

Implementación del algoritmo de diagnóstico técnico en los motores de grupos electrógenos Hyundai Himsen 9h25/33. Caso de estudio

Implementation of technical diagnosis algorithm in Hyundai Himsen 9h25/33 generator set engines. Case study

Carlos Andres Deus Aguilera^{1,*}, Manuel Muñoz Cabrera¹, Alejandra García Toll¹

¹Universidad Tecnológica de Habana. Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento, CEIM. Calle 114, No. 11901 e/119 y 127, Cujae, Marianao 15, 19390. La Habana, Cuba.

*Autor de correspondencia: carlosade@mecanica.cujae.edu.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 11 mayo 2022 **Aceptado:** 17 junio 2022 **Publicado:** 20 junio 2022

Resumen

En el presente trabajo se presenta e implementa un algoritmo de diagnóstico técnico para los motores Hyundai Himsen 9H25/33 de la Central Eléctrica Habana 220 del occidente de la Habana, basado en la integración de tecnologías y herramientas para el diagnóstico. La propuesta es pertinente debido a que propicia mayor precisión en la determinación de los modos de fallos de los defectos. Se comenzó con el estudio de la documentación y la observación de las actividades de mantenimiento y operación, lo cual permite comprender el conjunto de sistemas funcionales y la interrelación entre ellos. Además, fueron identificados 19 parámetros técnicos y tecnológicos del motor y la manera de medirlos, registrarlos y compararlos con sus límites condenatorios. En el emplazamiento de grupos electrógenos, se realizó un análisis concurrente donde se evidencia que el modo de falla de la temperatura superior a 380°C, es el defectuoso funcionamiento del inyector, debido a que el inyector no atomiza el combustible correctamente dentro de la cámara de combustión. La propuesta del algoritmo de diagnóstico técnico posibilita, en la medida que los defectos no trasciendan a fallos y los fallos no trasciendan a averías, reducir los costos por mantenimiento y la afectación a la producción, impactando positivamente en la disponibilidad y eficiencia energética, y el cuidado al medio ambiente.

Palabras clave: algoritmo, diagnóstico técnico, mantenimiento de precisión, análisis concurrente

Abstract

This work presents a technical diagnostic algorithm for the Hyundai Himsen 9H25/33 engines of the Habana 220 Fuel-Oil Power Plant, located at the western part of Havana, based on the integration of technologies and tools for diagnosis. The proposal is pertinent because it promotes high precision in the determination of the failure modes of the defects. It began with the study of the documentation and the observation of the maintenance and operation activities, which allows understanding the set of functional systems and the interrelation between them. In addition, 19 technical and technological parameters of the engine and the way to measure, record and compare them with their damning limits were identified. In the location of generator sets, a concurrent analysis was carried out where it was patented that the failure mode of the temperature higher than 380°C, is the defective functioning of the injector, due to the fact that the injector does not atomize the fuel correctly inside the combustion chamber. The proposal of the technical diagnosis algorithm makes it possible, to the extent that the defects do not transcend to failures and the failures do not

transcend to failures, to reduce maintenance costs and the impact on production, positively impacting the availability and energy efficiency, and the care for the environment.

Keywords: algorithm, technical diagnosis, precision maintenance, concurrent analysis

1. Introducción

La generación de electricidad es un campo prioritario para los gobiernos, pues de ello depende en gran medida la calidad de vida de sus ciudadanos. Una de las alternativas para garantizar dicho objetivo son los grupos electrógenos (GE), los cuales se emplean de forma intensiva o como de apoyo. Estos son continuamente mejorados para garantizar su eficiencia y eficacia [1]. En particular La Central Eléctrica de Fuel-Oíl “Habana 220”, al igual que el resto de los emplazamientos a lo largo de Cuba tiene una gran importancia y surgió como alternativa para dar solución a una crisis energética existente en el país. Esta central eléctrica, ubicada en el Municipio Marianao, La Habana, está conectada al Sistema Electro-Energético Nacional, con el objetivo de brindar ayuda al sistema, debido a la crisis existente en las termoeléctricas. Las centrales eléctricas de este tipo por su pequeño porte, permiten la conexión y la salida de las centrales al Sistema Electro-energético Nacional de forma dinámica [2].

Esta manera de generar energía actualmente representa una forma más barata y eficiente de producir electricidad, ya que son equipos con alta disponibilidad, facilidad para su instalación y de niveles de potencia utilitaria inferiores a la de las termoeléctricas [3]. Durante el cumplimiento normal de las funciones, los GE están sometidos a diferentes solicitudes que ocasionan su deterioro y la consiguiente reducción de la capacidad de generación eléctrica [4]. Estos diversos beneficios para el país los cuales son: reducción de pérdidas en transmisión y distribución, ya que se encuentra cerca de los consumidores, libera capacidad del sistema, proporciona mayor control de energía reactiva, mayor regulación de tensión, uso eficiente de la energía y facilidad de adaptación las condiciones del sitio. En particular, en esta central se dispone de 6 baterías, cada una con 4 motores Hyundai Himsen 9H25/33 que consumen combustible fuel-oíl. Estos grupos electrógenos (GE) están compuestos principalmente por un motor de combustión interna de fuel-oíl, un generador eléctrico y su sistema de control.

Se cuenta con disímiles herramientas y tecnologías de las cuales no se aprovechan al máximo sus beneficios. Se tiende a diagnosticar los motores con una tecnología sin considerar el resultado que puedan ofrecer las otras, conociendo además que mientras más asertivo seamos en la predicción y la prescripción, más eficiente y eficaz seremos en la Prevención [5]. Esto constituye una de las problemáticas en esta central por lo que se hace sumamente importante lograr una base de conocimientos referentes al comportamiento de los motores y a su diagnóstico a partir de la integración de herramientas y tecnologías para garantizar mayor precisión en la determinación de los modos de fallos de los defectos y así aumentar la disponibilidad de los motores y a su vez su vida útil. De acuerdo a esta situación, surge la necesidad de proponer e implementar un algoritmo de diagnóstico técnico donde se integren las tecnologías y herramientas para el diagnóstico.

2. Materiales y Métodos

Se realizó el diagnóstico mediante la secuencia de pasos mostrada en la Figura 1. Se comienza en el momento en que se desata un (defecto-fallo funcional-avería). La primera información que se brinda son sus efectos y síntomas, las cuales están muy relacionadas con los modos de fallos y este es el primer paso en el análisis, donde sirve de apoyo la herramienta AMFE. Luego se pasa al análisis del comportamiento de los parámetros de diagnóstico (técnicos-tecnológicos) y el indicador de presiones, teniendo ya todos los posibles modos de fallos que pueden generar el (defecto-fallo

funcional-avería), lo cual permite que el análisis sea más eficaz. El objetivo principal es no tomar decisiones apresuradas hasta no integrar todas las tecnologías y herramientas pertinentes. Esto es en el caso que no sea muy evidente el problema y se pueda actuar de manera oportuna y certera.

Recopilación de la información

Este paso comienza inmediatamente después de identificada la ocurrencia de un defecto para evitar la pérdida de información. Siempre que sea posible es recomendable obtener y registrar la información de forma sistemática, incluyendo las condiciones existentes, antes, durante y después del evento. Se debe identificar el personal involucrado, y las acciones tomadas; factores ambientales o cualquier dato que se considere relevante y pueda estar relacionado con el hecho.

Análisis concurrente

En el momento en que se desata un (defecto-fallo funcional-avería) la primera información que se brinda son sus efectos y síntomas, las cuales están muy relacionadas con los modos de fallos y este es el primer paso en el análisis, donde sirve de apoyo la herramienta AMFE. Luego se pasa al análisis del comportamiento de los parámetros de diagnóstico (técnicos-tecnológicos) y el indicador de presiones, teniendo ya todos los posibles modos de fallos que pueden generar el (defecto-fallo funcional-avería), lo cual permite que el análisis sea más eficaz.

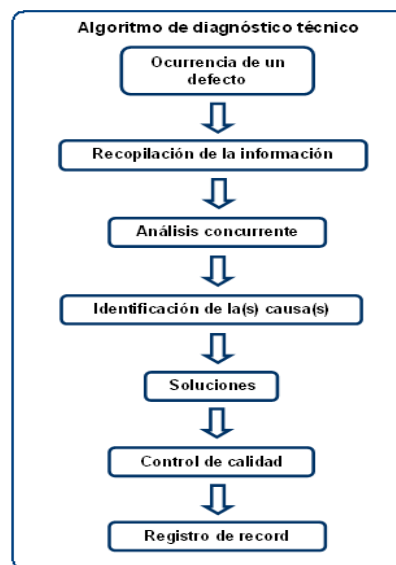


Fig.1 Algoritmo de diagnóstico técnico

Identificación de la causa o las causas

Una vez que el defecto ha sido detectado y se haya realizado el análisis concurrente, se debe determinar la causa del defecto. Es decir, identificar qué elemento o elementos del motor es el o son los causantes de la variación de los parámetros, con respecto a las referencias que reflejan una condición mecánico normal [6].

Soluciones

Sobre la base de los resultados anteriores puede ser planificada la intervención del motor, lo cual permitirá programar con mayor eficiencia los trabajos a realizar, la mano de obra necesaria y los repuestos exigidos por el problema detectado e identificado previamente.

Control de calidad

Esta es la fase de seguimiento, la cual permite determinar si las acciones correctivas que han resultado efectivas o no, en la solución del problema que se intentaba resolver. El chequeo de la efectividad es esencial para asegurarse que se han implementado adecuadamente las acciones correctivas y se ha prevenido la recurrencia del problema [7].

Registro de Record

La inclusión de los resultados en el sistema de reporte y procesamiento de ocurrencia de eventos que tenga implementado la organización, continuará enriqueciendo la base de la información disponible para futuros análisis. Este sistema de reporte y procesamiento se recomienda que sea gestionado de forma automatizada [7].

3. Resultados y Discusión

El algoritmo de diagnóstico a través del cual se identifica la causa de los problemas, sólo se debe poner en práctica cuando se detecta un cambio o un comportamiento anormal durante el proceso de monitoreado. Como resultado del diagnóstico tiene que haber sido posible determinar cuál o cuáles son las componentes afectadas e incluso, proporcionar un estimado preciso de la severidad del problema, de manera tal que se disponga de información de rigor para poder estimar el margen de tiempo que queda para programar acciones de mantenimiento y efectuar las correcciones necesarias, con el menor impacto a la producción [8].

Es frecuente que los encargados de operaciones le informen al grupo técnico que ocurrió una desviación acentuada en un motor, es decir que la temperatura de los gases de escape es superior por 2°C a su límite condensorio superior, que es 380°C, lo cual es suficiente para empezar el algoritmo de diagnóstico técnico propuesto anteriormente ya conocemos que el motor se encuentra en condición de fallo.

El primer paso es la recopilación de la información, se obtienen todos los parámetros técnicos y tecnológicos, el AMFE, entre otras fuentes [9]. El Análisis de Efectos (FMEA) es el proceso de revisar los elementos mantenibles de un activo físico para identificar posibles modos de falla, y sus causas y efectos [10].

En la Tabla 1 se muestran las relaciones existentes entre los modos de fallos con los efectos y los síntomas que genera, lo cual una vez conocido el tipo de fallo funcional, permite determinar sus causas y concebir las soluciones correctivas pertinentes.

Análisis concurrente

En el momento en que se desata un (defecto-fallo funcional-avería), la primera información que se brinda son sus efectos y síntomas las cuales están muy relacionadas con los modos de fallos y este es el primer paso en el análisis, donde sirve de apoyo la herramienta Análisis del Modo y Efecto de Fallas (AMFE). Luego se pasa al análisis del comportamiento de los parámetros de diagnóstico (técnicos-tecnológicos) y el indicador de presiones, teniendo ya todos los posibles modos de fallos que pueden generar el (defecto-fallo funcional-avería), lo cual permite que el análisis sea más eficaz (Ver Figura 2).

Tabla 1. El AMFE de la temperatura de los gases de escape superior a 380°C

SUBSISTEMA		EQUIPO	
Sistema de admisión y gases de escape		Motor Hyundai Himsen	
Función	Fallo Funcional	Modos de Fallo	Efectos
+ Dar entrada de aire limpio al motor con presión de 1,1 a 2,6 bar y temperatura de 35 a 55°C. + Dar salida sin restricción a todos los gases de escape dentro del rango de temperatura de 250 a 380°C. + Reducir el volumen de ruido del escape. + Evacuar el calor de las válvulas y otros dispositivos. + Silenciar la entrada de aire al motor.	3. Temperatura de los gases de escape superior a 380°C.	1. Temperatura del aire de carga superior a 55°C.	Mezcla incorrecta para la combustión Síntomas: Disminución de la carga Parámetros: Temperatura, Presión
		2. Canales de admisión sucios y/o obstruidos.	Se introduce más combustible que lo necesario para la combustión Síntomas: Aumento de la temperatura Parámetros: temperatura
		2. Inyector defectuoso.	Mala atomización del combustible Síntomas: incrementos de los sedimentos, aumento de la temperatura Parámetros: Temperatura
		4. Válvula de admisión y de escape dañadas.	Fugas de los gases de la combustión. Síntomas: Pérdida de hermeticidad Parámetros: Hermeticidad
		5. Cilindros sobrecargados	Golpeteo del motor Síntomas: aumento de la carga en los cilindros Parámetros: Presión
		6. Temperatura del agua a la entrada del motor superior a 78°C.	No tiene la capacidad para refrigerar las culatas correctamente. Síntomas: aumento de la temperatura Parámetros: Temperatura
		7. Presión del aire de carga inferior a 1 bar	Mezcla incorrecta para la combustión Síntomas: disminución de la carga Parámetros: Temperatura, Presión

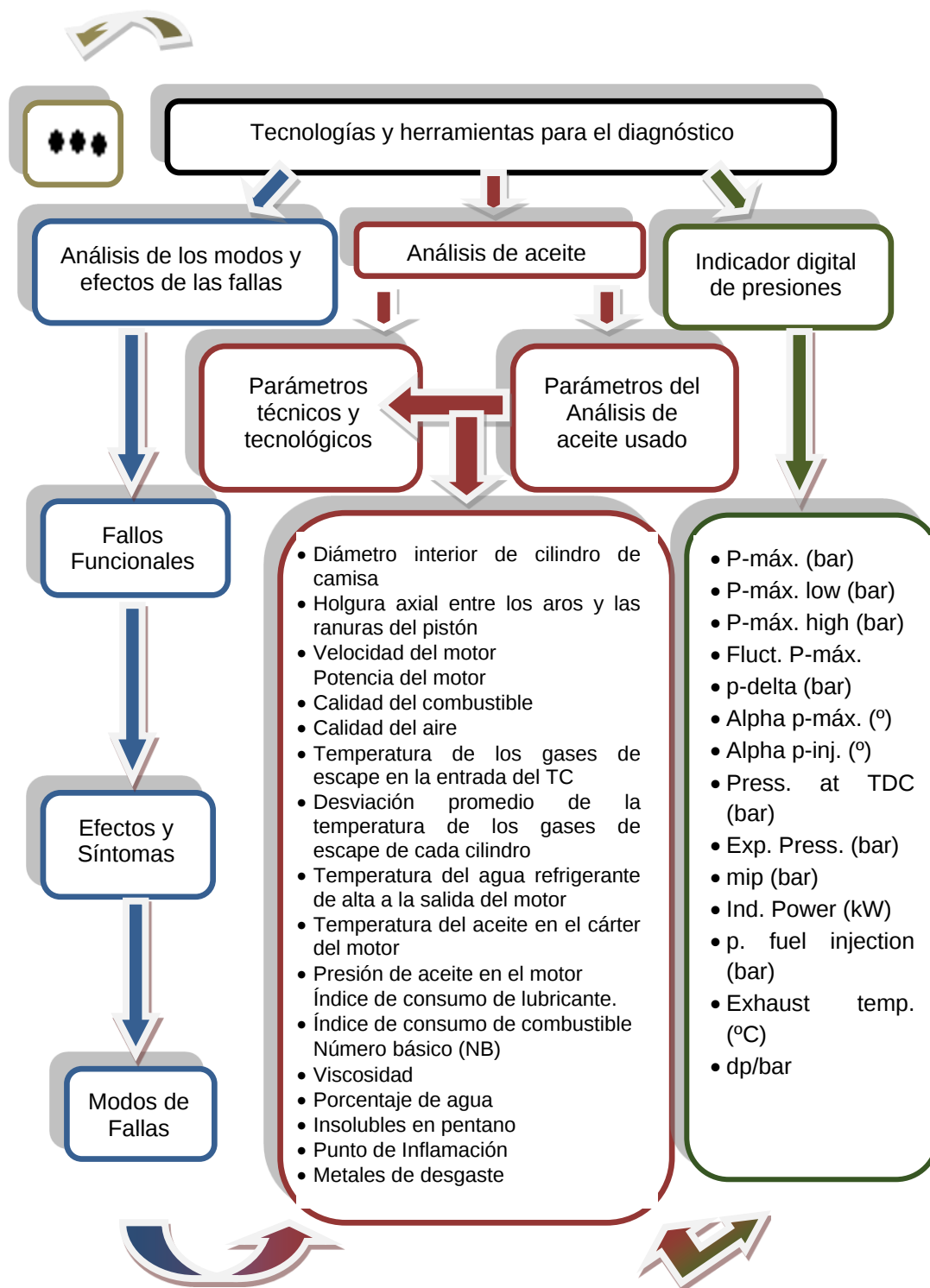


Fig.2 Secuencia del análisis concurrente

Evaluación del análisis del aceite usado

El análisis y monitoreo del aceite lubricante, brinda mayor confiabilidad acerca del estado real en el que se encuentra el motor, y previene fallas y paradas no planificadas [11]. Para poder evaluar motor Hyundai Himsen 9H25/33 en base al análisis de aceite, es necesario conocer cómo cambian los parámetros fisicoquímicos del combustible, tales como: viscosidad, densidad, poder calórico, porcentaje de carbón, asfaltenos, sedimentos, entre otros [12].

Para el análisis concurrente, se consideró la variación de los parámetros de diagnóstico, visualizados en gráficos de tendencia de viscosidad, BN, insolubles, porcentaje de agua y punto de inflamación, los cuales permiten establecer el dictamen mostrado en la Figura 3.

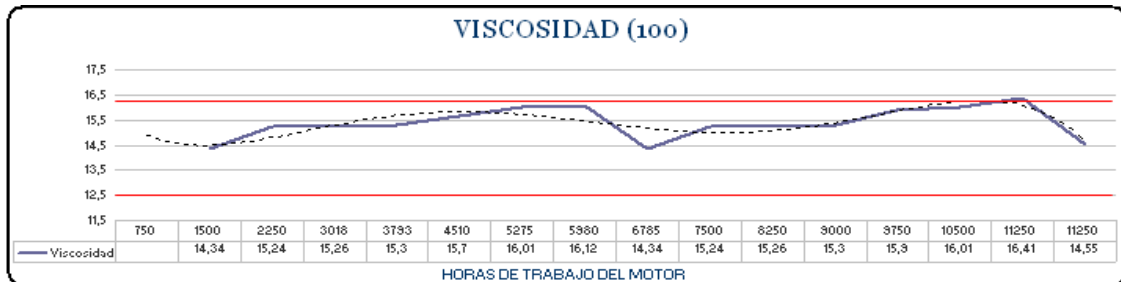


Fig.3 Análisis de tendencia de la viscosidad

En la Figura 3 se observa un aumento de la viscosidad rebasando ligeramente su límite condensorio superior. Esto puede ser provocado por el pase de combustible parcialmente combustionado hacia el cárter, lo que puede estar asociado a problemas funcionales del inyector o baja estanqueidad. Puede ser también debido puntos calientes en el sistema de lubricación, lo que se relaciona con la alta temperatura de las culatas que oxidan los hidrocarburos del lubricante.

El BN es una medida del potencial que tiene el aceite para neutralizar los ácidos que se forman dentro del motor. En la Figura 4 se evidencia una disminución anormal del BN, (del 40% de la alcalinidad), lo que está asociado a puntos calientes que oxidan el combustible. Este comportamiento se corresponde con el incremento de la viscosidad.

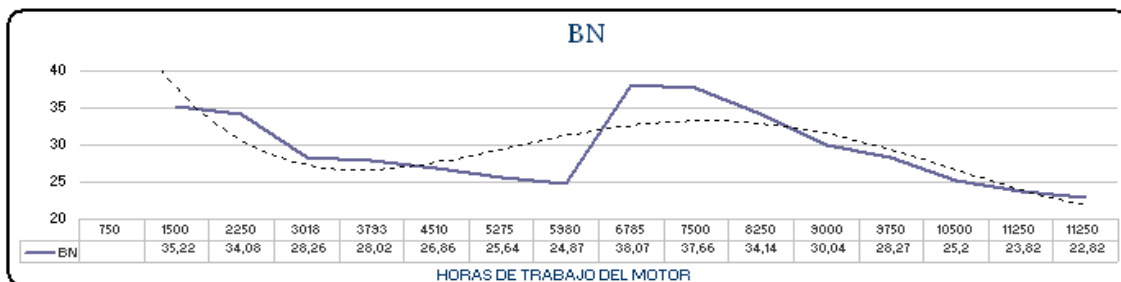


Fig.4 Análisis tendencia del BN

Se observa una disminución considerable del punto de inflamación (Figura 5), lo que puede estar asociado con la entrada de fracciones ligeras del combustible al cárter, lo que puede estar asociado con problemas en los inyectores y a baja estanqueidad en la cámara de combustión.

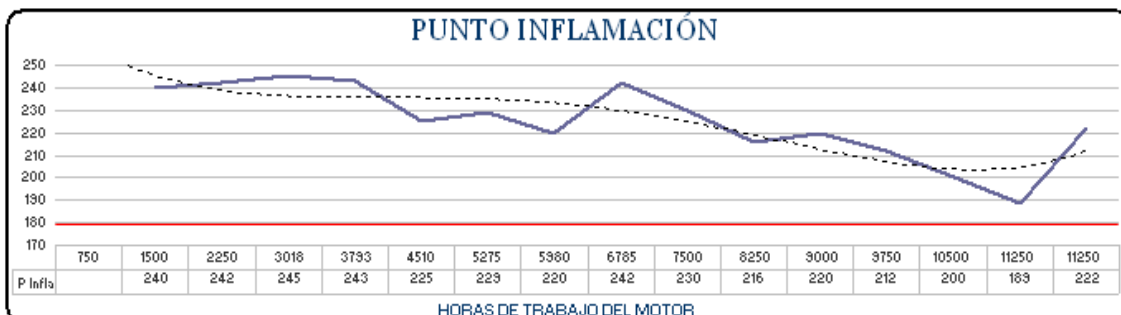


Fig.5 Análisis de tendencia del punto de inflamación

El análisis de la tendencia del porcentaje de agua en la Figura 6, muestra un comportamiento normal dentro de los límites condenatorios. Lo que descarta que exista: pase de agua hacia el cárter por las juntas, deficiente funcionamiento de la purificadora de aceite. El aumento de la viscosidad no está asociado a la contaminación con agua. Respecto a la tendencia de los insolubles (Figura 7), se observa un comportamiento normal dentro de los límites condenatorios, lo que descarta que exista un deficiente funcionamiento de la purificadora de aceite y que el filtro de aceite este sucio y/o obstruido.

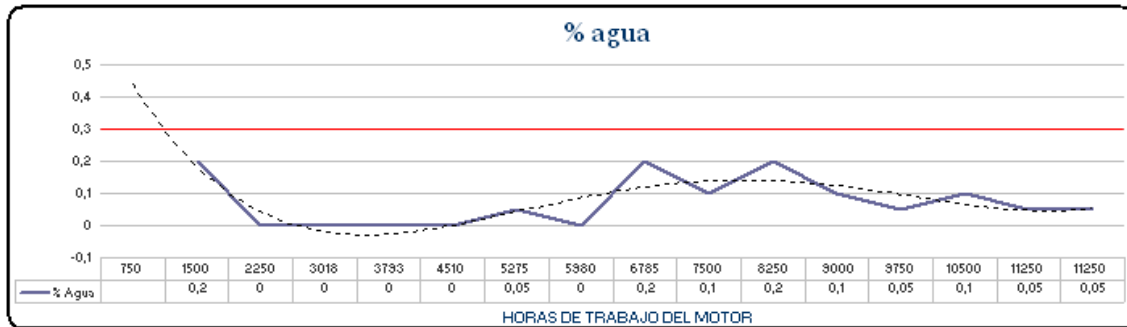


Fig.6 Análisis de tendencia del porcentaje de agua

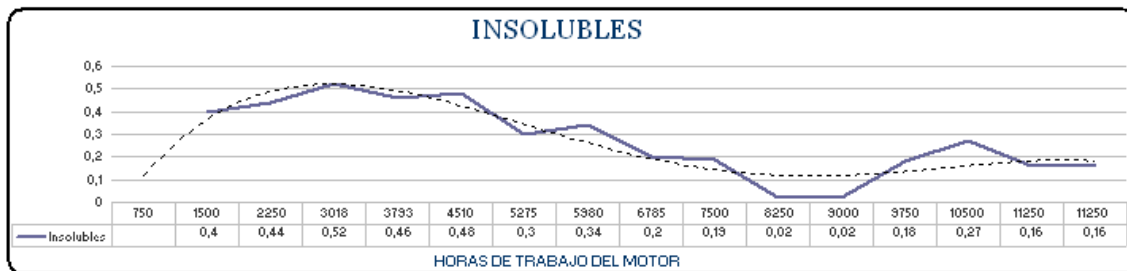


Fig.7 Análisis de tendencia de los insolubles

Evaluación de los parámetros tecnológicos

En la Figura 8 se observa que la temperatura se va incrementando en el tiempo, lo que indica que la causa también fue progresando en el tiempo. En cuanto a la temperatura del agua refrigerante (Figura 9), se observa un incremento, lo que puede estar asociado a las altas temperatura de las culatas.

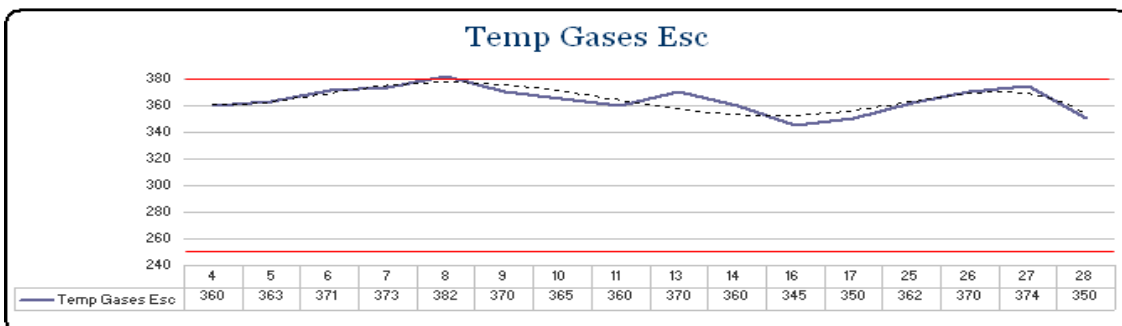


Fig.8 Análisis de tendencia de la temperatura de los gases de escape

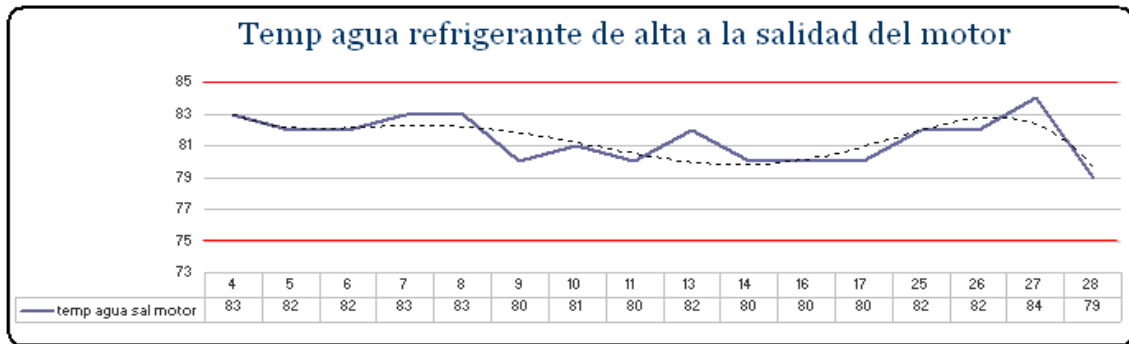


Fig.9 Tendencia de la temperatura del agua refrigerante de alta a la salida del motor

Evaluación del indicador de presiones

En la Figura 10 se observa que el valor de la presión máxima en el PMS es mayor que 5,50 lo que verifica que existe una correcta estanqueidad dentro de la cámara de combustión. Mientras más alto sea el valor, mejor es la estanqueidad.

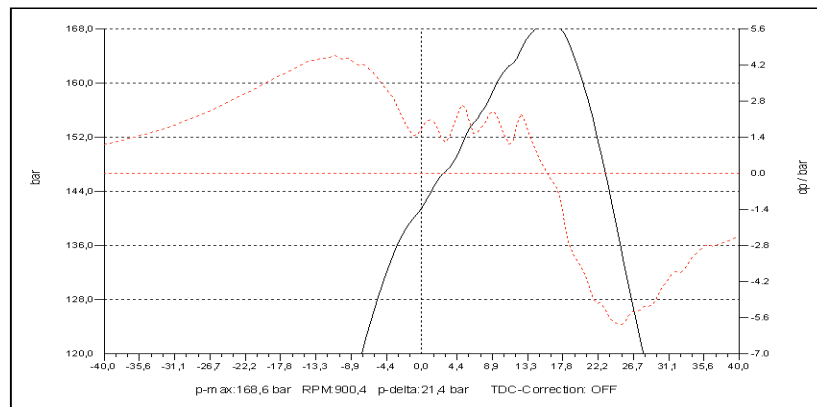


Fig.10 Diagrama Indicado

En el momento de la combustión, mientras más agrupado y menos picos se vea en el gráfico mejor es la combustión, lo que está asociado al correcto funcionamiento del inyector. En la Figura 11 se observa gran dispersión en el instante de la combustión.

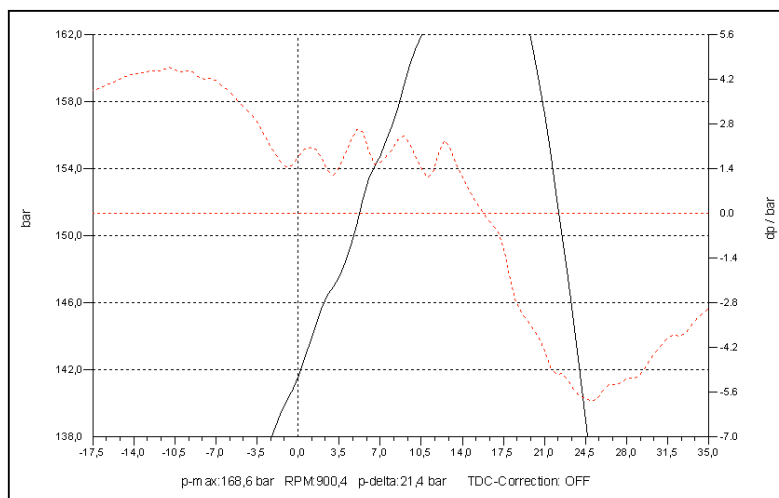


Fig.11 Diagrama Indicado 1

Corroborando lo dicho en el análisis anterior, en el diagrama de la Figura 12 se evidencia un defectuoso funcionamiento de los inyectores viendo las fluctuaciones por cilindros, las cuales no son homogéneas. Debido a los problemas concretos que existen en cuanto al almacenamiento de los datos, los registros históricos de los motores están incompletos y en específico el motor 15 no contiene dentro de su expediente los parámetros técnicos (diámetro interior de cilindro de camisa y holgura axial entre los aros y las ranuras del pistón) del mantenimiento anterior, lo que para este análisis no se puede tener en cuenta.

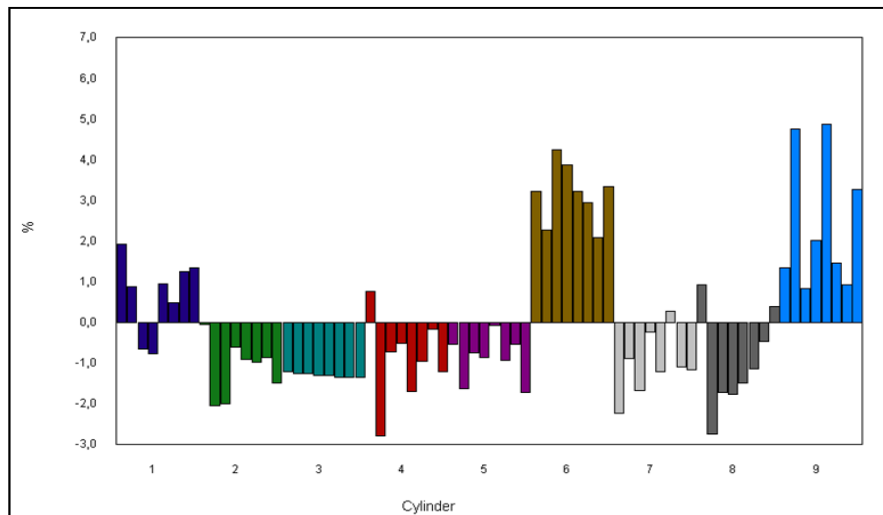


Fig.12 Fluctuaciones por cilindros

Se tuvo en cuenta en el análisis del estudio de criticidad de estos motores [13], que el sistema más crítico de la batería 4 es el de inyección de combustible y toma el mayor valor es para el motor 15 aunque muestra el mismo comportamiento con menor puntaje en los demás motores. Después de ver en el análisis del modo y efecto de fallas los siete posibles modos de fallos, se llega a la conclusión que el modo de falla de la temperatura superior a 380°C es el funcionamiento del inyector defectuoso, debido a que el inyector no atomiza el combustible correctamente dentro de la cámara de combustión, lo que provoca que la mezcla no sea la correcta y se generan deposiciones dentro de la cámara, que hace que el volumen de compresión disminuya (se modifica la relación de compresión). Es decir, entra el mismo aire de carga en un volumen menor, la compresión es mayor, se genera más potencia, pero a la vez se eleva la temperatura. El lubricante arrastra hacia el cárter el sedimento, que está en la pared del cilindro, razón por la cual se incrementó la viscosidad y más considerablemente el punto inflamación.

4. Conclusiones

Se implementó el algoritmo de diagnóstico técnico para determinar el estado técnico de los motores, mediante la integración de herramientas y tecnologías que permite la identificación de los modos de fallos de los defectos, fallas funcionales o averías. Se identificaron los parámetros técnicos y tecnológicos del motor y de ellos se concibe la manera de medirlos, registrarlos y compararlos con sus límites condenatorios. La aplicación del análisis de los modos y efectos de los fallos da a conocer cuáles son los modos de fallos de los sistemas de funcionamiento del motor Hyundai Himsen 9H25/33 que pueden desencadenar un fallo funcional y los efectos de los mismos. Lo cual permite identificar los síntomas que generan cada modo de falla para relacionarlos con los parámetros de diagnóstico del motor. Del análisis concurrente realizado se concluye que el modo de falla de la temperatura superior a 380°C, es el defectuoso funcionamiento del inyector, debido a que este componente no atomiza el combustible correctamente dentro de la cámara de combustión, lo que provoca que la mezcla no sea la correcta.

Referencias

1. Fernández, M.C., Fernández, M.F., Fuentes, D., Montiel, A.C., *Calidad de la energía y generación distribuida en Cuba*. Revista Cubana de Ingeniería, 2010. **1**(3): p. 41-50.
2. UNE, Manual de Gestión GDECU UNE. Parte 1, 2010. La Habana.
3. Ariosa, H.R., Muñoz, C.M., *Diagnóstico de motores diesel mediante la obtención de diagramas indicados digitalizados*, 2012. EMGEF.
4. Llanes-Cedeño, E., Guardia-Puebla, Y., *Detección de fallas en motores de combustión mediante indicadores de temperatura y presión de inyección*. Revista de ciencia y tecnología, 2019. **22**: p. 38-46.
5. Vásquez, E., *Mantenimiento centrado en la Realidad*, 2021. Amazon. ISBN 979-859-624-938-5.
6. Muñoz, C.M., *Estudio para la validación por método experimental del comportamiento de un aceite candidato en motores de tronco*. Tesis de Maestría, 2013. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana.
7. Ariosa, H.R., *Procedimiento para la realización del proceso de diagnóstico mecánico a los motores de las tecnologías Hyundai Himsen 9H25/33, MAN 18V 28/32 y 7L 28/32*, 2007. EMGEF.
8. Palomino, E., *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*. 5ta Ed., 2007. Editorial ISPJAE, La Habana. ISBN 959-261-043-6.
9. Cabrera, J.G., *Plataforma básica para un enfoque de mantenimiento centrado en la confiabilidad*, 2003. Editorial ISPJAE, La Habana.
10. David Tafur, H., Barbieri, G., Pereira, C., *An FMEA-base methodology for the development of control software reliable to hardware failures*. IFAC PapersOnLine, 2021. **54-1**: p. 420-425.
11. Saldivia, F., *Aplicación de mantenimiento predictivo. Caso Estudio: análisis de aceite usado en un motor de combustión interna*. Innovation in Engineering, Technology and Education for Competitiveness and Prosperity, 2013. Cancun, Mexico.
12. Fernández-Fernández, D., Mourdoch-Misa, F., *Aplicación de técnicas de lubricación predictiva*. Ingeniería Mecánica, 2009. **22**(12): p. 1-8.
13. Padura, Y.A., García, A.E., *Análisis de criticidad en los sistemas mecánicos de los grupos electrógenos*. Ingeniería Energética, 2017. **38**(3): p. 224-230.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no hay ningún conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Carlos Deus Aguilera. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1749-2139>

Adquisición de datos para la investigación. Procesamiento de datos. Concepción del manuscrito, revisión crítica de su contenido así como en la redacción y aprobación del manuscrito final.

Manuel Muñoz Cabrera

Análisis e interpretación de los datos. Búsqueda de información, diseño de la investigación y concepción del manuscrito. Análisis de los resultados.

Alejandra García Toll. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-5413>

Concepción del manuscrito, diseño de la investigación, análisis de los resultados y redacción del manuscrito.