

Monitoreo de condición de las cabezas de bobina de un alternador de 760 MVA mediante el análisis de vibraciones de la carcaza.

Matías Marticorena, Oscar García Peyrano

Laboratorio de Vibraciones y Mecatrónica - Centro Atómico Bariloche - Comisión Nacional de Energía Atómica.

Av. Bustillo 9500, (8400) Bariloche, Argentina. e-mail: garciapeyrano@yahoo.com.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se presenta un método que permite realizar el monitoreo de la condición de las cabezas de bobina de un alternador de 760 MVA, mediante el análisis de las señales de vibraciones medidas sobre la carcaza. Se ha estudiado la respuesta dinámica de una cabeza de bobina mediante simulaciones por el método de elementos finitos y ensayos experimentales, hallando múltiples frecuencias naturales en el rango 400 Hz – 4000 Hz. Se ha caracterizado experimentalmente la función transferencia entre las cabezas de bobina y la carcaza. La simulación de la vibración forzada permite identificar las zonas de la cabeza de bobina donde se inducen las mayores tensiones alternativas, indicando puntos de posible inicio de fallas por fatiga. En base a esto se simulan diferentes condiciones de falla y para cada una, se caracteriza la nueva respuesta dinámica de la pieza.

Se han recogido y analizado mediciones de vibración durante un período de dos años, lo que permite caracterizar los niveles de vibración normales para diferentes condiciones de funcionamiento. En base a estos datos de funcionamiento y las simulaciones antes mencionadas, se ha desarrollado un software que permite analizar en detalle y con bastante exactitud las funciones de densidad espectral de potencia para correlacionar el origen y la intensidad de los valores pico de esta función con el estado de los componentes de la máquina antes mencionados. De esta manera el seguimiento de determinado valor de la función espectral promediada permite, por comparación, detectar cambios mecánicos importantes en los componentes del alternador.

Palabras Claves: Vibraciones, alternador, cabeza de bobina, monitoreo de la condición.

1. INTRODUCCIÓN

Los turbogeneradores usados en las centrales térmicas y nucleoelectricas son máquinas eléctricas de gran potencia cuyas piezas se encuentran sometidas a importantes sollicitaciones eléctricas, mecánicas y térmicas. Por esta razón existe aún un enorme potencial para realizar mejoras sobre estas piezas, para las cuales es necesario realizar cálculos tridimensionales.

Existen varios trabajos que analizan las frecuencias naturales y modos normales de la estructura de cabezas de bobina (incluyendo barras de interconexión, estructura de soporte y cabezas de bobina), así como la vibración forzada de esta estructura bajo condiciones normales y de falla [1-4]. Ninguno de estos trabajos considera la cabeza de bobina en detalle, a pesar de ser esta una pieza altamente sollicitada que sufre fallas periódicas.

En los turboalternadores sincrónicos utilizados en las centrales térmicas y nucleoelectricas normalmente se presentan dos fenómenos típicos durante el funcionamiento que para controlarlos es necesario efectuar tareas de mantenimiento en la máquina. Dichos fenómenos son el aflojamiento del acunado estático y roturas por fatiga de algunos componentes de las cabezas de bobina. Ambos fenómenos están directamente relacionados con las vibraciones forzadas de las barras estáticas y de las cabezas de bobina. En el caso de los bobinados estáticos refrigerados por agua, estos desperfectos pueden llevar a una pérdida del agua de refrigeración, ocasionando un cortocircuito y una salida de servicio no planificada de la máquina. En la Argentina tenemos varias centrales nucleares y algunas de gran porte, por lo que NASA ha considerado llevar adelante este estudio, mediante un contrato de investigación con la CNEA, con el objetivo de mejorar la producción eléctrica.

1.1 Antecedentes y objetivos.

El Laboratorio de Vibraciones y Mecatrónica del Centro Atómico Bariloche – Comisión Nacional de Energía Atómica, ha desarrollado en los últimos 10 años aplicaciones industriales relacionadas con la tecnología del análisis de vibraciones, destacándose en el campo de la generación nucleoelectrica [5], aeroespacial y automotriz [6, 7]. Se posee experiencia específica en el análisis modal de las cabezas de bobina, utilizando tanto métodos experimentales [8] como estudios mediante el método de los elementos finitos [9].

El objetivo de este trabajo es la definición de un método que permita realizar el monitoreo de la condición de las cabezas de bobina de un alternador mediante la medición de las vibraciones en la carcasa, durante la operación normal de la máquina. Este método se basa en el análisis y seguimiento de la función espectral de potencia densidad, específicamente de las bandas espectrales correspondientes a los componentes de las cabezas de bobina (tanto en estado normal como en condición de falla).

1.2 Descripción de la máquina estudiada.

Una parte crítica desde el punto de vista estructural en los grandes alternadores es la zona de cabezas de bobina, donde mediante las barras de interconexión se conectan las barras estáticas de las diferentes fases. Esta estructura de cabezas de bobina, compuesta por las barras de interconexión y las cabezas de bobina propiamente dichas, se encuentra montada en voladizo, sostenida por una estructura de soporte. En la Figura 1 (izquierda) se muestra un esquema típico de la estructura de cabezas de bobina, donde se indica el paquete estático, las barras estáticas, las barras de interconexión, la estructura de soporte y las cabezas de bobina propiamente dichas, formadas por las chapas y las cajas de entrada de agua refrigerante. En la Figura 1 (derecha) se muestra una fotografía obtenida durante una parada de mantenimiento de la máquina, donde se observan las cabezas de bobina y las barras de interconexión (recubiertas por su aislación eléctrica). También se observan los tubos de entrada de agua refrigerante (de color negro), que no están dibujados en el esquema de la izquierda.

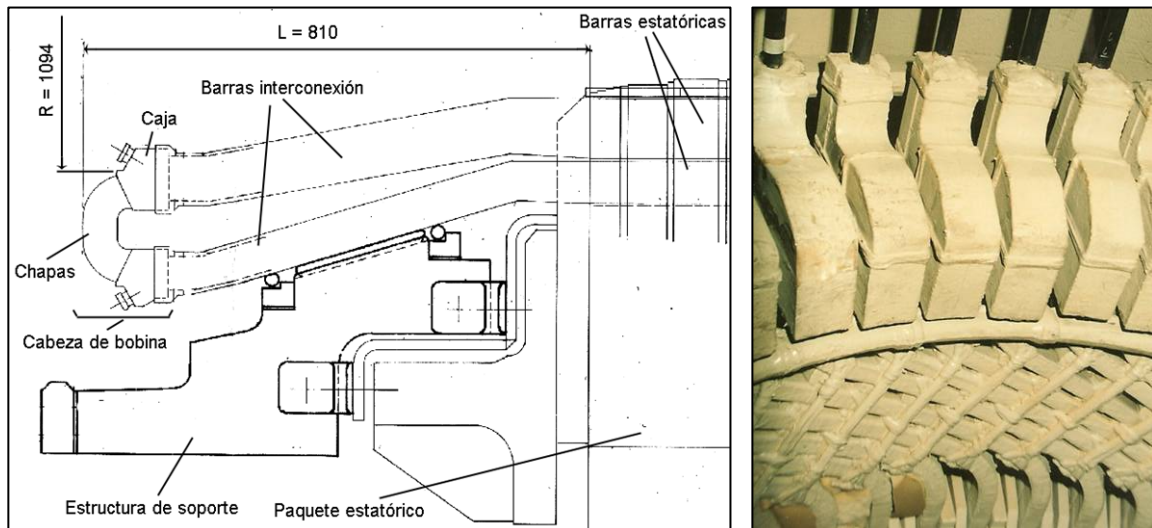


Figura 1: Izq: Esquema de la zona de cabezas de bobina. Der: Fotografía de algunas cabezas de bobina (parte superior) y barras de interconexión (parte inferior).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se divide en tres partes:

2.1 Caracterización experimental de la cabeza de bobina.

Durante una parada de mantenimiento, se realizó un estudio de respuesta resonante en condiciones reales en un determinado número de cabezas de bobina del alternador del lado excitatriz. El estudio comprendió los siguientes componentes: Cabeza de bobina, caja, cajón, tubos de refrigeración y barras de interconexión.

Los datos se obtuvieron utilizando colectores de datos SKF CMVA-60 y SKF CMVA-40 y se procesaron digitalmente mediante PC.

La experiencia consistió en medir la respuesta local y luego la respuesta en un punto exterior a la carcasa del alternador a una excitación calibrada sobre cada elemento mencionado. A posteriori se realizó la medición en los puntos exteriores seleccionados en la carcasa del alternador, para luego caracterizar la función de transferencia del camino más probable. El resultado es una función promediada que asegura que la desviación de las mediciones está acotada a un entorno de aceptación. De esta manera se pudo seleccionar los puntos más sensibles, en la carcasa exterior del alternador, a la vibración producida en los componentes de la cabeza de bobina.

Para un proceso estacionario ergódico, como es la transmisión de la señal de vibración en estructuras mecánicas, la función transferencia se calcula como [10]:

$$T_{xy}(f) = \frac{P_{xy}(f)}{P_{xx}(f)} \quad (1)$$

Donde $T_{xy}(f)$ es la función transferencia entre la entrada "x" y la salida "y", $P_{xx}(f)$ es la densidad espectral de potencia (o auto-espectro), P_{xy} es la densidad cros espectral de potencia (o cros-espectro). Basándose en las series temporales medidas durante la excitación de los elementos, la función transferencia (1) se estimó mediante el método de Welch [11, 12].

2.2 Modelado de la respuesta dinámica.

Se ha realizado un modelo dinámico de la cabeza de bobina utilizando el método de los elementos finitos, mediante el paquete de análisis Abaqus 6.7 (ver Figura 2). El modelo de la cabeza de bobina está formado por un total de 16097 elementos y 83640 nodos. Este modelo ha permitido realizar un análisis modal completo de la cabeza de bobina, así como una simulación de la respuesta forzada de la misma, obteniendo la distribución de tensiones y deformaciones alternativas en la pieza en forma cualitativa. Esto permite identificar las zonas donde, en condiciones de operación, se produce una concentración de tensiones que puede originar el inicio de una falla por fatiga. Para las posibles fallas identificadas se ha estudiado como se modifica la respuesta dinámica de la pieza en el caso de que manifieste esta falla.

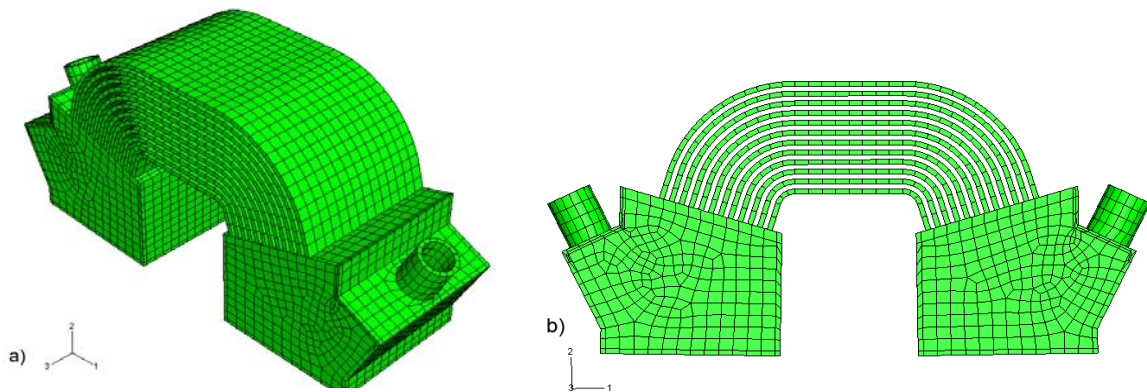


Figura 2: Modelo geométrico de una cabeza de bobina (no se muestra el tubo de entrada refrigerante). Se muestra la malla utilizada. (a) Vista en perspectiva. (b) Vista frontal.

Los detalles y resultados completos del análisis modal ya se encuentran publicados [9]. Para el caso de la respuesta forzada, se ha considerado que la cabeza de bobina se encuentra excitada por las fuerzas que surgen de la interacción del campo magnético rotante generado por el rotor con las corrientes estáticas. Se encuentra aceptado [1, 13, 14] que estas fuerzas actúan en las tres direcciones y poseen una componente fundamental a 100Hz. Según mediciones que hemos realizado con la máquina en funcionamiento, existe una componente a 500Hz de amplitud similar a la de 100Hz. Estas dos fuerzas se han incluido para realizar el análisis de la vibración forzada.

2.3 Datos de funcionamiento.

Se han analizado las señales de aceleración tomadas durante el funcionamiento normal de la máquina durante un período de 28 meses (marzo 2005, julio 2007). Estas señales se tomaron usando un colector SKF CMVA-60 y se consideraron 4 puntos de la ruta de medición en la carcasa del alternador (2 lado exitatriz, 2 lado turbina), los cuales coinciden aproximadamente con los puntos de mayor transferencia de energía entre cabezas de bobina y carcasa definidos en el apartado 2.1. Estos datos se filtraron y postprocesaron de modo de poder identificar la amplitud normal de vibración en las bandas espectrales correspondientes a cada elemento considerado.

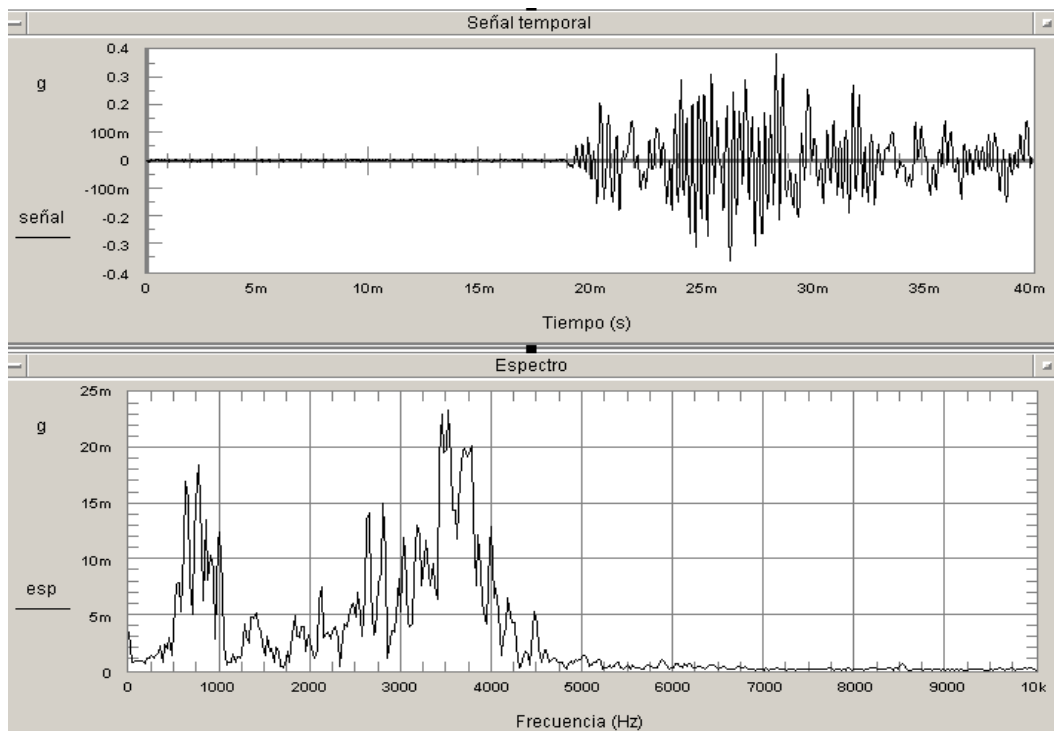


Figura 3: Señal de aceleración medida sobre la carcasa del alternador excitando la cabeza de bobina.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización experimental de la cabeza de bobina.

En la Figura 3 se muestra una respuesta típica en tiempo y frecuencia sobre la carcasa para un golpe sobre la cabeza de bobina. Se observan bandas espectrales a partir de 500Hz y hasta 4500Hz. Según los ensayos realizados (con diferentes combinaciones de posición de sensor y golpes) hemos podido determinar que las bandas por debajo de 3000Hz aproximadamente corresponden a respuestas resonantes de la cabeza de bobina, mientras que las bandas por encima de este valor corresponden a la estructura de la caja de aislamiento, soportes, etc.

En la Figura 4 se muestra la función de transmisión entre una cabeza de bobina y uno de los puntos de medición elegidos sobre la carcasa. En la banda de interés que contiene la respuesta modal y forzada de la cabeza de bobina la estructura transmite la señal en forma satisfactoria, con lo cual los puntos de medición de vibración seleccionados son objetivamente válidos para el seguimiento.

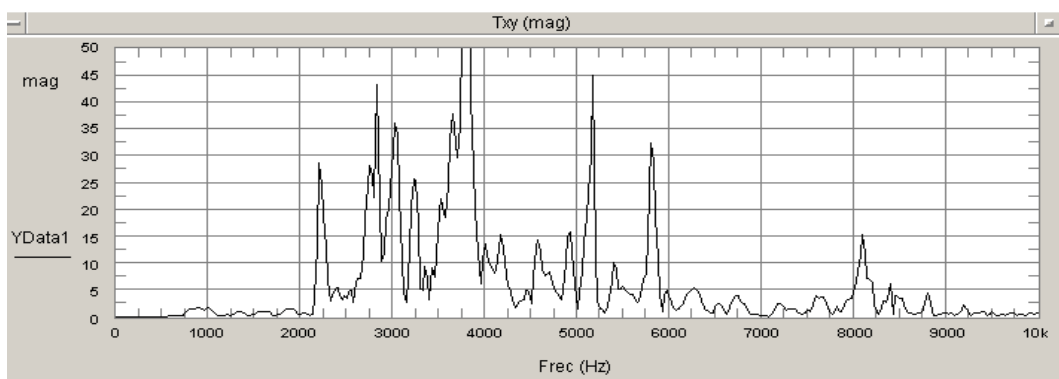


Figura 4: Función transmisión entre una cabeza de bobina y el punto seleccionado sobre la carcasa.

3.2 Modelado de la respuesta dinámica.

El análisis modal llevado a cabo mediante el modelo de elementos finitos permite identificar las frecuencias naturales de cada componente de la cabeza de bobina, diferenciando entre el tubo de entrada refrigerante, las chapas y el conjunto de la cabeza de bobina (entendiendo como conjunto los modos que involucran a las chapas y las cajas). Cada uno de estos componentes tiene sus frecuencias naturales en bandas definidas y separadas unas de otras: Tubo refrigerante: 130 – 450 Hz; Chapas: 400 – 2050 Hz; Conjunto: 1950 – 3200 Hz. En la Figura 5 se muestra un ejemplo de modos normales de chapa y conjunto. Los resultados completos se encuentran publicados en [9].

En la Figura 6 se muestra la distribución de tensiones (Von Misses) para dos instantes de tiempo de la simulación de la vibración forzada. Esta distribución se debe interpretar de forma cualitativa, ya que no se posee información suficiente para calcular el valor exacto de las fuerzas actuando sobre las cabezas de bobina. Se observa que los valores más altos de tensión se encuentran en las chapas y las cajas.

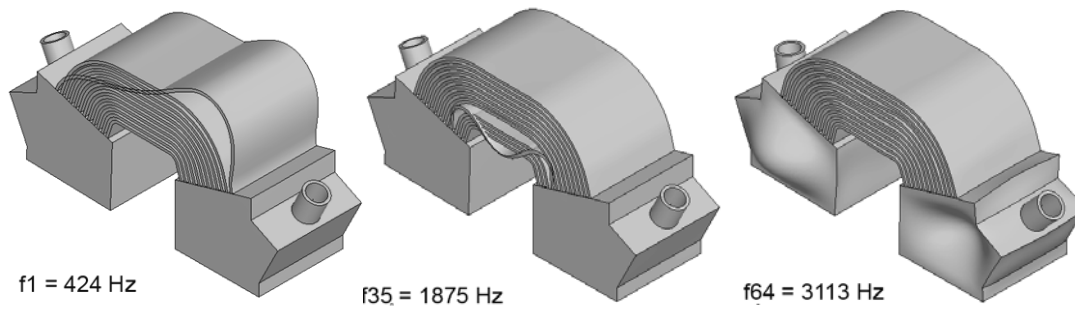


Figura 5: Modos normales y frecuencias naturales de chapas (izq. y centro) y conjunto (der.)

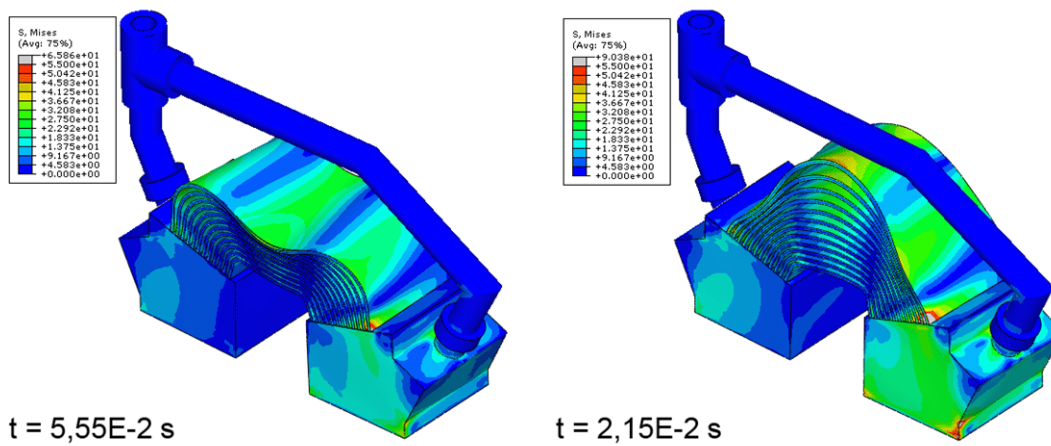


Figura 6: Tensiones (Von Misses) y desplazamientos debido a excitación forzada.

En la Figura 7 se observa un detalle que permite determinar las zonas de concentración de tensiones alternativas, que representan puntos de posible inicio de fallas por fatiga: unión de las chapas con la caja, base de la caja (unión de la caja con la barra de interconexión) y unión del tubo de refrigeración con la caja.

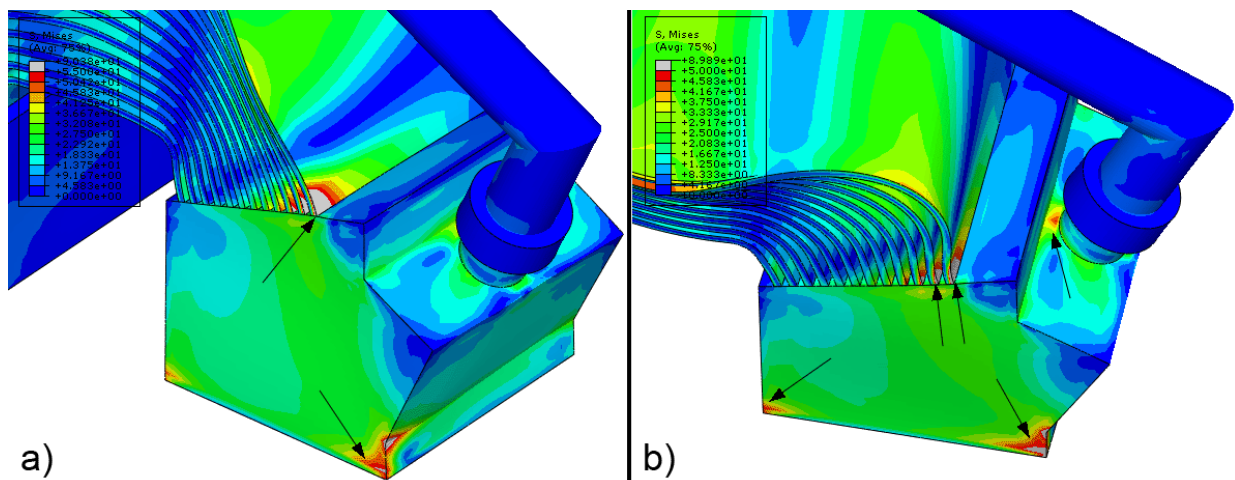


Figura 7: Concentración de tensiones en la cabeza de bobina debido a excitación forzada. Las flechas indican zonas de concentración de tensiones.

Considerando los puntos de posible inicio de fallas determinados y la geometría y sollicitación de la pieza, se modelaron las siguientes fallas, que son las que tienen mayor probabilidad de ocurrencia: a) Fractura en la unión de la 1º chapa (exterior) con la caja; b) Fractura en la unión de la 2º chapa (exterior) con la caja; c) Rotura de la base del tubo de refrigeración; d) Fisura en la unión de la caja con la barra de interconexión, lado interno. e) Fisura en la unión de la caja con la barra de interconexión, lado externo.

El análisis modal de la pieza con las fallas simuladas arroja como resultado que aparecen frecuencias naturales nuevas que están por debajo de las obtenidas anteriormente, específicamente en el rango 60 – 160 Hz para el tubo, 40 – 200 Hz para las chapas y 240 – 410 para el conjunto.

3.3 Discusión de resultados.

Los resultados del análisis modal realizado mediante el método de los elementos finitos coinciden con los ensayos experimentales para el caso de las chapas y el conjunto cabeza de bobina, por lo tanto se considera validado el modelo. Los elementos como la estructura de soporte, la caja de aislación, etc, que poseen frecuencias naturales por encima de 3500 Hz (según los ensayos experimentales) no se han incluido en el modelo.

En la Tabla 1 se resumen los rangos donde caen las frecuencias naturales de cada elemento, según los resultados presentados anteriormente.

Tabla 1: Frecuencias naturales para funcionamiento normal y para falla de distintos componentes.

Componente	Frecuencias normales (Hz)	Frecuencias de falla (Hz)
Conjunto cabeza de bobina	1950 - 3200	240 - 410
Chapas individuales	400 – 1700 1950 – 2050	40 - 200
Tubo refrigerante	130 - 190 300 - 450	60 - 160

La información presentada en la Tabla 1 permite realizar un seguimiento del estado de los componentes de la cabeza de bobina mediante el monitoreo de las bandas espectrales específicas de cada uno. El monitoreo de la condición se basa en lo siguiente: un aumento de la amplitud espectral en las bandas listadas en la columna “Frecuencias normales” indica un aumento de la vibración normal del componente correspondiente, lo que puede deberse a un desgaste o pérdida de rigidez del elemento. Un aumento en la amplitud espectral en las bandas listadas en la columna “Frecuencias de falla” indica la presencia o desarrollo de una falla en el componente correspondiente, lo que podría producir la rotura completa del mismo. Indudablemente para ambos casos (normal o falla) resulta imprescindible la técnica de tendenciar los valores medidos.

Se ha desarrollado un software que permite tomar las señales de los colectores, realizar automáticamente el filtrado en las bandas espectrales adecuadas, generar la tendencia de los valores específicos de cada componente a lo largo del tiempo y emitir las alarmas

diferenciadas (si existieran), diagnosticando la fuente del problema. En la Figura 8 se muestra la tendencia de los valores pico de aceleración en las bandas espectrales específicas de cada componente (frecuencias normales), para un período de 28 meses de funcionamiento normal de la máquina. Este gráfico permite definir claramente los límites normales de funcionamiento en cada banda espectral, permitiendo de este modo realizar la calibración del software para la posterior identificación de situaciones de alarma.

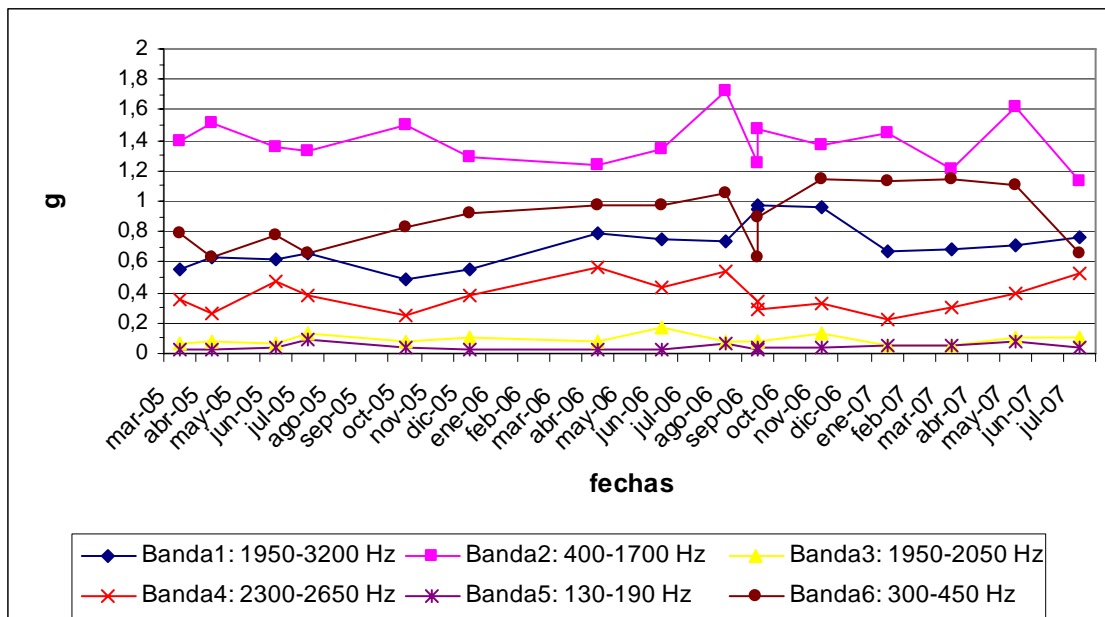


Figura 8: Tendencia de los valores pico de aceleración en punto seleccionado sobre la carcasa (lado turbina) para las frecuencias normales de los componentes, entre marzo 2005 y julio 2007

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha presentado un análisis completo de la respuesta dinámica de una cabeza de bobina de un alternador de 760 MVA, utilizando métodos experimentales y simulación mediante elementos finitos. También se han modelado algunas de las fallas más probables, de modo de conocer como afecta esto la respuesta dinámica de la pieza. Se ha presentado un método que permite realizar el monitoreo de condición de las cabezas de bobina mediante datos de vibración medidos en la carcasa del alternador durante el funcionamiento. El método presentado permite un seguimiento offline, es decir, se deben tomar los datos mediante un colector y analizarlos posteriormente mediante una PC.

Este método es igualmente aplicable para un seguimiento online de la máquina. En este caso se deben fijar una cantidad de acelerómetros sobre la carcasa del alternador y enviar las señales a una computadora industrial in situ, encargada de adquirir los datos, procesarlos y comunicar la información a una base de datos, que puede ser local o remota. Este esquema permite una rápida identificación de situaciones de alarma y comunicación de las mismas al personal de planta. Además se obtiene una gran cantidad de datos para confeccionar una

detallada estadística, permitiendo seguir la evolución del comportamiento de la máquina, detectando anticipadamente situaciones de falla.

El Laboratorio de Vibraciones y Mecatrónica del CAB ha desarrollado e instalado, en diversas plantas, sistemas de monitoreo online de máquinas. Estos sistemas se encuentran actualmente en operación con resultados óptimos.

5. REFERENCIAS

- [1] Drubel O, Kulig S, Senske K. End winding deformations in different turbo generators during 3-phase short circuit and full load operation. *Electrical Engineering*, **82**: 145-52, 2000
- [2] Khan GKM, Buckley GW, Brooks N. Calculation of Forces and Stresses on Generator End-Windings - Part I: Forces. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **4**(4): 661-70, 1989
- [3] Richard N, Duffeau F, Leger AC, Szylowicz N. Computation of Forces and Stresses on Generator End Windings Using a 3D Finite Element Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, **32**(3): 1689-92, 1996
- [4] Merkhoulf A, Boueri BF, Karmaker H. *Generator end windings forces and natural frequency analysis*. *Electric Machines and Drives Conference (IEMDC'03)*; 2003: IEEE International; 2003. p. 111-4.
- [5] García Peyrano O, Damiani H. Monitoreo remoto de cojinetes de turbinas y compresores. *2º Congreso Latinoamericano y del Caribe de Gas y Electricidad*. Punta del Este - Uruguay 2000.
- [6] García Peyrano O, Suedmascen V, Reimche W, Stegemann D. Non destructive control of ball and roller bearing damage using vibration analysis. *Revue pratique de contrôle industriel*, **26**(144): 26-30, 1987
- [7] García Peyrano O, Quintana F, Venere M. Análisis por elementos finitos y comprobación experimental de problemas de vibraciones en un tubo de escape. *Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales*. Mendoza, Argentina 1997.
- [8] García Peyrano O, Cismondi L, Damiani H, Torres E, Koch R. Estudio del comportamiento dinámico de una cabeza de bobina de una barra estatórica de un generador eléctrico de gran potencia ante diferentes estados de tensión. *SAM/COMANET-Simposio Materia*. Bariloche, Argentina 2003.
- [9] Marticorena M, García Peyrano O. Análisis de la respuesta dinámica de las cabezas de bobina de un turbogenerador de 760 KVA. *5º Reunión Latinoamericana de Usuarios de Abaqus*. Córdoba, Argentina 2007.
- [10] Harris CM, Piersol AG, editors. *Harris' shock and vibration handbook - 5º Edition*. 5 ed. New York: McGraw-Hill; 2002.
- [11] Welch PD. The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms. *IEEE Trans Audio Electroacoustics*, **AU-15**: 70-3, 1967
- [12] Stoica P, Moses RL. *Introduction to Spectral Analysis*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall; 1997.
- [13] Jianzhong Z, Xinghua J, Zeyuan Y. *Vibration measurement of the generator stator end windings and precautions against insulation wearing*. *International Conference on Power System Technology (POWERCON '98)*; 1998; Beijing, China: IEE; 1998. p. 1021-4.
- [14] Fortin T, Duffeau F. *Large generator vibration monitoring*. *Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives*; 1997; Cambridge, UK: IEE conference publication; 1997. p. 155-9.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a Nucleoeléctrica Argentina Sociedad Anónima y a la Comisión Nacional de Energía Atómica por haber aportado los recursos para llevar adelante este trabajo. Se agradece al personal de NASA, especialmente al Ing. Oscar Macayo y al grupo de mantenimiento predictivo. Se agradece al Dr. Sanchez Sarmiento el soporte técnico brindado.