

Análisis y verificación de los resultados del consumo de combustible en velocidades de baja en vacío de 800 RPM hasta una máxima velocidad de 2000 RPM



Estudio del consumo de combustible y eficiencia del motor CAT C9 a diversos regímenes de r. p. m. mediante el uso de dinamómetro de pruebas

Study of fuel consumption and efficiency of the CAT C9 engine at various RPM regimes through the use of a test dynamometer

RESUMEN

Para garantizar el correcto funcionamiento del motor diésel tras una reparación, es necesario e indispensable someterlo a una prueba dinamométrica en un banco de pruebas, con la finalidad de corroborar que se cumplan la potencia y los parámetros recomendados por el fabricante. Este artículo tiene como objetivo demostrar la importancia del uso de un dinamómetro de pruebas como herramienta de calidad para realizar el estudio del consumo de combustible en un motor diésel Caterpillar modelo C9 cuando está sometido a diferentes regímenes de velocidad angular. El tipo de investigación es aplicada, con un enfoque cuantitativo, y el diseño de la investigación es experimental. Se espera determinar el consumo de combustible real y la variación de la eficiencia del motor diésel durante una prueba dinamométrica. Dichas pruebas nos brindarán datos para gestionar, monitorear y controlar los recursos a emplear durante los procesos de pruebas dinamométricas.

Para poder lograr esto, se ha recolectado información como: consumo de combustible, frecuencias de inyección, tiempo de duración de la inyección de combustible y la corriente promedio del solenoide de la válvula de control IAP. Todos estos parámetros van a ser medidos e interpretados mediante espectros de las señales de accionamiento de los inyectores y del solenoide de la válvula cuando el motor diésel Caterpillar modelo C9 está sometido a diferentes regímenes de velocidad. Se analizaron y verificaron los resultados del consumo de combustible en velocidades bajas, en vacío, de 800 r. p. m. hasta una velocidad máxima de 2000 r. p. m., hallando una relación directamente proporcional con el consumo de combustible. Asimismo, se determinó la relación que presenta el consumo de combustible con las señales de accionamiento de los solenoides de la válvula IAP e inyectores.

Este artículo comprueba la importancia del estudio y análisis del consumo de combustible en relación con el accionamiento mecánico y electrónico del motor diésel modelo C9, mediante el uso de un dinamómetro de pruebas. En conclusión, esta herramienta permite verificar cómo el consumo de combustible guarda relación directa con los diferentes regímenes de velocidad, además de otros parámetros como las temperaturas y presiones del motor.

ABSTRACT

To ensure the proper functioning of the diesel engine after a repair, it is necessary and essential to subject it to a dynamometric test on a test bench, in order to verify that the power and parameters recommended by the manufacturer are met. This article aims to demonstrate the importance of using a test dynamometer as a quality tool to study fuel consumption in a CATERPILLAR C9 diesel engine when subjected to different angular speed regimes. The research type is applied, with a quantitative approach, and the research design is experimental. The goal is to determine the actual fuel consumption and the variation in engine efficiency during a dynamometer test. These tests will provide data to manage, monitor, and control the resources to be used during the dynamometer testing processes.

To achieve this, information has been collected such as fuel consumption, injection frequencies, injection duration, and the average current of the IAP control valve solenoid. All these parameters will be measured and interpreted through spectra of the actuator signals of the injectors and solenoid valve when the CATERPILLAR C9 diesel engine is subjected to different speed regimes. The results of fuel consumption at low idle speeds of 800 RPM to a maximum speed of 2000 RPM were analyzed and verified, finding a directly proportional relationship



Palabras Claves

Eficiencia del motor diésel, productividad, consumo de combustible, Motor Caterpillar C9, potencia, torque, optimización

Key words

Diesel engine efficiency, Productivity, Fuel consumption, Caterpillar C9 engine, Power, Torque, Optimization.

with fuel consumption. Additionally, the relationship between fuel consumption and the actuator signals of the IAP valve solenoids and injectors was determined.

This article confirms the importance of studying and analyzing fuel consumption in relation to the mechanical and electronic actuation of the C9 diesel engine, using a test dynamometer. In conclusion, this tool allows verification of how fuel consumption is directly related to different speed regimes, as well as other parameters such as engine temperatures and pressures.

INTRODUCCIÓN

Cuantificar el consumo de combustible en motores diésel es fundamental para planificar los costos operativos semestrales y anuales en empresas de reparación de motores diésel. Estas programan reparaciones y pruebas en dinamómetros, lo que genera la necesidad de conocer y estandarizar el consumo de combustible del motor a diferentes regímenes de velocidad. Sin embargo, no se dispone de datos técnicos sobre el consumo de combustible al realizar pruebas de rendimiento en el motor Caterpillar modelo C9.

El dinamómetro de prueba Power Test es una herramienta de alta calidad que permite medir parámetros técnicos como la potencia y el torque en motores diésel. Estos datos se comparan con las especificaciones del fabricante. Por esta razón, muchas empresas mineras, marítimas, petroleras y de transporte someten sus motores reparados a pruebas en dinamómetro para garantizar su confiabilidad y disponibilidad. En Perú, empresas como Ferreyros, Cummins, Mur Wy y Detroit cuentan con dinamómetros de prueba, lo que nos convierte en el primer instituto técnico superior en disponer de un dinamómetro de la misma marca, permitiendo así el estudio del consumo de combustible en diversos motores diésel.

En la figura 1, se observan los componentes mecánicos y electrónicos del motor diésel estudiado en esta investigación. El objetivo del proyecto es demostrar que, mediante el uso del dinamómetro de pruebas, se puede calcular y analizar el consumo de combustible del motor diésel Caterpillar modelo C9, así como examinar el comportamiento de los componentes electrónicos del sistema de combustible, incluyendo el tiempo de inyección electrónica y la corriente promedio del solenoide.

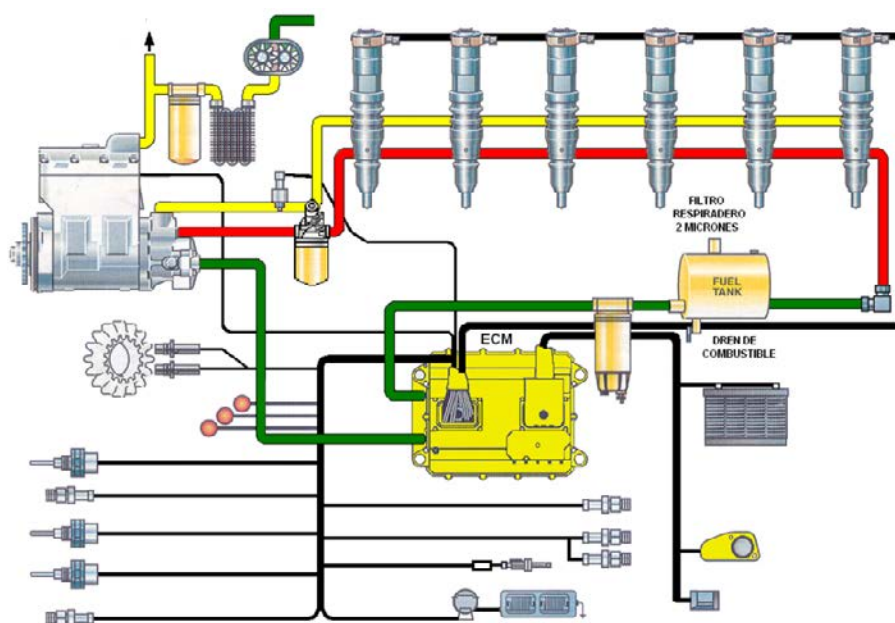


Figura 1. Sistema de combustible tipo HEUI del motor Caterpillar modelo C9

Fuente: [2].

FUNDAMENTOS

Merchán [5] determinó que dicha técnica se basa en las ecuaciones matemáticas que definen la dinámica de un motor de combustión interna. Esta técnica está diseñada para medir el rendimiento a partir de la velocidad angular del motor, acelerándolo sin someterlo a ninguna carga adicional, salvo las pérdidas mecánicas provocadas por la transmisión y la fricción de sus componentes.

Morales y Rivadeneira [7] afirman que este equipo es esencial para realizar pruebas controladas del rendimiento de un motor diésel en condiciones de laboratorio. Además, destacan la

importancia de estudiar el motor en las condiciones atmosféricas de la ciudad de Quito, Ecuador, debido a las elevadas emisiones características de los motores diésel, como el dióxido de azufre, monóxido de carbono y material particulado, entre otros. La solución comienza con el diseño de motores y sistemas de alimentación de combustible, la búsqueda de combustibles ecológicos, el desarrollo de dispositivos de postcombustión y la implementación de tecnologías alternativas en los motores.

Jaya y Mancheno [3] analizan el comportamiento de un motor de encendido por compresión usando mezclas de biodiésel, con el objetivo de evaluar su viabilidad técnica en la generación de potencia en motores diésel. Los resultados de las pruebas se dividen en tres variables: el control de calidad de las mezclas de

biodiésel, las especificaciones de torque, potencia, consumo específico y eficiencia total, y, finalmente, las emisiones de gases de escape.

Llanes, Grefa, Molina y Rocha [4] señalan que los vehículos livianos generan una considerable cantidad de polución en el tránsito local, tanto en horario normal como en horas pico. Por ello, se subraya la importancia de estudiar el consumo de combustible de los vehículos al utilizar el aire acondicionado, a través de un monitoreo electrónico con el software OBD2 ELM327 en la zona de Shushufindi.

Sun *et al.* [8] indican que los costos de combustible están directamente relacionados con el rendimiento del motor de combustión y el indicador clave de la economía de combustible. Este estudio en tractocamiones demuestra la importancia del consumo de combustible en diferentes escenarios, comparando las pruebas entre vehículos de celdas de combustible y tractocamiones con celdas de combustible, ambos bajo una velocidad constante de 40 km/h.

Schmidt, Kimmich, Straky e Isermann (2000) [9] señalan que los sistemas de inyección diésel modernos deben satisfacer diversas demandas. Además de optimizar el tiempo de inyección y la asignación de los tiempos, se presta especial atención al aumento de la presión de inyección para mejorar la combustión y reducir las emisiones de gases de escape. Dado que estos sistemas son cada vez más complejos y los componentes, especialmente los de la parte de alta presión de las bombas de inyección, soportan una gran carga, surge la necesidad de supervisar los componentes delicados.

Macián, Luján, Guardiola y Perles (2006) [6] presentan una lista de los principios seleccionados para detectar irregularidades en el suministro de combustible: velocidad del eje del motor convencional (n), presión de los gases de escape (P), temperatura de los gases de escape (T) y velocidad del eje del turbocompresor (n). Para compararlos, se empleará un enfoque lineal unificado basado en la transformada discreta de Fourier.

Castillo, López, Serrato, Tibaquirá y Castaño (2020) [1] aplican diferentes estrategias de eficiencia aplicados a vehículos de transporte para fijar y estandarizar los procedimientos de medición, regulación y control del consumo de combustible en diferentes vehículos, para garantizar que estos vehículos cumplan con los límites de emisiones a diferentes velocidades específicas del motor.

Es importante destacar que, actualmente, no existe un *paper* que especifique el consumo de combustible de un motor diésel Caterpillar modelo C9 en un dinámometro de prueba a diferentes regímenes de velocidad. Esta investigación contribuirá de manera significativa a la cuantificación del consumo real de combustible del motor diésel y al análisis del comportamiento de diversas variables al someterlo a una prueba dinámométrica.

METODOLOGÍA

En el presente estudio, se ha sometido al motor diésel Caterpillar modelo C9 a diferentes regímenes de velocidad, monitoreando y recopilando información mediante el *software* Electronic Technician de Caterpillar. Los parámetros observados incluyen la velocidad del motor, la presión de activación de inyección, el caudal de combustible y la corriente de activación del inyector. Además, se ha utilizado un osciloscopio para monitorear las frecuencias y tiempos de activación del sistema de inyección.

En la figura 2, se muestran los parámetros de funcionamiento del motor diésel a 800 r. p. m. El *data logger* del *software* Electronic Technician ha verificado que el caudal mínimo de combustible entregado es de 4,5 L/h y el caudal máximo es de 5,25 L/h, lo que da una media de 4,87 L/h. Esta variación entre los valores mínimos y máximos se debe a las fluctuaciones en las r. p. m., que oscilan entre 797 y 805 r. p. m. Finalmente, se evidencia una frecuencia de activación de 1 kHz durante el paso del caudal hacia los inyectoros.

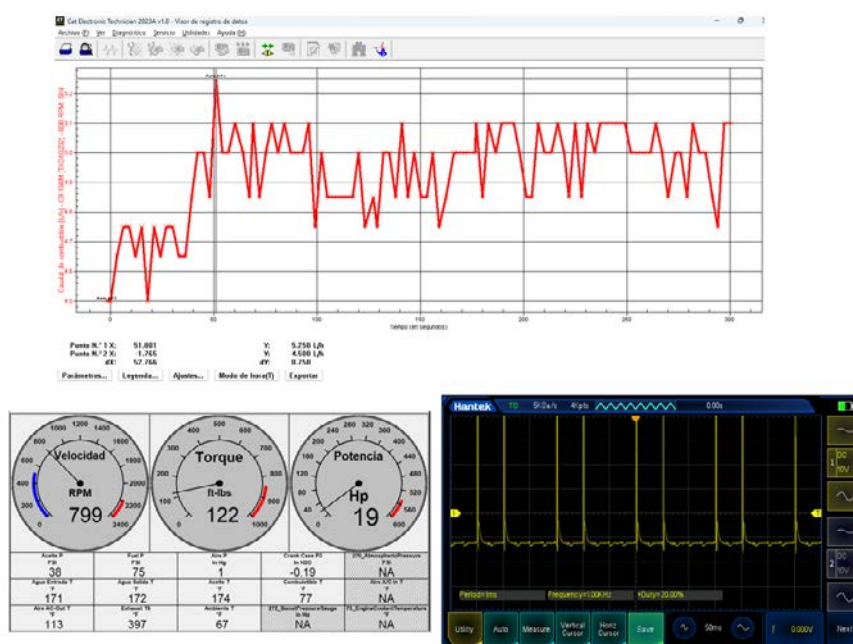


Figura 2. Caudal de combustible vs. frecuencia de activación de inyección a 800 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3, se muestran los parámetros de funcionamiento del motor diésel a 2000 r. p. m. El *data logger* del *software* Electronic Technician ha verificado que el caudal mínimo de combustible entregado es de 14,6 L/h y el máximo es de 19 L/h, lo que da una media de 16,8 L/h. Esta variación entre mínimos y máximos

se debe a las fluctuaciones en las r. p. m., que oscilan entre 1993 y 2004 r. p. m. Finalmente, se evidencia una frecuencia de activación de 2,08 kHz durante el paso del caudal de combustible hacia los inyectores.

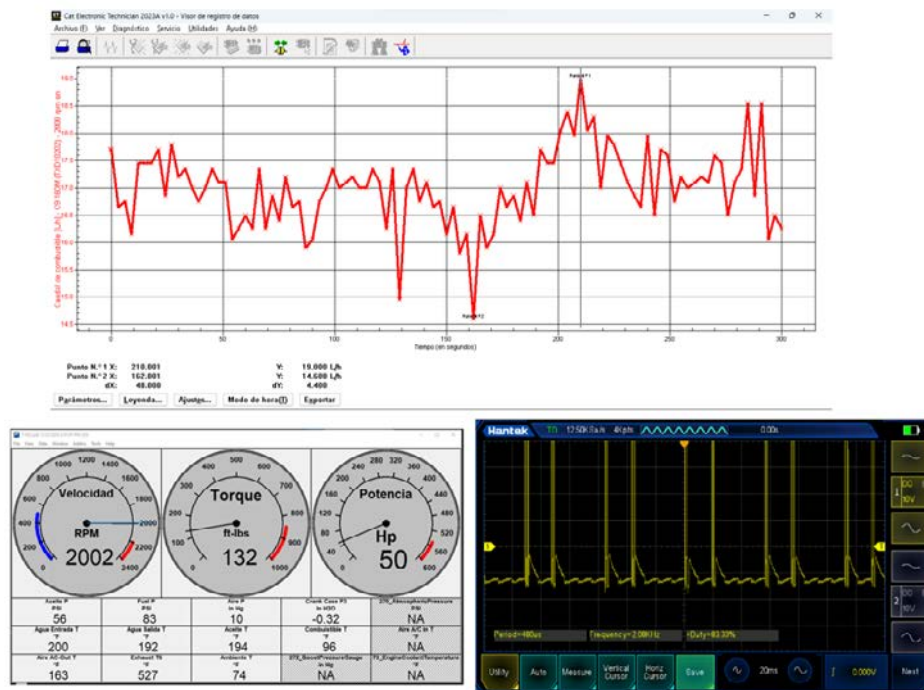


Figura 3. Caudal de combustible vs. frecuencia de activación de inyección a 2000 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, en la tabla 1 se presenta el desempeño de cada una de las variables mencionadas a distintos regimenes de trabajo, desde 800 r. p. m. hasta un máximo de 2000 r. p. m. En cada

caso, se muestran el caudal de combustible (L/h), la corriente de activación de inyección (%), y la presión de activación del inyector (kPa).

Tabla 1
Desempeño de variables

Velocidad del motor en r. p. m.	Caudal de combustible L/h	Presión activación inyección Kpa	Corriente activación inyector %
800	4,88	15 680,00	40,85
900	6,13	16 043,75	40,03
1000	6,48	17 766,25	41,55
1100	7,95	19 885,00	42,03
1200	9,33	20 248,75	42,63
1300	9,90	20 230,00	42,28
1400	10,83	20 292,50	41,93
1500	11,58	20 291,25	41,58
1600	12,53	20 552,50	41,00
1700	14,08	20 957,50	41,93
1800	15,50	21 401,25	42,05
1900	16,23	19 522,50	41,23
2000	16,80	17 706,25	40,85

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

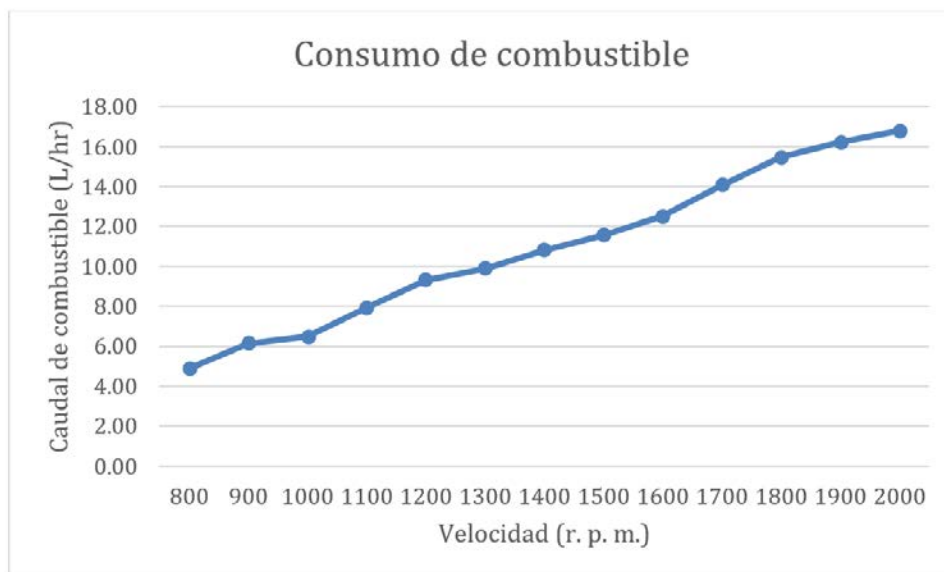


Figura 4. Consumo de combustible vs. r. p. m. del motor diésel

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la gráfica:

1. Eje X (velocidad – r. p. m.): La gráfica abarca un rango de velocidades del motor, desde 800 hasta 2000 r. p. m.
2. Eje Y (Consumo de combustible - L/h): El consumo de combustible varía entre aproximadamente 4 L/h y 17 L/h.
3. Existe una relación directamente proporcional entre las r. p. m. del motor y el consumo de combustible. A mayores r. p. m., el motor requiere más energía, lo que se refleja en un aumento del consumo de combustible.
4. Respecto a la eficiencia del motor, se observa que la pendiente constante del incremento sugiere un comportamiento predecible y lineal en cuanto al consumo de combustible en relación con las r. p. m. No obstante, el aumento continuo del consumo indica que el motor es menos eficiente a altas r. p. m., ya que el consumo de combustible por unidad de trabajo realizado es mayor.

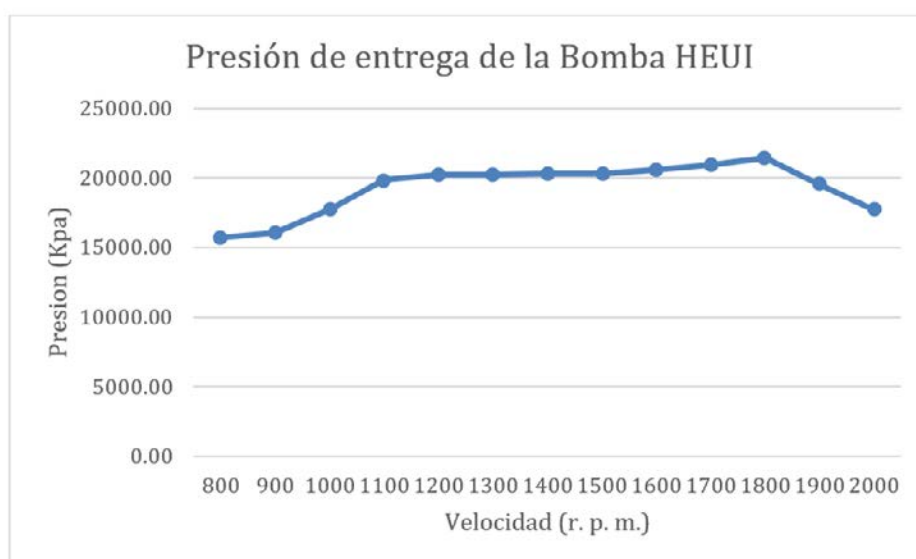


Figura 5. Presión de entrega de bomba HEUI vs. r. p. m. del motor diésel

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la gráfica:

1. Eje X (velocidad - r. p. m.): La gráfica abarca un rango de velocidades del motor, desde 800 hasta 2000 r. p. m.
2. Eje Y (presión - kPa): La presión de entrega varía entre aproximadamente 15 000 kPa y 22 000 kPa.
3. La presión de entrega de la bomba HEUI aumenta con la velocidad del motor hasta alcanzar una meseta estable en un rango moderado de 1100 a 1600 r. p. m., lo que propone que la bomba está diseñada para mantener una presión constante en ese rango de operación.

4. La estabilización de la presión entre 1100 y 1600 r. p. m. indica que la bomba HEUI optimiza el rendimiento de manera más eficiente dentro de este rango de r. p. m., un factor crucial para mejorar tanto el rendimiento como la economía de combustible del motor.
5. La presión de entrega es esencial para una correcta inyección de combustible. Las variaciones observadas fuera de la meseta, es decir, entre 800 y 1100 r. p. m. y entre 1600 y 2000 r. p. m., podrían afectar la atomización y la combustión del combustible, lo que a su vez influiría en el rendimiento del motor.

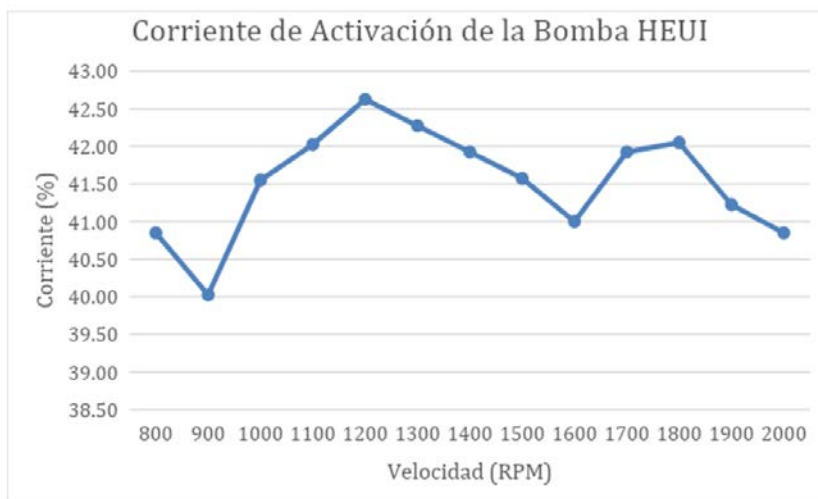


Figura 6. Corriente de activación de la bomba HEUI vs. r. p. m. del motor diésel

Fuente: Elaboración propia.

Análisis de la gráfica:

1. Eje X (velocidad - r. p. m.): La gráfica abarca un rango de velocidades del motor, desde 800 hasta 2000 r. p. m.
2. Eje Y (corriente - %): La corriente de activación de la bomba HEUI varía entre aproximadamente 39,50 % y 43,00 %.
3. La corriente de activación de la bomba HEUI no es constante y fluctúa según la velocidad del motor, lo que sugiere que la demanda de corriente depende tanto de la carga como del régimen de funcionamiento del motor.
4. Los picos y caídas en la gráfica indican puntos de ajuste

o eficiencia en la operación de la bomba HEUI a diferentes velocidades. La bomba parece estar optimizada para operar de manera más eficiente a ciertos regímenes, como lo indica el pico observado alrededor de las 1200 r. p. m.

5. Las variaciones en la corriente de activación pueden influir en el rendimiento y la eficiencia del motor diésel, ya que la correcta inyección de combustible es un factor clave para su funcionamiento óptimo.

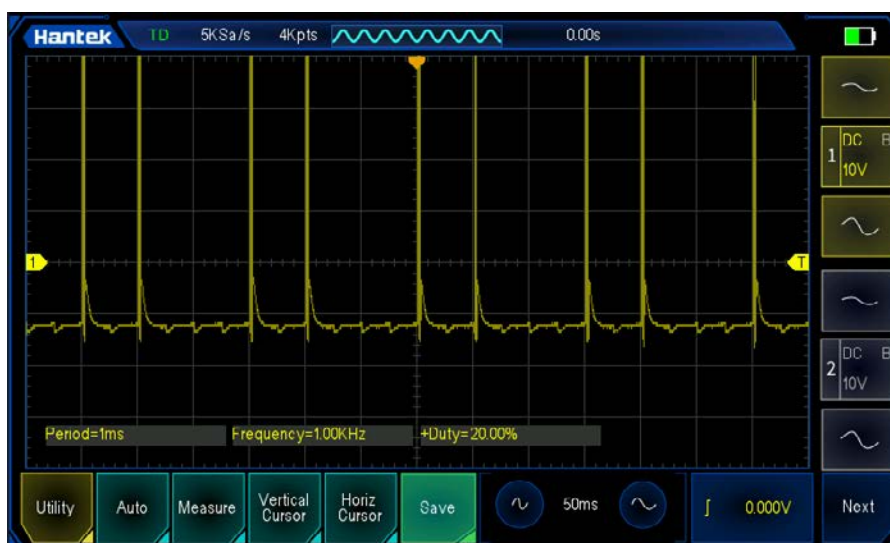


Figura 7. Frecuencia de activación de inyección de combustible a 800 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

La forma de onda mostrada en la figura 7 es una señal periódica con un patrón consistente. Su frecuencia es de 1,00 kHz y su periodo es de 1 ms, lo que concuerda con dicha frecuencia. Estas observaciones indican que la señal medida es una señal

de pulso periódica con una frecuencia relativamente baja y un ciclo de trabajo pequeño, lo que sugiere su potencial utilidad en aplicaciones de procesamiento de señales digitales o modulación por ancho de pulso (PWM).

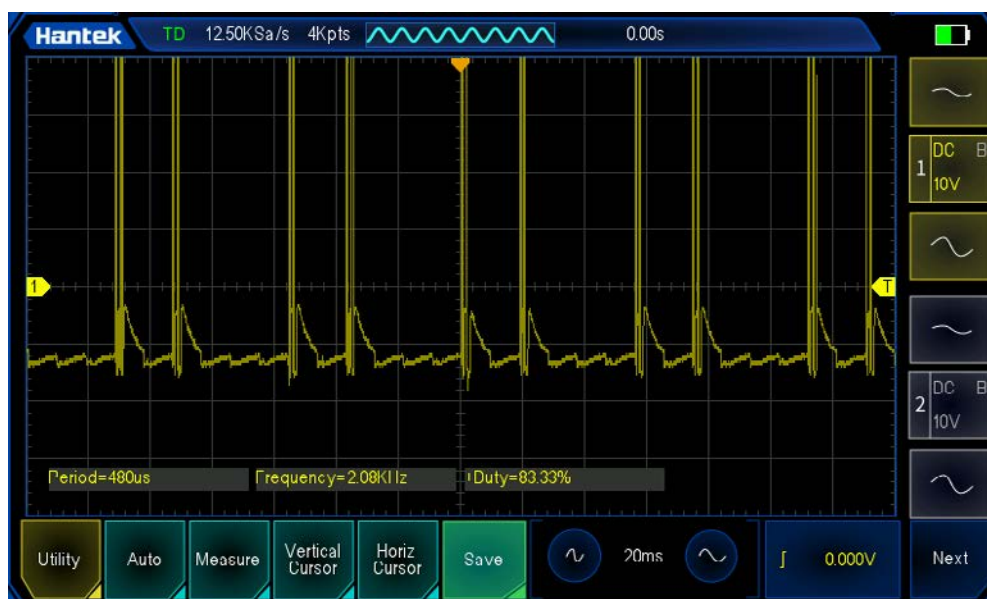


Figura 8. Frecuencia de activación de inyección de combustible a 2000 r. p. m.

Fuente: Elaboración propia.

La señal mostrada en la figura 8 presenta una frecuencia más baja y un ciclo de trabajo menor en comparación con la señal de la figura 7. Estas características pueden ser beneficiosas en diversas aplicaciones de procesamiento de señales y control. Una señal con menor frecuencia y ciclo de trabajo reducido puede ser útil en situaciones donde se necesita una menor tasa de activación o un menor consumo de energía, lo cual es ideal para aplicaciones que priorizan la eficiencia energética.

y los inyectores. Este hallazgo subraya la importancia de la calibración y el control electrónico para optimizar el consumo de combustible.

- La corriente de activación de la bomba HEUI varía según la velocidad del motor, mostrando picos y caídas que indican puntos de eficiencia o ajustes en la bomba para diferentes velocidades. Estas variaciones pueden influir en el rendimiento y la eficiencia del motor.
- La frecuencia de activación de la inyección de combustible es de 1 kHz a 800 r. p. m. y de 2,08 kHz a 2000 r. p. m. Estas señales periódicas y sus características sugieren que la inyección está optimizada para distintos regímenes de velocidad, contribuyendo al rendimiento y eficiencia del motor.

CONCLUSIONES

Con base en el análisis del consumo de combustible en distintos regímenes de velocidad del motor diésel Caterpillar modelo C9, se concluyen los siguientes puntos:

- La relación directa entre la velocidad y el consumo de combustible reveló que el consumo del motor diésel está estrechamente vinculado a los regímenes de velocidad. Se observó un incremento en el consumo a medida que aumentaban las r. p. m., lo que es consistente con el funcionamiento de los motores de combustión interna, donde mayores velocidades exigen más energía y, por tanto, mayor consumo de combustible.
- En diversas pruebas, el caudal de combustible varió según la velocidad, fluctuando en función de las r. p. m. Por ejemplo, a 800 r. p. m., el caudal osciló entre 4,7 y 5,3 litros/hora, mientras que, a 1000 r. p. m., la variación fue de 6,3 a 6,7 litros/hora. Estas fluctuaciones reflejan la adaptación del sistema de inyección a las demandas operativas del motor.
- En cuanto al accionamiento de los solenoides, se encontró una relación significativa entre el consumo de combustible y las señales de activación de los solenoides de la válvula IAP

REFERENCIAS

- [1] Castillo Herrera, J., López Restrepo, J., Serrato Tobón, D., Tibaquirá Giraldo, J. & Castaño Pérez, S. (2020). Desarrollo de una metodología de medición de consumo de combustible para vehículos livianos en Colombia, basada en principios de metrología/Development of a fuel consumption measurement methodology for light duty vehicles in Colombia, based on metrology principles. *Dyna*, 87(212), 47-56. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.78899>
- [2] Caterpillar. (2008). *Manual del motor ACERT C9*.
- [3] Jaya, E. & Mancheno, P. (2009). *Determinación de las características de funcionamiento y rendimiento de un motor encendido por compresión al utilizar mezclas de biodiésel* [Tesis de pregrado, Universidad Superior

Politécnica de Chimborazo]. Universidad Superior Politécnica de Chimborazo.

- [4] Llanes, E., Shiguango, S., Molina, J. & Rocha, J. (2024). Incidence of automotive air conditioning on the index of fuel consumption in spark ignition vehicle on a route in the Ecuadorian Amazon. [Incidencia del aire acondicionado automotriz en el índice de consumo de combustible en vehículo de encendido provocado en una ruta de la Amazonía Ecuatoriana]. *Ingenius*, (31), 115-126. <https://doi.org/10.17163/ings.n31.2024.10>
- [5] Merchan, C. (2004). *Determinación de la potencia y el torque en motores de combustión interna mediante la aceleración libre* [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Universidad Industrial de Santander.
- [6] Macián V., Lujan J., Guardiola C. & Perles A. (2006). A comparison of different methods for fuel delivery unevenness detection in Diesel engines. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(8), 2219–2231. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.04.001>
- [7] Morales, D. & Ribadeneira, A. (2007). *Dimensionamiento de un banco para pruebas de motores a diésel* [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]. Escuela Politécnica Nacional.
- [8] Sun, T. *et al.* (2021). Experimental study on fuel economy of fuel cell truck under different driving cycle. In *2021 4th Asia Conference on Energy and Electrical Engineering (ACEEE)* (pp. 38-43). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ACEEE51855.2021.9575149>
- [9] Schmidt, M., Kimmich, F., Straky, H., & Isermann, R. (2000). Combustion supervision by evaluating the crankshaft speed and acceleration. *SAE Technical Paper*, 2000-01-0558. <https://doi.org/10.4271/2000-01-0558>

Antes de unirse a Tecsup, trabajó como técnico de maquinaria pesada con las marcas Doosan, Jhon Deere, Caterpillar y Case, para luego estar en el área de planeamiento y, por último, supervisor de equipo de flota pesada.

@ creategui@tecsup.edu.pe

Brayan Oswaldo Garrido Rios

Docente del Departamento de Mecánica. Bachiller en Ingeniería Mecatrónica por la Universidad Privada del Norte, técnico en Electricidad Industrial de la escuela de Senati, diplomado en gestión del mantenimiento basado en la confiabilidad. Cuenta con más de 5 años de experiencia laboral en la industria, en el área de proyectos, automatización, programación con variadores y PLC y mantenimiento de equipos médicos. Actualmente, se desempeña como docente de la carrera de mecánica en Tecsup Centro.

@ bgarrido@tecsup.edu.pe

José Ernesto Alvarado Alvarrán

Magíster en Gerencia del Mantenimiento, ingeniero industrial y técnico en Mecánica Automotriz. Docente del Departamento de Gestión y Mantenimiento de Maquinaria Pesada en Tecsup. Actualmente, desempeña labores en la línea de la gestión del mantenimiento, tren de fuerza, motores diésel, evaluación y reusabilidad de componentes del motor, diagnóstico y prueba dinamo-métrica.

Antes de unirse a Tecsup, trabajó como especialista mentor en Motores Caterpillar en el dealer de Caterpillar la empresa Ferreyros S. A. para luego desarrollar la posición de jefe de Mantenimiento en la empresa Sermec SAC, dedicada al sector de la pesca y energía.

@ jalvaradoa@tecsup.edu.pe

Recibido: 23-02-24
 Revisado: 10-09-24
 Aceptado: 24-09-24



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.

ACERCA DEL AUTOR

Christopher Jesus Reategui Olivares

Técnico de Mantenimiento de Maquinaria Pesada y bachiller en Ingeniería Industrial. Docente del departamento de Mecánica y Aviación, actualmente está encargado de la línea de motores donde se desempeña en las áreas de mantenimiento de motores diésel, diagnóstico de motores diésel, pruebas en dinamómetro de motores diésel y tren de fuerza del equipo pesado.