

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR DE SEÑALES CKP Y CMP CON MATLAB Y SALIDA DE AUDIO PARA PRUEBAS DE ECU AUTOMOTRIZ

M.C.I. Aquino López Carlos

Universidad Politécnica del Valle de Toluca

Dirección de la División de Ingeniería Mecatrónica e Ingeniería Mecánica Automotriz

Dirección: Manzana 007, 50904 Villa de Almoloya de Juárez, Méx.

Teléfono: 722 276 6060

RESUMEN

En este artículo se describe el desarrollo de un sistema generador de señales que emula las salidas de los sensores CKP (cigüeñal) y CMP (árbol de levas), utilizando MATLAB para la generación digital y la salida de audio de una computadora como interfaz física. Se diseñaron señales periódicas con picos faltantes, caídas simuladas mediante ondas triangulares y señales cuadradas sincronizadas para la prueba de ECUs (computadoras automotrices). Se implementó una GUI (interfaz gráfica) interactiva para el control de parámetros y la grabación de la señal.

Palabras Clave: Generador de señales, CKP, CMP, ECU automotriz, MATLAB, señales sincronizadas, serie de Fourier, diagnóstico automotriz, sensores magnéticos, acondicionamiento de señal.

ABSTRACT

This paper presents the design and development of a synchronized CKP (Crankshaft Position) and CMP (Camshaft Position) signal generator using MATLAB as the digital signal generation platform and a computer audio output as the physical interface. The system emulates real automotive sensor behavior by generating periodic signals with missing teeth patterns, cubic-shaped voltage drops, and synchronized square waves suitable for ECU diagnostic testing. A graphical user interface (GUI) was implemented to allow real-time control of parameters such as engine speed (RPM), number of missing teeth, pulse duration, and signal amplitude. The generated signals are exported as audio signals through a stereo output, assigning CKP and CMP signals to independent channels. To ensure compatibility with automotive electronic control modules, external signal conditioning circuits, including low-pass filtering, comparators, and an instrumentation amplifier, were designed and validated. Experimental results demonstrate that the proposed system successfully reproduces real CKP and CMP signal patterns observed in automotive oscillograms, offering a flexible and low-cost alternative to commercial signal generators for ECU testing and diagnostics.

Keywords: Signal generator, CKP, CMP, automotive ECU, MATLAB, synchronized signals, Fourier series, automotive diagnostics, magnetic sensors, signal conditioning.

1. INTRODUCCIÓN

Las ECUs automotrices modernas, dependen de señales precisas provenientes de sensores CKP y CMP. Para diagnósticos, es útil disponer de un generador de señales que simule su comportamiento. En este trabajo se implementa un generador de señales digitales que produce ambas señales sincronizadas y exportables a la salida de audio.

En la actualidad existen varios generadores de señales sincronizadas CKP y CMP en el mercado, sin embargo, dichos generadores sólo pueden reproducir señales que tienen que se encuentran en una base de datos, lo cual es una limitante.

La principal función de un generador de señales sincronizadas es para realizar un correcto diagnóstico automotriz, en muchos talleres y empresas se utiliza principalmente para verificar el correcto funcionamiento de la ECU.

La sincronización entre los sensores CKP y CMP es crucial para el correcto funcionamiento del motor. La ECU utiliza las señales de ambos sensores para determinar la posición precisa del cigüeñal y el árbol de levas, lo que le permite controlar la inyección de combustible y la chispa de encendido de manera sincronizada con las fases del motor.

¿Cómo funcionan y se sincronizan?

1. Sensor CKP: Detecta la posición y velocidad del cigüeñal. Esta señal es la base para determinar la posición de cada pistón y el tiempo del ciclo de combustión.
2. Sensor CMP: Detecta la posición del árbol de levas, lo que permite identificar la fase de cada cilindro (admisión, compresión, explosión o escape).
3. Sincronización: La ECU utiliza ambas señales para calcular la posición precisa del cigüeñal y el árbol de levas. El CMP confirma la posición del pistón #1 en la carrera de compresión, lo que permite a la ECU sincronizar la inyección de combustible y el encendido con la secuencia correcta para cada cilindro.
4. Problemas de sincronización: Si hay una discrepancia en la correlación entre las señales, la ECU puede registrar códigos de falla y el motor puede experimentar problemas de arranque, pérdida de potencia o funcionamiento irregular.

En la *figura 1.0* se ilustran las señales sincronizadas CKP y CMP de un vehículo Aveo modelo 2014.

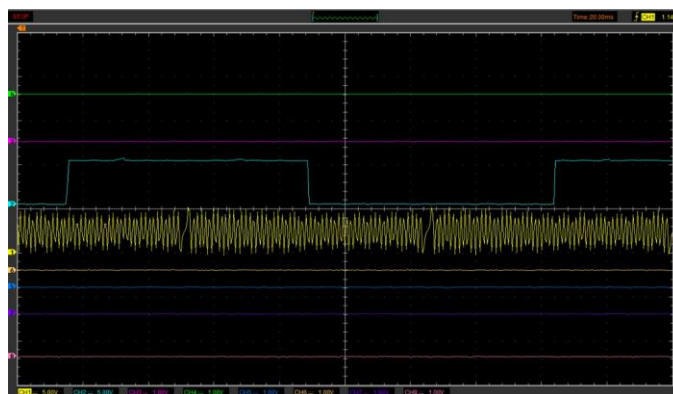


Figura 1.0 señales sincronizadas ckp-cmp vehículo Aveo 2014

Esta captura fue tomada con un osciloscopio automotriz *Hantek*, el oscilograma muestra el comportamiento de la señal del sensor CKP (gráfica color amarilla) y CMP (señal azul), como se puede observar en la señal del sensor CKP, hay un patrón diferente en la gráfica, esto quiere decir que hay dientes faltantes en el reluctor del cigüeñal, cada que el sensor de cigüeñal detecta un diente del reluctor, envía un “pico”, y cuando no detecta un diente envía un comportamiento distinto, semejante al comportamiento de una función cúbica o polinomial.

A esto se refiere la sincronización de las señales, como se puede observar cada cierto número de pulsos se activa la señal del sensor CMP y en cada vuelta del reluctor hay 2 dientes faltantes.

Cada marca de vehículo puede presentar un patrón de señales distinto, algunos fabricantes de este tipo de generadores de señales almacenan la información de estas señales mediante osciloscopios y las almacenan para su posterior uso, sin embargo esto podría significar una limitante, puesto que, a pesar de tener una gran base de datos de señales almacenadas, en el caso de no contar con cierto tipo de señal, no se podrían utilizar dichos generadores para realizar un correcto diagnóstico automotriz.

Algunos generadores están basados en la tarjeta Arduino, sin embargo, tiene varias limitantes:

- No tiene salidas analógicas, las cuales son necesarias para la generación de la señal CKP de los sensores magnéticos
- El rango de voltajes que puede manejar es de 0-5 V
- Tiene un procesamiento relativamente lento en comparación del procesamiento de una computadora

Por estos motivos, se opta por la utilización de la generación de las señales sincronizadas mediante Matlab.

2. METODOLOGÍA

Una serie de Fourier es aquella que toma un intervalo de una función y le da una aproximación en dicho intervalo, fuera del intervalo le da periodicidad a dicha función [1], lo que se realizó, fue mediante el software Matlab 2024, desarrollar una serie de Fourier de una señal rampa, después dicha señal se convierte a señal de audio, para posteriormente ser enviada a través de la salida de audio de dos canales de un equipo de cómputo.

Se plantea la serie de Fourier de la función $f(x) = x$ en $x \in [0,2]$, al desarrollar la serie de Fourier para esta función impar en el intervalo mencionado, se llega a la serie (1).

$$f(x) = \frac{2(-1)^{n+1}}{n\pi} \operatorname{sen}(n\pi x) \dots\dots\dots (1)$$

Se toma el desarrollo en serie de senos puesto que la función es impar, dicha función se programa en Matlab [2]:

```
for n = 1:N
    bn = 2*(-1)^(n+1)/(n*pi);
    y = y + bn*sin(2*pi*n*frec*t);
```

end

Dicha función ahora será convertida a un archivo de audio.

2.1 Escalamiento de la señal:

La señal periódica $f(x)$ se comportará como una onda periódica. La frecuencia fundamental depende del periodo $T = 2$. Esto significa una frecuencia dada por (2).

$$f_1 = \frac{1}{T} = 0.5\text{Hz} \dots\dots\dots (2)$$

Lo cual es inaudible, así que **se realizó el escalamiento de la frecuencia** a algo dentro del rango audible como 440 Hz.

Así, el escalamiento estará determinado por (3):

$$\omega_n = 2\pi n f_1 \Rightarrow \omega_n = 2\pi n * 440 \dots\dots\dots (3)$$

La señal de audio generada se envía por medio de la salida de audio (conector de 3.5 mm) de un equipo de cómputo, dicha salida al ser de tipo estereofónica puede enviar ambas señales en dos canales, el canal izquierdo y el canal derecho. En un canal se envió la señal del sensor CKP, mientras que en el otro canal se envió la señal del sensor CMP, este programa también tiene la capacidad de contar la cantidad de pulsos que envía la señal del sensor CKP, y después de la cantidad de pulsos que el usuario indique, se activa la señal CMP, dando también un periodo de la señal como función de la cantidad de picos que el usuario especifique.

2.2 Código realizado en matlab:

En este caso, se elige Matlab por ser un lenguaje de programación de alto nivel, en el cual se logró realizar una interfaz gráfica, así como la conversión de los datos calculados mediante la serie de Fourier a señal de audio, su captura y envío de la señal mediante el conector 3.5mm de audio.

El siguiente código es un fragmento que se encarga de crear una parte de la interfaz gráfica en Matlab, para que el usuario pueda ajustar el valor del rpm en la señal de audio generada.

```
uicontrol('Style','text','String','RPM:', 'Position',[20, 650, 50, 20], 'FontWeight','bold');
```

El procesamiento de los máximos locales en la señal creada mediante serie de Fourier consta de las siguientes etapas:

1. Encontrar los máximos locales de la señal mediante la instrucción **findpeaks**
2. Filtrar picos inválidos
3. Modificar las caídas de la señal en los ciclos

Posteriormente, se genera un vector x que va de -1 a 1 con. Luego, x se utiliza para generar una función cúbica ($1000 * x.^3$), que se normaliza para ajustarse a la amplitud deseada, dicha función cúbica reemplaza los picos inválidos que elige el usuario desde la interfaz gráfica, estos picos inválidos representan los dientes faltantes en el reluctor del

cigüeñal, la función cúbica tendrá una duración igual al periodo de los picos faltantes.

Este perfil cúbico se utiliza para reemplazar los valores de la señal en donde el usuario decide que hay picos faltantes.

2.3 Diseño de la señal cuadrada (CMP) y desarrollo de la interfaz gráfica (GUI).

La señal CMP fue diseñada como una onda cuadrada sincronizada con la señal CKP, activada tras medio ciclo, puesto que es lo que puede visualizarse en el oscilograma del vehículo Aveo 2014, y manteniéndose alta y baja durante un ciclo completo cada una. La amplitud de ambas señales es proporcional a las RPM, variando linealmente. En la *Figura 2.0* se puede observar la gráfica junto con la GUI de Matlab, como se puede observar se puede elegir la cantidad de picos que durará en estado alto la señal cuadrada, lo cual aparece como “*Duración cuadrada (picos válidos)*”, el control mediante el slider de las rpm, el cual también muestra su valor, la amplitud de la señal, la cual varía también al aumentar las rpm, la cantidad de dientes faltantes en cada ciclo, lo cual puede visualizarse como “*Picos faltantes por ciclo*”, la cantidad de dientes que deben de pasar para que se active la señal del sensor CMP “*Picos tras bajada para cuadrada*”, la posibilidad de guardar el archivo en formato wav, y un botón para detener la simulación.

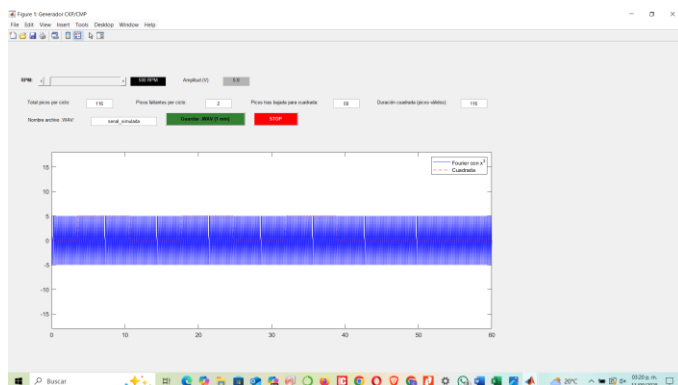


Figura 2.0: Interfaz Gráfica elaborada en Matlab

2.4 Acondicionamiento de la señal

La interconexión entre dos o más dispositivos, tales como micrófonos, amplificadores, ecualizadores, altavoces, etc., da origen a lo que se denomina un sistema. Estos dispositivos, así como el sistema resultante, tienen la característica común de que todos reciben, procesan y entregan señales de algún tipo. El concepto de señal es el de una magnitud variable en el tiempo que transmite o transporta información.

En el caso de los sistemas de sonido, existen dos tipos principales de señal: acústicas y eléctricas. La conversión entre ambos tipos de señal se realiza por medio de dispositivos denominados genéricamente transductores (micrófonos, altoparlantes, auriculares). Otros tipos de señales involucradas en sistemas de audio son las magnéticas (cintas,

discos rígidos) y las ópticas (discos compactos, transmisión por fibra óptica). [3]

A efectos de lograr un resultado óptimo, es necesario tomar ciertas consideraciones en la interconexión de los componentes de un determinado sistema. Cuestiones como la adaptación de impedancias, el ancho de banda, el rango dinámico, la relación señal a ruido y otras, deben ser cuidadosamente analizadas en cada caso particular si se desea sacar el máximo provecho del equipamiento disponible. [3] [4]

En el caso de los sistemas de sonido, la información es, precisamente, la forma de onda del sonido. Idealmente, la señal eléctrica debería tener exactamente la misma forma de onda que la señal sonora, con un mero cambio de unidades: la señal sonora es una presión sonora, mientras que la señal eléctrica es una tensión (o voltaje). Este es el concepto de analogía. Por eso se dice que la señal eléctrica es una representación análoga o analógica de la señal sonora. En la *Figura 3.0* se ilustra esta situación, mostrando una señal sonora y su analogía eléctrica.

Aunque las amplitudes se han dibujado deliberadamente diferentes, ello no implica ninguna relación de tamaño entre las señales, simplemente porque no es posible comparar una presión con una tensión eléctrica (del mismo modo que no tiene sentido decir que “la longitud de esta mesa es mayor que una hora”).

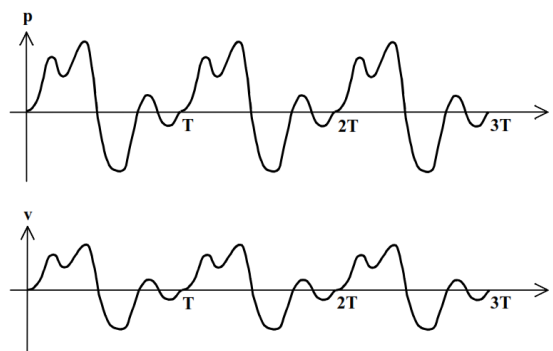


Figura 3.0. Forma de onda de una señal de sonido

Bajo este esquema, se espera que la señal de sonido que sale del conector de 3.5mm de audio sea una señal analógica y además alterna, esto es útil para la generación de la señal de un sensor de tipo magnético CKP, pero no lo es así para la señal del sensor CMP, la cual es una señal cuadrada de corriente continua.

En la *Figura 4.0* (color azul) puede observarse esto, la señal generada mediante el software Matlab para el caso del sensor CMP no es una señal cuadrada, y presenta valores de voltaje negativos, además de la distorsión que puede observarse en la figura debido al ruido, esta señal no puede ser enviada al módulo ECM.

Con la finalidad de crear una señal cuadrada sincronizada con un voltaje entre 0 y 5V que pueda ser enviada al módulo ECU, se propuso conectar un comparador (*Figura 5.0*) implementado mediante amplificadores operacionales, así, cuando la señal cayera por debajo de 0V se envía un voltaje de 0V y cuando la señal fuera mayor a 0V, se estarían enviando 5V, sin embargo, como puede observarse en la *Figura 4.0* (azul), existen caídas de voltaje repentinas en la señal alterna, y en cada caída de voltaje se tiene mediante el comparador una

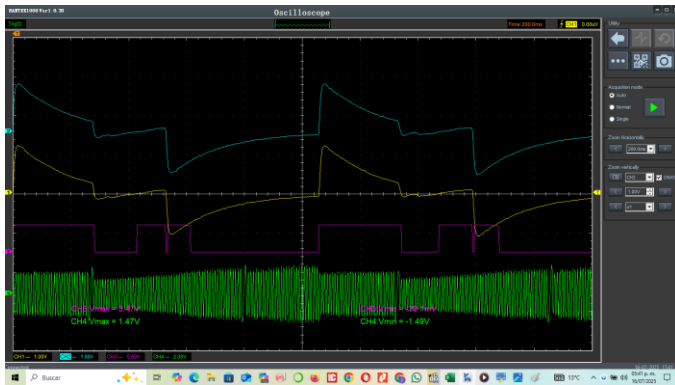


Figura 4.0: Señales ckp y cmp generadas mediante Matlab.

caída a 0V (Figura 4.0 violeta), esto es debido a la alta ganancia en lazo abierto de un comparador, incluso en algunas ocasiones, pequeñas señales de ruido provocan un cambio de estado en la salida del comparador [4] y en cuanto la señal vuelve a aumentar su valor de tensión, nuevamente se tiene un flanco de subida, el cual es enviado mediante el comparador, esto representa una señal incorrecta.

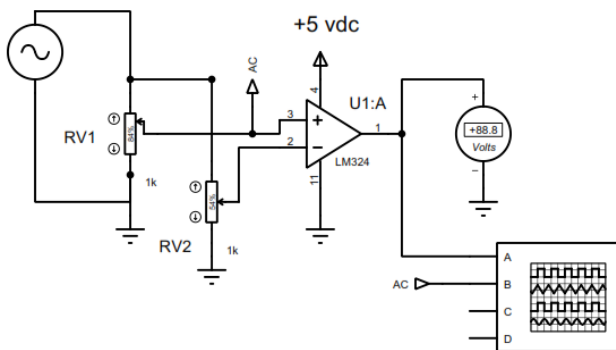


Figura 5.0 Comparador implementado mediante el amplificador LM324 [4]

La solución que se propuso fue implementar un filtro pasa bajas (Figura 7.0) para tratar de eliminar esas caídas de voltaje repentinas en la señal de salida [4] CMP (gráfica en color azul). En la figura 6.0 puede observarse el resultado de la aplicación del filtro pasa bajas.

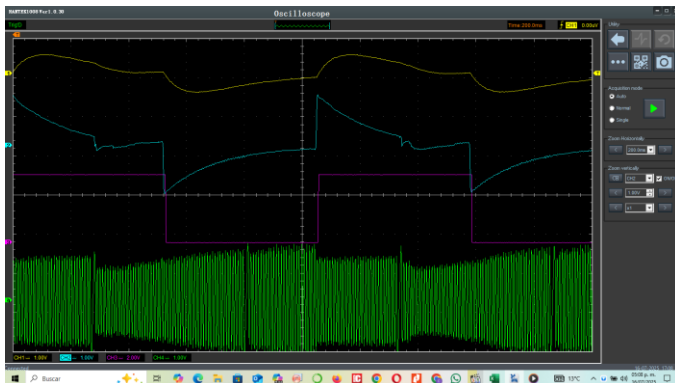


Figura 6.0 señal filtrada (amarillo), señal obtenida mediante el comparador (violeta)

Como se puede observar en la figura anterior la implementación del filtro pasa bajas funcionó correctamente.

Señal amarilla: señal filtrada

Señal Azul: señal no filtrada con caídas de voltaje repentinas

Señal Violeta: señal cuadrada sincronizada correctamente, esta señal es la que envía el comparador.

Como se puede observar en la Figura 6.0 (gráfica violeta), después de realizar el proceso de filtrado de la señal y el comparador no inversor, se obtiene la señal cuadrada correcta sin distorsiones, ni señales de ruido, lo cual muestra que tanto el filtro propuesto como el comparador funcionan correctamente para esta aplicación.

Lo que se busca es suavizar las caídas de tensión observadas en las gráficas anteriores, se utilizó un potenciómetro de 1K y un capacitor electrolítico de $100\mu F$.

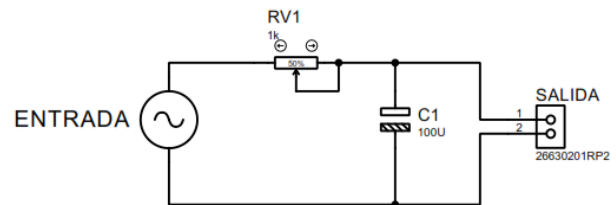


Figura 7.0 Filtro pasa bajas [4]

En la Figura 8.0b puede observarse que la señal generada mediante Matlab queda correctamente sincronizada para el caso de un vehículo Chevrolet Aveo 2014, en dicha figura se pueden observar cambios en la amplitud de la señal, esto es debido a la modificación en las rpm mediante la interfaz gráfica de Matlab, mientras que en la Figura 8.0a no se muestran esos cambios, debido a que cuando se capturó la señal no se aceleró en vehículo.

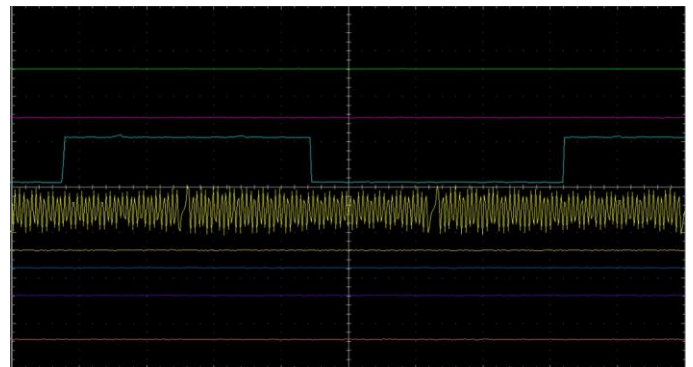


Figura 8.0a. señal CKP-CMP obtenida directamente del vehículo

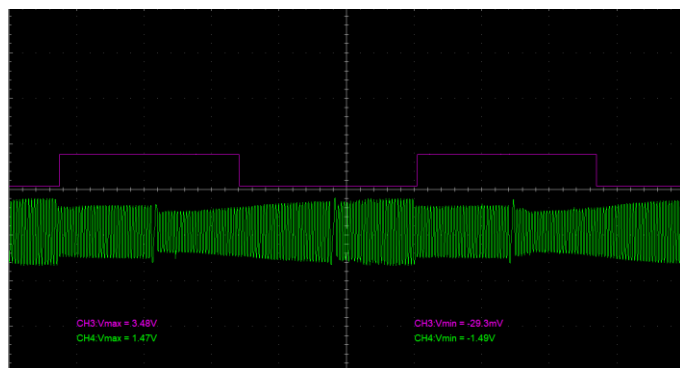


Figura 8.0b. señal CKP-CMP generada mediante Matlab

Una vez obtenida la señal sincronizada, como puede observarse en la Figura 8.0b, la señal de salida del conector de audio no tiene la amplitud suficiente para ser enviada al módulo de control automotriz, por lo que fue necesario implementar un amplificador de instrumentación con ganancia ajustable para poder enviar la señal, en la Figura 9.0 se ilustra el diagrama de dicho circuito, así como la ecuación de ganancia, todo lo anterior simulado bajo el software Proteus.

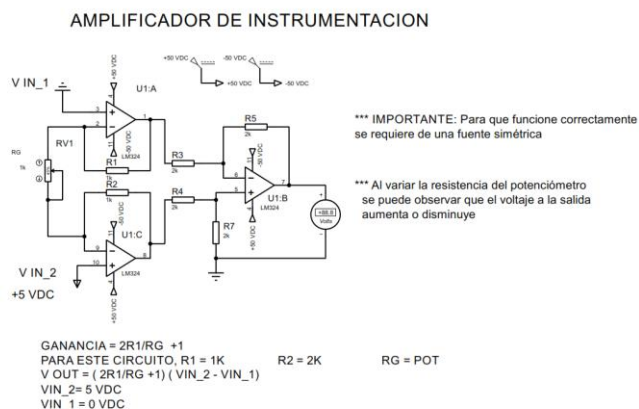


Figura 9.0. Amplificador de instrumentación [4]

3. CONCLUSIONES

El sistema desarrollado demuestra que es posible generar señales CKPy CMP sincronizadas, configurables y representativas del comportamiento real de sensores automotrices utilizando herramientas de software de propósito general como MATLAB y la salida de audio de un equipo de cómputo. La implementación de la serie de Fourier para la generación de señales periódicas, junto con la inserción controlada de picos faltantes y perfiles cúbicos, permite reproducir con alta fidelidad los patrones característicos observados en sensores de cigüeñal reales, incluyendo los dientes faltantes del reluctor.

La interfaz gráfica desarrollada constituye una aportación importante, ya que brinda al usuario la posibilidad de modificar parámetros clave como las RPM, la cantidad de picos válidos, los picos faltantes y la sincronización de la señal CMP, sin necesidad de modificar el código fuente. Esto convierte al sistema en una herramienta flexible y adaptable a distintos modelos de vehículos, superando una de las principales limitaciones de los generadores comerciales basados en bases de datos cerradas de señales.

En cuanto al acondicionamiento de la señal, se comprobó que la salida de audio, al ser inherentemente alterna, no es adecuada de forma directa para la generación de señales cuadradas CMP de corriente continua. No obstante, mediante la implementación de un filtro pasa bajas y un comparador no inversor, fue posible eliminar las caídas abruptas de tensión y el ruido, obteniendo una señal cuadrada estable y compatible con los requerimientos de una ECU automotriz. Adicionalmente, el uso de un amplificador de instrumentación permitió ajustar la amplitud de la señal a niveles adecuados para pruebas en módulos electrónicos reales.

Finalmente, los resultados experimentales muestran una alta similitud entre las señales generadas mediante MATLAB y las señales reales capturadas en un vehículo Chevrolet Aveo 2014, tanto en forma como en sincronización. Esto confirma la viabilidad del sistema como una alternativa de bajo costo, altamente configurable y didáctica para pruebas de ECUs, formación académica y diagnóstico automotriz. Como trabajo futuro, se propone la integración de una etapa de aislamiento eléctrico y protección, así como la adaptación del sistema para su implementación en plataformas embebidas dedicadas.

4. REFERENCIAS

- [1] D. G. zill, Ecuaciones diferenciales con problemas con valores en la frontera, México, cdmx: Cengage Learning, 2009.
- [2] H. Moore, Matlab para Ingenieros, Cdmx: Pearson educación, 2007.
- [3] M. Federico, Acústica y Sistemas de sonido, Rosario, República Argentina: Red de editoriales de universidades nacionales., 1999.
- [4] A. P. Malvino, Principios de Electrónica, Madrid, España: Mc Graw Hill, 2000.