

Monitorado de condición en grupos electrógenos basado en análisis de vibraciones por bandas espectrales

Condition monitoring in engine generator sets based on vibration analysis by spectral bands

Evelio Palomino-Marín, Jesús Cabrera-Gómez, Yanexy Cepero-Aguilera

Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Centro de Estudios en Ingeniería de Mantenimiento. La Habana, Cuba

Correo electrónico: e.palomino@ceim.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: 12 de mayo de 2018 Aceptado: 25 de julio de 2018

Resumen

Se presentan los resultados del estudio cuyo objetivo fue conseguir una primera aproximación a la definición de parámetros para el monitorado de la condición de generadores del tipo HSR7719-8P de grupos electrógenos HYUNDAI HIMSEN instalados en un central eléctrica, basada en el análisis de vibraciones por bandas espectrales. Se efectuaron mediciones en los 24 grupos electrógenos instalados, registrándose las vibraciones en banda estrecha en términos de velocidad pico para puntos seleccionados en correspondencia con la norma ISO 8528-9. En los registros se discriminaron aquellas componentes procedentes del motor de combustión interna y se definieron

cuatro bandas espectrales de alarma con carácter discreto, como punto de partida para monitorar la condición de los generadores. Se estimaron los umbrales preliminares de alarma a través del tratamiento estadístico de las amplitudes dominantes dentro de cada banda espectral. Se concluyó que los generadores en los cuales se registraron las vibraciones, exhiben una condición normal.

Palabras claves: monitorado de condición, banda estrecha, alarma, vibraciones.

Abstract

Based on the vibration analysis by spectral alarm bands, it is shown a first approximation of condition monitoring for generators HSR7719-8P of HYUNDAI HIMSEN engine generator sets at real power plant. Measurements were made on 24 engine generator sets, recording narrow band peak vibrations at selected points according to ISO 8528-9. Registered frequency components from the engine were not taken into account and four discrete spectral alarm bands were defined, as a starting point to condition

monitoring of such generators. Preliminary alarm thresholds were estimated using statistical treatment of the dominant amplitudes within each spectral band. It was concluded that those generators in which the vibrations were recorded exhibit a normal condition.

Key words: condition monitoring, narrow band measurement, alarm, generator set.

Introducción

La generación distribuida, en el caso que ocupa a la presente investigación, se logra mediante los grupos electrógenos (GE), que son equipos electromecánicos compuestos por dos sistemas fundamentales: el sistema motriz, que es un motor de combustión interna (MCI) y el sistema conducido, que es precisamente el generador y que en el caso particular del presente artículo, es un generador de corriente alterna [1]. El motor de combustión interna pertenece a la marca HYUNDAI HIMSEN en conjunto con el generador trifásico que lo acompaña, trabajando el grupo electrógeno con combustible pesado mezcla *fuel-oil*; aunque para el encendido y apagado de los mismos se utiliza diesel.

A partir de las observaciones realizadas y de la información recopilada, se ha podido comprobar no se están aplicando tecnologías para el monitorado de la condición de grupos electrógenos basadas en la medición y análisis de vibraciones, además de que tampoco están definidas las particularidades de tal monitorado. Así mismo, la complejidad de los grupos electrógenos, dada por la operación conjunta de una máquina recíprocamente acoplada a una máquina rotatoria, dificulta el monitorado de la condición, de aquí que la influencia mutua motor-generador comprometa la concepción y aplicación del monitorado de la condición basado en la medición y el análisis de vibraciones [2, 3].

Según estudios previos realizados [4] el tipo y complejidad de estas máquinas requiere que el monitorado se realice a partir del establecimiento de niveles de alarma para un número apropiado de bandas espectrales, de modo que la delimitación del problema a resolver se realizó sobre la base del planteamiento de preguntas tales como: ¿cuántas bandas espectrales de alarma serán necesarias para monitorar la condición de los generadores? ¿qué características dimensionales describirán a cada una de las bandas espectrales de alarma

seleccionadas para el monitoreo de la condición? y ¿cómo identificar las componentes espectrales asociadas al motor de combustión interna y al generador?

La investigación fue desarrollada para dar respuesta a las preguntas planteadas, tuvo como objetivo general el de definir los parámetros necesarios para el monitoreo de la condición de los generadores de los grupos electrógenos HYUNDAI HIMSEN instalados en la central donde se llevó a cabo la investigación, basado en la medición y el análisis de vibraciones por bandas espectrales.

Las soluciones que dan respuesta al objetivo de la investigación se sustentan en la obtención y análisis de 1380 registros de vibraciones en banda estrecha, a través de los cuales se pudo identificar la presencia en los alternadores, de las vibraciones generadas por los motores de combustión interna.

Se definieron cuatro bandas espectrales de carácter discreto, lo cual constituye la principal novedad en los resultados de esta investigación, además de que la propia aplicación de la tecnología de bandas espectrales de alarma a este tipo de máquina también presupone novedad científica, pues no se tienen noticias que avalen tal práctica, al menos si de generación eléctrica con grupos electrógenos se trata.

Por otro lado, generalmente las bandas espectrales de alarma se aplican con la intención de efectuar pronósticos sobre el comportamiento mecánico de las máquinas a nivel de defecto [5]. Sin embargo, como resultado de esta investigación se está proponiendo la aplicación novedosa de las bandas espectrales en este tipo de máquina, con el interés de avisar sobre cambios en la condición de los generadores, propiciando la alerta oportuna que devendrá en otras investigaciones encaminadas a diagnosticar la causa de tales comportamientos anormales.

Métodos y Materiales

Los programas para el monitoreo de condición están concebidos para proporcionar información que pueda ser asimilada por el personal de operaciones y a su vez, que sirva de herramienta de trabajo para el personal de mantenimiento.

Monitoreo de la condición

El monitoreo de condición constituye una herramienta y a la vez un método primario, basado en mediciones y procedimientos de análisis, concebidos para avisar de manera oportuna, acerca de cambios significativos en el comportamiento de la maquinaria industrial. Este podrá estar soportado por mediciones continuas a través de instalaciones permanentes o por mediciones periódicas que tienen lugar con el empleo de instrumentos portátiles [6, 7].

Por otro lado, el diagnóstico –habitualmente asociado al monitoreo de estado– centra su atención en cambios más específicos y en los síntomas que permiten determinar las causas de estos, su severidad y por consiguiente, las acciones correctivas.

La utilización plena de las vibraciones como fuente de información para el monitoreo de condición exige de la medición de la amplitud, la frecuencia y la fase. Salvo algunas excepciones, la amplitud es el indicador primario de calidad de condición. Por su parte, frecuencia y fase constituyen parámetros síntomas para la identificación de defectos específicos, en elementos afectados y en algunos casos también puede indicar calidad de estado [8].

El éxito en el análisis y evaluación de la condición de la maquinaria industrial, depende en gran medida de la comprensión y del conocimiento que se tenga de la máquina en sí misma, de la relación que exista entre los cambios en su comportamiento y en sus signos vitales y por supuesto, de la habilidad para decidir qué, dónde y cómo medir, en función de la identificación de defectos específicos o de elementos defectuosos [9-11].

Para evaluar con mayor precisión un registro complejo, se dispone de dos métodos basados en el análisis espectral. Uno de ellos contempla la división del espectro en bandas y la cuantificación o bien de la energía en cada banda o bien del nivel dominante por banda. Sea uno u otro indicador, se obtendrá un valor por banda espectral que luego, a través del análisis de tendencias, deberá ser comparado con límites preestablecidos para cada banda. Es precisamente este método el empleado en esta investigación.

Monitoreo por bandas espectrales

Este tipo de monitoreo justamente se basa en la segmentación del espectro en bandas de frecuencia, de acuerdo a las características de la máquina, es decir, el inicio y fin de cada banda dependerá del tipo de máquina, su configuración, sus componentes y por supuesto, del conocimiento que se tenga de la máquina [5].

¿Cuántas bandas utilizar? No existen recomendaciones para ello. La respuesta es: tantas como requiera la máquina objeto de monitoreo.

Este método facilita enormemente la detección de cambios prematuros en componentes de baja amplitud y de baja energía, que no resulten suficientes para provocar cambios sensibles en el nivel total de las vibraciones [12]. Esta técnica no implica la definición de bandas espectrales invariables en cuanto a ancho, nivel, cantidad

y posición. Las bandas espectrales no tienen necesariamente que permanecer con la configuración inicial a medida que se vaya construyendo la historia de la máquina.

El uso de esta herramienta proporciona un punto de partida muy sólido para poder definir bandas espectrales efectivas antes de efectuar las mediciones iniciales de referencia, en el caso de no disponer de historia relativa a la máquina, tal y como lo es el caso que aborda el presente artículo.

Realización de los ejercicios experimentales

Para la realización de los ejercicios experimentales basados en el registro de las vibraciones del GE, se empleó el instrumento identificado como VIBROTEST 60, que reúne todos los requisitos de un colector analizador (Transformada Rápida de Fourier, en inglés Fast Fourier Transform, FFT), combinando las funciones más utilizadas en el campo del análisis de vibraciones, con un sistema operativo basado en secuencias intuitivas, complementadas por un registro y un procesamiento de alta velocidad [13]. El instrumento, de conjunto con el software VIBROEXPERT CM-400, fue utilizado en modo colector-analizador, cargándose en este tres rutas de medición. En cada GE se registraron las vibraciones en 15 puntos de medición ubicados según se muestra en la figura 1 y cumpliendo con lo establecido en la norma ISO 8528-9, la cual aborda la temática de los generadores de corriente alterna conducidos por motores de combustión interna y su parte 9, contempla lo relativo a la medición y evaluación de sus vibraciones mecánicas, todo lo cual equivale a un total de 345 registros espectrales.

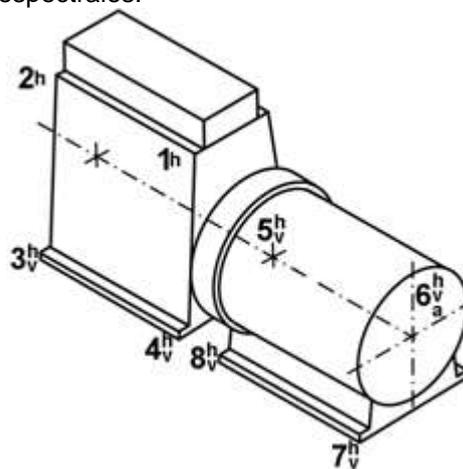


Fig. 1. Ubicación de los puntos de medición en el GE
(Fuente: ISO 8528-9)

Es importante señalar que a pesar de que esta investigación estuvo encaminada al monitorado de la condición del generador, también se realizaron mediciones en el MCI con el ánimo de discriminar en el generador, aquellas vibraciones que sean generadas por el MCI.

Para los registros de vibraciones se utilizó un acelerómetro piezoeléctrico con una sensibilidad de 100 mV/G's y una frecuencia de resonancia de 38 kHz.

Resultados y Discusión

Para la definición preliminar de las bandas espectrales de alarma, tanto en ancho (frecuencia) como en alto (umbral de alarma) y como consecuencia disponer de un punto de partida para la puesta en marcha del programa de monitorado de condición de los generadores de los grupos electrógenos HYUNDAI HIMSEN instalados en la central eléctrica caso de estudio, es preciso definir el ancho de la banda espectral en cuestión, en cuyo caso se debe establecer la frecuencia inicial y la frecuencia final para cada una de las bandas recomendadas. Así mismo, es imprescindible definir los umbrales de alarma por banda espectral, que sirvan de punto de partida para iniciar un análisis encaminado a confirmar o rechazar la ocurrencia de cambios en la condición de la máquina, en este caso, el generador del GE.

En referencia a la identificación y discriminación teórica de las frecuencias provenientes del MCI en los espectros del generador, es necesario tomar en cuenta que en un motor de combustión interna de cuatro tiempos, se generan vectores de primer y segundo órdenes asociados a la fuerza de inercia en la dirección de los cilindros, vectores de primer, segundo y tercer órdenes asociados al torque inercial sobre el cigüeñal y un subarmónico característico del momento torsor de potencia sobre el cigüeñal.

Desde luego, (también se analizó pero por problemas de espacio no se puede mostrar todo el análisis) que en el caso de múltiples cilindros, se generan componentes poliarmónicas y subarmónicas tanto para la fuerza como para el torque inercial, lo cual puede observarse en la figura 2:

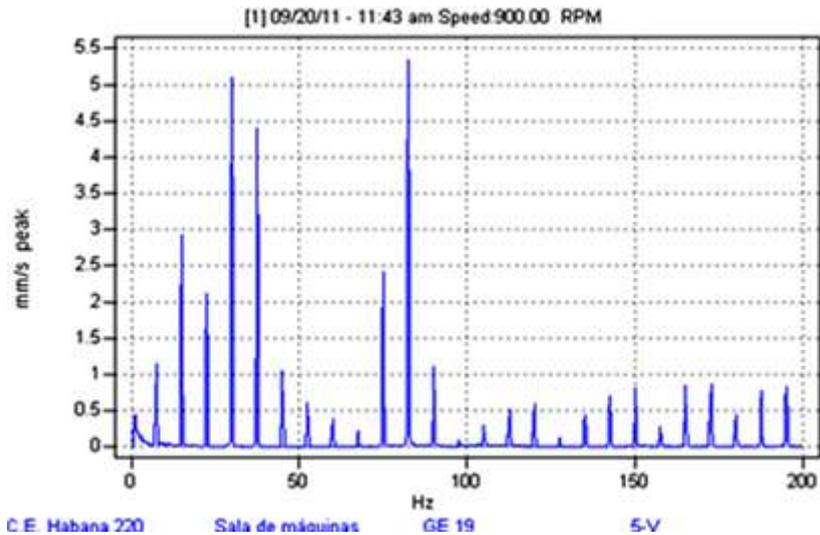


Fig. 2. Espectro de velocidad pico expresada en mm/s registrado en el generador del GE no.19, lado MCI, orientación vertical

Aunque este comportamiento es típico para todos los grupos electrógenos, a manera de ejemplo se muestra sólo uno del total de espectros obtenidos en el generador de cada uno de los GE. Obviamente, por cuestiones de espacio no es posible recoger en el presente artículo los 1380 espectros registrados.

En la figura 3, a modo de ejemplo, se observa el análisis realizado a todos los espectros, donde se aprecia que en el generador están dominando componentes de baja frecuencia, es decir, componentes asociadas al torque producido por el motor de cuatro tiempos, tomando en cuenta además que en la dirección vertical, típicamente se registran los mayores niveles de vibraciones por dos razones muy importantes. En primer lugar, porque se está en presencia de un motor de nueve cilindros en línea orientados verticalmente, lo cual hace que la ya conocida fuerza que está orientada en la propia dirección vertical, tenga una influencia directa en los niveles de vibraciones registrados en la orientación vertical. En segundo lugar y no menos importante, es necesario tomar en cuenta que todo el GE está montado sobre calzos antivibratorios, lo cual limita la transmisión de vibraciones hacia la base, pero favorece los niveles de vibraciones registrados en el motor y en el generador. De hecho, no pocas instituciones especializadas en análisis de vibraciones, recomiendan incrementar los límites en caso de que la máquina esté soportada por sistemas antivibratorios.

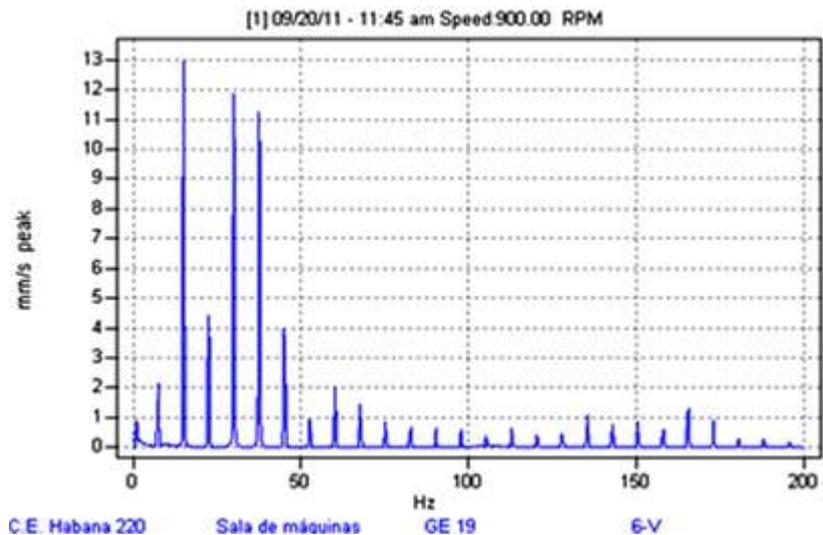


Fig.3. Espectro de velocidad pico expresada en mm/s registrado en el generador del GE no.19, lado libre, orientación vertical

Bandas espectrales de alarma para el generador

La banda espectral, como función discreta en el dominio de la frecuencia, se puede definir según la ecuación (1), lo cual se puede observar gráficamente en la figura 4

$$BE(f) = \begin{cases} AL & \text{para } f_1 \leq f \leq f_2 \\ 0 & \text{para } f < f_1 \text{ o } f > f_2 \end{cases} \quad (1)$$

Siendo:

BE(f): la función banda espectral de alarma.

AL: el nivel de alarma para una banda espectral.

f_1 : la frecuencia inferior de la banda espectral.

f_2 : la frecuencia superior de la banda espectral.

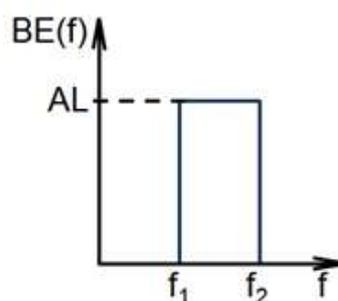


Fig. 4. Parámetros que describen la banda espectral de alarma

Nótese que AL representa el umbral de alarma de la banda espectral, el cual puede cumplir dos objetivos fundamentales, a saber:

- Reconocer cambios que pudieran ser sintomáticos de una condición anormal de la máquina, sobre la base de los cambios en los niveles de vibraciones, de aquellas componentes de frecuencia que estén contenidas en la banda en cuestión.
- Avisar sobre una condición de la máquina a partir de la cual resulta impredecible el comportamiento de esta debido a la evolución del defecto o de los defectos contemplados en la banda espectral afín.

Tomando en cuenta que la presente investigación presupone un carácter estrictamente preliminar, toda vez que no existe historia de cada uno de los 24 grupos electrógenos desde el mismo momento de su puesta en marcha y que las mediciones efectuadas hasta el momento no ofrecen evidencias de defectos en los alternadores, entonces se definieron niveles apropiados para reconocer cambios que pudieran ser sintomáticos de una condición anormal de la máquina, sobre la base de los cambios en los niveles de vibraciones, de aquellas componentes de frecuencia que estén contenidas en la banda en cuestión.

De acuerdo con la bibliografía consultada [6, 7, 9], el generador clasifica como una máquina con cojinetes de deslizamiento y sin álabes rotatorios, lo cual quiere decir que supuestamente responde a lo sugerido en la tabla 1.

Sin embargo, muchos espectros de los obtenidos en las mediciones denotan una presencia dominante de poliarmónicas que harían fracasar la aplicación al generador de lo recomendado en la tabla 1, pues como puede observarse, las seis bandas sugeridas son continuas, en cuyo caso estarían contemplando las poliarmónicas para efectuar la evaluación de la condición del generador y como ya se sabe, las poliarmónicas provienen del motor de combustión interna, generadas a partir del subarmónico característico del torque de potencia sobre el cigüeñal, de la fuerza motriz y del torque inercial.

Tabla 1. Bandas espectrales de alarma para máquinas con cojinetes de deslizamiento y sin álabes rotatorios

Banda no.	Frecuencia inferior	Frecuencia superior	Alarma espectral
1	1 % $f_{\text{máx}}$	0,8 x rpm	20 % alarma
2	0,8 x rpm	1,8 x rpm	90 % alarma
3	1,8 x rpm	2,8 x rpm	40 % alarma
4	2,8 x rpm	3,8 x rpm	30 % alarma
5	3,8 x rpm	10,2 x rpm	25 % alarma
6	10,2 x rpm	$f_{\text{máx}}$	20 % alarma

El generador, como máquina rotatoria al fin, es susceptible de estar desbalanceado, desalineado, de tener deformaciones permanentes por flexión en su eje central, de presentar solturas en todas sus variantes y de exhibir defectos propios de un generador. Por tal motivo, no es difícil encontrar en un generador, vibraciones con componentes a frecuencia fundamental, en este caso la velocidad sincrónica expresada en Hertz o en ciclos por minuto y sus armónicos de orden superior [11, 12].

Un generador es susceptible de presentar defectos tales como:

- a) Excentricidad del estator.
- b) Excentricidad del rotor.
- c) Deformaciones térmicas.

Por tal motivo, las bandas espectrales de alarma fueron definidas de manera preliminar para monitorar la condición del generador atendiendo a los siguientes defectos potenciales:

- a) Desbalance.
- b) Desalineamiento.
- c) Deformación permanente del eje del rotor.
- d) Solturas mecánicas.
- e) Excentricidad en el estator.
- f) Soltura en las barras del estator.

De manera que fue necesario definir cuatro bandas espectrales de alarma, las cuales satisfacen el aviso oportuno para iniciar el análisis con vista a reconocer cambios en la condición del alternador en función de los defectos potenciales.

Anchos de banda

Con la intención de lograr la mayor selectividad posible sin que esto implique que la fluctuación en la velocidad de la máquina pueda comprometer la efectividad de la banda, se tomó un ancho de banda de 8 Hz, atendiendo a que la frecuencia fundamental es de 15 Hz y que el motor de combustión interna genera un momento torsor de potencia que se traduce en una vibración subarmónica a 7,5 Hz. Esto implica que los límites superior e inferior de cada banda se ubiquen en la zona central entre dos componentes armónicas y no incluyan interarmónicos [5]. De esta forma, las bandas espectrales quedarán configuradas según se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Bandas espectrales (ancho de banda)

Banda no.	Frecuencia inferior [hz]	Frecuencia superior [hz]	Defecto potencial
1	11	19	Desbalance de masa, soldadura mecánica
2	26	34	Deformación permanente, desalineamiento
3	41	49	Desalineamiento
4	116	124	Excentricidad, soldaduras en barras

Alarmas

Para la definición de los umbrales de alarma por banda espectral se aplicó el criterio representado por la ecuación (2).

$$AL = \bar{V} + 2\sigma \tag{2}$$

Siendo:

AL: El umbral de alarma para una banda en cuestión.

\bar{V} : Valor promedio.

σ : Desviación estándar

Para estimar el umbral de alarma para cada banda, fue necesario extraer de los registros espectrales correspondientes a los alternadores, cada una de las amplitudes dominantes por cada banda espectral. Luego, calcular el valor promedio y la desviación estándar para cada banda y finalmente aplicar –también para cada banda– la ecuación (2) para estimar el umbral de alarma con que se debe iniciar el programa de monitoreo de la condición de los alternadores, a nivel de defecto y a través de sus vibraciones.

Es imprescindible aclarar, que el estimado del umbral de alarma por banda espectral según la Ecuación 2, sólo es posible efectuarlo si el comportamiento de las amplitudes dominantes registradas en cada banda espectral en cuestión responde a una distribución normal [14, 15].

Por ello, fue necesario analizar estadísticamente las amplitudes dominantes por banda espectral, aplicando el test de bondad de ajuste para una distribución normal. Esto se efectuó con el software de análisis STATGRAPHICS Plus, versión 5.1 en su edición profesional para Windows.

A manera de ejemplo, en la figura 5 se presenta el resultado gráfico del test de bondad de ajuste para una distribución normal, efectuado sobre las amplitudes dominantes correspondientes a la banda no.1 del lado libre del alternador, orientación vertical, evidenciándose la distribución normal.

Trazas de Densidad para Amp. [mm/s], Banda 1, Pto. 6V

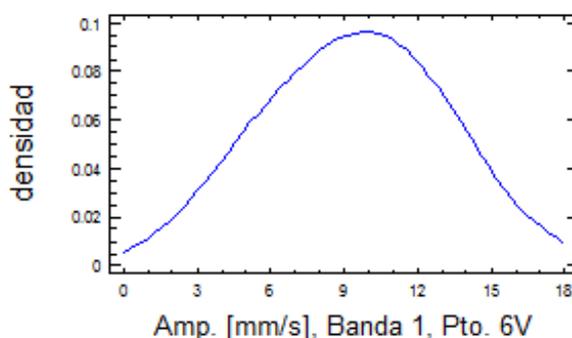


Fig. 5. Resultados gráficos del test de bondad de ajuste de una distribución normal efectuado para la Banda no.1 del lado libre del alternador, orientación vertical

A continuación, en la tabla 3 se muestran los umbrales de alarma expresados en mm/s por cada banda espectral y para cada punto de medición.

Tabla 3. Umbrales de alarma por banda espectral y por punto de medición

Punto	Umbral de alarma por banda espectral [mm/s]											
	Banda 1			Banda 2			Banda 3			Banda 4		
	\bar{V}	σ	AL_1	\bar{V}	σ	AL_2	\bar{V}	σ	AL_3	\bar{V}	σ	AL_4
5H	2,65	1,39	5,43	1,22	0,54	2,30	1,34	0,49	2,32	0,44	0,21	0,86
5V	3,64	2,10	7,84	3,14	1,55	6,24	1,34	0,32	1,98	0,46	0,22	0,90
6A	3,82	1,76	7,34	4,38	2,45	9,28	1,02	0,41	1,84			
6H	5,11	2,43	9,97	1,50	0,61	2,72	0,75	0,56	1,87	0,50	0,33	1,16
6V	9,43	3,45	16,33	12,21	1,86	15,93	4,57	1,33	7,23	0,61	0,28	1,17

La influencia en el alternador, de las vibraciones generadas por el motor de combustión interna y su identificación experimental, propició la definición de bandas espectrales discretas con iguales anchos de banda, lo cual garantiza que no exista interferencia de otras componentes no asociadas al alternador.

La característica poliarmónica de los espectros de vibraciones registrados en el alternador, condujeron al empleo de la técnica de detección absoluta, para la evaluación de la condición de este a nivel de defecto.

Los generadores en los cuales se registraron las vibraciones, exhiben una condición NORMAL de acuerdo con el criterio evaluativo sugerido por la norma ISO 8528-9.

Conclusiones

El diseño constructivo del alternador como máquina, condicionó el empleo de cuatro bandas espectrales de alarma, como punto de partida para reconocer cambios en la condición del alternador, provocados por desbalance y solturas mecánicas (banda no.1), desalineamiento y deformación permanente por flexión del eje del generador (banda no.2), desalineamiento (banda no.3) y excentricidades en estator – rotor y soltura de las barras del estator (banda no.4).

Con la definición de un ancho de banda de 8 Hz para cada banda espectral, se logra una selectividad tal que se garantice el aislamiento de las componentes asociadas a las vibraciones en el alternador, sin comprometer la efectividad de la banda ante fluctuaciones en la velocidad de rotación de los motores de combustión interna.

Referencias

1. Hourné MB, Brito ML, Castillo A, et al. Análisis de criticidad de grupos electrógenos de la tecnología fuel oil en Cuba. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*. 2012;21(3):55-61.
2. William Olarte C, Marcela Botero A. Técnicas de mantenimiento predictivo utilizadas en la industria. *Scientia et Technica*. 2010;2(45):223-26.
3. Yaguo Lei, Jing Lin, Ming J, et al. Condition monitoring and fault diagnosis of planetary gearboxes: A review. *Measurement*. 2016;48:292-305.
4. Vikas S, Anand P. A review of gear fault diagnosis using various condition indicators. In: 12th International Conference on Vibration Problems; Unit Kingdom; 2016. [Citado 12 de diciembre de 2017] Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/81978928.pdf>
5. Flores R, Asiain TI. Diagnóstico de Fallas en Máquinas Eléctricas Rotatorias Utilizando la Técnica de Espectros de Frecuencia de Bandas Laterales. *Información Tecnológica*. 2011;22(4):73-84.
6. San Martín C, Estupiñán E, San Martín D. A methodology for the detection and diagnostic of localized faults in gears and rolling bearing systems. *Ingeniare*. 2010;18(1):44-52.
7. Liu X, Li J, Al-Khalifa K, et al. A framework for condition-based maintenance scheduling. *Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium*. 2012;(1):1-3.
8. Hernandez Montero FE, Ruiz Barrios MI, Palomino Marin E. Application of Lock-In Amplifier on gear diagnosis. *Measurement*. 2017;107:120-7.
9. Antoni J, Randall RB. Differential diagnosis of gear and bearing faults. *ASME Journal of Sound and Vibration*. 2002;124:165-71.
10. Ibrahim RA. Recent advances in nonlinear passive vibration isolators. *Journal of Sound and Vibration*. 2008; 314(3-5):371-452.
11. Ha JM. Autocorrelation-based time synchronous averaging for condition monitoring of planetary gearboxes in wind turbines. *Mech. Syst. Signal Process*. 2016;(70-71):161-75.
12. Verucchi CJ, Acosta G. Técnicas de Detección y Diagnóstico de Fallos en Máquinas Eléctricas de Inducción. *IEEE Latin America Transactions*. 2007;5(1):250-60.
13. Thomson WT, Fenger M. Current signature analysis to detect induction motor faults. *IEEE Industry Applications Magazine*. 2001;4:26-34.
14. Borthakur T, Gogoi B. A Study on Some Tests of Goodness of Fit For Exponentiality *Journal in Science, Engineering and Technology*. 2016;3(3):145-155.
15. Benítez Montalvo RI, Díaz Concepción A. Cálculo de la mantenibilidad usando la distribución gamma. *Ingeniería Mecánica*. 2018;21(1):52-58.