

PRUEBA DE COMPRESIÓN RELATIVA EN UN MOTOR OTTO MEDIANTE EL
ANÁLISIS DE LA VELOCIDAD DEL CIGÜEÑAL

David Jared Páez Gómez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Ingeniería Automotriz

Director

Jorge Luis Chacón Velazco

MSc, PhD

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías físico mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Ingeniería Automotriz

Bucaramanga

2024

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción.....	9
1. Objetivos.....	10
1.1 Objetivo General	10
1.2 Objetivos Específicos	10
2. Marco Referencial.....	11
El Ciclo Otto.....	11
Principio de Pascal.....	12
El cigüeñal.....	13
Prueba de compresión relativa.....	13
Desaceleración del cigüeñal en la carrera de compresión.....	14
Sensor de posición del cigüeñal.....	15
Rueda de fase.....	16
Señal del sensor ckp inductivo.....	16
Velocidad del cigüeñal.....	17
El osciloscopio.....	18
Antecedentes.....	19
3. Metodología.....	20
3.1 Descripción de la prueba de compresión relativa mediante el análisis de la velocidad del cigüeñal.....	20

3.2 Diseño de un procedimiento operativo para la recolección de los datos pertinentes a la prueba de compresión relativa.	20
3.3 Diseño de un algoritmo para el procesamiento de los datos de la señal del sensor ckp con el fin de obtener la velocidad instantánea del cigüeñal.	20
3.4 Recolección de datos sobre el motor seleccionado.	20
3.5 Procesamiento de los datos mediante el algoritmo.	20
3.6 Análisis de los resultados	20
4. Desarrollo de las actividades propuestas en la metodología planteada.....	21
4.1 Descripción de la Prueba de Compresión Relativa Mediante el Análisis de la Velocidad del Cigüeñal.....	21
4.2 Diseño de un Procedimiento Operativo para la Recolección de los datos Pertinentes a la Prueba de Compresión Relativa.	22
4.2.1 Materiales:.....	22
4.2.2 Diseño de un procedimiento operativo para la recolección de los datos pertinentes a la prueba de compresión relativa.	24
4.4 Recolección de datos sobre el motor seleccionado.	32
Encender y dejar calentar el motor del vehículo hasta su temperatura de operación.	33
Comprobar el voltaje de la batería	33
Desconectar el fusible de alimentación de los inyectores.	34
Configurar el osciloscopio a una resolución horizontal de 50ms por división, 2 kV por división vertical para el canal 1 y 5 V por división vertical para el canal 2.	34
Interceptar la señal de encendido del secundario de las bobinas de encendido en un cilindro en el canal 1.....	35

Interceptar la señal del sensor CKP con la punta de pruebas del osciloscopio en el canal 2.	36
Dar arranque al motor durante 5 segundos, captar las señales y guardar los datos en formato imagen JPG y Excel.	37
Procesamiento de los datos mediante el algoritmo.	37
4.6 Análisis de los resultados.....	39
5. Conclusiones.	42

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Variación de la velocidad angular.	40

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Ciclo Otto del aire	11
Figura 2 El cigüeñal	13
Figura 3 Fuerza derivada de la presión en la carrera de compresión	14
Figura 4 Sensor ckp y rueda de fase.....	15
Figura 5 Señal del sensor ckp.	17
Figura 6 Osciloscopio Hantek 1008c	22
Figura 7 Sonda HT-25.....	23
Figura 8 Señal binaria	28
Figura 9 Señal binaria y con puntos de cambio de 0 a 1.....	30
Figura 10 Automóvil de prueba.	32
Figura 11 Tablero de instrumentos	33
Figura 12 Voltaje de batería	34
Figura 13 Configuración del osciloscopio.....	35
Figura 14 Bobinas de encendido.....	36
Figura 15 Conector sensor ckp	36
Figura 16 Datos obtenidos.....	37
Figura 17 Velocidad del cigüeñal	38
Figura 18 Análisis de los datos.....	39
Figura 19 Compresión Relativa	41

Resumen

Título: Prueba de compresión relativa en un motor Otto mediante el análisis de la velocidad del cigüeñal.

Autor: David Jared Páez Gómez*

Palabras Clave: Motor Otto, Compresión relativa, Mantenimiento.

Descripción: Los motores de combustión interna, como el motor Otto, desempeñan un papel fundamental en nuestra sociedad al impulsar una amplia gama de dispositivos, vehículos, generadores, maquinaria entre otros. Sin embargo, a lo largo de su vida útil, estos motores están sujetos a desgaste y fallos que impactan su rendimiento y eficiencia. Por tanto, resulta crucial disponer de herramientas y métodos precisos para diagnosticar su estado operativo.

La Prueba de Compresión Relativa puede ser técnica valiosa para diagnosticar motores de cuatro tiempos, se fundamenta en el análisis de la velocidad del cigüeñal. En motores de múltiples cilindros, el principio físico subyacente es que el cigüeñal en su movimiento de rotación experimenta una leve desaceleración debido a la resistencia que genera la compresión de los gases en los cilindros. La Prueba consiste en medir y comparar esta variación en la velocidad angular del cigüeñal, pues esta se puede considerar una medición indirecta de la presión interior de los cilindros (Brown T. S., & Neill W. S., 1992).

La compresión relativa proporciona una visión general de la relación entre las presiones de compresión en los cilindros de un motor, lo que puede revelar problemas relacionados a desgastes en anillos o cilindros, válvulas defectuosas o problemas en las jutas de culata. Detectar estos fallos de manera temprana es crucial para evitar daños mayores al motor y garantizar su óptimo funcionamiento.

** Facultad de Ingenierías. Escuela de Ingeniería Mecánica. Especialización en ingeniería Automotriz. Director: Jorge Luis Chacón Velazco. MSc, PhD.

Abstract

Title: Relative compression test in an Otto engine through crankshaft speed analysis.

Author(s): David Jared Páez Gómez **

Key Words: Otto Engine, Relative Compression, Maintenance

Description: Internal combustion engines, such as the Otto engine, play a fundamental role in our society by powering a wide range of devices, vehicles, generators, machinery, among others. However, throughout their lifespan, these engines are subject to wear and failures that impact their performance and efficiency. Therefore, it is crucial to have accurate tools and methods to diagnose their operational status.

The Relative Compression Test can be a valuable technique for diagnosing four-stroke engines, based on the analysis of the crankshaft speed. In multi-cylinder engines, the underlying physical principle is that the crankshaft experiences a slight deceleration in its rotational movement due to the resistance generated by the compression of gases in the cylinders. The test involves measuring and comparing this variation in crankshaft angular speed, as it can be considered an indirect measurement of the internal pressure of the cylinders (Brown T. S., & Neill W. S., 1992).

Relative compression provides a quick insight into the relationship between compression pressures in the cylinders of an engine, which can reveal issues related to worn rings or cylinders, faulty valves, or problems in the cylinder head gaskets. Detecting these failures early is crucial to prevent major engine damage and ensure optimal performance.

Introducción

Los motores de combustión interna, como el motor Otto, desempeñan un papel fundamental en nuestra sociedad al impulsar la industria y el transporte. Sin embargo, a lo largo de su vida útil, estos motores están sujetos a desgaste y fallos que afectan su rendimiento y eficiencia. Por lo tanto, es crucial contar con herramientas y métodos adecuados para diagnosticar y evaluar su estado operativo.

Un mantenimiento inadecuado puede reducir la eficiencia del motor. La acumulación de depósitos de carbono, desgaste de piezas y fugas pueden disminuir la eficiencia del motor, lo que resulta en un mayor consumo de combustible y mayores emisiones contaminantes. Esto no solo impacta en los costos de operación debido al aumento en el consumo de combustible, sino que también contribuye a la contaminación del aire y el cambio climático. También puede llevar a fallos prematuros del motor, lo que resulta en costosos tiempos de inactividad y reparaciones. Esto aumenta los costos de operación y tiene un impacto negativo en la rentabilidad a largo plazo.

En este contexto, la prueba de compresión relativa se presenta como una herramienta alternativa para evaluar las condiciones del motor. Esta prueba proporciona una medida de la integridad de los cilindros y la eficiencia de compresión del motor. Un bajo valor en la prueba de compresión relativa puede indicar problemas como desgaste de los anillos de pistón, válvulas defectuosas o problemas de sellado. Identificar estos problemas a tiempo mediante esta prueba puede evitar costosas averías futuras y optimizar la eficiencia del motor.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Realizar un ensayo de compresión relativa en un motor Otto mediante el análisis de la velocidad del cigüeñal con los datos obtenidos de la señal del sensor de posición de cigüeñal, con el fin de obtener métricas que reflejen su estado operativo.

1.2 Objetivos Específicos

Establecer un procedimiento para la adquisición y procesamiento de los datos requeridos en la prueba.

Ejecutar el procedimiento de adquisición y procesamiento de los datos provenientes del sensor de posición del cigüeñal.

Llevar a cabo un análisis de los datos obtenidos para inferir las métricas de la prueba de compresión relativa mediante el análisis de la velocidad del cigüeñal.

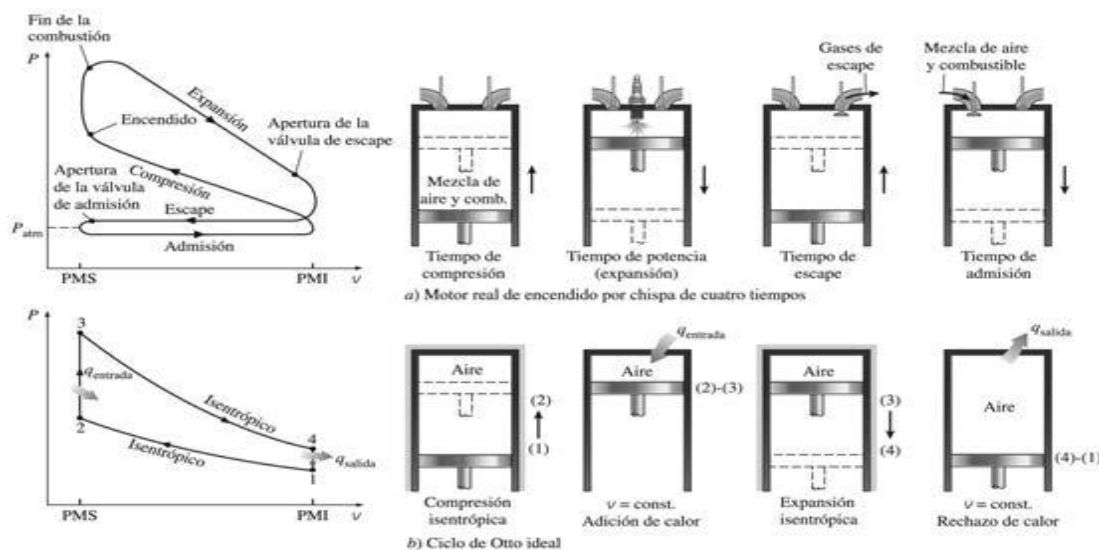
2. Marco Referencial

El Ciclo Otto.

nombrado en honor a Nikolaus A. Otto, se define como el ciclo ideal utilizado en las máquinas de encendido por chispa. Estas máquinas de combustión interna, experimentan cuatro tiempos o carreras completas dentro del cilindro, generando dos ciclos mecánicos para cada ciclo termodinámico. Durante la fase de compresión, el pistón reduce el volumen de la mezcla de aire y combustible. Luego, la ignición mediante una chispa aumenta la presión y temperatura del sistema. Finalmente, en la carrera de expansión, se produce trabajo útil. Los gases resultantes de la combustión se expulsan durante la carrera de escape (Cengel & Boles, 2013).

Figura 1

Ciclo Otto del aire



Nota. Graficas de presión vs volumen y representación de los tiempos en el ciclo Otto. Tomado de (Cengel & Boles, 2013).

En la figura 1 se puede observar una gráfica presión vs volumen que refleja los cambios en la presión de los gases en el interior de un cilindro a medida que ocurren los cuatro tiempos en un motor Otto, el análisis del comportamiento de esta resulta útil a los propósitos de este trabajo, pues esta presión es la principal causa de las fuerzas que intervienen en la dinámica de la rotación de un cigüeñal.

Principio de Pascal.

“La presión se define como la cantidad escalar que se obtiene al dividir la magnitud de una fuerza ejercida en forma perpendicular sobre alguna superficie entre el área de la misma” (Mott & Untener, 2015, p. 3).

Lo cual se define por la ecuación:

Ecuación 1.

$$P=F/A$$

donde.

P = Presión

F = Fuerza

A = Área

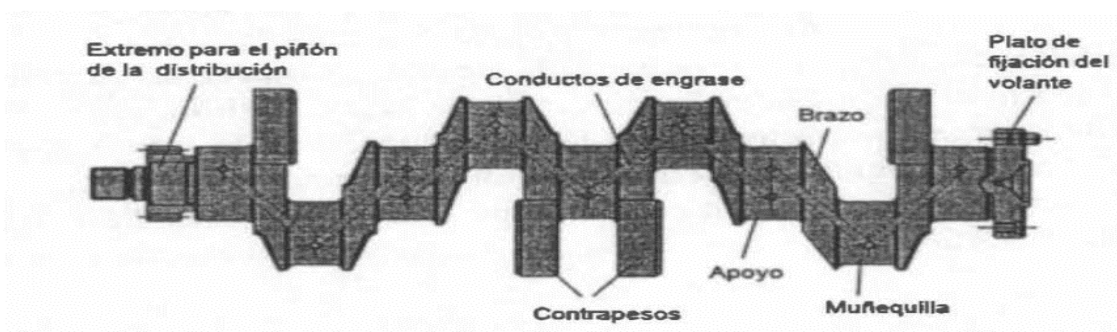
Donde P representa la presión, F representa la Fuerza y A el área de aplicación, despejando la ecuación obtenemos una expresión que representa la fuerza que ejerce la presión sobre un área dada.

El cigüeñal.

El cigüeñal, un componente esencial en los motores, desempeña un papel crucial al convertir el movimiento alternativo generado por los pistones en un movimiento rotativo. Este eje, con codos descentrados y un ángulo específico, se adapta según el tipo de ciclo de trabajo, el número de cilindros y su disposición. Desde la perspectiva de su montaje en la bancada, se asemeja a una viga con puntos de apoyo distribuidos, sometida a tensiones alternas de flexión y torsión (Payri & Desantes, 2011).

Figura 2

El cigüeñal



Nota. Geometría y partes del cigüeñal. Tomado de (Payri & Desantes, 2011)

Prueba de compresión relativa.

El ensayo de compresión relativa es un método poco invasivo para obtener una medida indirecta de la compresión en los cilindros de un motor de cuatro tiempos. Este método se basa en la detección de la desaceleración del cigüeñal, la cual es causada por la resistencia de los gases a medida que son comprimidos durante la carrera de compresión.

En lugar de medir directamente la presión de los gases en los cilindros, la prueba busca comparar la reducción en la velocidad angular del cigüeñal para cada cilindro durante su carrera de compresión. Esto permite evaluar la eficacia de la compresión en cada cilindro de manera

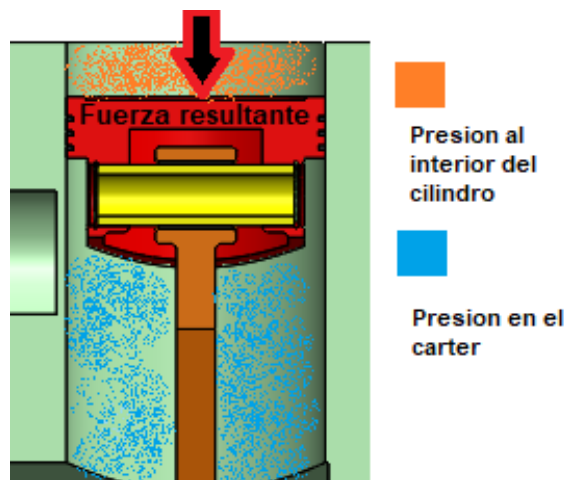
relativa, es decir, comparando la desaceleración relativa entre los cilindros en lugar de obtener valores absolutos de presión (Taglialatela F. et al, 2013).

Este ensayo se plantea como una herramienta de diagnóstico de motores a combustión para evaluar la integridad y estado operativo de, el sello entre los aros del pistón y el cilindro, el tren de válvulas y la junta de culata.

Desaceleración del cigüeñal en la carrera de compresión.

Figura 3

Fuerza derivada de la presión en la carrera de compresión



Cuando un pistón se desplaza en la carrera de compresión dentro de un motor de cuatro tiempos, se encuentra sometido a una fuerza proporcional a la presión de los gases dentro del cilindro. Esta presión de los gases sigue una relación definida por la ecuación 1, que describe la relación entre la presión y el volumen durante procesos de compresión adiabática. Esta ecuación evidencia un comportamiento exponencial en la presión, como se muestra en la figura 1.

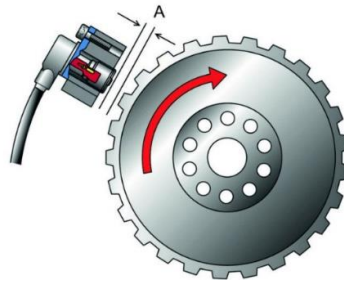
Se puede concluir que el pistón experimenta una fuerza debida a la compresión, la cual tiene un carácter exponencial y alcanza su máximo al final de la carrera de compresión. Esta actúa como una resistencia al movimiento de rotación del cigüeñal reduciendo su velocidad angular.

Sensor de posición del cigüeñal.

El sensor de posición del cigüeñal es esencial para la sincronización y control de motores de combustión. Asociado con la rueda de fase en el cigüeñal, esta rueda dentada permite referenciar la posición angular del cigüeñal. La detección de dientes y huecos en la rueda de fase proporciona información clave para el control preciso de la inyección y el encendido (Payri & Desantes, 2011)

Figura 4

Sensor ckp y rueda de fase.



Nota. Principio de funcionamiento del sensor ckp y rueda de fase. Tomado de

(https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-el-sensor-de-posicion-de-ciguenal-ckp-y-como-funciona/#google_vignette)

En síntesis, un sensor CKP inductivo está compuesto esencialmente por una bobina de alambre envuelta alrededor de un núcleo magnético, protegido dentro de una carcasa. Su funcionamiento se basa en la generación de una corriente eléctrica inducida en la bobina cuando el campo magnético que la atraviesa se ve alterado por el movimiento de los dientes del engranaje del cigüeñal. Esta señal eléctrica, resultado de la interacción entre el engranaje y la bobina, se emplea para monitorizar y regular la posición y velocidad del cigüeñal.

Rueda de fase.

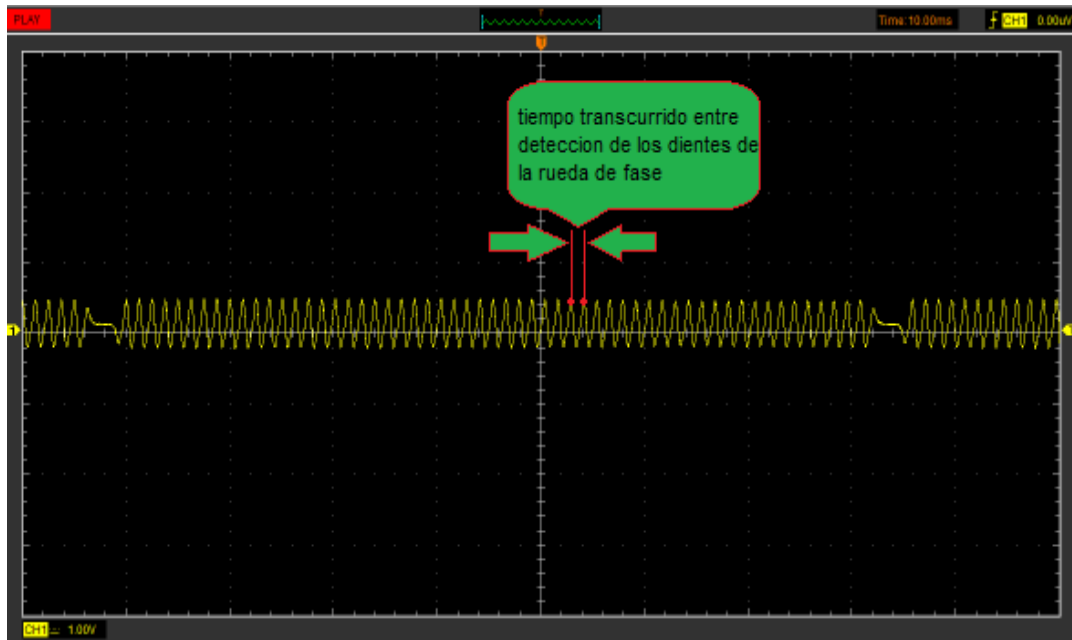
La rueda de fase, ubicada en el volante de inercia de un motor, es una parte crucial del sistema de sincronización del motor. Esta rueda, equipada con dientes o reluctores, proporciona información precisa sobre la posición del cigüeñal al sensor de posición del cigüeñal (CKP). Presenta un espacio donde normalmente estarían dos dientes que permite a la ECM detectar el punto muerto superior (PMS) del cilindro, un momento crítico para la sincronización del encendido y la inyección de combustible. Este diseño asegura una sincronización precisa del motor y una operación eficiente en todas las condiciones de funcionamiento.

Señal del sensor ckp inductivo.

En la Figura 5 se muestra una captura de pantalla de un osciloscopio, donde la línea de color amarillo representa la señal del sensor CKP. Esta señal se compone de una serie de picos y valles sucesivos: los picos corresponden al aumento de voltaje generado cuando un diente de la rueda de fase pasa por el sensor, mientras que los valles representan el voltaje generado por los espacios entre los dientes. Además, se puede distinguir un intervalo donde la señal es plana; este intervalo coincide con el vacío en la rueda de fase, indicando una revolución completa de la misma.

Figura 5

Señal del sensor ckp.



Velocidad del cigüeñal.

La Figura 5 muestra la señal emitida por el sensor CKP, donde el eje vertical representa el voltaje de la señal y el eje horizontal, el tiempo. Para determinar la velocidad del cigüeñal a partir de esta señal, se identifican los picos que corresponden a dos dientes consecutivos de la rueda de fase. Una vez localizados estos puntos, se calcula la distancia horizontal entre ellos, lo que proporciona el tiempo que tardaron en pasar esos dos dientes. Si se conoce el número de dientes de la rueda de fase se puede calcular la velocidad angular promedio entre dientes consecutivos como se expresa en la ecuación 2.

Ecuación 2.

$$w = \frac{1}{z*t}$$

donde.

w = velocidad angular del cigüeñal (RPM)

z = Numero de dientes de la rueda de fase

t = intervalo de tiempo entre dientes (min)

El osciloscopio.

Un osciloscopio es un instrumento de medición electrónico que permite visualizar señales eléctricas en función del tiempo. Su uso es común en electrónica y se combina a menudo con un analizador de espectro (Bolton, 202).

Al utilizar un osciloscopio, los técnicos pueden visualizar de manera precisa la forma de onda generada por el sensor de posición del cigüeñal. Esta forma de onda revela información valiosa sobre la integridad y el rendimiento del sensor. Problemas como cortocircuitos, interferencias electromagnéticas o fallos en el sensor pueden ser identificados al analizar la amplitud, frecuencia y forma de la señal.

Además, el osciloscopio permite observar variaciones en la señal en tiempo real, lo que facilita la detección de irregularidades durante diferentes condiciones de operación del motor. Esta capacidad de diagnóstico preciso no solo acelera el proceso de identificación de problemas, sino que también ayuda a evitar reemplazos innecesarios de componentes.

Antecedentes.

Determinación de las presiones en los cilindros del motor a partir de las fluctuaciones de la velocidad del cigüeñal.

Se presenta un método experimental no invasivo para determinar simultáneamente la presión en cada cilindro de un motor alternativo. Utiliza técnicas de reconocimiento de patrones en las fluctuaciones de velocidad del cigüeñal (Brown T. S., & Neill W. S., 1992)

Límites de precisión de la determinación de IMEP a partir de mediciones de velocidad del cigüeñal.

El autor propone un método para estimar la Presión Media Efectiva Indicada (IMEP) y el par de presión de gas de un motor multicilíndrico mediante la variación de la velocidad del cigüeñal, cuya precisión depende de la carga del motor. (Taraza, D., 2002).

Reconstrucción de la presión del cilindro mediante fluctuaciones de velocidad del cigüeñal.

Se propone una red neuronal recurrente (RNN) para reconstruir la presión del cilindro utilizando fluctuaciones de velocidad del cigüeñal. Se mejora la capacidad de estimación mediante la interpolación de parámetros de peso, validando el método en un motor mono cilíndrico (Ali S. A. & Saraswati S., 2015).

3. Metodología

3.1 Descripción de la prueba de compresión relativa mediante el análisis de la velocidad del cigüeñal.

3.2 Diseño de un procedimiento operativo para la recolección de los datos pertinentes a la prueba de compresión relativa.

3.3 Diseño de un algoritmo para el procesamiento de los datos de la señal del sensor ckp con el fin de obtener la velocidad instantánea del cigüeñal.

3.4 Recolección de datos sobre el motor seleccionado.

3.5 Procesamiento de los datos mediante el algoritmo.

3.6 Análisis de los resultados

4. Desarrollo de las actividades propuestas en la metodología planteada

4.1 Descripción de la Prueba de Compresión Relativa Mediante el Análisis de la Velocidad del Cigüeñal.

Este ensayo busca evaluar la compresión relativa entre los cilindros en un motor de combustión interna mediante la variación de la velocidad angular del cigüeñal, la cual se infiere a partir de la medición de la señal del sensor CKP (Ali S. A. & Saraswati S.,2015).

Este sensor de posición del cigüeñal proporciona datos precisos sobre la posición angular del mismo a lo largo de un ciclo termodinámico completo. Posteriormente, estos datos son procesados para calcular la velocidad angular del cigüeñal en cada punto de los 720 grados de giro. Durante las carreras de compresión, se registra la variación de la velocidad angular, lo que permite obtener información sobre la eficacia de la compresión en cada cilindro.

Dos métricas principales serán registradas: los valores del cambio de velocidad del cigüeñal durante las carreras de compresión $\Delta\omega$ y los valores de compresión relativa en porcentaje %C. El cambio de velocidad del cigüeñal durante las carreras de compresión ofrece una medida directa de la eficacia de la compresión en cada cilindro, mientras que los valores de compresión relativa permiten una comparación entre los cilindros. Cilindros con una compresión relativa uniforme indican un buen desempeño de la compresión.

4.2 Diseño de un Procedimiento Operativo para la Recolección de los datos Pertinentes a la Prueba de Compresión Relativa.

4.2.1 Materiales:

Osciloscopio digital. El osciloscopio Hantek 1008C es un dispositivo de ocho canales con una frecuencia de muestreo de hasta 2.5GS/s, diseñado para aplicaciones de diagnóstico y medición en aplicaciones automotrices. Se conecta a una computadora a través de USB, donde se puede visualizar y analizar las formas de onda utilizando el software proporcionado. Con una amplia gama de funciones y capacidades, incluida una memoria de hasta 4M y opciones de conectividad como USB, el Hantek 1008C ofrece una solución versátil y precisa para diversas necesidades de medición en entornos de laboratorio y campo.

Figura 6

Osciloscopio Hantek 1008c



Nota. Tomado de (<https://www.hantek.com/products/detail/13170>)

Sonda de prueba de voltajes para secundario de bobinas de encendido. La sonda ht-25 es una sonda inductiva utilizada en aplicaciones automotrices para medir señales eléctricas. Su diseño permite conectarla a un osciloscopio y analizar formas de onda, especialmente en sistemas de encendido de motores. La sonda se coloca alrededor de los cables de encendido o bujías, y su función principal es detectar irregularidades en la señal, como problemas de sincronización o fallas en el encendido. Con un ancho de banda de hasta 100 MHz, la HT-25 es una herramienta valiosa para los técnicos y mecánicos que trabajan en diagnóstico automotriz.

Figura 7

Sonda HT-25



Nota. Tomado de (<https://www.hantek.com/products/detail/13170>)

Sonda de pruebas de osciloscopio Hantek 1008c. Una punta de prueba (o simplemente una punta) es un dispositivo que permite realizar una conexión física entre una fuente de señal o punto de prueba y un instrumento de medición electrónico, como por ejemplo un osciloscopio.

4.2.2 Diseño de un procedimiento operativo para la recolección de los datos pertinentes a la prueba de compresión relativa.

Encender y dejar calentar el motor del vehículo hasta su temperatura de operación.

Debido a que los elementos mecánicos sufren dilataciones térmicas y el aceite del motor cambia su viscosidad con la temperatura, se recomienda llevar al motor a su temperatura de operación antes de ejecutar la prueba.

Comprobar el voltaje de la batería. Debido a que el motor de arranque funciona con corriente directa proveniente de la batería, es fundamental para la prueba comprobar el voltaje de esta para asegurar que tendrá un apropiado rendimiento. Este debe estar sobre los 12V cd.

Desconectar el fusible de alimentación positiva de los inyectores. Dado que la prueba requiere que el motor no encienda, es necesario cortar el suministro de combustible, siendo el método más simple y seguro desconectar el fusible que alimenta a los inyectores para cancelar su activación.

Interceptar la señal de encendido del secundario de las bobinas de encendido en un cilindro en el canal 1. Esto con el fin de tener una referencia angular en las señales captadas, pues con la señal de la bujía y el orden de encendido se puede establecer la posición del cigüeñal en cada carrera del pistón.

Interceptar la señal del sensor CKP con la punta de pruebas del osciloscopio en el canal 2. Configurar el osciloscopio a una resolución horizontal de 50ms por división, 2 kV por división vertical para el canal 1 y 5 V por división vertical para el canal 2.

Dado que el motor de arranque mueve el cigüeñal a una velocidad de aproximadamente 400 RPM, 6,67 Hz, se puede calcular que para que este complete 2 revoluciones equivalentes a un ciclo termodinámico transcurren 300 ms, siendo 50ms por división y 500ms de rango total la configuración más cercana del osciloscopio, así mismo el voltaje del secundario de la bobina tiene un pico de voltaje y un voltaje de quemado de entre 2kV y 4 kV por lo que se sugiere una división vertical de 2kV para el canal 1, de igual manera y dado que el sensor ckp tiene una salida de entre 5 v, se sugiere la recomendación expuesta.

Configurar el disparo (trigger) del osciloscopio en el canal 1 a un nivel de entre 3kV y 5 kV. Esto se hace con la intención de captar con precisión el salto de chispa en el cilindro escogido y lograr una sincronización con la señal del ckp.

Dar arranque al motor durante 5 segundos y captar las señales y guardar los datos en formato imagen JPG y Excel.

Se escoge el formato Excel para la manipulación de los datos, debido a su facilidad de uso y universalidad, además se toma una imagen JPG con el fin de interpretar visualmente la calidad de los datos.

4.3 Diseño de un algoritmo para el procesamiento de los datos de la señal del sensor ckp con el fin de obtener la velocidad instantánea del cigüeñal

El presente algoritmo fue diseñado y ejecutado en el entorno de programación Google Colab mediante el lenguaje Python. El siguiente fragmento de código tiene como función, cargar y graficar los datos tomados de la señal del sensor ckp guardados en un archivo Excel.

1. `from google.colab import files`
2. `import pandas as pd`
3. `import matplotlib.pyplot as plt`
- 4.
5. `# Sube el archivo desde el PC`
6. `uploaded = files.upload()`
- 7.
8. `# Obtiene el nombre del archivo`
9. `nombre_archivo = list(uploaded.keys())[0]`
- 10.
11. `# Lee el archivo Excel y asigna a un DataFrame llamado 'señal'`
12. `señal = pd.read_excel(nombre_archivo)`
- 13.
14. `# Grafica la señal`
15. `plt.figure(figsize=(10, 6))`
16. `plt.plot(señal.iloc[:, 0], señal.iloc[:, 1], linestyle='-', color='b', label='Señal original')`
- 17.
18. `plt.xlabel('Tiempo (ms)')`
19. `plt.ylabel('Voltaje (mV)')`
20. `plt.grid(True)`
21. `plt.legend(loc='upper left')`
22. `plt.title('Gráfico de Tiempo vs Voltaje')`
- 23.

24. plt.show()

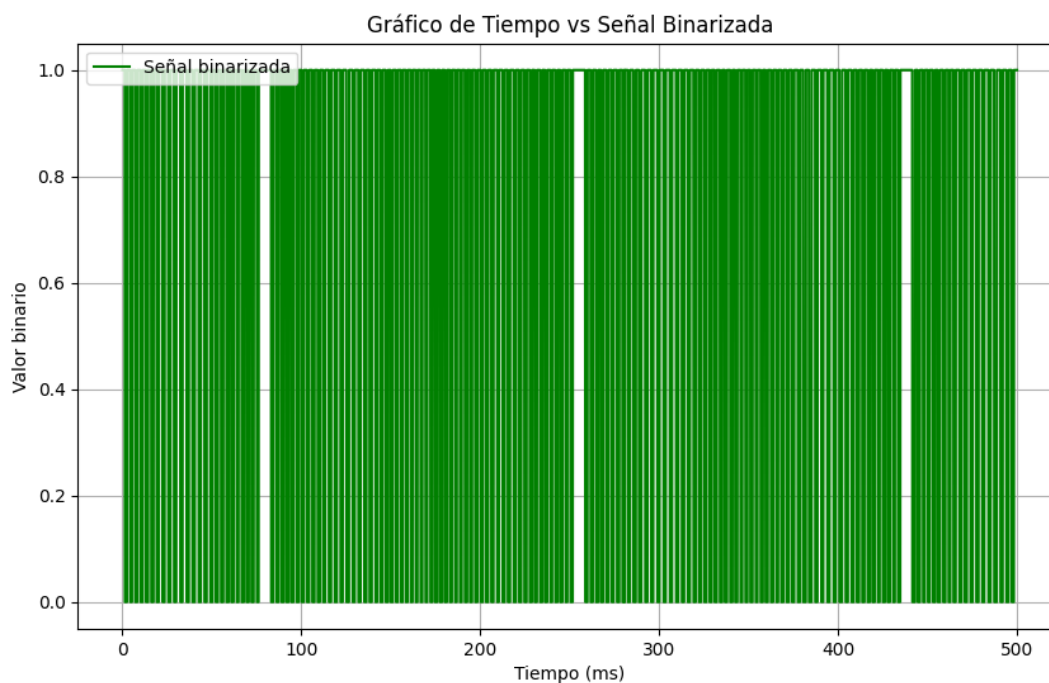
El siguiente fragmento de código tiene la función de transformar la señal del sensor ckp en datos binarios, para facilitar su procesamiento.

```
1. # Binariza la señal utilizando un umbral de 4000
2. señal_binarizada = pd.DataFrame()
3. señal_binarizada['Tiempo'] = señal.iloc[:, 0]
4. señal_binarizada['Voltaje'] = (señal.iloc[:, 1] > 40000).astype(int)
5.
6. # Grafica la señal binarizada
7. plt.figure(figsize=(10, 6))
8. plt.plot(señal_binarizada['Tiempo'], señal_binarizada['Voltaje'], linestyle='-', color='g',
label='Señal binarizada')
9.
10. plt.xlabel('Tiempo (ms)')
11. plt.ylabel('Valor binario')
12. plt.grid(True)
13. plt.legend(loc='upper left')
14. plt.title('Gráfico de Tiempo vs Señal Binarizada')
15.
16. plt.show()
```

La Figura 8 ilustra la gráfica obtenida al procesar la señal del sensor CKP para convertirla en una señal binaria. Esto se logra mediante la selección de un umbral: si la señal supera este valor, se asigna un valor binario de 1; de lo contrario, se asigna un valor de 0. La binarización se realiza con el fin de reducir el ruido de la señal y facilitar la identificación de puntos coincidentes en dos dientes consecutivos.

Figura 8

Señal binaria



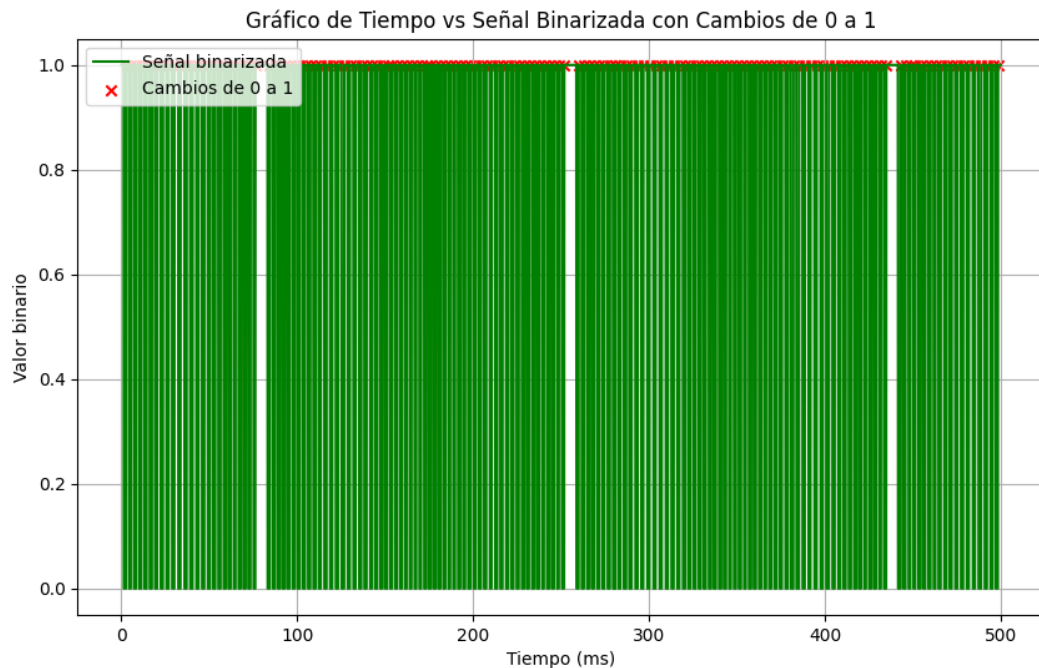
A continuación, se presenta un fragmento de código encargado de encontrar y graficar los cambios de 0 a 1 en la señal binaria.

1. # Encuentra los índices donde la señal cambia de 0 a 1
2. cambios = señal_binarizada['Voltaje'].diff() # Calcula la diferencia entre valores adyacentes
3. indices_cambios = cambios[cambios == 1].index # Índices donde ocurren los cambios
4. # Grafica la señal binarizada con las marcas en y=1
5. plt.figure(figsize=(10, 6))
6. plt.plot(señal_binarizada['Tiempo'], señal_binarizada['Voltaje'], linestyle='-', color='g', label='Señal binarizada')
7. plt.scatter(señal_binarizada.loc[indices_cambios, 'Tiempo'], [1] * len(indices_cambios), color='r', marker='x', label='Cambios de 0 a 1')
- 8.
9. plt.xlabel('Tiempo (ms)')
10. plt.ylabel('Valor binario')
11. plt.grid(True)
12. plt.legend(loc='upper left')
13. plt.title('Gráfico de Tiempo vs Señal Binarizada con Cambios de 0 a 1')
- 14.
15. plt.show()

El anterior fragmento de código tiene la función de encontrar y guardar los puntos donde la señal binaria cambia de 0 a 1 además de graficarla y marcar los puntos con un x roja, veri figura 9.

Figura 9

Señal binaria y con puntos de cambio de 0 a 1.



Finalmente se presenta el fragmento del código que encuentra y grafica la velocidad instantánea del cigüeñal, esto se hace calculando la distancia horizontal, es decir el tiempo entre un punto de cambio de la señal de 0 a 1 y el punto anterior obteniendo el periodo entre cada punto con el fin de inferir de allí la velocidad angular del cigüeñal en cada punto de cambio de la señal.

1. `import matplotlib.pyplot as plt`
- 2.
3. `# Divide la componente x de indices_cambios en 10`
4. `indices_cambios_divididos = [i / 10 for i in indices_cambios]`

```
5. # Calcula la distancia horizontal entre los puntos de cambio
6. distancias = []
7. for i in range(1, len(indices_cambios)):
8.     # Convierte el tiempo de ms a segundos
9.     tiempo_actual_s = señal_binarizada.loc[indices_cambios[i], 'Tiempo'] / 1000
10.    tiempo_anterior_s = señal_binarizada.loc[indices_cambios[i - 1], 'Tiempo'] / 1000
11.    distancia_actual = tiempo_actual_s - tiempo_anterior_s
12.    distancias.append(distancia_actual)
13.
14. # Calcula la frecuencia como el inverso del periodo
15. frecuencias = [1 / d for d in distancias]
16.
17. # Grafica la frecuencia en función del índice de cambio
18. plt.figure(figsize=(10, 6))
19. plt.plot(indices_cambios_divididos[1:], frecuencias, linestyle='-', color='r', marker='o',
label='Frecuencia')
20. # Ajusta los límites del eje y (por ejemplo, de 0 a 100 Hz)
21. plt.ylim(20, 50) # Cambia estos valores según tus necesidades
22. plt.ylabel('Velocidad del cigüeñal (RPM)')
23. plt.grid(True)
24. plt.legend(loc='upper left')
25. plt.show()
```

4.4 Recolección de datos sobre el motor seleccionado.

El presente ensayo de compresión relativa se realizó en un automóvil Chevrolet Spark modelo 2011, con motor a combustión a gasolina de 996 cm de cilindrada, 140.000 km en el hodómetro, no presenta luz de “Check Engine” ni códigos de falla en el sistema diagnóstico a bordo OBD2, se percibe una leve inestabilidad en el motor.

Figura 10

Automóvil de prueba.



Encender y dejar calentar el motor del vehículo hasta su temperatura de operación.

Luego de encender el motor del vehículo, este alcanzo la temperatura de operación 85c-95c transcurridos 10 minutos, se comprobó este estado luego de que se encendiera el electroventilador tomándose una temperatura con el scanner de 91c.

Figura 11

Tablero de instrumentos

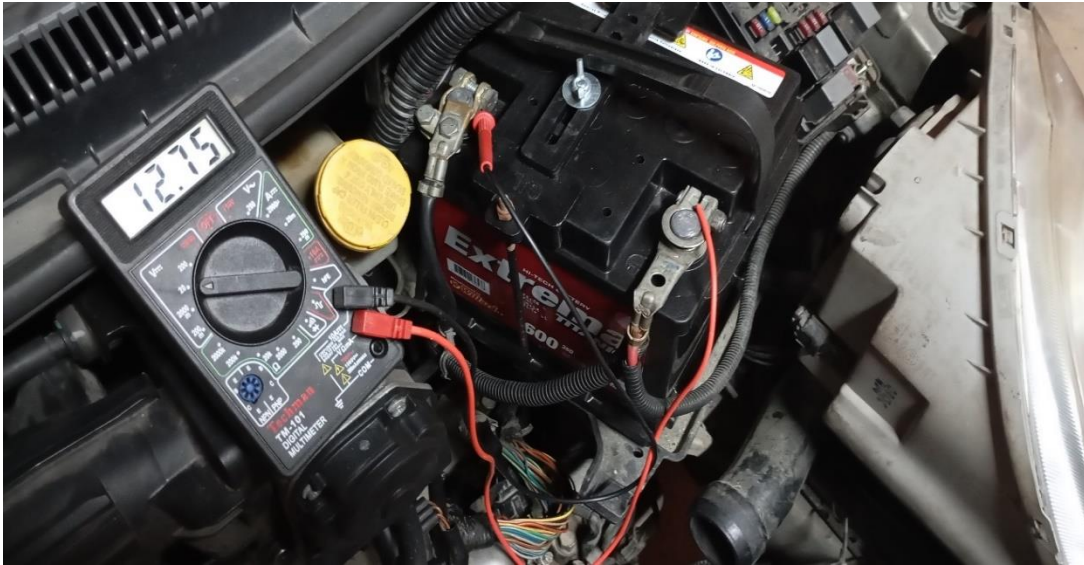


Comprobar el voltaje de la batería.

Haciendo uso de un multímetro digital se comprueba el voltaje de la batería, obteniendo una medición de 12,75 V cd.

Figura 12

Voltaje de batería

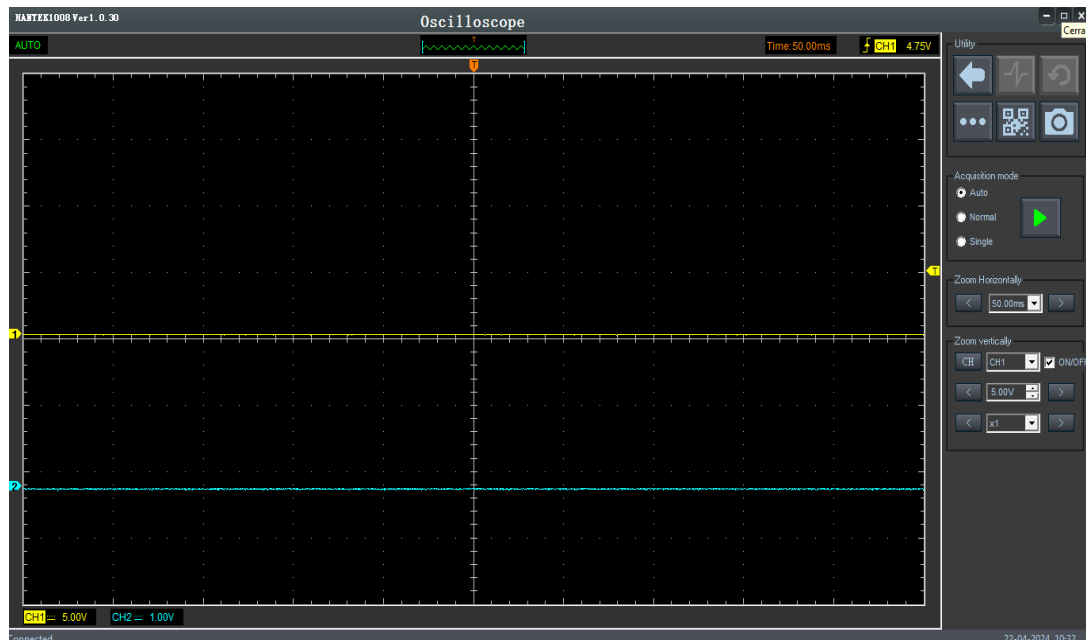


Desconectar el fusible de alimentación de los inyectores.

Según el diagrama esquemático de las conexiones eléctricas y la caja de fusibles del compartimiento del motor, se identifica el fusible f12 como el fusible de alimentación de los inyectores de combustible y se procedió a su desconexión para la realización de la prueba.

Configurar el osciloscopio a una resolución horizontal de 50ms por división, 2 kV por división vertical para el canal 1 y 5 V por división vertical para el canal 2.

En la figura 13 se observa una captura de pantalla del Software del osciloscopio en la cual se puede ver dos líneas, en color amarillo corresponde a la señal del canal 1 del osciloscopio y en color azul el canal 2, además de las configuraciones establecidas en el procedimiento.

Figura 13*Configuración del osciloscopio*

Interceptar la señal de encendido del secundario de las bobinas de encendido en un cilindro en el canal 1.

Con la sonda inductiva ht-25 conectada al canal 1, se conecta la punta de pruebas al cable de alta de la bujía correspondiente al cilindro 1, e igualmente Según los diagramas eléctricos se identifica e intercepta la señal del sensor CKP en el conector C12 y el cable B+ de color B/W blanco y negro con el canal 2 del osciloscopio. Ver figuras 14 y 15.

Figura 14

Bobinas de encendido



Interceptar la señal del sensor CKP con la punta de pruebas del osciloscopio en el canal 2.

Figura 15

Conector sensor ckp



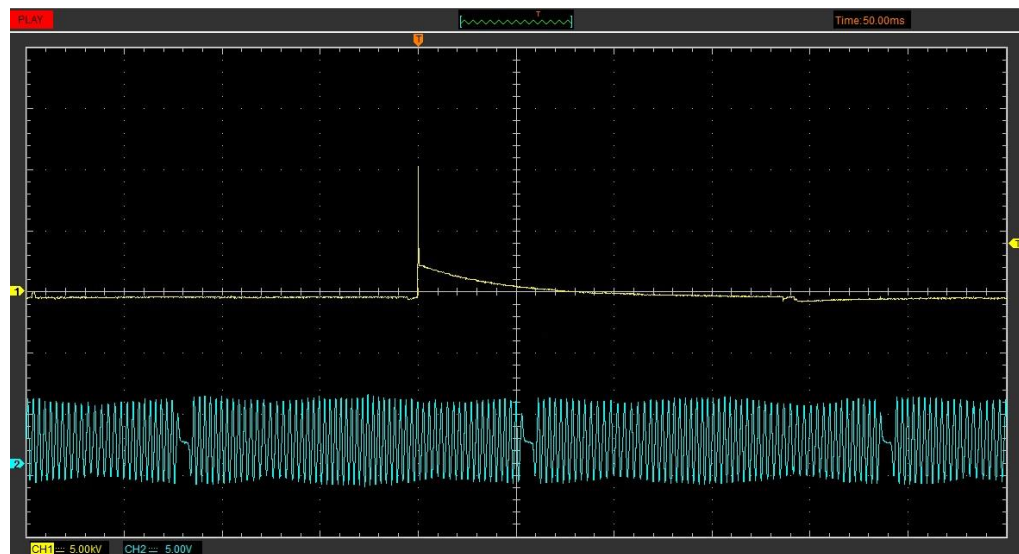
Dar arranque al motor durante 5 segundos, captar las señales y guardar los datos en formato imagen JPG y Excel.

La Figura 16 muestra una captura de pantalla del osciloscopio. En ella, la señal del sensor CKP está representada por una línea azul, mientras que la señal de encendido de la bujía del cilindro 1 aparece en amarillo. Dado que la chispa se produce antes del PMS en el ciclo Otto, esta señal será útil para identificar la carrera de compresión de cada cilindro en la señal registrada.

Además, los datos son guardados en un documento Excel en sus respectivos componentes vertical y horizontal.

Figura 16

Datos obtenidos



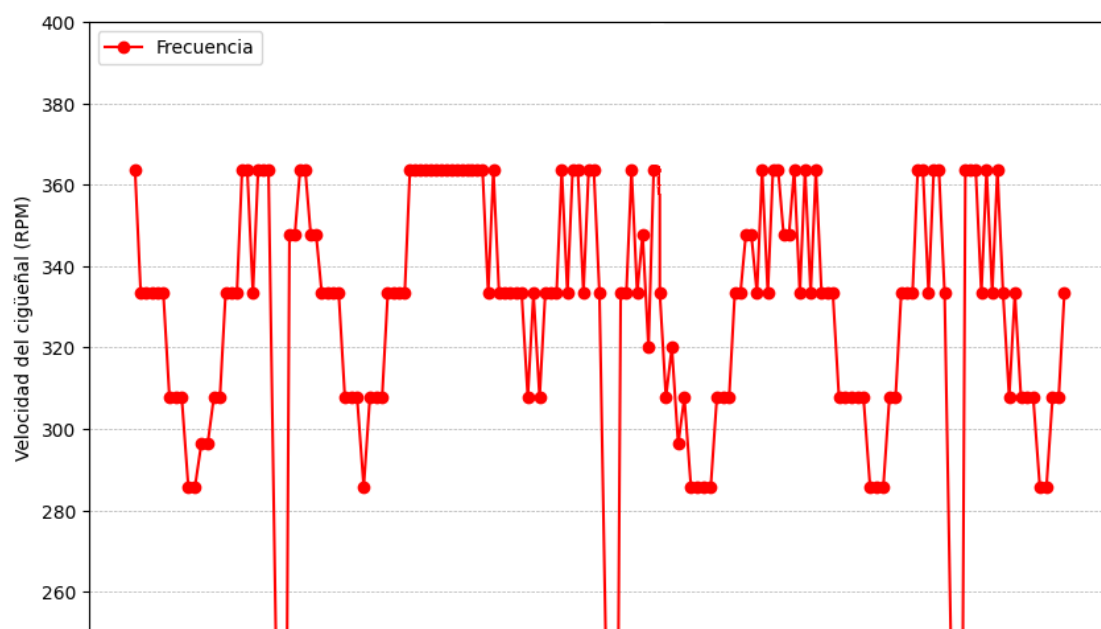
Procesamiento de los datos mediante el algoritmo.

Después de recopilar y procesar los datos del sensor CKP del motor seleccionado, se presenta la gráfica en la Figura 17, que representa la velocidad angular del cigüeñal en el eje

vertical (RPM). Se observa una oscilación entre 280 RPM y 380 RPM, los picos inferiores son causados por la resistencia de compresión en cada cilindro. Además, se distinguen tres eventos donde la gráfica desciende a valores que se salen del eje horizontal; estos corresponden al espacio sin dientes en la rueda de fase, marcando una revolución completa entre cada par de eventos. Esto, junto con la ubicación de la señal de encendido, facilita la identificación de los eventos de los cilindros.

Figura 17

Velocidad del cigüeñal

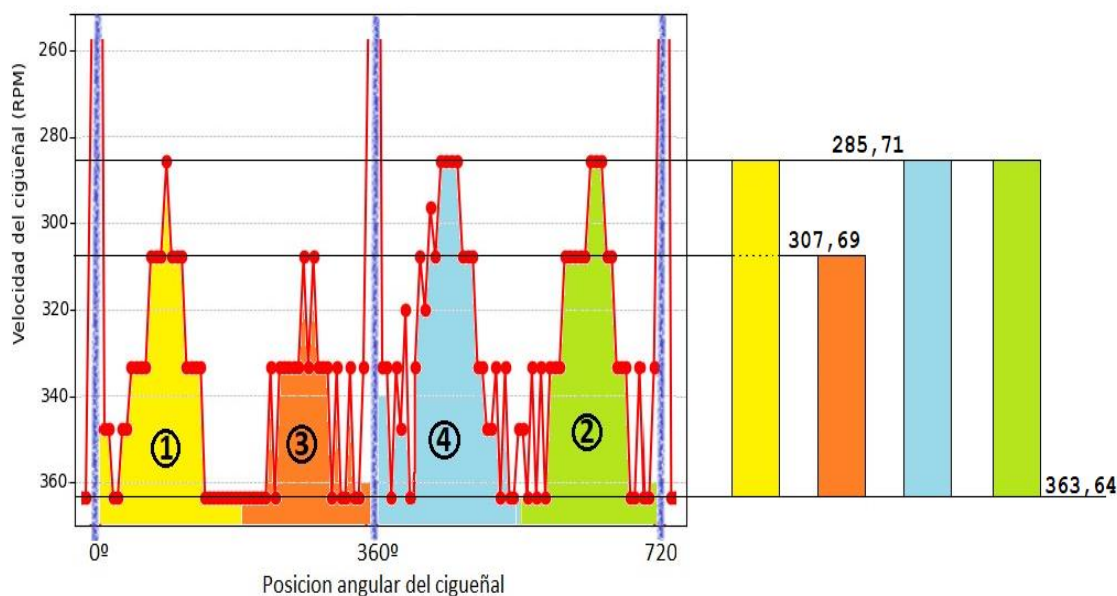


4.6 Análisis de los resultados.

Como parte del proceso de análisis se modifica la gráfica de las frecuencias del cigüeñal figura 17, con el fin de hacer más sencilla su interpretación ver figura 18.

Figura 18

Análisis de los datos



En primer lugar, se invierte el eje vertical y luego se marcan las posiciones 0, 360 y 720 de giro de la rueda de fase del cigüeñal con líneas verticales de color azul para incluir todos los eventos de compresión de los cilindros. Utilizando la Figura 16 como referencia, se localizan, marcan y asignan valores a los eventos de compresión para cada cilindro siguiendo el orden de encendido 1-3-4-2.

Del análisis visual de la Figura 18, se observa que los cilindros 1, 4 y 2 exhiben un comportamiento similar en cuanto a los eventos de compresión, ya que muestran un cambio de velocidad durante la carrera de compresión. Sin embargo, se nota una irregularidad en el evento de compresión del cilindro 3, donde no se observa una reducción de velocidad del cigüeñal al mismo nivel que en los otros cilindros. Esto podría indicar problemas de estanqueidad o fugas de presión de gases en el cilindro 3, lo que resulta en una fuerza de compresión menor y, por lo tanto, una desaceleración menos pronunciada durante dicho evento.

Métricas.

El término $\Delta\omega$ representa la reducción de la velocidad angular del cigüeñal para cada cilindro. Se calcula restando el valor mínimo del valor máximo para cada evento de compresión.

Tabla 1.

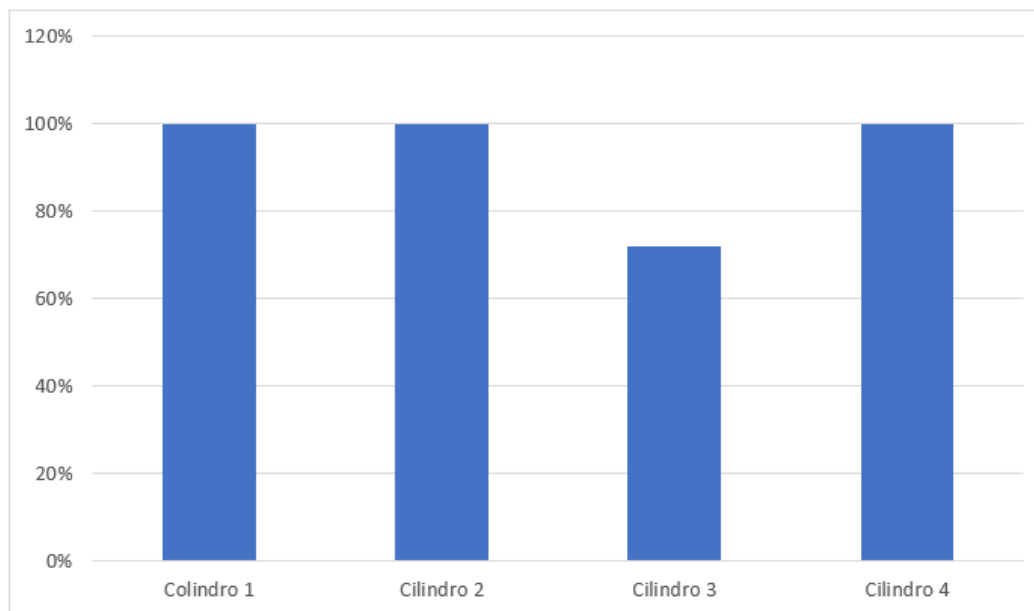
Variación de la velocidad angular.

Cilindro	Variación de velocidad angular en la carrera de compresión $\Delta\omega$, (RPM)
1	77.93
2	77.93
3	55.95
4	77.93

El término %C compara la reducción de velocidad angular $\Delta\omega$ de cada cilindro con el cilindro que experimenta la mayor variación. Esta variación en la velocidad angular del cigüeñal se utiliza como una medida indirecta de la compresión y se muestra en la figura 19.

Figura 19

Compresión Relativa



Según lo observado en la figura 19, el cilindro 3 muestra una anomalía al presentar una compresión menor que los otros tres cilindros. Por tanto, es plausible concluir que este cilindro tiene deficiencias en la compresión. Las posibles causas de este fallo son diversas e incluyen desgaste en la superficie interior del cilindro, desgaste de los anillos del pistón, problemas en el tren de válvulas o una rotura en la junta de culata. Identificar la causa precisa de esta falla requeriría pruebas adicionales, como mediciones de presión en el sistema de enfriamiento del motor, mediciones de presión en el cárter y, posiblemente, un desmonte de la culata del motor para una inspección visual o con instrumentos de medición de las tolerancias y desgastes.

5. Conclusiones.

Como se evidencio en el análisis de las métricas obtenidas, es posible obtener una estimación de la compresión de cada cilindro reflejada en la desaceleración del cigüeñal, la cual es útil para conocer el estado operativo del motor, esta prueba resulta una herramienta factible para el diagnóstico, pues siendo una técnica poco intrusiva ofrece un método rápido y fiable para evidenciar problemas. Aun así, también se debe tener en cuenta que, para tener una mayor resolución de la velocidad del cigüeñal, es necesario contar con un equipo de adquisición de datos con una memoria más extensa para así inferir con mucho más detalle esta magnitud.

Con todo lo anterior en consideración se puede concluir que es posible y pertinente la medición de la compresión relativa en motores de cuatro tiempos mediante esta técnica.

REFERENCIAS

Bolton, W. (202). *Ingenieria de control* (2 ed.). Alfaomega.

Brown, T. S., & Neill, W. S. (1992). Determination of Engine Cylinder Pressures from Crankshaft Speed Fluctuations. *SAE Transactions*, 101, 771–779. <http://www.jstor.org/stable/44611250>

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2013). *Termodinamica* (7 ed.). McGraw Hill.

Payri, F., & Desantes, J. (2011). *Motores de combustion interna alternativos*. Reverte .

Serway, R. A., & Jewett, J. (2018). *Fisica para ciencias e ingenierias* (7 ed.). CENGAGE.

Tagliatalata F., Lavorgna M., Mancaruso E., Vaglieco B.M. (2013). Determination of combustion parameters using engine crankshaft speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.12.009>.

S. A. Ali and S. Saraswati,(2015). "Reconstruction of cylinder pressure using crankshaft speed fluctuations," International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), Pune, India, 2015, pp. 456-461, doi: 10.1109/IIC.2015.7150785.

Taraza, D. (2002). Accuracy Limits of IMEP Determination from Crankshaft Speed Measurements. *SAE Transactions*, 111, 689–697. <http://www.jstor.org/stable/44743096>

Understanding the Relative Compression Analysis. (s. f.). <https://autoditex.com/page/relative-compression-test-67-1.html>

Qué es el sensor de posición de cigüeñal CKP y cómo funciona?
https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/que-es-el-sensor-de-posicion-de-ciguenal-ckp-y-como-funciona/#google_vignette