

SISTEMA DE CONTROL PARA LA GESTIÓN INDEPENDIENTE DE CORRIENTE POR BOBINA Y ENCENDIDO EN MOTORES DE CUATRO CILINDROS

Realizado por:
Ing. Carlos Durán / Correo: carlospuv789@gmail.com
Ing. Alirio Sánchez / Correo: aliriojosesanchez6@gmail.com
Ing. Edgar Vásquez / Correo: ejvasan1504@gmail.com

Tutor Académico:
Dr. Francisco Parra / Correo: frparra@gurbe.edu.ve

Tutor Metodológico:
Dra. Maribel Ordoñez / Correo: mordonez@urbe.edu.ve

La evolución de la optimización y los sistemas de control en la electrónica comenzó con la aplicación de principios de retroalimentación negativa en ingeniería de control, marcando el inicio de la teoría moderna de control. Esta teoría permitió el desarrollo de sistemas automáticos más precisos y estables. Con el avance de la computación, surgieron métodos de optimización más sofisticados, como los algoritmos y la programación matemática, que mejoraron significativamente la eficiencia de los sistemas electrónicos. Estas tecnologías han revolucionado sectores como la

automatización industrial, las telecomunicaciones y la industria automotriz, impulsando una nueva era de innovación en la electrónica.

Un ejemplo de la evolución en los sistemas de control electrónicos se puede observar en la mejora de los sistemas de encendido en los automóviles, estos han experimentado una notable evolución desde los primeros días de la automoción. Inicialmente, los motores de combustión interna usaban sistemas de encendido por magneto, que generaban electricidad mediante imanes y bobinas. Con el paso del tiempo, estos sistemas evolucionaron hacia el uso de distribuidores y bobinas de encendido, lo que permitió un mejor control de la chispa y el rendimiento del motor. Más adelante, se introdujeron los sistemas de encendido electrónico, que sustituyeron los componentes mecánicos por circuitos electrónicos, mejorando así la precisión y la eficiencia.

Debe señalarse que uno de los aspectos cruciales para el rendimiento de los motores es el sistema de encendido. La sincronización precisa del encendido y la adecuada distribución de corriente a cada cilindro son esenciales para maximizar la potencia del motor, minimizar el consumo de combustible y reducir las emisiones nocivas. No obstante, los sistemas de encendido tradicionales enfrentan limitaciones en cuanto a la gestión independiente de la corriente por bobina. Estos sistemas suelen depender de una computadora que no permite una optimización individual para cada cilindro.

En relación con la problemática expuesta, surge la necesidad de desarrollar un sistema de control avanzado que permita la gestión independiente de la corriente por bobina y del encendido en motores de cuatro cilindros. Este nuevo enfoque tiene el potencial de ajustar de manera precisa la corriente y el momento de encendido.

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

La electrónica desempeña un papel esencial en una sociedad cuyo desarrollo se ha centrado en la tecnología. Su impacto puede resumirse en dos aspectos clave: facilitar la comunicación y la conectividad, reduciendo las distancias, y proporcionar soluciones prácticas que optimicen las actividades diarias, mejorando la eficiencia y la accesibilidad en diversos ámbitos de la vida cotidiana.

Para desarrollar una descripción del funcionamiento del diseño, se realizó una investigación del desempeño de los motores carburados y las desventajas que ellos presentan con los distribuidores convencionales, por lo cual se trazó una línea a seguir, el cual era sustituir la parte mecánica del distribuidor que capta la posición del árbol de leva, y reemplazarla con un sensor electrónico que

pudiese eliminar por completo la flotabilidad que estos distribuidores presentan después de las 3000 rpm del motor, haciendo esto más eficiente el funcionamiento del mismo, a su vez pueda adelantar el encendido de la bobina a altas revoluciones, logrando así en la etapa de explosión una mayor eficacia en el desempeño del motor.

Se realizaron las especificaciones de los requerimientos para el diseño del prototipo, para ello se tomó en cuenta que el sensor no debe ser invasivo para ser eficiente cuando el motor se encuentre a altas revoluciones, el mismo sistema de control debe tener una etapa de potencia la cual capte las señales de control a altas frecuencias de conmutación para activar la chispa de las bobinas, también las condiciones externas donde se ubica el prototipo es algo a tomar en cuenta para la durabilidad del mismo.

En este contexto, se establece lo que debe contemplar el diseño posterior, incluyendo la identificación de requerimientos y necesidades. Para ello, se lleva a cabo una entrevista estructurada dirigida a expertos en sistemas de control electrónicos, así como a personas con conocimientos fundamentales sobre mecánica automotriz y sistemas de distribución de corriente, esto con la finalidad de, a partir de conocimientos impartidos por los entrevistados y de la proyección de la investigación, dar forma al prototipo.

Una vez analizados los sistemas de control y encendido empleados actualmente en automóviles de cuatro cilindros, se procede a iniciar la fase II metodológica de la investigación titulada definición de las especificaciones, correspondiente al segundo objetivo específico el cual consiste en determinar los parámetros del sistema de encendido para motores de cuatro cilindros.

Esta etapa tiene como propósito establecer las especificaciones técnicas de cada elemento que conforma el sistema, garantizando su compatibilidad, eficiencia y funcionalidad dentro del conjunto. Para ello, se recurrió a técnicas de revisión bibliográfica, consulta de hojas técnicas (datasheets), documentación especializada en electrónica de potencia, y fuentes académicas disponibles en bibliotecas virtuales. La selección de componentes se fundamenta en criterios como capacidad de manejo de corriente, respuesta electromagnética, facilidad de integración y disponibilidad comercial, con el fin de asegurar un diseño robusto y escalable.

En función del diseño planteado, se identifican y especifican todas las entradas y salidas necesarias para el sistema de control, considerando tanto las señales digitales como las analógicas involucradas en el proceso. Asimismo, se incorpora una descripción técnica del tipo de comunicación utilizado, estructurada bajo un esquema de análisis que permite comprender su función dentro del sistema.

En el diseño de las entradas del sistema de control de distribución de corriente por bobina, se contempla la integración de un sensor ubicado en el distribuidor del automóvil, cuya función principal es detectar la posición de la leva para sincronizar el encendido. Para la elaboración de este sensor se emplean componentes como el sensor de efecto Hall. Dentro de la parte logica del sistema de control, se incorpora el ESP32. Por su parte, se incorpora el driver TC4427 como elemento clave para la transición entre señales digitales y la activación de la etapa de potencia. Como componente final de la etapa lógica, el transistor IRF3205 cumple la función de conmutar la carga de forma eficiente, confiable y altamente precisa en respuesta a las señales amplificadas por el driver.

La parte de salida del sistema de control está conformada por los elementos encargados de transmitir la señal final hacia el mecanismo de encendido. Esta sección incluye dispositivos que reciben la activación desde la etapa lógica y la canalizan hacia el sistema físico que genera la respuesta mecánica. Para ello, se utilizan componentes que permiten la conducción de energía, conexiones que aseguran la continuidad del flujo eléctrico, y enlaces que dirigen la señal hacia los puntos de ignición. La disposición adecuada de estos elementos es fundamental para garantizar que la señal procesada llegue con precisión y sin pérdidas, manteniendo la sincronización del sistema y asegurando su funcionamiento estable bajo condiciones variables.

En la parte de salida del sistema de control se emplean bobinas de encendido independientes, cada una dedicada a un cilindro específico del motor.

Una vez culminada la definición de las especificaciones para saber los requerimientos técnicos que se usaran en la prótesis robótica, se procede a realizar el esquema general del hardware correspondiente a la fase III, para cumplir así con el siguiente objetivo: Diseñar la arquitectura y lógica del sistema de control para la gestión independiente de corriente por bobina y encendido en motores de cuatro cilindros con los parámetros previamente establecidos.

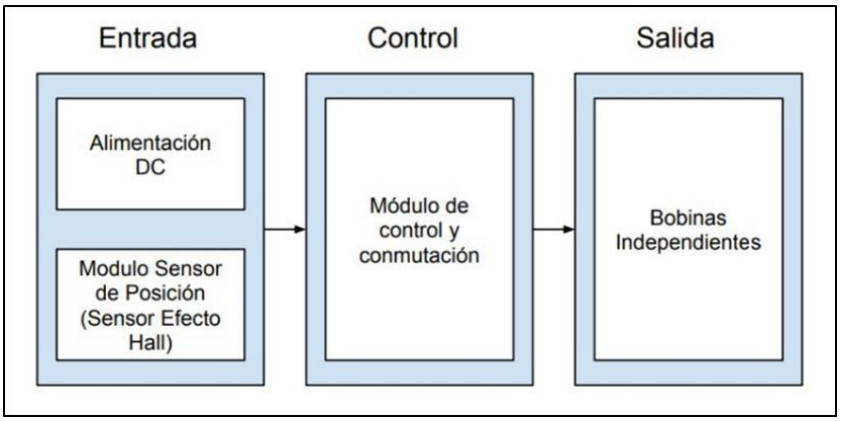


Figura 1. Esquema General del Hardware
Fuente: Durán, Sánchez y Vásquez (2025)

Como se observa en la Figura 1, el diagrama de bloques se divide en tres etapas donde se identifican las entradas, el control y la salida. El primer bloque presente en la etapa de entradas es la alimentación DC, este bloque suministra la energía de corriente continua que es esencial para energizar todos los componentes del sistema de control. Está compuesto por la batería de 12v o el alternador cuando el motor está en funcionamiento.

El siguiente bloque es el **módulo sensor de posición (sensor de efecto hall)**, este se compone de cuatro sensores de efecto hall (S1 a S4) ubicados en el distribuidor, estos se encargarán de detectar la posición de cada pistón en su fase de explosión, enviado una señal digital al **módulo de control y conmutación**, que es nuestra siguiente etapa. La etapa de control recibe las señales del módulo sensor de posición, la lógica de este módulo procesa la señal enviando la respuesta a la siguiente etapa.

La última etapa son las **bobinas independientes**, estas son la salida de todo el sistema, un conjunto de cuatro bobinas de ignición, una para cada cilindro. Estas bobinas son activadas por los MOSFETs (U1, U2, U3 y U4), que reciben la señal del módulo sensor de posición. Al ser activadas, las bobinas generan la alta tensión necesaria para la bujía del cilindro correspondiente, produciendo la chispa en el momento preciso**.**

El proceso se inicia con la rotación del distribuidor, generando señales secuenciales que activan el ciclo de operación del sistema. El mecanismo de control realiza un monitoreo continuo del estado de los sensores, ejecutando una verificación sistemática en orden predeterminado. Cada detección de activación desencadena inmediatamente una respuesta de encendido en la bobina correspondiente, generando un pulso instantáneo para la chispa del cilindro respectivo.

El ordinograma representa así la integración completa de los componentes lógicos, temporales y de seguridad requeridos para el funcionamiento óptimo del sistema de encendido, cumpliendo con los parámetros y objetivos de diseño establecidos para la gestión del motor de cuatro cilindros.

El desarrollo del sistema de control está basado en la plataforma ESP32, utilizando el lenguaje de programación C++ propio del IDE de Arduino. El software implementa un sofisticado sistema de gestión de ignición que monitorea cuatro sensores de efecto Hall ubicados en los pines 4, 0, 2 y 15, y controla las salidas correspondientes en los pines 26, 25, 33 y 32 para las bobinas de ignición de cada cilindro. El programa incorpora un algoritmo de adelanto variable que ajusta dinámicamente el punto de encendido en función de las RPM del motor, utilizando una tabla predefinida con valores de adelanto específicos para diferentes regímenes de giro.

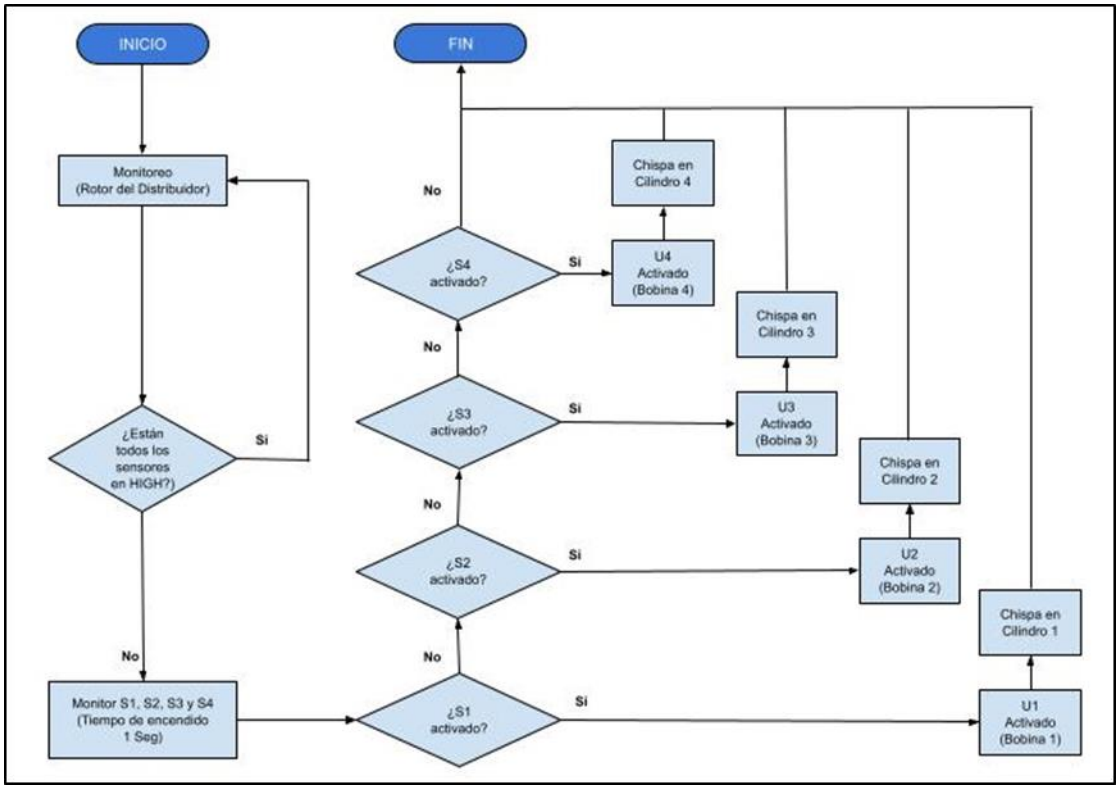


Figura 2. Ordinograma General del Sistema
Fuente: Durán, Sánchez y Vásquez (2025)

Se llevó a cabo el montaje de los componentes electrónicos para dar cumplimiento al cuarto objetivo de nuestro trabajo de investigación “construir un prototipo del sistema de control para la gestión independiente de corriente por bobina y encendido en motores de cuatro cilindros.”

Se finalizó el diseño completo del sistema de encendido electrónico, integrando el módulo de sensado de posición con la etapa de potencia para cumplir con el objetivo de construir un prototipo funcional del sistema de control para la gestión independiente de corriente por bobina y encendido en motores de cuatro cilindros. Se llevó a cabo el diseño e implementación de la etapa de potencia que constituye el núcleo del sistema de generación de chispa, reemplazando completamente los componentes mecánicos del distribuidor tradicional por un sistema electrónico de precisión.

Para la alimentación de la fase de potencia, se usará el alternador del automóvil que maneja una corriente nominal de 70A, en condiciones óptimas el voltaje del alternador es de 14V.

El sistema de potencia va a mantener un voltaje de 12V regulados por un LM7812 e implementa cuatro MOSFETs IRF3250 configurados para conmutar individualmente cada una de las cuatro bobinas de encendido, una por cada cilindro del motor. La selección del IRF3250 se basó en su

capacidad de manejar corrientes de hasta 30A y voltajes de hasta 250V, características suficientes para las demandas energéticas de las bobinas de encendido automotriz.

El sistema implementa bobinas de encendido independientes cuyo diseño se basa en los parámetros característicos de las bobinas Honda originales, las cuales operan con un voltaje primario de 12 voltios DC y requieren una corriente máxima de aproximadamente 7 amperios durante el pulso de encendido. Estas bobinas están diseñadas para generar una alta tensión secundaria de hasta 35,000 voltios, suficiente para garantizar una combustión óptima en condiciones normales de operación del motor.

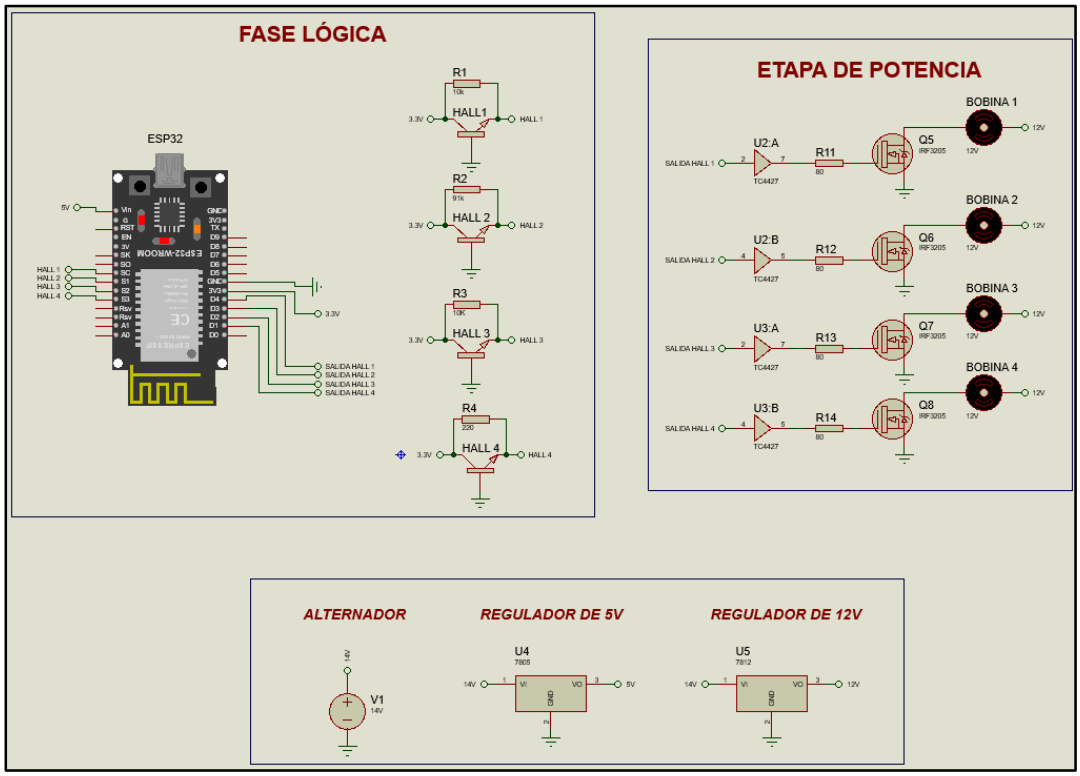


Figura 3. Simulación del prototipo
Fuente: Durán, Sánchez y Vásquez (2025)

Para comenzar la construcción del prototipo definitivo se aplicó el método de planchado a las baquelas de cobre para imprimir el circuito y posteriormente soldar los componentes en dichas baquelas. Luego se procedió a realizar las respectivas pruebas y mediciones para comprobar el correcto funcionamiento de las baquelas, continuando con las actividades a realizar se armó el banco de prueba para poder visualizar el funcionamiento en conjunto de las distintas etapas del sistema de control.

Este banco de prueba fue diseñado para simular las condiciones reales de operación del motor, permitiendo la adquisición y análisis de datos en tiempo real sobre la corriente gestionada en cada bobina y la sincronización de la chispa. Esto es clave para validar si el sistema cumple con los parámetros de precisión y estabilidad establecidos en las fases iniciales del diseño.

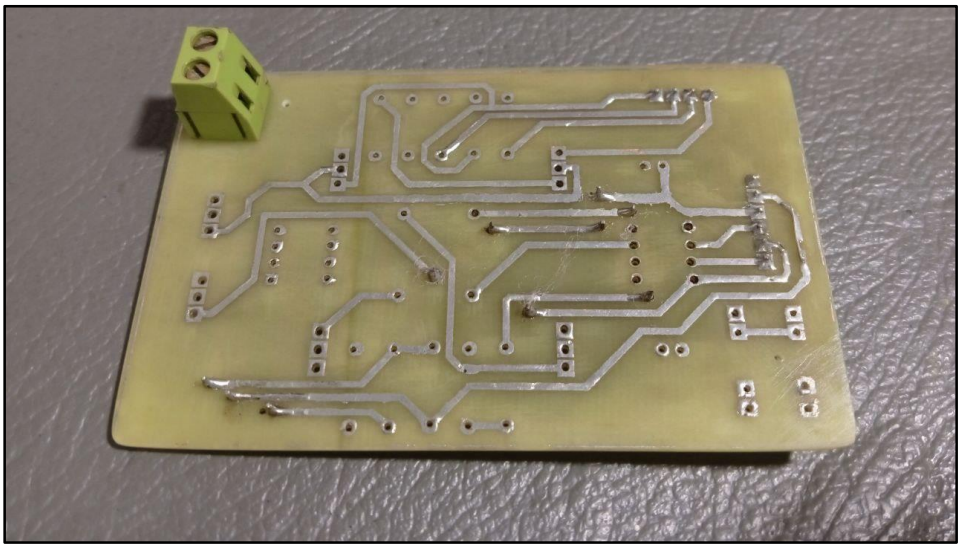


Figura 4. Baquela etapa de potencia
Fuente: Durán, Sánchez y Vásquez (2025)

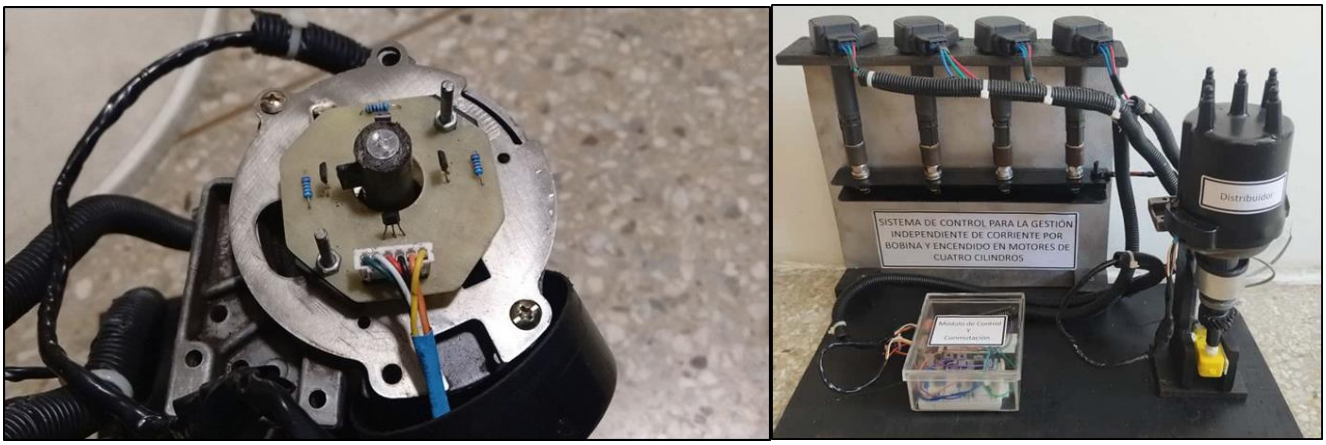


Figura 5. Sensor de posición y Banco de prueba
Fuente: Durán, Sánchez y Vásquez (2025)

La siguiente lista de verificación se ha diseñado como una herramienta sistemática para garantizar el correcto funcionamiento de todos los componentes del sistema de control. Su ejecución metódica permite verificar la integridad, configuración y operatividad de cada etapa, desde la entrada de datos hasta la salida de actuación, asegurando así la fiabilidad del sistema y facilitando la identificación temprana de posibles anomalías.

Cuadro 1. Lista de verificación

Procedimiento		
Planchar correctamente de la impresión		
Verificar las pistas del circuito		
Verificar la correcta soldadura de los componentes		
Medir los voltajes de alimentación de las fases		
Medir los voltajes de salida de los sensores		
Medir voltaje de salida de ESP32		
Verificar activación correcta de los drivers TC4427		
Medir salida de los MOSFETS		
Corroborar que el circuito funciona de acuerdo a la lógica establecida		

FUENTE: Durán, Sánchez y Vásquez. (2025)

CONCLUSIONES

La culminación de la fase práctica permitió validar los aspectos teóricos mediante un análisis exhaustivo de los sistemas de control y encendido en motores modernos de cuatro cilindros. La investigación se centró en la gestión de la sincronización de inyección y encendido a través del estudio de componentes clave como el distribuidor, cigüeñal y bobinas. Para determinar los parámetros operativos, se empleó un banco de pruebas con un motor de corriente directa y un osciloscopio digital, logrando medir con precisión tiempos de carga y comportamientos del sistema bajo distintas velocidades simuladas.

Posteriormente, se desarrolló la arquitectura de control utilizando un microcontrolador ESP32, cuya lógica fue validada inicialmente mediante simulaciones en Proteus y sensores de efecto Hall para la sincronización de los cilindros. El diseño evolucionó hacia un prototipo físico construido en una placa de circuito impreso de doble cara, el cual fue sometido a pruebas de funcionamiento definitivas. Los resultados documentados confirmaron que el dispositivo opera de manera estable y fiel a los parámetros de diseño establecidos, cerrando así el ciclo de los objetivos específicos planteados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Bonnick, A. (2001). **Automotive Computer Controlled Systems: Diagnostic Tools and Techniques (1st ed.).** Butterworth-Heinemann. https://books.google.co.ve/books?id=Q6Os_RZWu1QC&printsec=frontcover&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false

Brunete, A., San Segundo, P., y Herrero, R. (2025). Introducción a la Automatización Industrial. Bookdown. Madrid (España). https://bookdown.org/alberto_brunete/intro_automatica/

Corona, L., Abarca, G., y Mares, J. (2019). **Sensores y Actuadores, Aplicaciones con Arduino.**

Larousse – Grupo Editorial Patria. Ciudad de México (México). https://drive.google.com/file/d/1oHODYI9RXDKafi0lwwuUPSTyeFBuz3Zi/view?usp=drive_link

Heisler, H. (1995). **Advanced Engine Technology.** SAE International. https://mit.primo.exlibrisgroup.com/permalink/01MIT_INST/ejdckj/alma990009321380106761

Khalil, H. (2023). **Control Systems: An Introduction.** Michigan Publishing. Michigan (Estados Unidos de América). https://drive.google.com/file/d/1YQ8uI5GjZWetrhJ-Ge4h8nrnIBJ48pA5/view?usp=drive_link

Ogata, K. (2010). **Ingeniería de Control Moderna.** Pearson Educación. Madrid (España). https://ingenierovizcaino.com/material/libros/sd/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf

Reif, K. (2014). **Automotive Mechatronics: Automotive Networking, Driving Stability Systems, Electronics.** Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-658-03975-2

Tocci, R. (2003). **Sistemas Digitales: Principios y Aplicaciones.** Pearson Educación. Nueva York (Estados Unidos de América). **https://virtual.unju.edu.ar/pluginfile.php/161532/mod_resource/content/16/%5BTocci-2007%5D%20Sistemas_Digitales_Principios_y_Aplicaciones%20-%20Cap%204.pdf**

Zhao, H. (2017). **Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development.** Woodhead Publishing. https://books.google.com/books/about/Advanced_Direct_Injection_Combustion_Eng.html?id=i32oAgAAQBAZ