

Metodología combinada del uso de MarPrime y Vibrotip para diagnóstico del motor HYUNDAI HIMSEN 9H25/33

Yovany Oropesa-Márquez
Nilo Cecilia-Simón

Universidad de Pinar del Río
Facultad de Ciencias Técnicas
Departamento de Mecánica Aplicada.
Martí 270, Pinar de Río, CP 20100
CUBA

Tel. 48779656
+5355026554

correos electrónicos (emails):
yovany.oropesa@upr.edu.cu
nilo@upr.edu.cu

Recibido 02-03-2017, aceptado 28-06-2017.

Resumen

En los motores de combustión interna (MCI) las vibraciones debidas al desbalance másico tienen dos fuentes reconocidas para el mecanismo reciprocante biela-manivela-corredera; una por los efectos de la inercia de las partes móviles y otra por la fluctuación en la presión de los gases en la cámara de combustión. El presente trabajo pretende mostrar una metodología para interpretar los resultados en la medición de la presión en los cilindros de un MCI traduciéndolos a un esquema de fluctuación compatible y comparable con el análisis de vibraciones realizado sobre el mismo equipo, con el objetivo de unificar ambos criterios e incrementar la confiabilidad del diagnóstico que se realiza con orientación al mantenimiento predictivo y explotación del motor. El equipo en cuestión es un motor HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 de nueve cilindros en línea, empleado en los grupos electrógenos de 25 MW para generación distribuida y perteneciente a la Empresa de Mantenimiento a Grupos Electrógenos de Fuel Oil (EMGEF) en Pinar del Río, Cuba. Las mediciones y gráficos sobre la presión de los gases se realizaron con ayuda de MarPrime, mientras el análisis de vibraciones se realizó con base en los datos obtenidos por Vibrotip. La valoración de la efectividad del método se basa en la comparación con lo establecido en las normas ISO

10816 y 10816-3, teniendo además en cuenta su impacto en la economía de la empresa y en la disponibilidad de equipos para la generación.

Palabras clave: metodología, vibraciones, diagnóstico técnico.

Abstract (Combined Methodology of MarPrime and Vibrotip for the Diagnosis of the HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 Engine)

Vibrations in reciprocating machines as internal combustion engines (ICE) arise due to periodic variation of the gas pressure in the combustion chamber, and inertia forces associated with the moving parts. In this paper, the authors intend to show a procedure to interpret the gas pressure measurement in the ICE cylinders and produce a graphical model consistent with vibration analysis developed on the same engine, in order to unify both criteria and improve the reliability of the diagnosis oriented to predictive maintenance of the engine. The equipment analyzed in this case is an ICE HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 of nine-in-line cylinders used in Engine Power Plant in Pinar del Rio, Cuba. The gas pressure measurements and graphics were developed by mean of MarPrime technology and vibration analysis was based on Vibrotip procedure. Validation of the method exposed is based on statements of ISO 10816 and 10816 - 3 and its effect on the Plant efficiency.

Index terms: methodology, vibrations, technical diagnosis.

1. Introducción

Las vibraciones son causadas por una fuerza de excitación, esta fuerza se puede aplicar externamente al objeto o puede tener su origen dentro del mismo objeto. La proporción de frecuencia y la magnitud de las vibraciones están completamente determinadas por las fuerzas de excitación, su dirección y frecuencia, por esta razón un análisis de vibración puede determinar las fuerzas de excitación que actúan sobre una máquina. Estas fuerzas dependen del estado de la máquina y el conocimiento de sus características e interacciones, permitiendo diagnosticar el estado técnico de la máquina [1].

En la actualidad el estudio y análisis de las vibraciones tiene vital importancia en la mayoría de las industrias, tanto extranjeras como cubanas, aunque prevalece la práctica de emplear esta técnica, solo cuando sensorialmente se recibe algún indicio de que la máquina está vibrando demasiado. Hace ya algunos años, se han incorporado tecnologías predictivas en la industria a pesar de lo aparentemente costosas que inicialmente resultan. Su mismo conocimiento y aplicación han contribuido a necesitarlas y fomentarlas. Actualmente, son cada vez más las organizaciones que deciden implementar sistemas de diagnóstico como fuente fundamental de información a su sistema de mantenimiento. Cada día son mayores los beneficios que recibe la economía empresarial cuando se interpretan correctamente las señales de vibraciones medidas con instrumentos modernos, que permiten detectar los defectos y mal funcionamientos de los equipos en etapas cada vez más incipientes, pero que consecuentemente exigen mayor preparación teórica y experiencia práctica [2].

Son muchos los estudios encontrados en la bibliografía consultada con respecto al comportamiento y señales de alarmas de los distintos sistemas vibracionales aplicados a máquinas rotatorias. El autor norteamericano Glen White en su libro *Introducción al análisis de vibraciones* aborda las principales teorías de las vibraciones y el análisis de las mismas aplicadas a la determinación y las características de operación de las máquinas y sus deficiencias, además propone el análisis de frecuencia como diagnóstico para las fallas en máquinas, basándose sobre todo en el análisis de las mediciones. También propone una serie de pasos lógicos para determinar el estado de una máquina basándose en un informe detallado de las formas de las vibraciones [1].

El doctor en ciencias técnicas Palomino Marín, profesor titular de Ingeniería de Vibraciones en el Instituto Politécnico de La Habana (CUJAE), en su libro *Elementos de medición y análisis de vibraciones rotatorias* incluye algunas consideraciones con relación a la clasificación y a las diferentes formas del mantenimiento que existen en el mundo industrial moderno basándose en aportes de prestigiosos autores norteamericanos relacionados con este campo. El estudio de su trabajo permitió conocer una descripción conceptual de los patrones temporales de algunos defectos ilustrados con poco más de 30 formas de ondas. Además, incluye una serie de consideraciones relacionadas con la operación de los colectores analizadores de vibraciones de última generación, haciendo una valoración de los tipos de promedios y de las ventanas de ponderación de estos instrumentos [3].

La ingeniera Cepero Aguilera, en su tesis presentada en opción al título académico de Máster en Ingeniería y Gerencia de Mantenimiento, presenta una primera aproximación al monitoreo de

las condiciones de los generadores HSR7719-8P de los Grupos Electrónicos HYUNDAI HIMSEN instalados en la Central Eléctrica "Habana 220" basándose en las vibraciones por bandas espectrales. Su estudio se basó en el registro de vibraciones en términos de velocidad de RMS (banda ancha) y Pico (banda estrecha), permitiendo la estimación de los umbrales preliminares de alarma a través del tratamiento estadístico de las amplitudes dominantes dentro de cada banda espectral. La novedad de su trabajo fue la obtención de cuatro bandas espectrales de alarma con distribución discreta como punto de partida para monitorear la condición de generadores despreciando los registros espectrales de generadores de aquellos componentes precedentes del motor de combustión interna [4].

Hoy en día es de gran importancia conocer el comportamiento y tendencia vibracional de máquinas reciprocantes por su gran utilidad en las industrias actuales, dicho tema es un mundo aun sin explorar totalmente, por su complejidad y poca documentación tanto teórica como práctica, puesto que aún no se han implementado técnicas o metodologías capaces de diagnosticar total y eficazmente dichas máquinas.

Los Grupos Electrónicos (GE) pertenecientes a la Central Eléctrica Fuel Oil Antonio Briones Montoto de Pinar del Río, compuestos por 12 motores constituyen la base fundamental de la generación distribuida en el municipio, sin embargo, su eficacia puede verse comprometida si no se aplican las tecnologías apropiadas para el mantenimiento de este tipo de máquinas, puesto que el monitoreo de estado repercute directamente sobre el mantenimiento predictivo. Son muchos los ejemplos que avalan los beneficios de la implementación de estos dos programas, en nuestro país la Empresa de Generación Grupos Electrónicos de Fuel Oil (EMGEF) es una Organización Empresarial para los Servicios Técnicos Especializados en mantenimiento a motores de combustión interna y sus accesorios, perteneciente al Ministerio de Energía y Minas, por lo que la entidad tiene la necesidad de desarrollar una metodología para el análisis de vibraciones en los motores HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 de Fuel Oil, que permita el diagnóstico, tendencia y comparación con mediciones realizadas por instrumentos u otros métodos.

2. Determinación de los valores RMS

Para realizar un modelo de IGDL es necesario conocer las características geométricas del motor proporcionadas por su catálogo [5], además de determinar una serie de valores dinámicos, pues en las máquinas de combustión interna se debe tener en cuenta las fuerzas en cada uno de los cilindros del motor, cuando sobre una superficie plana de área (A) se le aplica una fuerza normal (F) de manera uniforme, la presión (P) viene dada por la siguiente ecuación (1)

$$P = \frac{F}{A} \quad (1)$$

En (1) P representa los valores de presión medidos por Mar Prime [6], [7], en los pistones (bar) bajo condiciones de trabajo reales (véase Fig.1), A es el área del cilindro (0,050 m²) y F representa las fuerzas que actúan sobre el mecanismo biela y manivela (N).

Con la ayuda de la Fig. 1 se puede elaborar un gráfico de presión contra ángulo de giro del cigüeñal y tiempo que se demora en recorrer dicho ángulo; desfasado 40° cada cilindro (véase Fig. 2).

Si despejamos en la ecuación (1) la F y se realiza una sumatoria cada 40° se obtiene la Fig. 3.

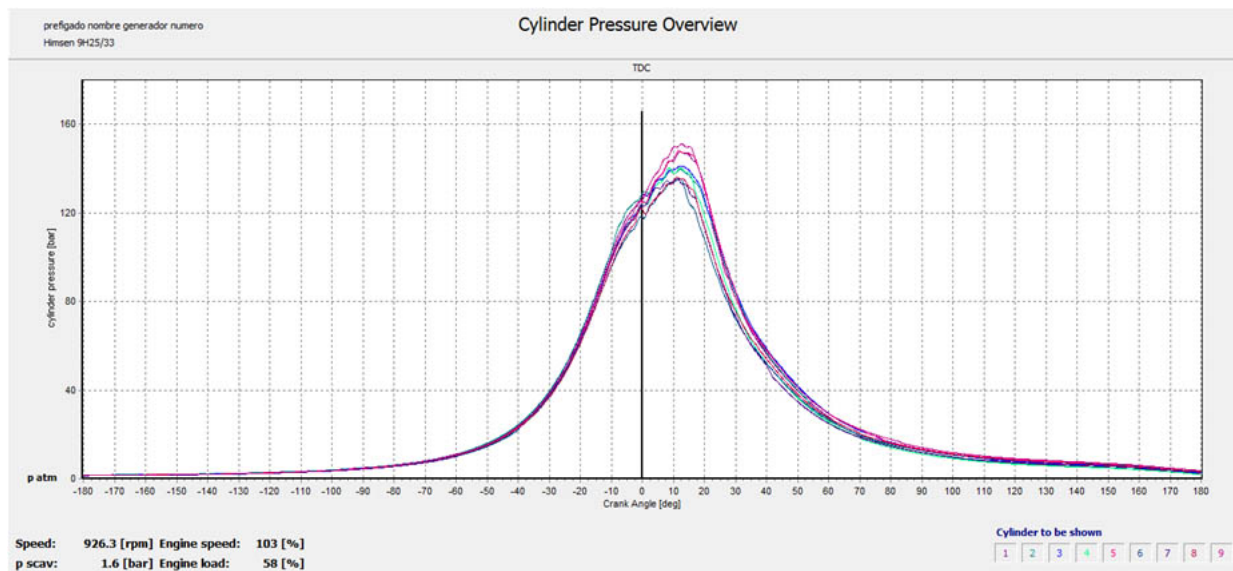


Fig. 1. Gráfico de presión vs. ángulo de giro del cigüeñal obtenido con el empleo del MarPrime.

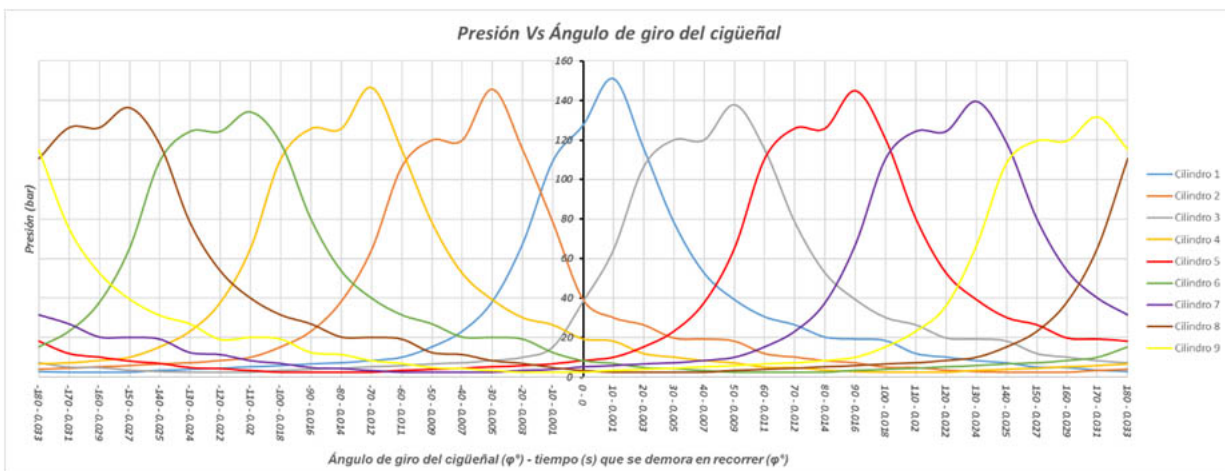


Fig. 2. Gráfico de presión en los cilindros contra ángulo de giro del cigüeñal desfasado 40°.

Si se realiza una sumatoria de las fuerzas en cada diez grados se puede obtener un gráfico (véase Fig. 4) el cual es de gran importancia para poder determinar los distintos parámetros que definen los valores de la fuerza excitadora interna del motor.

Con la interpretación de la Fig. 4 se puede determinar el periodo (T), amplitud (A), ángulo de desfase (θ) y la frecuencia (ω). Se puede apreciar que el periodo es de 0.0009 s por lo tanto la frecuencia de la fuerza excitadora puede ser de 111,11 Hz la cual convertida a rad/s es de 698,13.

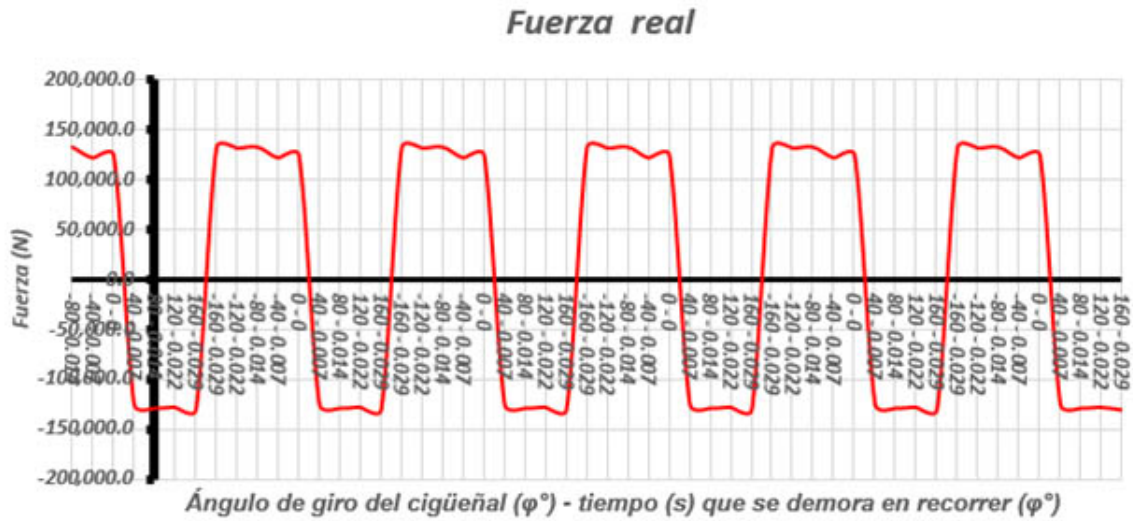


Fig. 3. Fuerza real vs. ángulo de giro del cigüeñal.

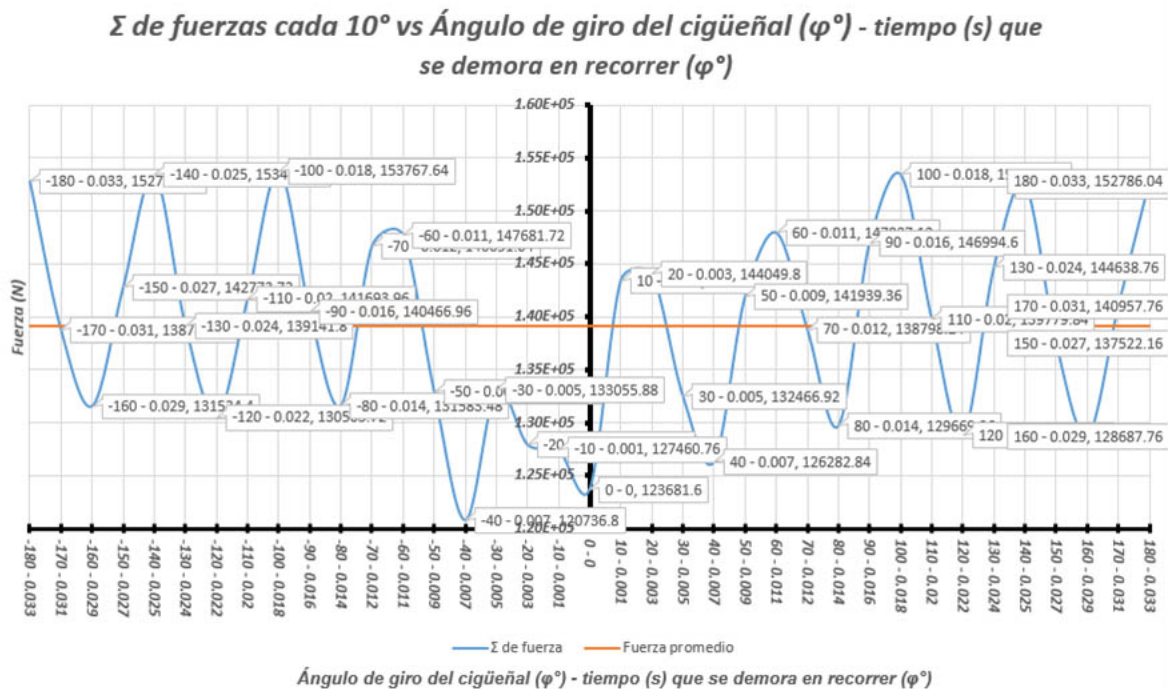


Fig. 4. Sumatoria de fuerzas cada 10° vs. fuerza promedio vs. ángulo de giro del cigüeñal-tiempo que se demora en recorrer (φ°).

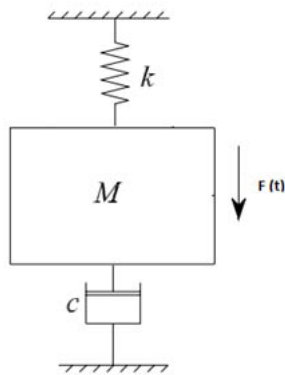


Fig. 5. Modelo concentrado de un grado de libertad con vibración forzada amortiguada del motor HYUNDAI HIMSEN 9H25/33.

Promediando los valores de máximos de amplitud (A) correspondientes a los valores de tiempo (s) de 0,018; 0,025; 0,033 se puede obtener un valor de fuerza de 152867,84 N por lo que la expresión $F(t) = F_0 \cos \omega t$ puede ser escrita de la siguiente forma $F(t) = 152\ 867,84 \cos(698,13 t)$ la cual describe un movimiento armónico [8], [9]. Modelando un sistema de 1GDL con vibración forzada amortiguada (véase Fig. 5).

Se conoce que la masa del motor es de 260 200 kg, que el desplazamiento inicial es de $x_0 = 0,015$ m según recomendaciones del fabricante de los calzos [10], la aceleración de $\dot{x}_0 = 0$ y la relación de amortiguamiento $\zeta = 0,1$ sistema subamortiguado o raíces complejas conjugadas puede determinar una serie de parámetros como se muestra en la tabla 1 los cuales permiten determinar la respuesta total del sistema.

La respuesta total del sistema se puede expresar en la siguiente ecuación:

Tabla 1. Parámetros principales.

ω_n	δ_{st}	ω_d	r
3,85 rad/s	0,393 m	2,31 rad/s	181

$$x(t) = 0,015e^{(-0,8 \times 3,85t)} \cos(2,31t - 5) + 1,20 \times 10^{-5} \cos(698,13t)$$

Si se evalúa el tiempo en la expresión que rige la respuesta total del sistema se puede confeccionar un gráfico (véase Fig. 6). El valor eficaz o RMS de la amplitud es representativo de la energía contenida en la vibración y corresponde a un valor medio de la amplitud.

Por lo tanto el valor amplitud máxima con relación a la posición de equilibrio (X_{pico}) es de 4,28 mm y el valor eficaz o RMS (mm) de la amplitud es 3,03 mm/s. El periodo de esta vibración es de 0,068 por lo que presenta una frecuencia de 14,71 Hz que es igual a 92,40 rad/s o 882,36 rpm.

3. Medición de las vibraciones

Las mediciones de las vibraciones tienen en cuenta una serie de instrucciones de trabajo para los motores HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 planteadas en el manual de procedimientos de la Empresa de Mantenimiento a Grupos Eléctricos de Fuel Oil [11] y las normas vigentes para los límites del nivel de vibraciones son ISO 10816-6 para motores diésel (véase Fig. 7).

El motor debe estar funcionando con una carga no inferior al 85 % y un tiempo de trabajo de una hora como mínimo. El período de esta vibración es de 0,068 por lo que presenta una frecuencia de 14,71 Hz que es igual a 92,40 rad/s o 882,36 rpm.

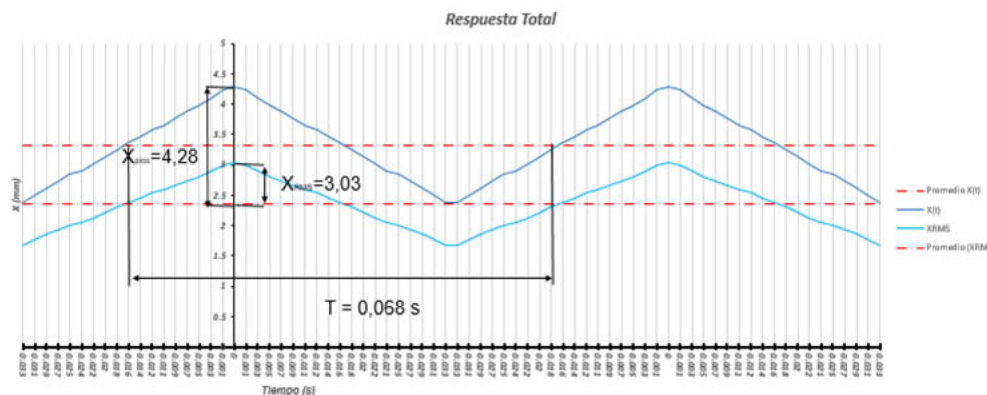


Fig.6. Parámetros fundamentales de las vibraciones en el motor HYUNDAI HIMSEN 9H25/33.

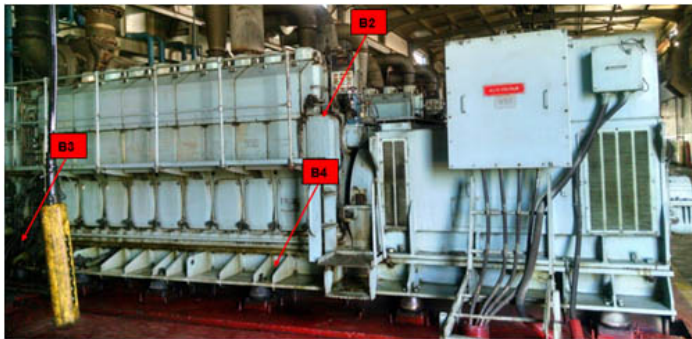


Fig. 7. Puntos de medición recomendados por el manual de instrucciones para motores de combustión interna.

Se realizaron dos mediciones, empleando un Vibrotip como se muestra en la Fig. 8, los puntos seleccionados se tomaron según las instrucciones [11].

3.1. Valoración de los resultados

La medición y análisis de vibraciones tiene como ventaja respecto a otras técnicas que la evaluación que se hace de la máquina no requiere detener o desarmar la máquina por lo que no produce incidencias en la producción.



Fig. 8. Medición de vibraciones empleando un Vibrotip.

El objetivo del análisis de vibraciones es interpretar correctamente la información que contiene la señal de vibraciones. En primer lugar, para determinar si los niveles registrados son admisibles para el tipo de máquina estudiada según las normas vigentes. En segundo lugar, para asociar componentes de esa vibración a los posibles defectos presentes en la máquina en diferentes etapas de su desarrollo.

Al comparar las frecuencias naturales del sistema con el espectro de amplitudes (g) en el dominio de la frecuencia medidas en la base del motor durante el funcionamiento del mismo (véase Fig. 10) se observa que los picos de amplitud tienen lugar a frecuencias de 900,9 y 1 209 rpm, es decir, bastante alejadas de las frecuencias naturales y por tanto de las zonas de resonancia. Esto es una señal de funcionamiento adecuado del motor, desde el punto de vista dinámico.

Por lo tanto, los cálculos realizados sirven como elemento de diagnóstico al compararlos con los obtenidos de las mediciones en condiciones reales y, de esta forma, utilizarlos para prever las fallas que pueden estar teniendo lugar antes de que ocurra una rotura imprevista o evitar mantener en funcionamiento el equipo cuando este se encuentra operando fuera de los parámetros adecuados.

Tabla 2. Medición número uno 11 de abril del 2017 11:30 AM realizada al motor número 11.

Punto de medición	Axial (X) RMS	Transversal (Y) RMS	Vertical (Z) RMS
B2 (extremo trasero superior)	3,8	3,03	3,40
B3 (extremo delantero, base de la estructura (blok))	3,6	3,60	3,03
B4 (extremo trasero, base de la estructura (blok))	3,4	3,10	3,40

Tabla 3. Medición número dos 12 de abril del 2017 11:00 AM.

Punto de medición	Axial (X) RMS	Transversal (Y) RMS	Vertical (Z) RMS
B2 (extremo trasero superior)	3,01	4,30	2,2
B3 (extremo delantero, base de la estructura (blok))	3,60	3,08	3,4
B4 (extremo trasero, base de la estructura (blok))	3,00	3,20	3,4

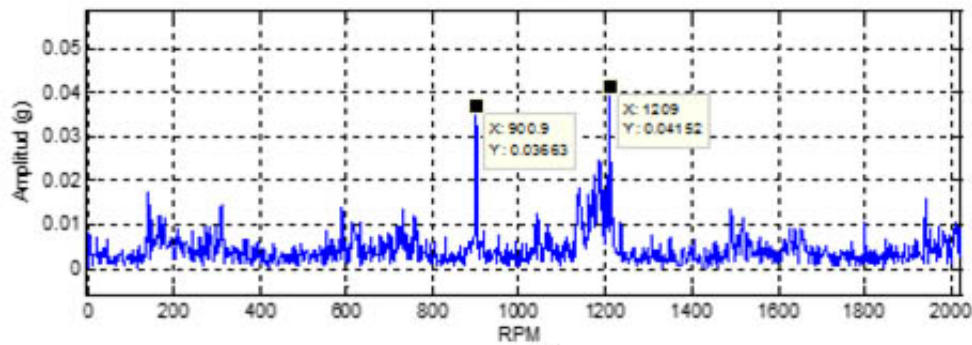


Fig.9. Espectro de amplitudes en el dominio de la frecuencia.

De esta forma pueden determinarse los desgastes en cojinetes y otros pares de fricción, así como desbalances en elementos rotatorios o reciprocantes, el funcionamiento errático del gobernador, el desajuste del mecanismo de regulación de las bombas de inyección (barra de cremalleras), así como el desbalance de las presiones máximas de combustión y la potencia entregada.

Si se realiza una comparación entre el valor de la amplitud máxima X_{pico} y el valor eficaz o RMS medidos por el Vibrotip y los determinados con el empleo del MarPrime se puede obtener la Fig.10, donde se puede apreciar que si se promedia todas estas mediciones existe una diferencia de 0,28 mm/s de los valores reales con respecto al instrumento de medición por lo que el método empleado tiene gran veracidad. Además, ambas mediciones indican que el motor está en óptimas condiciones pues se recomiendan valores por debajo de 28 mm/s según el manual de instrucciones para el mantenimiento.

3. Conclusiones

Para conocer el estado técnico de una máquina recíprocante es necesario apoyarse en varios criterios por la complejidad y veracidad a la hora de emitir un determinado criterio sobre el posible comportamiento o tendencia a seguir por máquina que se estudia.

Se ha determinado el $X_{pico} = 4,28$ mm, el de RMS = 3,03 mm/s y el periodo de esta vibración $T = 0,068$ s, de donde se puede calcular la frecuencia $\omega = 14,71$ Hz que es igual a 92,40 rad/s. Por lo antes planteado, para poder tener una mayor seguridad se emplean los nomogramas recomendadas por Palomino [2] para poder diagnosticar las vibraciones en este tipo de motores.

El motor tiene una velocidad de rotación de 900 rpm y una velocidad de 3,03 mm/s se puede apreciar que el motor vibra suavemente.

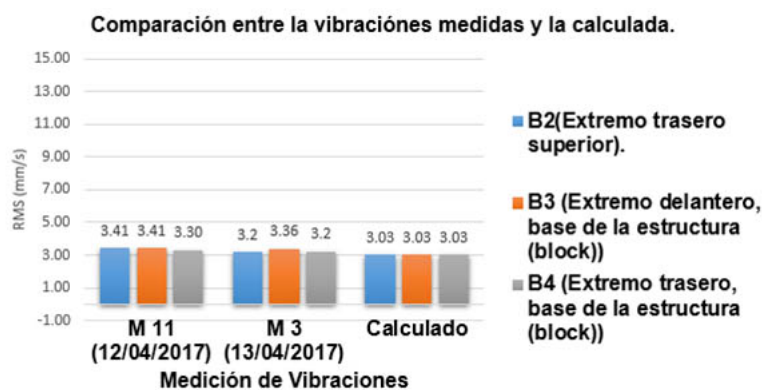


Fig.10. Comparación entre las mediciones reales de vibración y las obtenidas con el empleo del MarPrime.

En la Fig. 11 se pueden apreciar las máquinas en diferentes grupos, además de tener en cuenta los tipos de instalación.

Teniendo en cuenta que el motor tiene una potencia de 2610 kW y se encuentra en estado estacionario se puede apreciar que el motor HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 pertenece al grupo uno y como presenta un valor de 3,03 mm/s se encuentra en la zona amarilla por lo que puede funcionar en operación continua sin restricciones.

Por lo antes expuesto se propone la siguiente metodología para poder diagnosticar el estado técnico del motor HYUNDAI HIMSEN 9H25/33 o cualquier otra máquina reciprocante, la cual consta de siete pasos fundamentales.

1. Colección de información técnica del equipo a partir de la observación científica, el estudio de la documentación tecnológica, historial de explotación y entrevistas a operadores y especialistas de mantenimiento.
2. Establecimiento de características y propiedades del equipo como sistema vibratorio; elasticidad, inercia, amortiguamiento, frecuencia de excitación externa y posibles desplazamientos espaciales.

3. Creación de modelos de uno y de varios grados de libertad según geometría, inercia y dinámica de funcionamiento del sistema.
4. Medición de los valores dinámicos. En este paso se hace necesario la utilización de la instrumentación para medir directa o indirectamente la amplitud de la fuerza excitadora. En esta investigación el parámetro utilizado fue la presión en la cámara de combustión del motor, realizada con Mar Prime.
5. Procesamiento de los resultados, determinación de las características de la fuerza excitadora y aplicación al modelo de un GDL con vibración forzada amortiguada.
6. Comparación de los resultados con las normas y nomogramas de explotación de equipos bajo vibraciones mecánicas. Establecer conclusiones sobre la necesidad de intervención de mantenimiento.
7. En caso de existir la posibilidad, comparar los resultados teóricos con mediciones de vibraciones reales.

Referencias

- [1] G. White, *Introducción al análisis de vibraciones*, USA: Azima DLI, 2010. Consultado 5 febrero 2017.

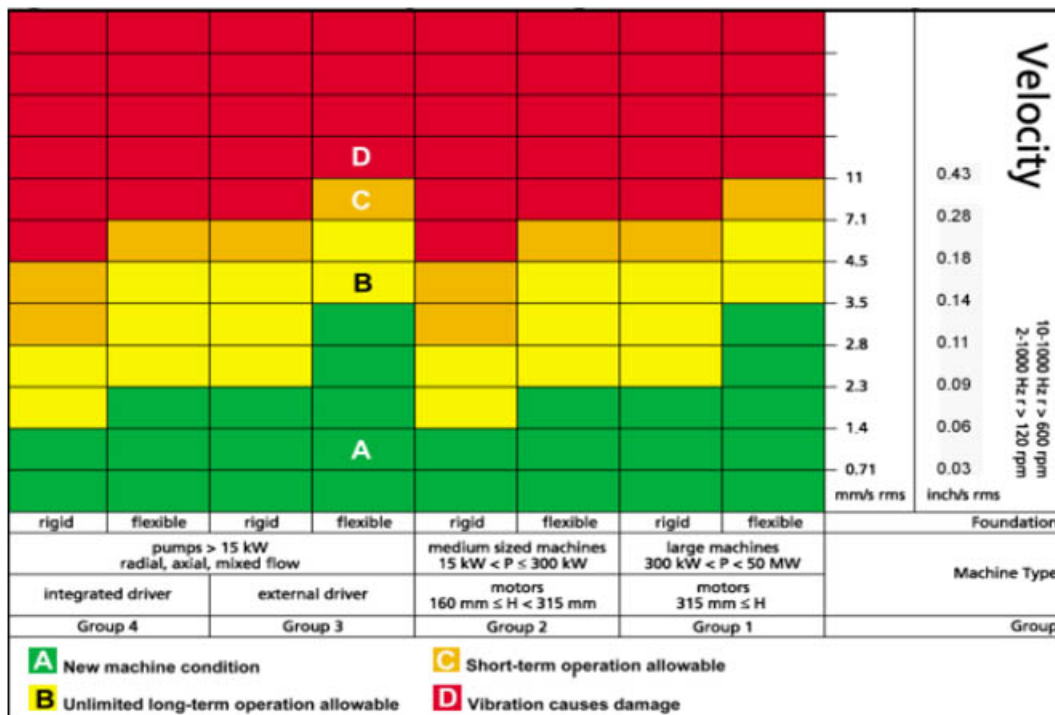


Fig. 11. Criterio de la severidad de las vibraciones acorde con la norma ISO 10816.

- [2] E. Palomino-Marín, *Monitorado y predicción. Actualidad industrial*, Habana, José Antonio Echeverría, 2003. Consultado 10 enero 2017.
- [3] E. Palomino-Marín, *Elementos de medición y análisis de vibraciones en máquinas rotatorias*, Bolivia: Latinas Editores, 2007. Consultado 20 marzo 2017.
- [4] Y. Cepero Aguilar, & E. Palomino-Marín, *Primera aproximación al monitoreo de condiciones en el análisis de vibraciones por bandas espectrales (Generadores HSR 7719-8P de los grupos electrógenos HYUNDAI HIMSEN instalados en la Central Eléctrica "Habana 220")*, Tesis de Maestría inédita. Centro de Estudio de Ingeniería y Mantenimiento (CUJAE), 2012. Consultado 11 abril 2017.
- [5] Hyundai Heavy Industries, *Engine & Machinery*, marzo 2010 [en línea]. Disponible en <http://engine.od.ua/ufiles/Himsen-H25-33V.pdf>. Consultado 27 enero 2017
- [6] Maridis, *Diagnosis & Service*, 2016 [en línea]. Disponible en: <http://www.maridis.de/en/>. Consultado 25 abril 2017.
- [7] Prüftechnik, 2014 [en línea]. Disponible en: <http://www.pruftechnik.com>. Consultado 2 enero 2017.
- [8] S. R. Singiresu, *Mechanical Vibrations vol. II*, Habana, Félix Varela, 2009.
- [9] S. R. Singiresu, *Mechanical Vibrations vol. II*, Habana: Félix Varela, 2009.
- [10] Rubber Design, *Vibration & Noise Control*, agosto 2012 [en línea]. Disponible en: <http://www.rubberdesign.nl>. Consultado 28 febrero 2017.
- [11] R. Ariona-Hernández, *Instrucción de trabajo para la medición del nivel de vibraciones en los motores de las tecnologías MAN y HYUNDAI*. Habana, pp. 2-9, 2016.