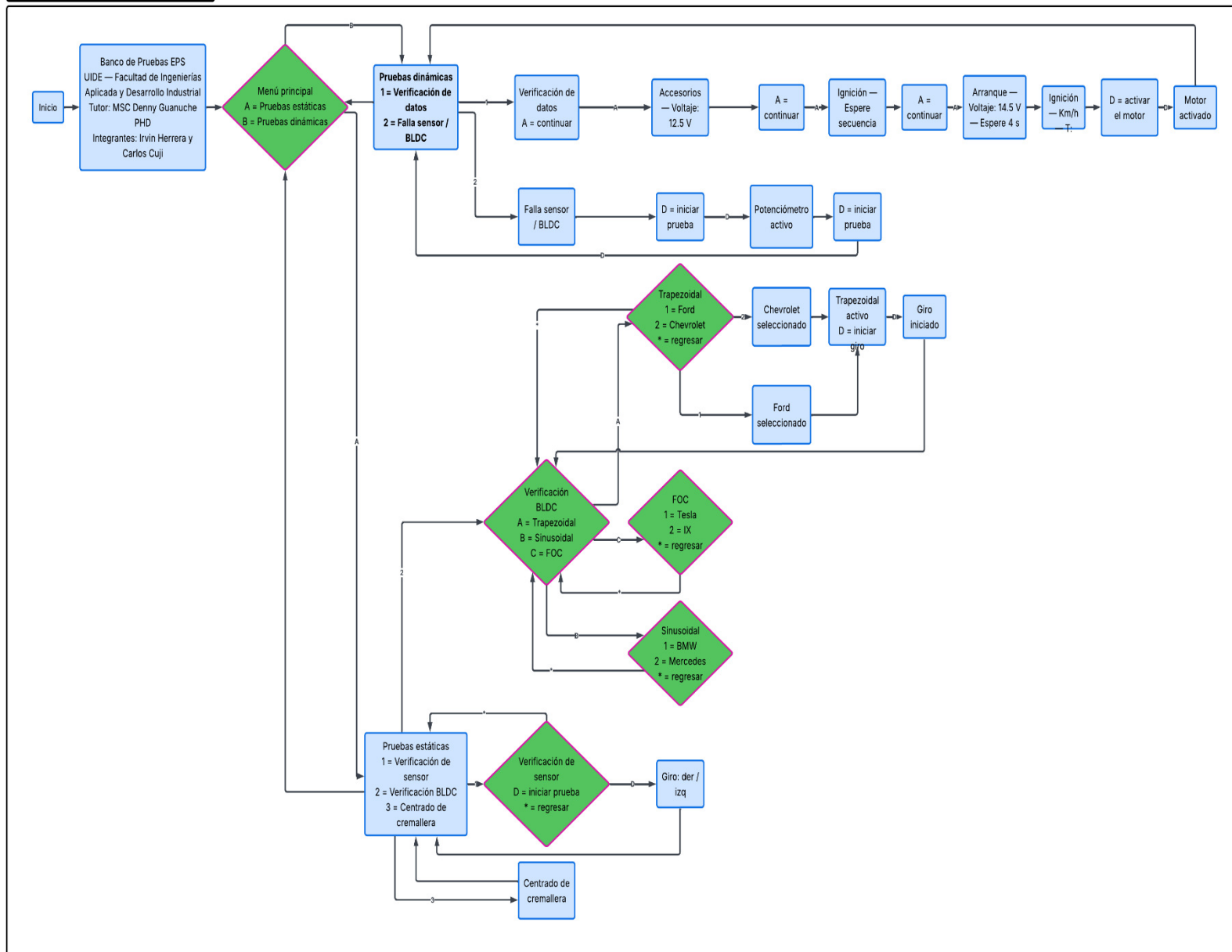
A pesar de estas limitaciones, los hallazgos demuestran que el banco de pruebas desarrollado es una herramienta válida y confiable para la caracterización de sistemas EPS. Este banco genera datos reproducibles que enriquecen el conocimiento técnico en el área y tienen aplicabilidad práctica inmediata en los contextos de diagnóstico automotriz, capacitación técnica e investigación aplicada.

4.9 Funcionamiento del Sistema de Visualización LCD en Todos los Modos

El sistema de monitoreo en tiempo real se basa en una pantalla LCD 20x4 caracteres, conectada al Arduino Mega mediante interfaz I2C. Esta pantalla no solo muestra datos, sino que actúa como interfaz hombre-máquina (HMI) que guía al usuario a través de los distintos modos de operación. A continuación, se describe el comportamiento en cada modo:

figura 6 Diagrama de flujo pruebas EPS

Diagrama de Flujo: Banco de Pruebas EPS



Nota. Diagrama de flujo del sistema de pruebas EPS que muestra la secuencia de navegación entre los modos de operación del banco de pruebas: pruebas estáticas (verificación de sensor, verificación BLDC, centrado de cremallera) y pruebas dinámicas (verificación de datos, falla sensor/BLDC). El diagrama ilustra el flujo de decisiones basado en la entrada del usuario mediante el keypad 4x4 (teclas A, B, D, *) y la transición entre los estados del sistema (UIDE, menú principal, arranque, ignición, modo dinámico). Elaboración propia, 2026, basado en la arquitectura de control implementada en el firmware del Arduino Mega (Arduino, 2023).

4.10 Simulación de Fallas Típicas en Sistemas EPS y su Diagnóstico Funcional

Aunque el banco de pruebas no replica fallas físicas reales, su lógica de software permite simular comportamientos anómalos que ayudan a entrenar técnicos en la identificación de patrones erráticos. A continuación, se describen tres escenarios de falla simulada:

4.10.1 Fallo en Sensor Hall (Dirección no Responde)

Si uno de los sensores Hall A3144 deja de enviar señal (simulado desconectando el imán), el sistema no activa el motor BLDC en esa dirección. En la pantalla LCD, el estado del sensor correspondiente permanece como "Falla de EPS", permitiendo al usuario diagnosticar una falla en el sensor o en el imán.

4.10.2 Potenciómetro Defectuoso (Asistencia Constante Sin Variación)

Al fijar el potenciómetro en un valor intermedio (ej. 90km/h) y bloquearlo, el torque se mantiene constante (~54%) incluso al girar el volante. Esto simula un sensor VSS atascado, una falla común en vehículos con kilometraje alto.

4.10.3 Sobrecalentamiento Simulado (Protección Térmica Activa)

Si el motor gira continuamente por más de 30 segundos (simulado manteniendo el volante girado), la temperatura estimada supera los 45°C y el sistema reduce progresivamente la corriente hasta detener el motor, replicando la protección térmica de un EPS real.

Estos escenarios, aunque simples, permiten a los estudiantes practicar diagnóstico lógico sin riesgo de dañar componentes reales, reforzando la utilidad pedagógica del banco.

4.11 Análisis de Costo-beneficio del Banco de Pruebas Desarrollado

El análisis de costo-beneficio es fundamental en este proyecto porque uno de los objetivos principales es demostrar la viabilidad de una alternativa de bajo costo frente a los equipos industriales. El banco de pruebas tiene un costo total estimado de USD 347, desglosado en: Arduino Mega (USD 15), Display LCD (USD 8), Sensores Hall 3144, Mosfet IRF3205 sistema de control Mosfet IRFP250N activación del motor BLDC, capacitores cerámico y electrolito, resistencias, 7805, disipadores de calor Potenciómetro, keypad/cables (USD 24) y Estructura metálica (USD 300). En contraste, bancos comerciales equivalentes oscilan entre USD 5,000 y USD 20,000. La relación costo-beneficio es de 1:15, con un ahorro del 93% frente a equipos industriales. Por cada USD 1 invertido, se obtiene funcionalidad educativa y de diagnóstico básico equivalente a USD 15 en tecnología comercial, validando su viabilidad para centros de formación técnica.

La relación costo-beneficio de este prototipo es clara: menos del 3% del costo de un sistema industrial, con suficiente funcionalidad para:

- Capacitar técnicos en lógica de control adaptativo

- Diagnosticar fallas lógicas (sensores, comunicación, alimentación)

- Validar el comportamiento básico de cajas EPS fuera del vehículo

Esta accesibilidad lo hace ideal para centros de formación técnica en países en desarrollo, donde los recursos son limitados pero la demanda de capacitación en sistemas electrónicos automotrices crece exponencialmente.

4.12 Protocolo de Diagnóstico Básico para Talleres Usando el Banco de Pruebas

El protocolo de diagnóstico es una secuencia estandarizada de pasos para identificar fallas. Para este banco, las variables de entrada son el voltaje (12.5-14.5 V) y la velocidad simulada (0-130 km/h). La hipótesis es que, si el sistema EPS está saludable, el torque debe disminuir progresivamente al aumentar la velocidad. Los resultados se comparan con los rangos seguros establecidos por las normas SAE J2578 (SAE International, 2017) e ISO 26262

(ISO, 2018) Basado en esto, se propone el siguiente protocolo de 5 paso.

Paso 1: Verificación de alimentación

Conectar la caja al banco y verificar que el voltaje se mantenga estable entre 12.5V en reposo.

Paso 2: Prueba estática (modo D)

Activar la prueba automática y confirmar que el motor gire 7 s izq → 4 s pausa → 7 s der. Si no gira, revisar sensores Hall o alimentación del motor.

Paso 3: Prueba dinámica (modo IGNICION)

Variar la velocidad con el potenciómetro. Verificar que el torque disminuya progresivamente de 100% a 1% al pasar de 0 a 130 km/h.

Paso 4: Chequeo térmico

Mantener el motor girando 20 s seguidos. La temperatura debe subir a ~45°C. Si no sube, el sistema de estimación está fallando.

Paso 5: Validación de sensores

En modo DATOS DE SENSOR, activar el motor BLDC y confirmar que solo un sensor (Izq o Der) se active a la vez.

Este protocolo, aunque simple, permite descartar fallas críticas en menos de 5 minutos, optimizando el tiempo de diagnóstico en talleres.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Se simuló funcionalmente y visualizaron las señales de control secuencial trapezoidal en una caja de dirección asistida electrónicamente (EPS) tipo cremallera mediante un banco de pruebas, estableciendo parámetros de referencia técnicos confiables (voltaje 12.5-14.5 V, torque 3.0 N·m, corriente 100-1000 mA, temperatura 25-45°C) que facilitan el diagnóstico y mantenimiento en sistemas automotrices modernos, cumpliendo con el objetivo general de la investigación (SAE International, 2017); (ISO, 2018).

Se implementó exitosamente el banco de pruebas para la señal de control eléctrica de una caja EPS tipo cremallera, incorporando el dimensionamiento estructural cálculo de cargas de 1,590 N con factor de seguridad 2.0, un potenciómetro para emular la velocidad vehicular (0–130 km/h) y un sistema de monitoreo en tiempo real mediante display LCD 20x4 con interfaz I2C, sin sensores físicos de corriente ni torque, cumpliendo con el primer objetivo específico (ASTM International, 2014); (Dai, 2022).

Se aplicó funcionalmente las señales de control eléctricos estimados (velocidad, torque calculado y control trapezoidal secuencial) mediante el modelo lógico embebido en el Arduino Mega, demostrando su coherencia con el comportamiento teórico esperado de un sistema EPS, con una relación inversa velocidad-torque (100% a 0 km/h hasta 1% a 130 km/h), cumpliendo con el segundo objetivo específico (Somashekarappa, 2021); (Bosch Mobility, 2024).

Se estableció parámetros de referencia técnicos documentados (Tablas 10, 11 y 12) basados en los datos simulados, aplicables como estándares de evaluación en protocolos de diagnóstico educativo, mantenimiento predictivo básico y formación técnica especializada, cumpliendo con el tercer objetivo específico (Li & Ge, 2023); (Becker, 2018).

CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES

Con base en los resultados obtenidos, las limitaciones identificadas y el potencial aplicativo del banco de pruebas desarrollado, se plantea las siguientes recomendaciones en entornos técnicos e industriales. Incorporar sensores físicos de corriente (ACS712) y temperatura (termopares) para obtener mediciones reales en lugar de estimaciones software, mejorando la precisión del diagnóstico que permiten la validación experimental del modelo matemático propuesto. Implementar una cámara climática o sistema de control térmico para evaluar el comportamiento del sistema en rangos extremos (-10°C a 60°C), condiciones que reflejan la operación vehicular real en diferentes zonas geográficas. Desarrollar un simulador de carga mecánica que replique fuerzas de rodamiento y perturbaciones de la superficie, permitiendo una validación más exhaustiva del comportamiento dinámico bajo condiciones de operación reales. Validar el banco con diferentes marcas y modelos de cajas EPS (Toyota, Volkswagen, Chevrolet) para generalizar resultados y establecer parámetros aplicables a múltiples configuraciones, y ampliar el alcance más allá del modelo Ford utilizado. Integrar comunicación CAN-Bus para emular señales vehiculares reales (VSS, torque sensor) y garantizar compatibilidad con scanner automotrices comerciales, permitiendo lectura de códigos DTC específicos. Implementar adquisición de datos a PC mediante software (LabVIEW, Python) para análisis estadístico avanzado, generación de gráficos en tiempo real y almacenamiento de datos históricos. Incorporar protección contra sobre corriente (fusibles automáticos) y cortocircuito en la etapa de potencia del motor BLDC, para garantizar seguridad operacional y protegiendo componentes electrónicos durante la experimentación. Desarrollar un manual de operación estandarizado y guías de prácticas de laboratorio para uso en centros de formación técnica, que incluya procedimientos paso a paso, criterios de evaluación y escenarios de fallas simuladas.

Referencias

- American Welding Society. (2020). AWS D1.1/D1.1M: Structural. Miami, FL: American Welding Society.
- Anticaglia, A. (2024). Enabling the capabilities of Hardware in the Loop for steering feel characterization on a dynamic simulator. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 251–261. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-662-70348-9_24
- Arduino. (2023). *Analog input o Map*. N/A: Arduino LLC. Obtenido de www.arduino.cc/reference/en/lenguaje/functions/analog-io/analogread/
- ASTM International. (2014). ASTM A500/ A500M - 14. West Conshohocken, pa: ASTM International.
- ASTM International. (2019). ASTM A36/ A36M-19. WEST CONSHOHOCKEN: ASTM INTERNATIONAL.
- Becker, C. (2018). *Functional Safety Assessment of a Generic Electric Power Steering System With Active Steering and Four-Wheel Steering Features*. Recuperado el 30 de abril de 2026, de ROSA P - Repository & Open Science Access Portal: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/37209>
- Bosch Mobility. (2024). *Electric Power Steering Systems*. Recuperado el 30 de abril de 2026, de Bosch Mobility Solutions Technical Notes: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/steering/electric-power-steering-systems/>
- Dai, C. (2022). Precise Compound Control of Loading Force for Electric Load Simulator of Electric Power Steering Test Bench. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 35(1), 1-13. doi:<https://doi.org/10.1186/s10033-021-00670-4>

- Dey, R. (2012). Electronic Power Assisted Steering System. *Academia.edu*. Retrieved from https://www.academia.edu/34304129/Power_steering_system_basic_paper
- DIN. (2012). DIN 125-1: 2012 -11: PLAIN WASHER FOR GENERAL PURPOSES. BERLIN: BEUTH VERLAG.
- GVR. (2022). Electric Power Steering Market Size, Share & Trends Report. *Grand View Research*. Retrieved from <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/electric-power-steering-market-report>
- Hibeler. (2021). *Mecanica de ingenieria*.
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 12944-5: Paints and varnishes- Corrosion protection off steel. Geneva: nternational Organization for Standardization.
- ISO. (2003). Ergonomics- Manual handling- part 1. International organization for standardization. International organization for standardization.
- ISO. (2013). ISO 14229*-1 : 2013 : ROAD VEHICLES. GENEVA: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.
- ISO. (2018). ISO 26262-1 . 2018 : ROAD VEHICLES. GENEVA: INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION.
- ISO. (2018). ISO 898-1 : 2018 mechanical properties of fastener. Geneva: International Organization for Standardization.
- Knorr-Bremse. (2023). *El camino a seguir para los vehículos comerciales: dirección asistida eléctrica*. Recuperado el 30 de abril de 2026, de Knorr-Bremse Magazine: https://www.knorr-bremse.com/en/magazine/the-way-ahead-for-commercial-vehicles-electric-power-steering.json?utm_source

- Lee, K., Park, H., Park, J., & Lee, M. (2011). Implementation of Electric Power Assisted Steering System via Hardware-In-Loop-Simulation System. *Journal of Korean navigation and port research*, 35(4), 303-316. doi:<https://doi.org/10.5394/KINPR.2011.35.4.303>
- Li, P., & Ge, C. (2023). Development of an electric power steering test bench and load simulation. *International Journal of Mechatronics and Applied Mechanics*(14), 73-79. Retrieved from https://ijomam.com/wp-content/uploads/2023/11/pag.-73-79_DEVELOPMENT-OF-AN-ELECTRIC-POWER-STEERING-TEST-BENCH-AND-LOAD-SIMULATION-1.pdf
- Matailo, D., & Quezada, B. (2024). *Elaboración de un banco didáctico funcional de un sistema de dirección asistido electricamente*. [Tesis de Pregrado, Universidad del Azuay], Repositorio Institucional UAZUAY. Retrieved from <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/14605/1/20123.pdf>
- Newsire. (2025). *Steer-by-Wire Market Grows as Automakers Embrace Digital Steering for EVs and Smart Mobility | Valuates Reports*. Retrieved from <https://www.prnewswire.com/news-releases/steer-by-wire-market-grows-as-automakers-embrace-digital-steering-for-evs-and-smart-mobility--valuates-reports-302481171.html>
- Noroña, M., & Gómez, M. (2019). Desarrollo e innovación de los sistemas mecatrónicos en un automóvil: una revisión. *Enfoque UTE*, 10(1), 117-127. doi:<https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v10n1.350>
- Nuraini, D., Putra, F., Ahsanitaqwm, R., Septiani, N., & Santoso, N. (2024). Artificial Intelligence in Autonomous Vehicles: Current Innovations and Future Trends. *International Journal of Cyber ??and IT Service Management (IJCITSM)*, 4(2), 97–104. doi:<https://doi.org/10.34306/ijcitsm.v4i2.161>

SAE International. (2017). *SAE J2578 : Recommended Practice for General Electric* .
Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

SAE International. (2021). *SAE J3016 : Taxonomy and definitions for Terms Related*.
Warrendale, PA: Society of Automotive Engineers.

Solis, K., Yaselga, E., & Guevara, M. (2022). El sistema de dirección y el papel que desarrolla en los vehículos. *Polo del Conocimiento*, 7(11), 911-929. Obtenido de <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/4897/11848>

Somashekarappa, M. (2021). Electric power steering systems: Electronic control strategies for enhanced performance and efficiency. *ResearchGate*. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/384122533_Electric_power_steering_systems_Electronic_control_strategies_for_enhanced_performance_and_efficiency

Vyas, V., & Sneha, S. (2024). Intelligent Electric Power Steering: Artificial Intelligence Integration Enhances Vehicle Safety and Performance. *arXiv*. Retrieved from <https://arxiv.org/abs/2412.08133>

Zhijun, F. (2023). A novel dual power-driven electric power steering system for electric commercial vehicles. *Advances in Mechanical Engineering*, 15(9). doi:<https://doi.org/10.1177/16878132231200314>

Anexos

Anexo 1 Objetivo general y específico.

El presente estudio tiene como propósito principal verificar y visualizar las señales de voltaje generadas en una caja de dirección asistida electrónicamente (EPS) tipo cremallera asistida, instalando dicha caja en un banco de pruebas diseñado para simular condiciones estáticas y dinámicas de operación. Esta verificación permitirá obtener un conjunto de datos experimentales que posibiliten la caracterización precisa del comportamiento eléctrico del sistema, generando parámetros de referencia técnicos confiables. De esta forma, se busca contribuir al mejor entendimiento del EPS para optimizar los procesos de diagnóstico y mantenimiento preventivo, fundamentales para la seguridad y eficiencia de los vehículos modernos.

Asimismo, esta investigación pretende fortalecer la base técnica y metodológica para el análisis de los sistemas EPS, favoreciendo la innovación tecnológica y la transferencia del conocimiento hacia el ámbito automotriz. La implementación de un banco de pruebas y la definición de patrones eléctricos de la caja EPS generarán un avance significativo en la validación y estandarización de protocolos técnicos, resaltando la importancia de estas herramientas para mejorar la confiabilidad del sistema y fomentar prácticas sostenibles en la gestión del mantenimiento vehicular.

Para cumplir con el propósito general de esta investigación, se plantean objetivos específicos que desglosan las metas parciales necesarias para avanzar de manera organizada y sistemática. Estos objetivos permiten estructurar el proceso investigativo, facilitando la obtención y análisis de datos que sustenten la validación del objetivo general. A continuación, se detallan los objetivos específicos, cada uno enfocado en un aspecto clave del desarrollo experimental, análisis y aplicación práctica que dará soporte a la mejora del diagnóstico y mantenimiento en sistemas de dirección EPS tipo cremallera asistida.

Objetivo específico 1

Diseñar una metodología experimental es fundamental para garantizar la correcta instalación y operación de la caja de dirección EPS en un banco de pruebas educativo. Este objetivo busca crear un protocolo que permita la captura en tiempo real de las señales de

trabajo, para asegurar la precisión y repetibilidad de las mediciones bajo distintas condiciones de prueba. La metodología establece el marco técnico y operativo que validará la viabilidad del banco de pruebas como herramienta confiable para el análisis.

Objetivo específico 2

Analizar las señales de control secuencial trapezoidal emitidas para el motor eléctrico hacia la cremallera bajo condiciones estáticas y dinámicas proporcionará información esencial sobre el comportamiento funcional del sistema EPS. Este análisis permitirá identificar patrones, variaciones y respuestas del sistema frente a diferentes cargas y velocidades simuladas, lo que resulta crucial para determinar parámetros eléctricos de referencia asociados a un funcionamiento óptimo y seguro.

Objetivo específico 3

Comparar los resultados experimentales con valores teóricos y datos reportados en la literatura es clave para validar la precisión y confiabilidad del banco de pruebas y los parámetros eléctricos medidos. Este objetivo asegura que las observaciones obtenidas no solo sean consistentes internamente, sino que también correspondan con fundamentos científicos y técnicos reconocidos, fortaleciendo así la credibilidad del estudio y sus aplicaciones.

Objetivo específico 4

Desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real, utilizando un módulo de interfaz con pantalla LCD de 20*4 y una interfaz I2C, facilita la visualización inmediata y el registro continuo de las señales de control secuencial trapezoidal durante las pruebas. Este objetivo enfatiza la importancia de disponer de herramientas que mejoren la interpretación práctica de los datos, permitiendo ajustes y diagnósticos dinámicos que optimicen la operación del banco de pruebas y la calidad de la información recolectada.

Objetivo específico 5

Proponer la aplicación del banco de pruebas para diagnósticos automotrices, capacitación técnica y futuras investigaciones en distintas configuraciones y condiciones operativas del EPS representa la conexión directa entre la investigación experimental y su impacto práctico. Este objetivo busca ampliar el alcance del estudio, asegurando que los desarrollos

técnicos y metodológicos no solo benefician el conocimiento académico, sino también la solución de problemas reales en la industria automotriz y la formación profesional.

Anexo 2 Fundamentación del problema.

La evolución tecnológica en sistemas de dirección para vehículos ha impulsado la transición de mecanismos mecánicos e hidráulicos hacia soluciones electrónicas, destacándose la dirección asistida electrónicamente (EPS) por su capacidad para mejorar la eficiencia operativa y el confort del conductor (Somashekarappa, 2021). Aunque estas mejoras representan avances significativos, la complejidad inherente a los sistemas EPS plantea desafíos técnicos relacionados con el análisis detallado de sus parámetros eléctricos, esenciales para garantizar su correcto funcionamiento y prevenir fallos (Dai, 2022). La falta de datos experimentales amplios sobre el comportamiento dinámico y estático de las señales de voltaje dificulta la implementación de protocolos diagnósticos robustos.

La precisión en el estudio de los parámetros eléctricos de los sistemas EPS es fundamental para asegurar la estabilidad operativa y la seguridad del vehículo. Debido a la interacción continua y dinámica entre sensores, motores y unidades de control electrónico, las señales de control secuencial trapezoidal experimentan variaciones rápidas y complejas que deben ser analizadas con herramientas avanzadas. Este nivel de complejidad exige que los ingenieros y técnicos cuenten con metodologías robustas para interpretar el comportamiento eléctrico en diferentes condiciones de conducción, ya que cualquier desviación puede impactar significativamente la maniobrabilidad y confiabilidad del sistema. Por lo tanto, el entendimiento profundo de estos parámetros es un requisito imprescindible para el diseño y mantenimiento eficiente de los EPS.

Diversos estudios han señalado que, debido a la sofisticación de los algoritmos de control y la integración de diversos sensores en los sistemas EPS, las señales eléctricas presenten variaciones sensibles que requieren un monitoreo y análisis preciso para detectar

desviaciones potenciales que comprometan la seguridad vehicular (Li & Ge, 2023). La ausencia de herramientas prácticas para la captura en tiempo real y el análisis de estas señales limita la capacidad de los técnicos para desarrollar procesos de mantenimiento predictivo, y afecta la durabilidad y confiabilidad del sistema (Dai, 2022). Este vacío en la investigación resalta la necesidad de contar con bancos de pruebas que permitan la replicación exacta de condiciones operativas reales.

El mantenimiento predictivo se ha consolidado como una estrategia vital en la gestión de sistemas EPS, puesto que permite anticipar fallas y optimizar la vida útil de los componentes. Sin embargo, la carencia de instrumentos adecuados que posibiliten la captura en tiempo real y el análisis detallado de las señales eléctricas limita las capacidades de diagnóstico en los talleres automotrices. Este déficit tecnológico conduce a intervenciones reactivas que resultan en costos elevados y tiempos de inactividad prolongados, además de representar un riesgo potencial para la seguridad vehicular. La implementación generalizada de bancos de pruebas experimentales es, por ende, necesaria para superar estas limitaciones y mejorar la eficiencia en el diagnóstico y mantenimiento.

Otra problemática relevante es la escasa formación técnica específica en la interpretación de los datos eléctricos generados por los sistemas EPS, lo que restringe la eficacia en el diagnóstico y reparación por parte de los profesionales del sector automotriz (Anticaglia, 2024). La creación de metodologías experimentales educativas puede facilitar una mejor comprensión del funcionamiento del EPS y fortalecer las capacidades técnicas en ingeniería automotriz, alineándose con las demandas de la industria actual (Matailo & Quezada, 2024). Esto implica que los programas de formación deben actualizarse incorporando herramientas y conocimientos prácticos vinculados con la gestión de señales eléctricas en EPS.

Una adecuada formación técnica y profesional en la interpretación y manejo de sistemas EPS es crucial para cerrar la brecha entre el avance tecnológico y la preparación humana. Muchos profesionales carecen aún de las competencias necesarias para realizar

diagnósticos precisos debido a la complejidad intrínseca de los sistemas electrónicos vehiculares actuales. Por esta razón, la incorporación de prácticas experimentales basadas en análisis eléctricos y la utilización de laboratorios especializados deben ser una prioridad en la educación superior y técnica. Este enfoque pedagógico contribuirá a preparar una fuerza laboral calificada, capaz de enfrentar los retos de la movilidad inteligente y contribuir a la innovación tecnológica en la automoción.

Por otro lado, la creciente integración de sistemas EPS con tecnologías avanzadas de asistencia al conductor (ADAS) y vehículos autónomos aumenta la complejidad y la relevancia de realizar análisis detallados y sistemáticos del comportamiento eléctrico en escenarios variados (Nuraini, Putra, Ahsanitaqwm, Septiani, & Santoso, 2024). La predicción y corrección proactiva de fallas en la dirección, mediante el estudio preciso de las señales de control secuencial trapezoidal, resultan esenciales para garantizar la seguridad vial en sistemas cada vez más automatizados, destacando la necesidad de investigaciones aplicadas en este campo (Vyas & Sneha, 2024).

El impacto de una conducción segura y confiable se intensifica en la medida en que los sistemas de dirección asistida electrónica se integran con tecnologías avanzadas de asistencia al conductor y capacidades autónomas. La detección temprana de anomalías eléctricas permite no solo prevenir accidentes derivados de fallos mecánicos o electrónicos sino también optimizar la respuesta del vehículo en escenarios críticos. Así, las investigaciones enfocadas en el análisis detallado y continuado de las señales eléctricas ofrecen posibilidades concretas para desarrollar sistemas de monitoreo predictivo, los cuales constituyen un elemento determinante en la construcción de vehículos con altos estándares de seguridad y eficiencia operativa.

Estudios recientes también identifican que los sistemas EPS presentan una estrecha relación entre la magnitud del voltaje que opera el motor eléctrico y la velocidad del vehículo, reflejando un patrón dinámico que no ha sido suficientemente documentado experimentalmente (Zhijun, 2023). La carencia de datos detallados que especifiquen los rangos de voltaje operativo en función de la velocidad limita la capacidad para establecer umbrales

de referencia confiables para el diagnóstico temprano de fallos. Esta ausencia impide el desarrollo de protocolos adecuados para el mantenimiento predictivo, lo que afecta a la calidad del servicio y a la seguridad vehicular. Por ende, resulta fundamental intensificar la investigación experimental que permita cuantificar y estandarizar estos parámetros, proporcionando a los técnicos y fabricantes bases científicas sólidas para la mejora continua de los sistemas EPS.

El diseño y validación de bancos de pruebas especializados han sido mencionados como una solución clave para superar estas limitaciones, y permiten la simulación controlada de condiciones reales de operación y facilitando la captura detallada de señales eléctricas en tiempo real (Li & Ge, 2023). La adopción de bancos de pruebas y sistemas de monitoreo en tiempo real representa un avance tecnológico imprescindible en la evaluación y perfeccionamiento de la dirección asistida electrónicamente. Sin embargo, la validación de estos recursos debe ampliarse a un abanico más diverso de modelos y condiciones operativas para generalizar sus beneficios. Dichos avances permitirán consolidar un marco estandarizado para la certificación y mantenimiento, y favorece la interoperabilidad y robustez de los sistemas, factores cruciales para la competitividad y seguridad en la industria automotriz moderna. Sin embargo, estos desarrollos todavía están en fases iniciales y requieren de estudios que amplíen su aplicabilidad y validación en diferentes modelos y configuraciones EPS, lo cual es fundamental para la generalización de resultados y protocolos (Dai, 2022).

Adicionalmente, la creciente demanda en la industria automotriz por sistemas más eficientes, con menor consumo energético y mayores estándares de seguridad, exige investigaciones que profundicen en el análisis técnico y experimental de componentes críticos como la caja de dirección EPS (GVR, 2022). La sostenibilidad y reducción de costos de mantenimiento son factores que potencian el interés en este ámbito, y el estudio detallado de las señales de control eléctrico constituye una línea prioritaria de investigación para lograr estos objetivos. La carencia de investigaciones que aborden integralmente los aspectos eléctricos y dinámicos del EPS limita también la innovación tecnológica en el diseño de algoritmos de control y sistemas predictivos basados en inteligencia artificial (AI), los cuales

podrían optimizar la gestión del sistema y prolongar su vida útil (Knorr-Bremse, 2023). La investigación aplicada en este campo es crucial para avanzar en la integración efectiva de control adaptativo, diagnóstico en tiempo real y mantenimiento inteligente.

El desarrollo e integración de tecnologías basadas en inteligencia artificial y algoritmos adaptativos en los sistemas EPS han dado paso a un paradigma revolucionario en el diagnóstico y mantenimiento vehicular. Estas tecnologías permiten el análisis predictivo y la auto optimización del sistema, lo que a su vez incrementa la seguridad y la eficiencia energética. Los esfuerzos investigativos enfocados en estos aspectos son fundamentales para sostener un avance tecnológico que responda a las exigencias actuales y futuras de la industria automotriz, e impulsa la creación de vehículos más inteligentes, seguros y sostenibles. Finalmente, desde una perspectiva educativa y de desarrollo profesional, la elaboración de proyectos experimentales basados en bancos de pruebas para sistemas EPS contribuye a cerrar brechas entre la teoría y la práctica en la formación técnica del sector automotriz (Matailo & Quezada, 2024). La generación de conocimiento aplicado y la capacitación en técnicas modernas de monitoreo eléctrico se presentan como estrategias indispensables para preparar a los futuros ingenieros y técnicos ante los retos de la movilidad inteligente.

En este contexto, el presente estudio debe responder ¿Cuál es el comportamiento de las señales de control secuencial trapezoidal generadas por una caja de dirección EPS en condiciones estáticas y dinámicas, y cómo estos patrones pueden ser aprovechados para mejorar los métodos de diagnóstico y mantenimiento preventivo en sistemas modernos de dirección asistida electrónicamente? La falta de información experimental detallada sobre el comportamiento dinámico y estático de estas señales limita la capacidad de diagnóstico efectivo y mantenimiento preventivo, lo que puede afectar la seguridad y confiabilidad de los vehículos que emplean esta tecnología. Por tanto, esta investigación se enfoca en caracterizar y analizar dichas señales de voltaje para aportar un soporte técnico sólido que permita mejorar los protocolos de diagnóstico y optimizar el mantenimiento en los sistemas modernos de dirección asistida electrónicamente. Para resolver este problema, se plantean las siguientes preguntas de investigación, alineadas con los objetivos específicos:

- ¿Cómo diseñar una metodología experimental que permita instalar una caja de dirección EPS en un banco de pruebas especializado para la captura y análisis en tiempo real de las señales de control secuencial trapezoidal?
- ¿Cuál es el comportamiento de las señales de control secuencial trapezoidal emitidas por el motor eléctrico hacia la cremallera bajo diferentes condiciones operativas estáticas y dinámicas?
- ¿Cómo comparar los resultados experimentales obtenidos con valores teóricos y datos reportados en la literatura para validar la confiabilidad del banco de pruebas y los parámetros medidos?
- ¿De qué manera se puede desarrollar un sistema de monitoreo en tiempo real mediante un módulo de interfaz con pantalla LCD 20*4 que facilite la observación y registro de las señales eléctricas?
- ¿Qué aplicaciones prácticas puede tener el banco de pruebas desarrollado para diagnósticos automotrices, capacitación técnica y futuras investigaciones sobre diferentes configuraciones EPS y condiciones operativas más rigurosas?

La resolución de estas preguntas permitirá consolidar un marco metodológico y tecnológico que impulse la mejora continua de los sistemas EPS, fortaleciendo su diagnóstico y mantenimiento preventivo, elementos cruciales para la seguridad vial y eficiencia operativa. Asimismo, los resultados obtenidos servirán como base para la formación técnica especializada y para futuros desarrollos e investigaciones que amplíen la aplicabilidad de la tecnología EPS en la industria automotriz, promoviendo así la innovación y sostenibilidad en el sector.

Anexo 3 Hipótesis de la investigación.

Para estructurar el marco teórico y metodológico que guiará esta investigación, resulta fundamental plantear hipótesis que orienten el proceso de indagación y validación. Las

hipótesis representan proposiciones preliminares basadas en el objetivo general y los objetivos específicos de la investigación, y permiten establecer relaciones anticipadas entre las variables estudiadas, en este caso las señales de voltaje y su comportamiento en sistemas EPS tipo cremallera asistida. De este modo, el estudio podrá confirmar o refutar estas proposiciones mediante evidencias experimentales, aportando al conocimiento científico y práctico en el área.

Se plantea que las señales de voltaje generadas en una caja de dirección EPS tipo cremallera asistida, bajo condiciones estáticas y dinámicas, presentan patrones reproducibles y cuantificables que pueden servir como parámetros de referencia fiables para mejorar y optimizar los procesos de diagnóstico y mantenimiento preventivo en sistemas modernos de dirección asistida electrónicamente. En correspondencia con los objetivos específicos formulados, se establecen las siguientes hipótesis particulares que detallan los resultados esperados en cada fase del estudio, facilitando así un enfoque sistemático para validar el marco metodológico y técnico propuesto.

- La metodología experimental diseñada permitirá la instalación exitosa y la captura precisa de señales de control secuencial trapezoidal en un banco de pruebas especializado para una caja de dirección EPS tipo cremallera asistida.
- Las señales de voltaje emitidas por el motor eléctrico hacia la cremallera mostrarán características distinguibles bajo diferentes condiciones estáticas y dinámicas, reflejando los estados operativos reales del sistema.
- Los datos obtenidos experimentalmente serán consistentes y comparables con los valores teóricos y reportados en la literatura, validando la confiabilidad del banco de pruebas y la exactitud de las mediciones realizadas.
- La implementación de un sistema de monitoreo en tiempo real, mediante un módulo de interfaz y pantalla LCD 20*4, facilitará la observación continua y el registro eficiente de las señales eléctricas para fines diagnósticos.

- El banco de pruebas desarrollado podrá ser aplicado eficazmente en diagnósticos automotrices, en la capacitación técnica de profesionales y como base para investigaciones futuras que consideren distintas configuraciones EPS y condiciones de operación más exigentes.

Anexo 4 Fundamentación Teórica.

- Anexo 5.1 Evolución de los sistemas de dirección y transición hacia EPS. pp. 20–29
- Anexo 5.2 Comparación entre sistemas hidráulicos y electrónicos. pp. 30–35
- Anexo 5.3 Diagnóstico y monitoreo en sistemas EPS. pp. 36–42
- Anexo 5.4. Marco normativo aplicable (ISO 26262, ISO 14229, SAE J2578, J3016). pp. 43–47

Anexo 5 Materiales y Métodos

4.1 Metodología Aplicada

El proceso incluyó el diseño del montaje experimental, la instalación de la caja de dirección tipo cremallera de la marca Ford en el banco metálico, la integración de los sensores hall 3144, así como la conexión con el Arduino mega para la adquisición de datos y su pantalla LCD de 20x4 caracteres. Esta metodología se estructuró en fases: calibración de sensores, pruebas estáticas y pruebas dinámicas con simulación de diferentes rangos de velocidad (0–20 km/h, 20–60 km/h y 60–130 km/h).

4.2 Equipos empleados

En cuanto a los equipos empleados, se utilizaron:

- Caja de dirección EPS tipo cremallera, marca Ford.
- Banco de pruebas metálico diseñado para la fijación segura del sistema.
- Módulo de interfaz con pantalla LCD de 20x4, programado para mostrar en tiempo real las señales adquiridas.

- Sensores Hall A3144 para detección de giro. (Nota: Las variables de corriente y temperatura son estimadas por el firmware del Arduino, no se utilizaron sensores físicos de corriente para mantener el enfoque en la simulación lógica de bajo costo).
- Fuente de alimentación de 12,5V DC de batería, con rango de operación hasta 14,5 V.

4.3 Insumos utilizados

Cables de conexión de alta conductividad, conectores eléctricos, dispositivos de protección contra sobrecarga, módulos microcontroladores (Arduino o equivalente) para la programación y registro de datos, además de los elementos de sujeción mecánica empleados para garantizar la estabilidad de la caja EPS en el banco de pruebas.

4.4 Variables

- Variable independiente: velocidad simulada (km/h) y torque aplicado (Nm).
- Variable dependiente: voltaje (V) y corriente (A) suministrados por el motor eléctrico hacia la cremallera.
- Variables de control: temperatura ambiente, calibración inicial de los sensores, voltaje de alimentación constante entre 12,5–14,5 V, alineación de la cremallera y condiciones ambientales controladas de laboratorio.

Anexo 6 Normativas Aplicables

□ **ISO 26262:** Seguridad funcional de los sistemas eléctricos y electrónicos en vehículos. (ISO, 2018)

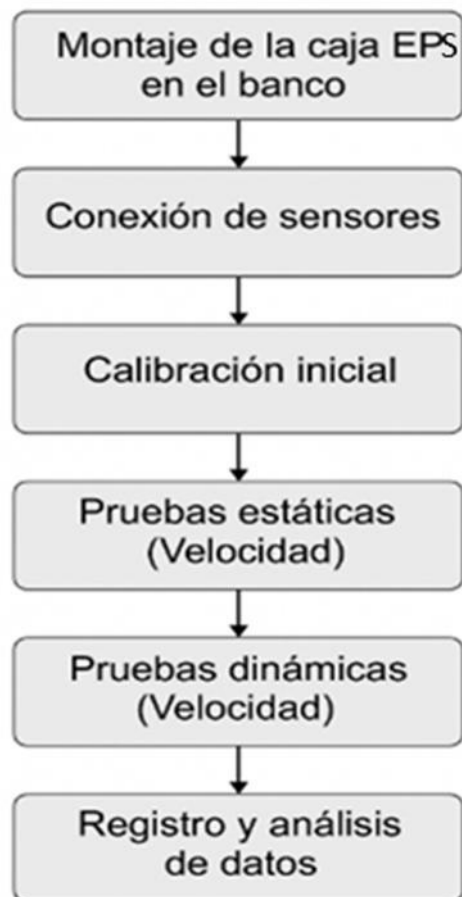
□ **ISO 14229:** Protocolo de diagnóstico automotriz UDS (Unified Diagnostic Services). (ISO, 2013)

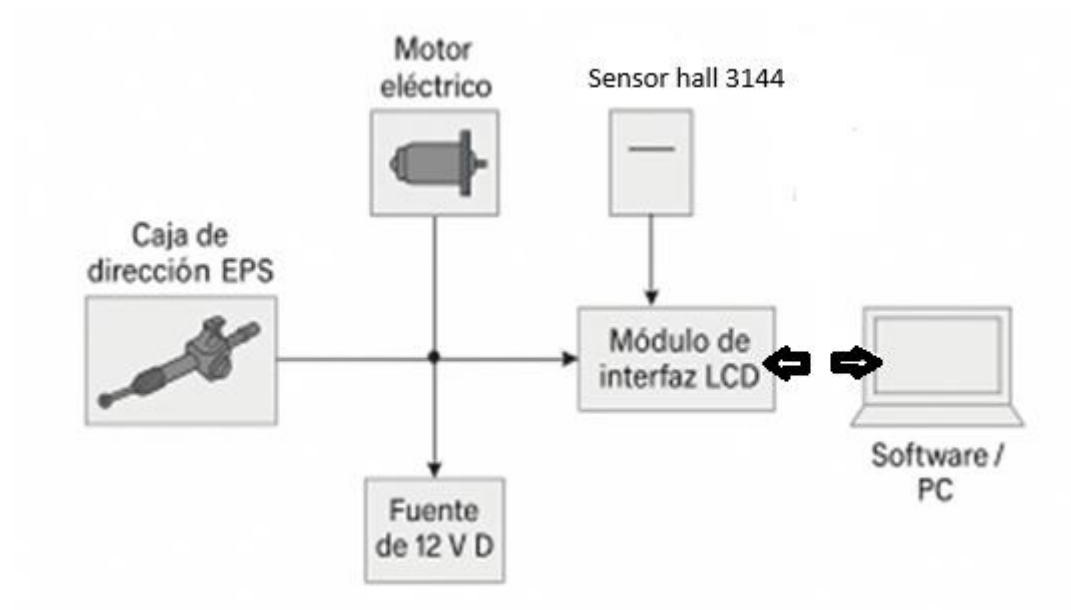
□ **SAE J2578:** Normativa de seguridad eléctrica en vehículos automotrices. (SAE International, 2017)

□ **SAE J3016:** Terminología y clasificación de sistemas automotrices avanzados.

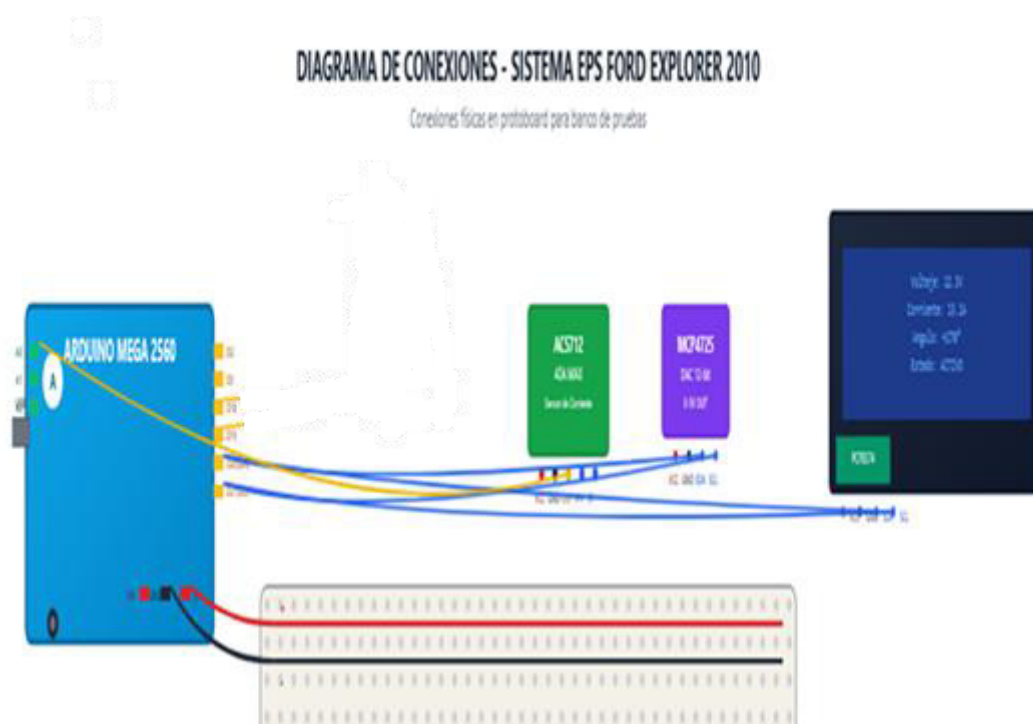
(SAE International, 2021)

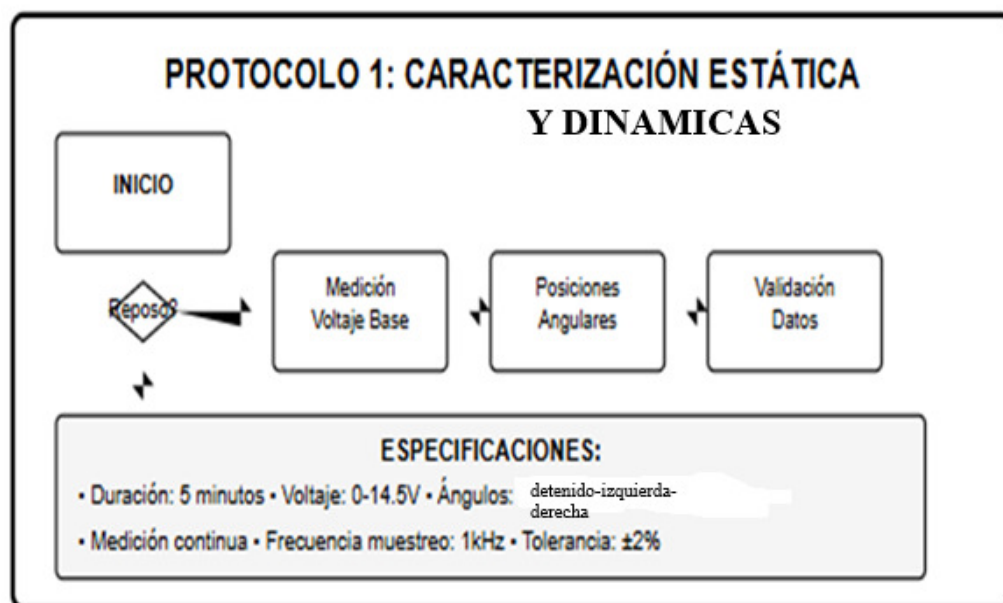
Anexo 7 Detalle del procedimiento experimental y calibración.



Anexo 8 Esquema de conexiones y banco de pruebas.

Anexo 9 Diagrama de Conexiones.

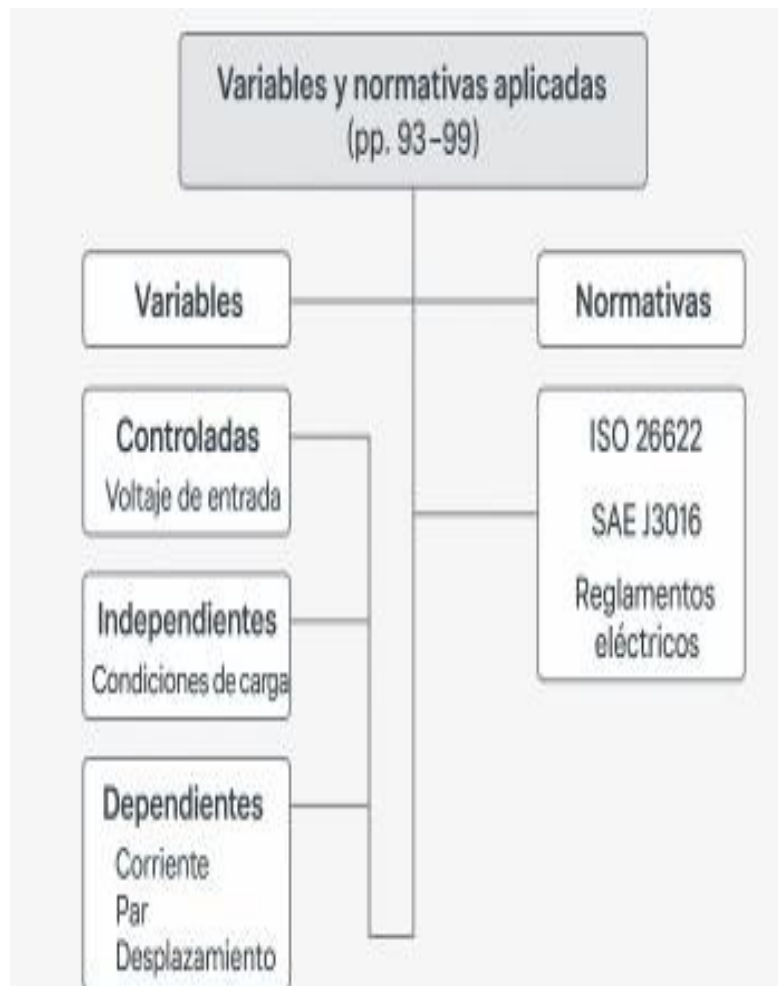


Anexo 10 Caracterización Estática y dinámica.

Anexo 11 Instrumentación y Equipamiento.



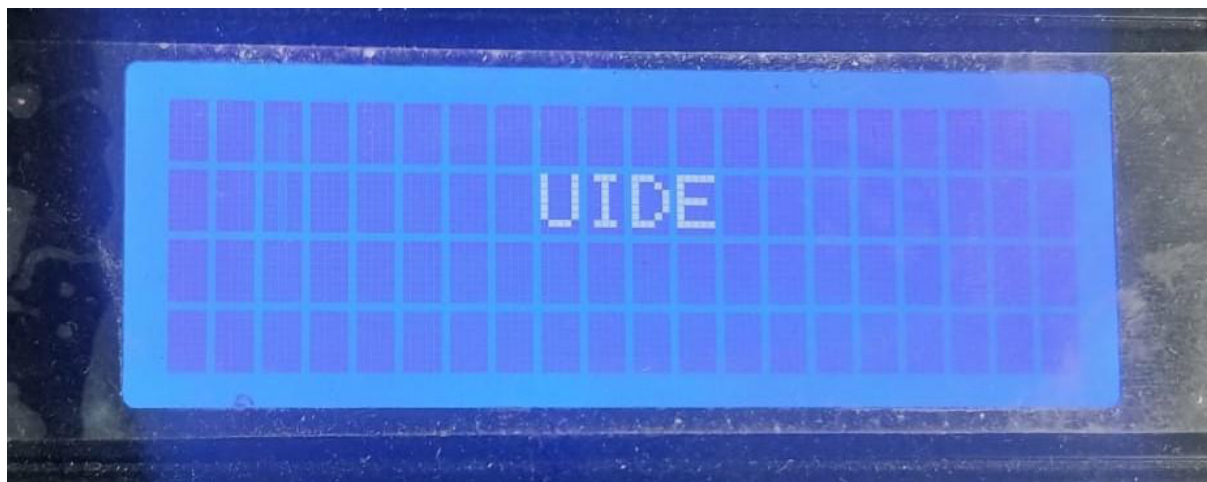
Anexo 12 Normativas Aplicadas.



Anexo 13 Tabla de datos primarios en pruebas estáticas y dinámicas.

Modo	Velocidad (km/h)	Torque (%)	Torque (N·m)	Corriente Estimada (mA)	Temperatura (°C)
Estático	0	100%	3.00	1000	45
Dinámico	20	85%	2.55	865	40
Dinámico	40	69%	2.07	721	35
Dinámico	60	54%	1.62	586	30
Dinámico	80	38%	1.14	442	27
Dinámico	100	23%	0.69	307	25
Dinámico	130	1%	0.03	109	25

Anexo 14 Sistema de Monitoreo EPS.



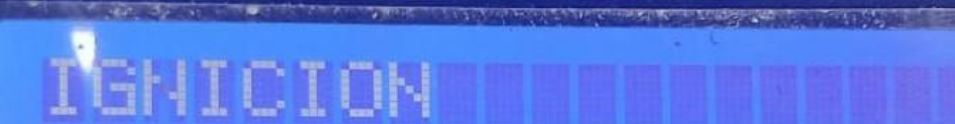












IGNICION

Espere secuencia.

A: Continuar

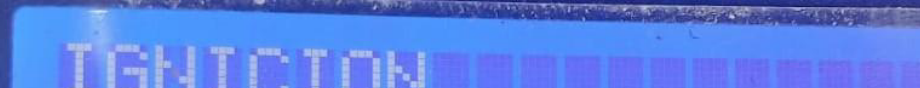
*: Regresar



ARRANQUE

VOLTAGE: 14.5V

Espera 4 segs...



IGNICION
KM/H: 0 T: 0%
D: ACTIVAR MOTOR
*: Salir



Anexo 15 Banco de soporte de caja de dirección.



Anexo 16 Arduino mega.



Anexo 17 Display LCD 20*4.



Anexo 18 KeyPad 4*4.



Anexo 19 Regulador de voltaje 7805 *3.



Anexo 20 Mosfet IRF 3205 *3.



Anexo 21 Mosfet IRFP250N*3.



Anexo 22 Caja de dirección.

Anexo 23 Motor BLDC.



Anexo 24 Disco con sensor hall 3144.



Anexo 25 Capacitores electrolíticos, cerámicos, resistencia, leds.



Anexo 26 Códigos DTC.

Código DTC	Descripción	Tipo	Severidad	Síntoma Principal
C0550	Circuito de sensor de ángulo de dirección - Mal funcionamiento	Sensor	Media	Luz de advertencia EPS
C0551	Circuito de sensor de ángulo de dirección - Rango/rendimiento	Sensor	Alta	Asistencia intermitente
C0552	Circuito de sensor de ángulo de dirección - Señal baja	Sensor	Media	Pérdida parcial de asistencia
C0553	Circuito de sensor de ángulo de dirección - Señal alta	Sensor	Media	Pérdida parcial de asistencia
C0555	Circuito de sensor de ángulo de dirección - Sin señal	Sensor	Alta	Pérdida total de asistencia
C0560	Circuito del motor EPS - Mal funcionamiento general	Actuador	Alta	Dirección pesada
C0561	Circuito del motor EPS - Cortocircuito a tierra	Actuador	Crítica	Pérdida total de asistencia
C0563	Circuito del motor EPS - Cortocircuito a voltaje	Actuador	Crítica	Pérdida total de asistencia
C0564	Circuito del motor EPS - Circuito abierto	Actuador	Alta	Asistencia errática
C0565	Circuito del motor EPS - Sobrecorriente detectada	Actuador	Crítica	Desconexión de seguridad
P0551	Circuito del sensor de torque - Mal funcionamiento	Sensor	Alta	Asistencia inconsistente
P0552	Circuito del sensor de torque - Señal bajucero	Sensor	Crítica	Dirección muy pesada
P0553	Circuito del sensor de torque - Señal alta	Sensor	Alta	Asistencia excesiva
U0601	Bus CAN de alta velocidad - Mal funcionamiento	Comunicación	Media	Múltiples fallos
U0100	Comunicación perdida con ECU/ECM	Comunicación	Alta	Pérdida de funciones auxiliares
C1230	Módulo de control EPS - Falla interna	Módulo	Crítica	Sistema no funciona
C1231	Módulo de control EPS - Sobrecalentamiento	Módulo	Alta	Asistencia reducida
C1232	Módulo de control EPS - Voltaje de alimentación incorrecto	Módulo	Media	Funcionamiento errático
C1235	Sistema EPS - Temperatura del motor excesiva	Sistema	Alta	Asistencia reducida temporal
C1236	Sistema EPS - Asistencia reducida por seguridad	Sistema	Media	Dirección pesada progresiva

Anexo 27 Tabla comparativa de Sistemas de Dirección Asistida.

Característica	EPS Columna Asistida	EPS Cremallera Asistida	EPS Piñón Asistido	Hidráulico Tradicional
Ubicación del motor	En la columna de dirección	En la cremallera de dirección	En el piñón de dirección	Bomba accionada por motor
Rango de potencia típico	300-600 W	800-1500 W	500-900 W	1500-3000 W (continuo)
Peso adicional	4-6 kg	7-10 kg	5-8 kg	12-18 kg
Complejidad de instalación	Baja	Media	Media-Alta	Alta
Costo aproximado	\$ 400-800	\$ 800-1500	\$ 600-1200	\$ 300-600 (menor costo inicial)
Eficiencia energética	Alta (85-90%)	Media (75-85%)	Media-Alta (80-88%)	Baja (45-60%)
Capacidad de asistencia	Media (hasta 5 Nm)	Alta (hasta 12 Nm)	Media-Alta (hasta 8 Nm)	Muy Alta (hasta 20 Nm)
Tiempo de respuesta	50-100 ms	30-80 ms	40-90 ms	100-200 ms
Sensación de dirección	Directa y comunicativa	Precisa y estable	Balanceda	Pesada pero consistente
Manterimiento	Mínimo	Bajo	Medio	Alto (fluidos, mangueras)
Durabilidad típica	150,000-200,000 km	200,000-250,000 km	180,000-220,000 km	150,000-180,000 km
Aplicación típica	Vehículos compactos y medianos	Vehículos medianos y grandes	Vehículos deportivos y SUVs	Vehículos pesados y antiguos
Nivel de ruido	Bajo	Muy bajo	Medio	Alto
Integración con ADAS	Media	Alta	Media-Alta	Nula

Anexo 28 Programación Arduino.

Firmware EPS Simulado

El firmware está estructurado en módulos funcionales para facilitar mantenimiento y depuración. A continuación, se presenta el código completo, con comentarios explicativos.

```
// =====

// SISTEMA EPS SIMULADO - BANCO DE PRUEBAS

// Autores: Irvin Herrera-Carlos Cuji

// Microcontrolador: Arduino Mega

// Fecha: 2026

// =====

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

// --- Configuración del display LCD ---

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Dirección I2C, 20 columnas, 4 filas

// --- Pines del sistema ---

const int PIN_POT = A0;      // Potenciómetro → velocidad

const int PIN_HALL_IZQ = 2;   // Sensor Hall izquierdo (interrupción)

const int PIN_HALL_DER = 3;   // Sensor Hall derecho (interrupción)

const int PIN_KEYPAD_ROWS[4] = {9, 8, 7, 6};

const int PIN_KEYPAD_COLS[4] = {5, 4, 3, 2};

// --- Estados del sistema ---

enum Estado {

    UIDE,

    VERIFICACION,

    MENU,

    PRUEBA,

    DATOS_SENSOR,

    ARRANQUE,
```

```

IGNICION

};

Estado estadoActual = UIDE;

unsigned long tiempoInicio = 0;

bool pruebaActiva = false;

bool arranqueActivo = false;

// --- Variables globales ---

int velocidadKmh = 0;

int torquePorcentaje = 0;

int corrienteMa = 0;

int temperaturaC = 25;

bool hallIzqActivo = false;

bool hallDerActivo = false;

// =====

// SETUP: Inicialización del sistema

// =====

void setup() {

    // Inicializar pines

    pinMode(PIN_HALL_IZQ, INPUT_PULLUP);

    pinMode(PIN_HALL_DER, INPUT_PULLUP);

    // Inicializar display

    lcd.init();

    lcd.backlight();

    lcd.clear();

    lcd.print("U I D E");

    // Inicializar serial (opcional, para depuración)

    Serial.begin(9600);

}

```

```

// =====

// LOOP: Máquina de estados principal

// =====

void loop() {

  leerSensores();

  actualizarVariables();

  switch (estadoActual) {

    case UIDE:      manejarUIDE(); break;

    case VERIFICACION: manejarVerificacion(); break;

    case MENU:      manejarMenu(); break;

    case PRUEBA:     manejarPrueba(); break;

    case DATOS_SENSOR: manejarDatosSensor(); break;

    case ARRANQUE:   manejarArranque(); break;

    case IGNICION:   manejarIgnicion(); break;

  }

  delay(100); // Evita parpadeo excesivo

}

// =====

// FUNCIONES DE LECTURA Y CÁLCULO

// =====

void leerSensores() {

  // Leer potenciómetro (0–1023) → 0–130 km/h

  int lecturaPot = analogRead(PIN_POT);

  velocidadKmh = map(lecturaPot, 0, 1023, 0, 130);

  // Leer sensores Hall (activo = LOW)

  hallIzqActivo = (digitalRead(PIN_HALL_IZQ) == LOW);

  hallDerActivo = (digitalRead(PIN_HALL_DER) == LOW);

}

```

```

void actualizarVariables() {
    // Torque inverso a la velocidad
    torquePorcentaje = 100 - (velocidadKmh * 99 / 130);
    if (torquePorcentaje < 1) torquePorcentaje = 1;
    // Corriente estimada: 100 mA (reposo) a 1000 mA (máximo)
    corrienteMa = 100 + (9 * torquePorcentaje);
    // Temperatura: solo sube si hay giro continuo
    if (hallIzqActivo || hallDerActivo) {
        temperaturaC = 25 + (torquePorcentaje * 20 / 100);
        if (temperaturaC > 45) temperaturaC = 45;
    } else {
        if (temperaturaC > 25) temperaturaC--;
    }
}

// =====
// MANEJO DE ESTADOS
// =====

void manejarUIDE() {
    char tecla = leerKeypad();
    if (tecla == '*') {
        estadoActual = VERIFICACION;
        lcd.clear();
        lcd.print("verificacion de datos");
    }
}

void manejarVerificacion() {
    char tecla = leerKeypad();
    if (tecla == '*') {

```

```

    estadoActual = MENU;

    lcd.clear();

    lcd.print("menu");
} else if (tecla == '#') {

    estadoActual = UIDE;

    lcd.clear();

    lcd.print("U I D E");
}
}

void manejarMenu() {

    char tecla = leerKeypad();

    if (tecla == 'D') {

        estadoActual = PRUEBA;

        pruebaActiva = false;
    } else if (tecla == 'S') {

        estadoActual = DATOS_SENSOR;
    } else if (tecla == '*') {

        estadoActual = VERIFICACION;

        lcd.clear();

        lcd.print("verificacion de datos");
    }
}

void manejarPrueba() {

    if (!pruebaActiva) {

        lcd.clear();

        lcd.print("prueba automatica");

        pruebaActiva = true;

        tiempolnicio = millis();
    }
}

```

```

}

unsigned long transcurrido = millis() - tiempoInicio;

if (transcurrido < 7000) {
    // Giro izquierda

    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("torque: 100%");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("I: 1000 mA");
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("T: 45°C");
} else if (transcurrido < 17000) {
    // Pausa

    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("torque: 0% ");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("I: 100 mA ");
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("T: 25°C ");
} else if (transcurrido < 24000) {
    // Giro derecha

    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("torque: 100%");
    lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("I: 1000 mA");
    lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("T: 45°C");
} else {
    // Finalizar

    pruebaActiva = false;
    estadoActual = UIDE;

    lcd.clear();
    lcd.print("U I D E");
}
}

void manejarDatosSensor() {
    lcd.clear();

    lcd.print("datos de sensor");
}

```

```

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("Izq: ");

lcd.print(hallIzqActivo ? "ACTIVO " : "INACTIVO");

lcd.setCursor(0, 2);

lcd.print("Der: ");

lcd.print(hallDerActivo ? "ACTIVO " : "INACTIVO");

lcd.setCursor(0, 3);

lcd.print("estado: listo");

    char tecla = leerKeypad();

    if (tecla == '*') {

        estadoActual = MENU;

        lcd.clear();

        lcd.print("menu");

    }

}

void manejarArranque() {

    if (!arranqueActivo) {

        lcd.clear();

        lcd.print("ARRANQUE");

        tiempoInicio = millis();

        arranqueActivo = true;

    }

    if (millis() - tiempoInicio >= 4000) {

        arranqueActivo = false;

        estadoActual = IGNICION;

    }

}

void manejarIgnicion() {

```

```

// Mostrar datos en tiempo real

lcd.clear();

lcd.print("km/h: "); lcd.print(velocidadKmh);

lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Torque: "); lcd.print(torquePorcentaje); lcd.print("%");

lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("I: "); lcd.print(corrienteMa); lcd.print(" mA");

lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("T: "); lcd.print(temperaturaC); lcd.print("°C");

    // Control de motor (simulado aquí; en hardware iría a L298N)

if (hallIzqActivo) {

    // Activar giro izquierda

} else if (hallDerActivo) {

    // Activar giro derecha

}

// Salidas

char tecla = leerKeypad();

if (tecla == '*') {

    estadoActual = VERIFICACION;

    lcd.clear();

    lcd.print("verificacion de datos");

} else if (tecla == '#' && digitalRead(10) == LOW) { // Ej: tecla '0' en pin 10

    estadoActual = UIDE;

    lcd.clear();

    lcd.print("U I D E");

} else if (tecla == 'A') {

    estadoActual = ARRANQUE;

    arranqueActivo = false;

}

}

// --- Función simplificada de lectura de keypad (ejemplo) ---

```

```
char leerKeypad() {  
    // Implementación real iría aquí (matriz 4x4)  
    return NO_KEY; // Placeholder  
}
```

Anexo 29 Pantallas del Sistema.

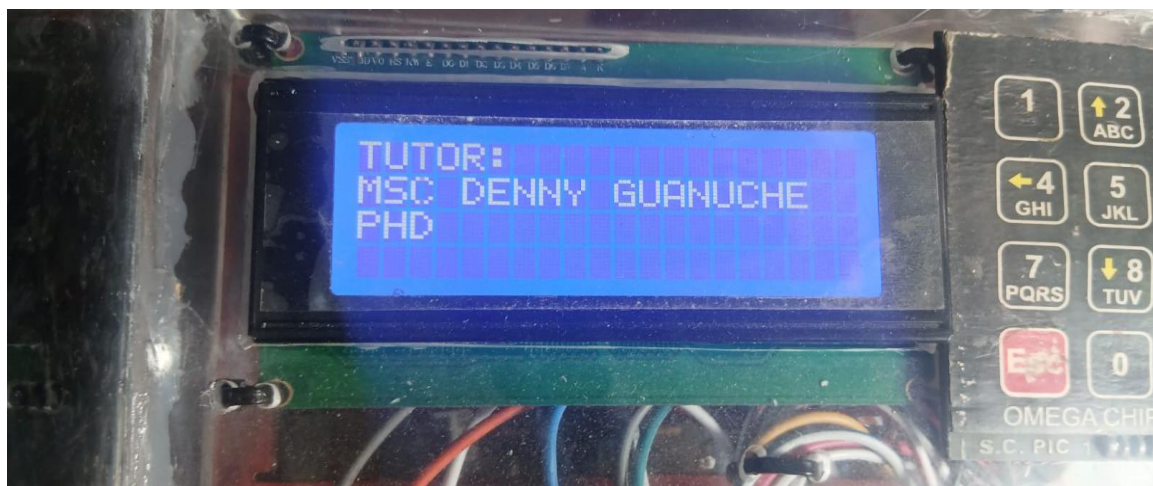














Anexo 30 Manual del propietario.

MANUAL DEL PROPIETARIO

Banco de Pruebas para Caja de Dirección EPS Tipo Cremallera

Control Trapezoidal Secuencial con Arduino Mega

Autores: Irvin L. Herrera Mejía & Carlos G. Cují Cachupud

Institución: Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) | Quito, 2026

Tutor: MSc. Denny Guanuche, Ph.D.

Contacto Técnico: Irvin Herrera - 0989201099

Versión del Firmware: 1.0 (Control Secuencial 6 Pasos - 10Hz)

CONTENIDO

1. Descripción del Sistema
2. Especificaciones Técnicas Reales
3. Tipos de Control para Motores BLDC
4. Diagrama de Conexiones Completo
5. Función de Cada Modo de Prueba
6. Pantallas Reales del Display LCD
7. Guía de Operación Paso a Paso
8. Seguridad y Mantenimiento
9. Contacto y Soporte Técnico

1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El banco de pruebas permite verificar y visualizar el comportamiento eléctrico de una caja de dirección EPS (Electric Power Steering) tipo cremallera mediante control trapezoidal secuencial. El sistema simula condiciones reales de operación estimando parámetros mediante modelos matemáticos integrados en el firmware del Arduino Mega. No utiliza sensores físicos de corriente ni temperatura, centrando su funcionamiento en la lógica de control, detección de sensores Hall y emulación de velocidad vehicular.

Aplicaciones:

- Formación técnica en sistemas de dirección electrónica
- Diagnóstico funcional básico de cajas EPS
- Validación de algoritmos de control trapezoidal
- Capacitación en mantenimiento predictivo

2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS REALES

Componente	Modelo/Configuración	Función
Microcontrolador	Arduino Mega 2560	Procesamiento central y control
Display	LCD 20x4 I2C (0x27)	Visualización de parámetros en tiempo real
Teclado	Matricial 4x4 membrana	Navegación de menús y selección de modos
Potenciómetro	Lineal 10k Ω (Pin A0)	Simula velocidad vehicular (0–130 km/h)
Sensores de dirección	Hall A3144 (Pines 2 y 3)	Detectan giro izquierdo/derecha
MOSFET Low-Side	IRF3205 (x3)	Conmutación a tierra (control)

Componente	Modelo/Configuración	Función
MOSFET High-Side	IRFP250N (x3)	Conmutación a +12V (potencia)
Filtrado de potencia	4700 μ F + 1 μ F (105K)	Estabilización de voltaje
Alimentación	Batería/Fuente 12.0–14.2 V DC	Suministro al driver y lógica
Frecuencia de conmutación	10 Hz	Control secuencial trapezoidal
Voltaje operativo	12.5 – 14.5 V	Rango automotriz estándar
Torque máximo	3.0 N·m (100% a 0 km/h)	Asistencia máxima
Corriente estimada	100 mA (reposo) a 1000 mA (máximo)	Estimación por software

Indicadores LED:

LED	Pin Arduino	Color	Función
LED_SYS	Pin 24	● Amarillo	ACCESORIOS (hall1)
LED_RUN	Pin 26	● Azul	IGNICIÓN (Sistema activo)
LED_COOL	Pin 28	● Verde	ARRANQUE (hall2)
LED_ERR	Pin 30	● Rojo	FALLA DE EPS (Error del sistema)
Interruptor Principal	-	○ Blanco	Encendido general del banco (Arduino ON)

3. TIPOS DE CONTROL PARA MOTORES BLDC

3.1 Control Trapezoidal Secuencial (IMPLEMENTADO EN ESTE BANCO)

Descripción: Conmutación de 6 pasos por revolución eléctrica. Dos fases activas (HIGH/LOW), una flotante (OFF).

Frecuencia: 10 Hz efectiva

Ventajas: Simple, bajo costo, fácil implementación en microcontroladores.

Desventajas: Par pulsante, ruido acústico moderado.

Marcas: Ford, Chevrolet, Honda, Nissan, Kia/Hyundai.

3.2 Control Sinusoidal

Descripción: Las tres fases se alimentan con señales senoidales desfasadas 120° .

Frecuencia: 10–20 kHz

Ventajas: Torque constante, mínimo ruido, alta eficiencia.

Desventajas: Complejo, requiere cálculos trigonométricos en tiempo real.

Marcas: BMW, Mercedes-Benz, Volkswagen ID.

3.3 Control FOC Avanzado

Descripción: Evolución del sinusoidal con algoritmos de orientación de campo y compensación en tiempo real.

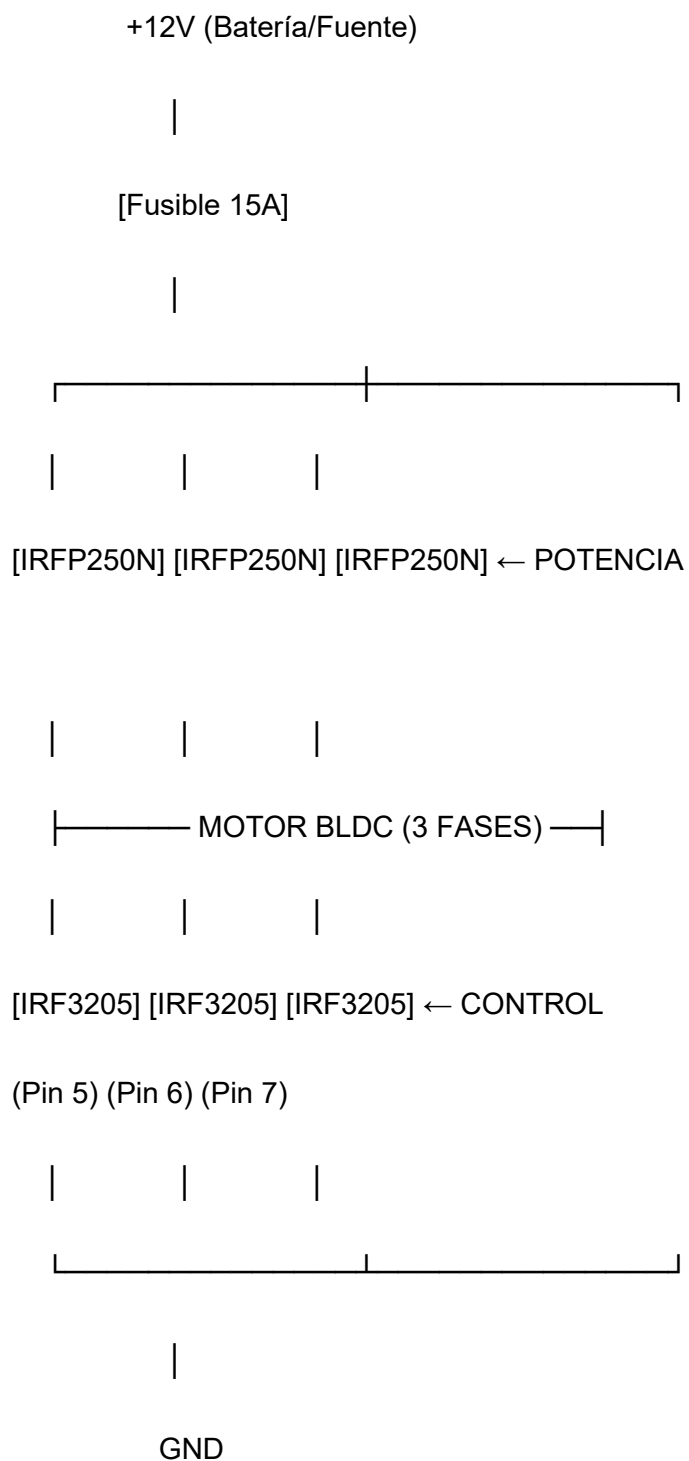
Ventajas: Máxima eficiencia, respuesta dinámica superior, integración nativa con ADAS.

Marcas: Sistemas premium de última generación, vehículos eléctricos de alta gama. Tesla, Audi, Ix, Jaguar, Rivian

(Nota: Este banco no utiliza modulación PWM tradicional. El control se realiza exclusivamente mediante conmutación secuencial trapezoidal).

4. DIAGRAMA DE CONEXIONES COMPLETO

4.1 Conexión del Motor BLDC (3 Fases)

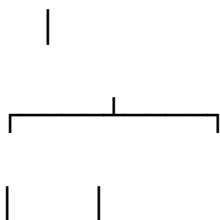


Asignación de Fases por Color:

Pin Arduino	Color Cable	Fase Motor	MOSFET Low-Side	MOSFET High-Side
Pin 5	 Azul	Fase A	IRF3205 #1	IRFP250N #1
Pin 6	 Amarillo	Fase B	IRF3205 #2	IRFP250N #2
Pin 7	 Rojo	Fase C	IRF3205 #3	IRFP250N #3

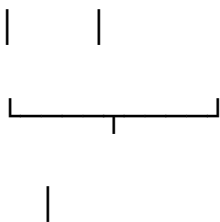
4.2 Conexión de Sensores Hall A3144

+5V (Arduino)



[Hall Izq.] [Hall Der]

(Pin 2) (Pin 3)



GND

Asignación de Cables por Color:

Color del Cable	Conexión	Función
 Rojo	+5V Arduino	Alimentación positiva (VCC)

Color del Cable	Conexión	Función
● Negro	GND Arduino	Tierra común (0V)
● Azul	Pin 2 Arduino	Señal Hall Izquierdo (Detección giro izquierda)
● Verde	Pin 3 Arduino	Señal Hall Derecho (Detección giro derecha)

Nota Técnica: Los sensores operan con pull-up interno del Arduino (INPUT_PULLUP). Al pasar el imán, la señal baja a LOW. Distancia recomendada imán-sensor: 2–5 mm.

4.3 Conexión del Display LCD 20x4 I2C

Pin LCD	Pin Arduino	Función
VCC	5V	Alimentación
GND	GND	Tierra
SDA	Pin 20	Datos I2C
SCL	Pin 21	Reloj I2C
Dirección I2C: 0x27		

4.4 Conexión del Keypad 4x4

Filas (Rows)	Pin Arduino	Columnas (Cols)	Pin Arduino
Fila 1	Pin 39	Columna 1	Pin 47
Fila 2	Pin 41	Columna 2	Pin 49
Fila 3	Pin 43	Columna 3	Pin 51

Filas (Rows)	Pin Arduino	Columnas (Cols)	Pin Arduino
Fila 4	Pin 45	Columna 4	Pin 53

Distribución de Teclas:

1 2 3 A

4 5 6 B

7 8 9 C

* 0 # D

Funciones de Teclas:

- * → Menú anterior / Detener motor
- # → Reset total (volver a UIDE)
- D → Prueba de Verificación de Sensores Hall
- A → Modo Arranque → Ignición

4.5 Conexión del Potenciómetro

Terminal	Conexión
Terminal 1	+5V Arduino
Terminal 2 (central)	Pin A0 (entrada analógica)
Terminal 3	GND Arduino
Función: Simula velocidad vehicular de 0 a 130 km/h	

4.6 Filtrado de Potencia

+12V ———[4700 μ F/25V]———— GND

| |

└──[1 μ F/105K]————┘

Ubicación: Lo más cerca posible del driver MOSFET

5. FUNCIÓN DE CADA MODO DE PRUEBA

◆ Prueba Estática (Tecla D)

Propósito: Simular la condición de máxima demanda de asistencia (vehículo detenido - maniobras de estacionamiento).

Características:

- Velocidad simulada: 0 km/h (fija)
- Torque: 100% (3.0 N·m)
- Corriente estimada: 1000 mA

Secuencia Automática:

1. **0–7 segundos:** Giro a la izquierda (torque 100%)
2. **7–17 segundos:** Pausa completa (torque 0%, motor detenido)
3. **17–24 segundos:** Giro a la derecha (torque 100%)

Aplicación:

- Verificar que el motor responde en ambas direcciones
- Validar que los MOSFET conmutan correctamente
- Comprobar que no hay cortocircuitos en las fases
- Diagnosticar fallas en sensores Hall

Cuando usar:

- Al instalar una nueva caja EPS
- Después de mantenimiento del motor BLDC
- Para verificar conexiones de fases
- En capacitación técnica básica

◆ **Prueba de Verificación de Sensores Hall (Tecla D en Menú)**

Propósito: Verificar el funcionamiento correcto de los sensores Hall A3144 que detectan el sentido de giro del volante.

Secuencia de Funcionamiento:**1. Fase 1 - Giro Derecha:**

- El motor comienza a girar hacia la **DERECHA**
- Busca detectar el imán del sensor Hall izquierdo
- Al detectarlo, el **LED 24 (Amarillo/Accesorios)** comienza a **TITILAR**
- La pantalla muestra: "LED 24: ESPERANDO" → "HALL IZQ: OK"

2. Fase 2 - Giro Izquierda:

- Inmediatamente después, el motor **INVIERTE** el giro hacia la **IZQUIERDA**
- Busca detectar el imán del sensor Hall derecho
- Al detectarlo, el **LED 28 (Verde/Arranque)** comienza a **TITILAR**
- La pantalla muestra: "LED 28: ESPERANDO" → "HALL DER: OK"

3. Finalización:

- El motor se **DETINE**

- **AMBOS LEDs (24 y 28) quedan TITILANDO** simultáneamente
- La pantalla muestra: "SENSORES OK - LED 24 + 28 TITILAN"
- Indica que ambos sensores funcionan correctamente

Aplicación:

- Verificar que los sensores detectan el imán correctamente
- Diagnosticar sensores dañados o desalineados
- Verificar distancia imán-sensor (2–5 mm)
- Validar que solo un sensor se activa a la vez

Cuando usar:

- Después de instalar o reemplazar sensores Hall
- Cuando el motor no gira en una dirección
- Para ajustar la posición de los imanes
- En diagnóstico de fallas de dirección

♦ Modo Arranque → Ignición (Tecla A)

Propósito: Simular el encendido del vehículo y entrar en modo de conducción dinámica.

Secuencia:

1. ARRANQUE (4 segundos):

- Pantalla muestra: "ARRANQUE - Espere 4 segs..."
- Simula el tiempo de encendido del vehículo
- LED Verde (Arranque) se enciende

2. IGNICIÓN (Modo Dinámico):

- Transición automática después de 4 segundos
- LED Azul (Ignición) se enciende
- Sistema entra en modo dinámico

Aplicación:

- Simular condiciones reales de conducción
- Verificar la relación inversa velocidad-torque
- Validar el algoritmo de control adaptativo
- Diagnosticar problemas de asistencia variable

Cuando usar:

- Para simular conducción en ciudad (0–60 km/h)
- Para simular conducción en carretera (80–130 km/h)
- Para verificar que la asistencia disminuye con la velocidad
- En diagnóstico de problemas de estabilidad direccional

◆ **Modo Dinámico (Ignición)**

Propósito: Simular el comportamiento real del sistema EPS durante la conducción con velocidad variable.

Características:

- Velocidad simulada: 0–130 km/h (ajustable con potenciómetro)
- Torque: Inversamente proporcional a la velocidad
- Corriente: Estimada según torque solicitado

Relación Velocidad-Torque:

velocidad (km/h)	Torque (%)	Torque (N·m)	Corriente (mA)
0	100%	3.00	1000
20	85%	2.55	865
40	69%	2.07	721
60	54%	1.62	586
80	38%	1.14	442
100	23%	0.69	307
130	1%	0.03	109

Aplicación:

- Verificar la relación inversa velocidad-torque
- Validar el algoritmo de control adaptativo
- Diagnosticar problemas de asistencia variable
- Capacitar en comportamiento real del EPS

Cuando usar:

- Para simular conducción en ciudad (0–60 km/h)
- Para simular conducción en carretera (80–130 km/h)
- Para verificar que la asistencia disminuye con la velocidad
- En diagnóstico de problemas de estabilidad direccional

6. PANTALLAS DEL DISPLAY LCD

1. Inicio (UIDE)

U I D E

2. Verificación de Datos

verificación de datos

3. Menú Principal

menú

D: Prueba Dinámica

A: Arranque

*: Detener

4. Prueba de Verificación de Sensores Hall (Tecla D)

prueba automática

Giro: DERECHA

LED 24: ESPERANDO

El motor gira a la derecha. Al detectar el imán, el LED 24 comienza a titilar y la pantalla cambia a:)

Giro: IZQUIERDA

LED 28: ESPERANDO

(Al detectar el segundo sensor, el LED 28 titila, ambos Leds quedan titilando y muestra:)

SENSORES OK

LED 24 + 28 TITILAN

*: Volver

5. Arranque (Tecla A)

ARRANQUE

Espere 4 segs...

Simula encendido del vehículo (4 segundos)

6. Ignición (Dinámica)

km/h: 60

Torque: 54% Nm

I: 586 mA

*: Detener

Valores cambian en tiempo real según potenciómetro

7. GUÍA DE OPERACIÓN PASO A PASO

1. **Encendido:** Activar interruptor principal. El LED blanco se enciende y el LCD mostrará U I D E. Esperar estabilización.
2. **Menú:** A pruebas estáticas B pruebas
3. **Modos disponibles:**
 - **D → Prueba de Verificación de Sensores Hall:** El motor comienza a girar hacia la derecha hasta que el sensor Hall izquierdo detecta el imán. Al detectarlo, el **LED 24 (Amarillo/Accesorios)** comienza a titilar. Inmediatamente después, el motor invierte el giro hacia la izquierda hasta que el sensor Hall derecho detecta el imán. Al detectarlo, el **LED 28 (Verde/Arranque)** comienza a titilar. Al finalizar, ambos Leds quedan titilando indicando que los sensores funcionan correctamente.

- **A → Arranque → Ignición:** Simula encendido vehicular (4 segundos) → entra automáticamente a modo dinámico.

4. **Modo Dinámico (Ignición):**

- aplastar D → activa el motor.
- Girar el potenciómetro → varía la velocidad simulada (0–130 km/h). El torque baja automáticamente.
- Presionar * → Detiene el motor y regresa al menú anterior.

5. **Reset:** # vuelve al inicio U I D E.

8. SEGURIDAD Y MANTENIMIENTO

✓ **Seguridad Operativa:**

- Usar fusible 15A en línea +12V. No exceder 14.5V.
- Verificar tierra común antes de energizar.
- Mantener manos y herramientas alejadas del eje durante operación.

✓ **Solución Rápida (LCD se congela/apaga al girar motor):**

- Causa: Caída de voltaje por pico de arranque del BLDC.
- Solución: El capacitor **4700 μ F + 1 μ F** ya está instalado. Si persiste, alimentar Arduino por USB independiente.

✓ **Mantenimiento Preventivo:**

- Limpiar contactos del teclado y potenciómetro con alcohol isopropílico.
- Revisar tornillería estructural y alineación de sensores Hall (2–5 mm del imán).
- Verificar estado de MOSFET con multímetro (modo diodo: Drain-Source debe marcar OL en inversa).

- Almacenar en lugar seco (humedad <60%), temperatura 10–30°C.

9. CONTACTO Y SOPORTE TÉCNICO

Para consultas técnicas, actualizaciones de firmware o soporte:

Contacto Directo:

Irvin Herrera

Teléfono/WhatsApp: **0989201099**

Quito, Ecuador

Soporte Técnico:

- Errores de compilación del código Arduino
- Ajuste de parámetros de control
- Modificaciones del hardware
- Diagnóstico de fallas en el banco

Institución:

Universidad Internacional del Ecuador (UIDE)

Facultad de Ingenierías Aplicada y Desarrollo Industrial

Tutor: MSc. Denny Guanuche, Ph.D.

OWNER'S MANUAL

Test Bench for Column-Type EPS Steering Box

Sequential Trapezoidal Control at 250 Hz with Arduino Mega

Authors: Irvin L. Herrera Mejía & Carlos G. Cují Cachupud

Institution: Universidad Internacional del Ecuador (UIDE) | Quito, 2026

Tutor: MSc. Denny Guanuche, Ph.D.

Technical Contact: Irvin Herrera - 0989201099

Firmware Version: 1.0 (6-Step Sequential Control - 10Hz)

CONTENTS

1. System Description
2. Actual Technical Specifications
3. BLDC Motor Control Types
4. Complete Connection Diagram
5. Function of Each Test Mode
6. Real LCD Display Screens
7. Step-by-Step Operation Guide
8. Safety and Maintenance
9. Contact and Technical Support

1. SYSTEM DESCRIPTION.

The test bench allows verification and visualization of the electrical behavior of a column-type EPS (Electric Power Steering) system through sequential trapezoidal control. The system simulates real operating conditions by estimating parameters through mathematical models integrated into the Arduino Mega firmware. It does not use physical current or temperature sensors, focusing its operation on control logic, Hall sensor detection, and vehicle speed emulation.

Applications:

- Technical training in electronic steering systems
- Basic functional diagnosis of EPS boxes
- Validation of trapezoidal control algorithms

- Predictive maintenance training

2. ACTUAL TECHNICAL SPECIFICATIONS.

Component	Model/Configuration	Function
Microcontroller	Arduino Mega 2560	Central processing and control
Display	LCD 20x4 I2C (0x27)	Real-time parameter visualization
Keypad	4x4 membrane matrix	Menu navigation and mode selection
Potentiometer	Linear 10k Ω (Pin A0)	Simulates vehicle speed (0–130 km/h)
Direction Sensors	Hall A3144 (Pins 2 & 3)	Detect left/right turn
Low-Side MOSFETs	IRF3205 (x3)	Ground commutation (control)
High-Side MOSFETs	IRFP250N (x3)	+12V commutation (power)
Power Filtering	4700 μ F + 1 μ F (105K)	Voltage stabilization
Power Supply	Battery/Source 12.5–14.5 V DC	Driver and logic supply
Commutation Frequency	10Hz	Trapezoidal sequential control
Operating Voltage	12.5 – 14.5 V	Standard automotive range
Maximum Torque	3.0 N·m (100% at 0 km/h)	Maximum assistance
Estimated Current	100 mA (idle) to 1000 mA (max)	Software estimation

LED Indicators:

LED	Arduino Pin	Color	Function
LED_SYS	Pin 24	 Yellow	ACCESSORIES (hall1)
LED_RUN	Pin 26	 Blue	IGNITION (System active)
LED_COOL	Pin 28	 Green	START (hall2)
LED_ERR	Pin 30	 Red	EPS FAULT (System error)
Main Switch	-	 White	Bench power ON (Arduino ON)

3. BLDC MOTOR CONTROL TYPES**3.1 Trapezoidal Sequential Control (IMPLEMENTED IN THIS BENCH).**

Description: 6-step commutation per electrical revolution. Two active phases (HIGH/LOW), one floating (OFF).

Frequency: 10 Hz effective

Advantages: Simple, low cost, easy microcontroller implementation.

Disadvantages: Pulsating torque, moderate acoustic noise.

Brands: Ford, Chevrolet, Honda, Nissan, Kia/Hyundai.

3.2 Sinusoidal Control.

Description: All three phases are powered with 120° phase-shifted sinusoidal signals.

Frequency: 10–20 kHz

Advantages: Constant torque, minimal noise, high energy efficiency.

Disadvantages: Complex, requires real-time trigonometric calculations.

Brands: BMW, Mercedes-Benz, Volkswagen ID.

3.3 Advanced FOC Control.

Description: Evolution of sinusoidal with field orientation algorithms and real-time compensation.

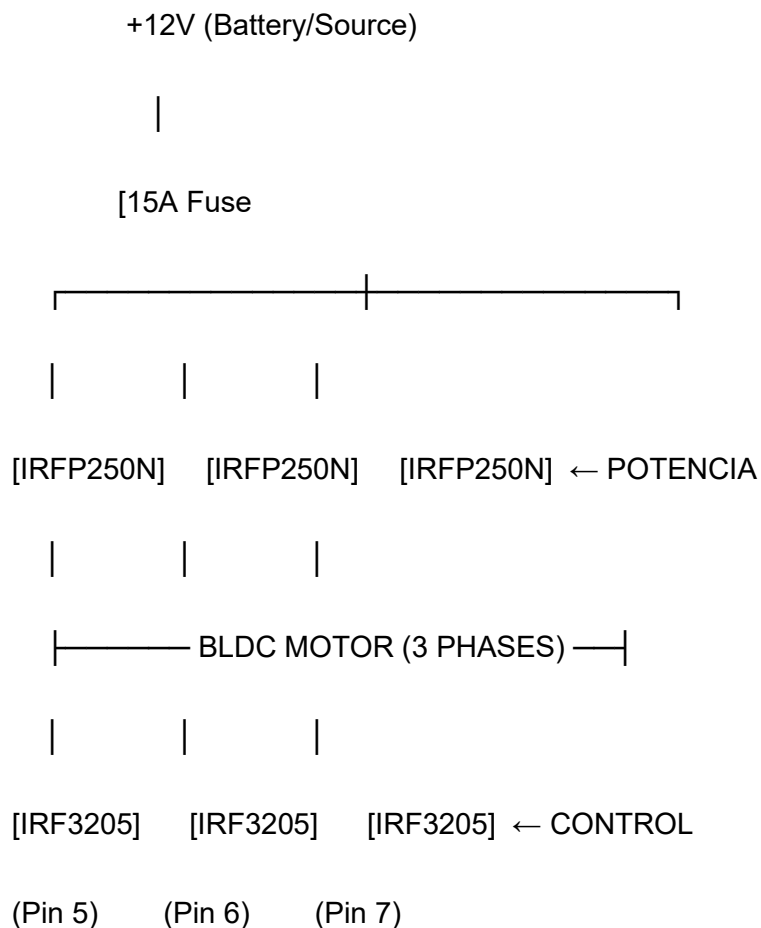
Advantages: Maximum efficiency, superior dynamic response, native ADAS integration.

Brands: Latest-generation premium systems, high-end electric vehicles. Tesla, Audi, Ix, Jaguar, Rivian

(Note: This bench does not use traditional PWM modulation. Control is performed exclusively through trapezoidal sequential commutation).

4. COMPLETE CONNECTION DIAGRAM

4.1 BLDC Motor Connection (3 Phases)





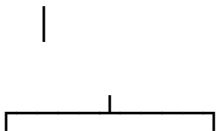
GND

Phase Assignment by Color:

Arduino Pin	Cable Color	Motor Phase	Low-Side MOSFET	High-Side MOSFET
Pin 5	Blue	Phase A	IRF3205 #1	IRFP250N #1
Pin 6	Yellow	Phase B	IRF3205 #2	IRFP250N #2
Pin 7	Red	Phase C	IRF3205 #3	IRFP250N #3

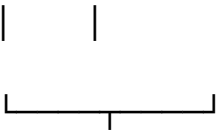
4.2 Hall Sensor A3144 Connection

+5V (Arduino)



[Hall Left] [Hall Right]

(Pin 2) (Pin 3)



GND

Cable Assignment by Color:

Cable Color	Connection	Function
 Red	+5V Arduino	Positive power supply (VCC)
 Black	GND Arduino	Common ground (0V)
 Blue	Arduino Pin 2	Left Hall Signal (Left turn detection)
 Green	Arduino Pin 3	Right Hall Signal (Right turn detection)

Technical Note: Sensors operate with Arduino internal pull-up (INPUT_PULLUP). When the magnet passes, the signal drops to LOW. Recommended magnet-sensor distance: 2–5 mm.

4.3 LCD 20x4 I2C Display Connection

LCD Pin	Arduino Pin	Function
VCC	5V	Power supply
GND	GND	Ground
SDA	Pin 20	I2C Data
SCL	Pin 21	I2C Clock

I2C Address: 0x27

4.4 4x4 Keypad Connection

Rows	Arduino Pin	Columns	Arduino Pin
Row 1	Pin 39	Column 1	Pin 47

Rows	Arduino Pin	Columns	Arduino Pin
Row 2	Pin 41	Column 2	Pin 49
Row 3	Pin 43	Column 3	Pin 51
Row 4	Pin 45	Column 4	Pin 53

Key Distribution:

1 2 3 A

4 5 6 B

7 8 9 C

* 0 # D

Key Functions:

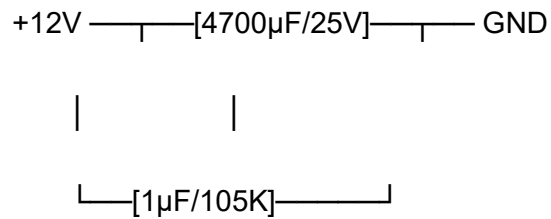
- * → Previous menu / Stop motor
- # → Full reset (return to UIDE)
- D → Hall Sensor Verification Test
- A → Start mode → Ignition

4.5 Potentiometer Connection

Terminal	Connection
Terminal 1	+5V Arduino
Terminal 2 (center)	Pin A0 (analog input)
Terminal 3	GND Arduino

Function: Simulates vehicle speed from 0 to 130 km/h

4.6 Power Filtering



Location: As close as possible to the MOSFET driver

5. FUNCTION OF EACH TEST MODE

Static Test (Key D)

Purpose: Simulate maximum assistance demand condition (stationary vehicle - parking maneuvers).

Characteristics:

- Simulated speed: 0 km/h (fixed)
- Torque: 100% (3.0 N·m)
- Estimated current: 1000 mA

Automatic Sequence:

1. **0–7 seconds:** Left turn (100% torque)
2. **7–17 seconds:** Complete pause (0% torque, motor stopped)
3. **17–24 seconds:** Right turn (100% torque)

Application:

- Verify motor responds in both directions
- Validate MOSFETs commutate correctly
- Check for phase short circuits

- Diagnose Hall sensor faults

When to use:

- When installing a new EPS box
- After BLDC motor maintenance
- To verify phase connections
- In basic technical training

◆ **Hall Sensor Verification Test (Key D in Menu)**

Purpose: Verify correct operation of A3144 Hall sensors that detect steering wheel rotation direction.

Operation Sequence:

1. **Phase 1 - Right Turn:**

- Motor starts turning **RIGHT**
- Searches to detect left Hall sensor magnet
- Upon detection, **LED 24 (Yellow/Accessories)** begins **BLINKING**
- Display shows: "LED 24: WAITING" → "LEFT HALL: OK"

2. **Phase 2 - Left Turn:**

- Immediately after, motor **REVERSES** direction to **LEFT**
- Search to detect right Hall sensor magnet
- Upon detection, **LED 28 (Green/Start)** begins **BLINKING**
- Display shows: "LED 28: WAITING" → "RIGHT HALL: OK"

3. **Completion:**

- Motor **STOPS**
- **BOTH LEDs (24 and 28) remain BLINKING** simultaneously
- Display shows: "SENSORS OK - LED 24 + 28 BLINKING"
- Indicates both sensors are working correctly

Application:

- Verify sensors detect magnet correctly
- Diagnose damaged or misaligned sensors
- Verify magnet-sensor distance (2–5 mm)
- Validate only one sensor activates at a time

When to use:

- After installing or replacing Hall sensors
- When motor doesn't turn in one direction
- To adjust magnet position
- In steering fault diagnosis

◆ **Start → Ignition Mode (Key A)**

Purpose: Simulate vehicle ignition and enter dynamic driving mode.

Sequence:

1. START (4 seconds):

- Display shows: "START - Wait 4 secs..."
- Simulates vehicle ignition time
- Green LED (Start) turns on

2. IGNITION (Dynamic Mode):

- Automatic transition after 4 seconds
- Blue LED (Ignition) turns on
- System enters dynamic mode

Application:

- Simulate real driving conditions
- Verify inverse speed-torque relationship
- Validate adaptive control algorithm
- Diagnose variable assistance problems

When to use:

- To simulate city driving (0–60 km/h)
- To simulate highway driving (80–130 km/h)
- To verify assistance decreases with speed
- In directional stability problem diagnosis

◆ Dynamic Mode (Ignition)

Purpose: Simulate real EPS system behavior during driving with variable speed.

Characteristics:

- Simulated speed: 0–130 km/h (adjustable with potentiometer)
- Torque: Inversely proportional to speed
- Current: Estimated based on requested torque

Speed-Torque Relationship:

Speed (km/h)	Torque (%)	Torque (N·m)	Current (mA)
0	100%	3.00	1000
20	85%	2.55	865
40	69%	2.07	721
60	54%	1.62	586
80	38%	1.14	442
100	23%	0.69	307
130	1%	0.03	109

Application:

- Verify inverse speed-torque relationship
- Validate adaptive control algorithm
- Diagnose variable assistance problems
- Train in real EPS behavior

When to use:

- To simulate city driving (0–60 km/h)
- To simulate highway driving (80–130 km/h)
- To verify assistance decreases with speed
- In directional stability problem diagnosis

6. REAL LCD DISPLAY SCREENS**1. Startup (UIDE)**

U I D E

2. Data Verification

verificacion de datos

3. Menu

menu

D: Prueba Estática

A: Arranque

*: Detener

4. Hall Sensor Verification Test (Key D)

prueba automatica

Giro: DERECHA

LED 24: ESPERANDO

(Motor turns right. When left Hall detects magnet, LED 24 starts blinking and screen changes to:)

Giro: IZQUIERDA

LED 28: ESPERANDO

(When right Hall detects magnet, LED 28 blinks, both LEDs blink together and shows:)

SENSORES OK

LED 24 + 28 TITILAN

*: Volver

5. Start (Key A)

ARRANQUE

Espere 4 segs...

Simulates vehicle ignition (4 seconds)

6. Ignition (Dynamic)

km/h: 60

Torque: 54% Nm

I: 586 mA

*: Detener

Values change in real-time based on potentiometer

7. STEP-BY-STEP OPERATION GUIDE

1. **Power On:** Turn on main switch. White LED turns on and LCD shows U I D E. Wait for stabilization.
2. **Menu:** Press A → Prueba dinamica → Press B → Prueba estatica.
3. **Available Modes:**
 - **D → Hall Sensor Verification Test:** Motor starts turning right until the left Hall sensor detects the magnet. Upon detection, **LED 24 (Yellow/Accessories)** begins blinking. Immediately after, the motor reverses direction to the left until the right Hall sensor detects the magnet. Upon detection, **LED 28 (Green/Start)** begins blinking. When complete, both LEDs blink together, confirming sensors are working correctly.
 - **A → Start → Ignition:** Simulates vehicle ignition (4s) → automatically enters dynamic mode.
4. **Dynamic Mode (Ignition):**

- Turn steering wheel → activates motor in detected direction.
- Turn potentiometer → varies simulated speed (0–130 km/h). Torque decreases automatically.
- Press * → Stops motor and returns to previous menu.

5. **Reset:** # returns to startup U I D E.

8. SAFETY AND MAINTENANCE

✓ Operational Safety:

- Use 15A fuse on +12V line. Do not exceed 14.5V.
- Verify common ground before powering on.
- Keep hands and tools away from shaft during operation.

✓ Quick Fix (LCD freezes/blanks when motor turns):

- Cause: Voltage drop due to BLDC startup spike.
- Solution: The 4700 μ F + 1 μ F (105K) capacitor is already installed. If issue persists, power Arduino via independent USB.

✓ Preventive Maintenance:

- Clean keypad and potentiometer contacts with isopropyl alcohol.
- Check structural bolts and Hall sensor alignment (2–5 mm from magnet).
- Verify MOSFET status with multimeter (diode mode: Drain-Source should read OL in reverse).
- Store in dry place (humidity <60%), temperature 10–30°C.

9. CONTACT AND TECHNICAL SUPPORT

For technical inquiries, firmware updates, or support:

Direct Contact:

Irvin Herrera

Phone/WhatsApp: **0989201099**

Quito, Ecuador

Technical Support:

- Arduino code compilation errors
- Control parameter adjustments
- Hardware modifications
- Test bench fault diagnosis

Institution:

Universidad Internacional del Ecuador (UIDE)

Faculty of Applied Engineering and Industrial Development

Tutor: MSc. Denny Guanuche, Ph.D.

© 2026 EPS Test Bench – UIDE

Document for educational and technical training use.

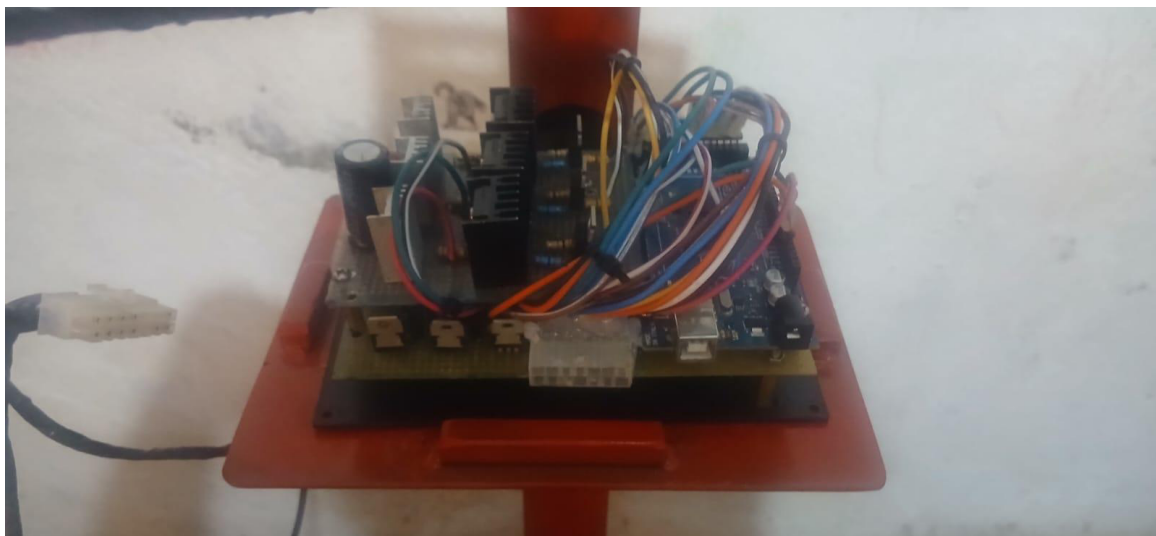
Anexo 31 Soporte del banco de pruebas.



Anexo 32 Tablero de control.



Anexo 33 Placa con componentes electrónicos del banco de pruebas.



Anexo 34 Banco de pruebas terminado.



1. ESQUEMA GENERAL DEL BANCO DE PRUEBAS

