

Identificación de síntomas espectrales asociados a problemas en grupos electro energéticos.

J. Cabrera Gómez, E. Egusquiza Estévez*.

Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento. Instituto Superior Politécnico, "José Antonio Echeverría".
CUJAE, Calle 119, Marianao, Ciudad de la Habana., Cuba.

E-Mail: jcabrera@ceim.cujae.edu.cu

*Centro de Diagnóstico Industrial y Fluidodinámica.
Universidad Politécnica de Cataluña. España.

(Recibido 4 de Septiembre de 2004, aceptado 10 de Noviembre de 2004).

Resumen.

La aplicación de estrategias de mantenimiento predictivo es una de las tendencias actuales en las centrales generadoras de energía eléctrica. Las acciones predictivas se fundamentan en el monitoreo y control del estado de las máquinas, jugando en este sentido la medición y análisis de las vibraciones un rol preponderante. El trabajo muestra, tomando como base un gran número de mediciones de campo realizadas, la forma en que se reflejan en los espectros de las vibraciones registradas varios de los principales problemas que pueden presentar estas máquinas durante su funcionamiento.

Palabras claves: Vibraciones mecánicas, fuerzas excitadoras, resonancias, comportamiento dinámico, espectro de vibraciones, mantenimiento predictivo.

1. Introducción.

El estudio del comportamiento dinámico de un grupo hidroeléctrico es sumamente difícil debido a la complejidad de la cadena de generación de vibraciones. Normalmente se trata de una máquina de grandes dimensiones, con una gran cantidad de elementos (un generador y una turbina acoplados mediante un eje, cojinetes, etc.) y con varios regímenes de operación. Las vibraciones que tienen lugar cuando están funcionando dependen de diferentes fuerzas excitadoras de difícil cálculo y de la respuesta estructural a dichas fuerzas. Además, tanto las excitaciones como la respuesta suelen variar durante las distintas condiciones de operación de la turbina. En algunos casos donde la vibración estructural puede variar la excitación original, como es el caso de las vibraciones auto excitadas, el problema es prácticamente insoluble. La aparición de daños o desgastes en estos elementos puede hacer variar significativamente las vibraciones generadas [4, 5].

Como parte del análisis de vibraciones, es importante conocer la respuesta que tiene el sistema ante las excitaciones que se producen en la máquina. Se trata también de un fenómeno complejo, pues cada uno de los elementos constituyentes presenta sus propias características dinámicas y por tanto responden de manera diferente ante las excitaciones [1, 9].

Entonces, para diagnosticar con eficacia los problemas asociados a las vibraciones en una máquina es indispensable, ante todo, conocer el origen y las amplitudes de las fuerzas excitadoras que sobre ella actúan. En el caso de las máquinas hidráulicas generadoras de energía estas fuerzas excitadoras se pueden agrupar en: fuerzas de origen mecánico, fuerzas de origen hidráulico y fuerzas de origen eléctrico [6, 8, 11]. El conocimiento del comportamiento espectral que presentan estas fuerzas es de suma importancia a la hora de realizar el diagnóstico.

2. Síntomas espectrales asociados a fuerzas excitadoras de origen mecánico.

2.1. Desbalance.

El desbalance es la principal causa de problemas vibratorios en las máquinas rotatorias, ya que todos los rotores lo presentan en mayor o menor medida. Éste ocurre cuando el centro de masa de un sistema que rota, no coincide con su centro de rotación. La fuerza de desbalance es proporcional a la masa desbalanceada, a la holgura y al cuadrado de la velocidad [8, 9]. En el caso de un grupo hidroeléctrico, el desbalance tiene lugar básicamente en el alternador y en la turbina. Los lugares más adecuados para detectar este problema son los cojinetes, a través de mediciones en las direcciones radiales (ver figura 1a).

El fenómeno de desbalance genera un vector fuerza rotatorio cuya frecuencia fundamental es igual a la frecuencia de rotación f_f ($f_f = \text{rpm} / 60$). Cuando el desbalance alcanza amplitudes elevadas pueden aparecer también componentes de pequeña amplitud a las frecuencias de $2xf_f$, $3xf_f$ y $4xf_f$ (ver figura 1b).

El efecto de la fuerza de desbalance sobre el rodete se puede detectar en una medición radial en el cojinete de turbina (ver figura 2a). En la figura 2b se aprecia un espectro obtenido a partir de una medición realizada en esta posición.

2.2. Desalineamiento.

El desalineamiento consiste en una pérdida de concentricidad de la línea central del eje del rotor con

respecto a la línea central del sistema de cojinetes. Puede ser originada por problemas de instalación y montaje [4 8]. Puede ser paralela y/o angular, tal como muestran respectivamente las figuras 3a y 3b.

El desalineamiento en paralelo se detecta con mediciones radiales y su síntoma espectral es la presencia de componentes a las frecuencias de $2xf_f$ y $3xf_f$. El desalineamiento angular se aprecia en una medición axial, donde además de una componente elevada a $1xf_f$, pueden aparecer las componentes de $2xf_f$ y $3xf_f$. En la práctica, lo más común es encontrar una combinación de los dos tipos de desalineamiento. En la figura 4 se aprecia un ejemplo de este problema.

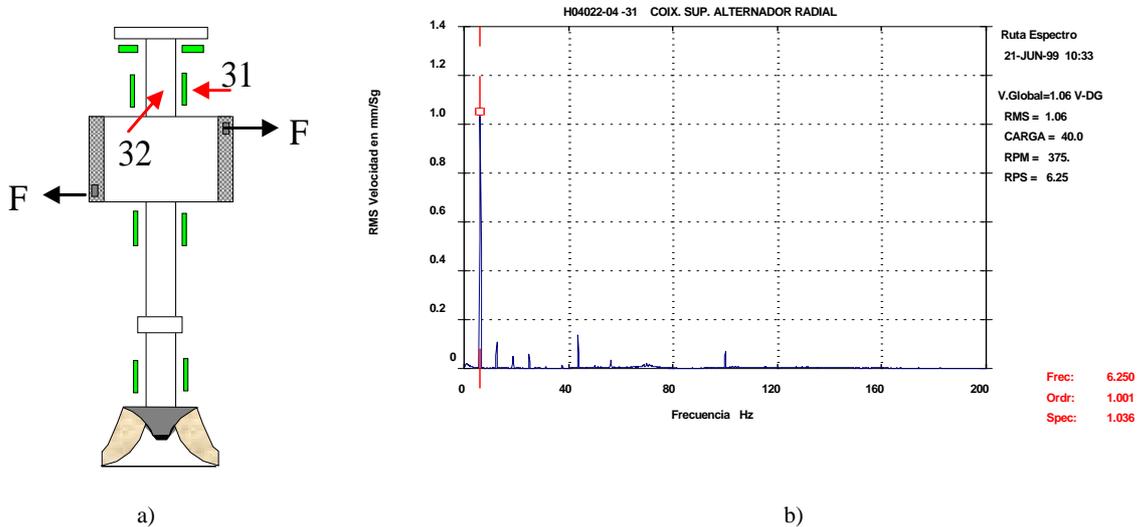


Figura 1. Identificación de un desbalance en el alternador de un grupo hidroeléctrico. (a) Fuerzas excitadoras del desbalance y puntos de medición. (b) Síntoma espectral.

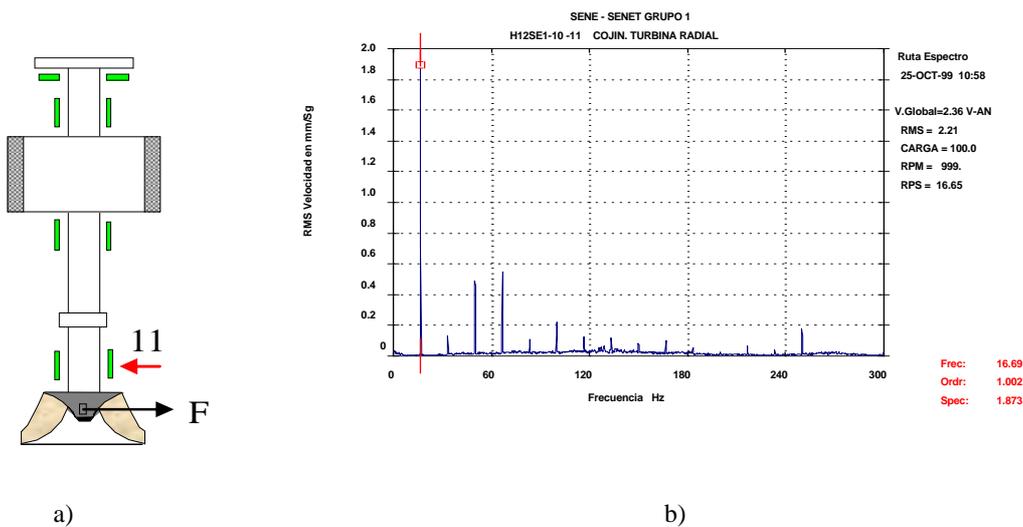


Figura 2. Identificación de un desbalance en la turbina de un grupo hidroeléctrico. (a) Fuerza excitadora del desbalance y puntos de medición. (b) Síntoma espectral.

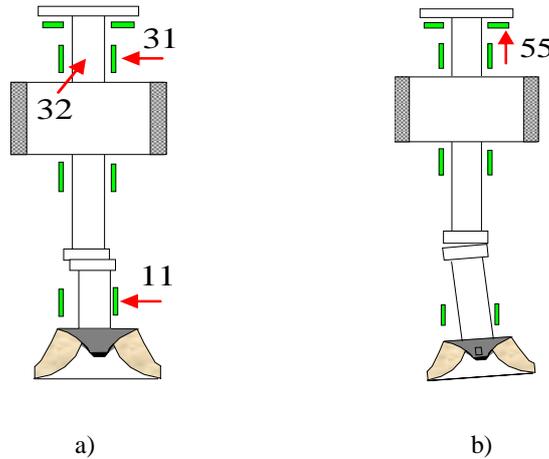


Figura 3. Presencia de desalineamiento en un grupo hidroeléctrico. (a) Desalineamiento en paralelo. (b) Desalineamiento angular.

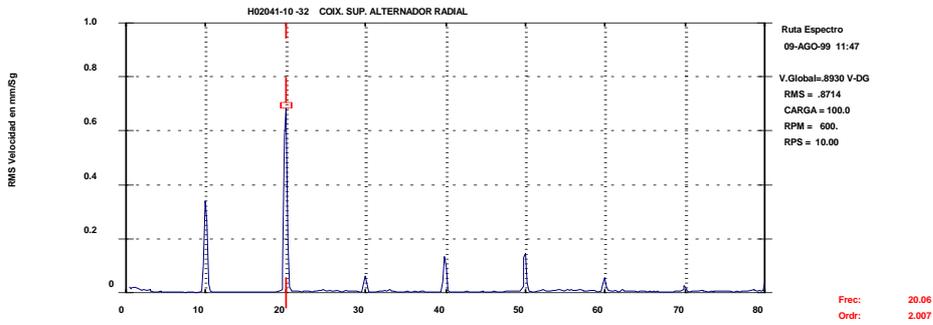


Figura 4 Síntoma especial de un desalineamiento.

2.3. Fricción seca.

Este problema aparece cuando existe roce entre elementos estacionarios y elementos giratorios. Puede tener lugar en cojinetes lisos por lubricación deficiente, en los laberintos, en los extremos de los álabes del rodete por contacto con la carcasa y puede ser el resultado de acciones externas como montajes

incorrectos y/o trabajos de reparación o mantenimiento inadecuados. En un espectro puede detectarse por la presencia de una banda ancha de energía en la base que puede excitar frecuencias propias y en la señal temporal, por el truncamiento de la misma. La figura 5 muestra un ejemplo de este problema.

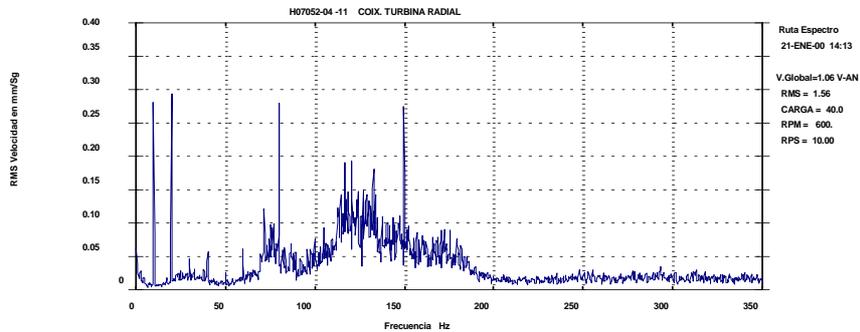


Figura 5. Síntoma espectral de la presencia de fricción seca

2.4. Problemas en cojinetes lisos.

2.4.1 Remolino de aceite (oil whirl).

Es una excitación generada por la rotación del fluido en el interior de cojinetes de película de aceite. Depende de la geometría del cojinete, de la viscosidad del aceite y de las condiciones de operación (velocidad de rotación, carga). La vibración debida al remolino de aceite se manifiesta con una componente a $(0.45 \div 0.48) \times ff$. En la figura 6 se aprecia un ejemplo donde aparece indicado un pico que revela problemas de remolino de aceite en un cojinete.

2.4.2 Holguras excesivas.

Las holguras excesivas pueden conducir a un rozamiento entre eje y cojinete que se traduce en

desgaste de este último y vibraciones con frecuencias que van desde $0.5 \times ff$ hasta zonas de altas frecuencias, pudiendo excitar además frecuencias de resonancia. En la figura 7 puede verse el caso de un cojinete que presenta este problema.

2.4.3 Lubricación deficiente.

Puede ocurrir debido al uso incorrecto de lubricantes mal especificados o daños en el sistema de lubricación. Puede producir fricción entre eje y cojinete llegando a provocar desgaste en el cojinete. Este problema se puede identificar observando si hay una excitación con frecuencia alrededor de $0.5 \times ff$, así como también si aparecen armónicos y medios armónicos de ff . En la figura 8 se muestra un ejemplo de este problema.

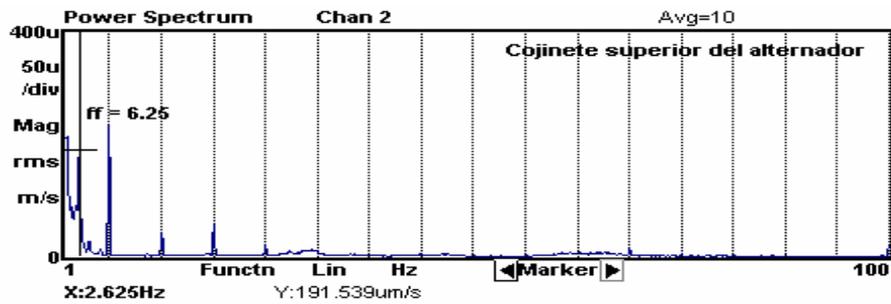


Figura 6. Síntoma espectral de la presencia de remolino de aceite.

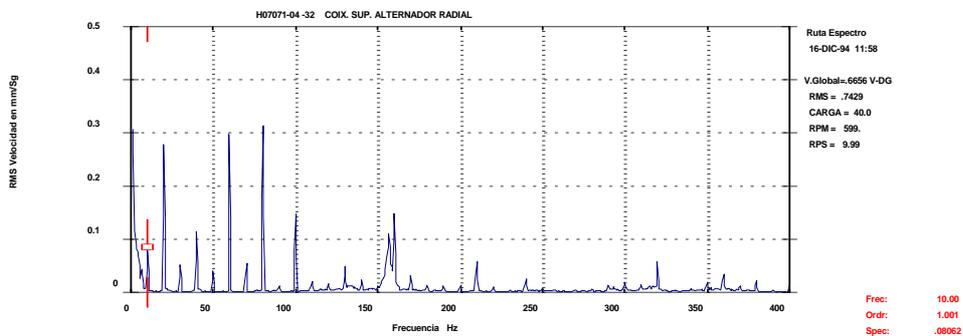


Figura 7. Síntoma espectral de la presencia de holguras excesivas.

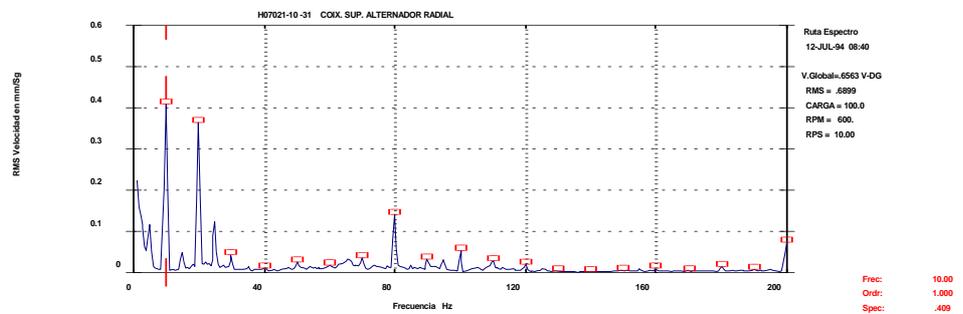


Figura 8. Síntoma espectral de una lubricación deficiente.

2.5. Resonancias mecánicas.

Los sistemas mecánicos están caracterizados por frecuencias y modos naturales de vibrar que están determinadas por la distribución de masa y la rigidez de los elementos que los componen. El fenómeno de resonancia existirá si una fuerza que excita la máquina posee frecuencia muy próxima o coincidente a una de las frecuencias propias, pudiendo producirse grandes amplitudes de vibración que pueden resultar peligrosas y conducir a daños catastróficos aún cuando las fuerzas excitadoras sean pequeñas. La representación sucesiva de espectros (cascadas) obtenidos durante la medición de un estado transitorio de la máquina (puesta en marcha y/o parada), permite la identificación de frecuencias propias. Durante estos transitorios las fuerzas excitadoras generadas van variando en frecuencia y pueden producir resonancias en la máquina o en elementos de ella [2, 6, 8, 11]. En la figura 9 se muestra un transitorio de arrancada y se aprecia

claramente la presencia de una resonancia entre 80 y 90 Hz.

3. Síntomas espectrales asociados a fuerzas excitadoras de origen hidráulico.

3.1. Desbalance hidráulico.

Este fenómeno ocurre por la distribución no homogénea del fluido en el rodete. Depende de variaciones geométricas en el rodete (diferencias entre los ángulos de entrada y salida de los álabes, variaciones de la distancia entre álabes, etc.), del punto de funcionamiento de la máquina (se incrementa cuando está fuera de él) y de la excentricidad del rotor. Produce vibraciones con frecuencia igual a la de rotación de la máquina y en algunos de sus armónicos [5]. Puede producir variaciones de amplitud considerables con la carga (ver figura 10).

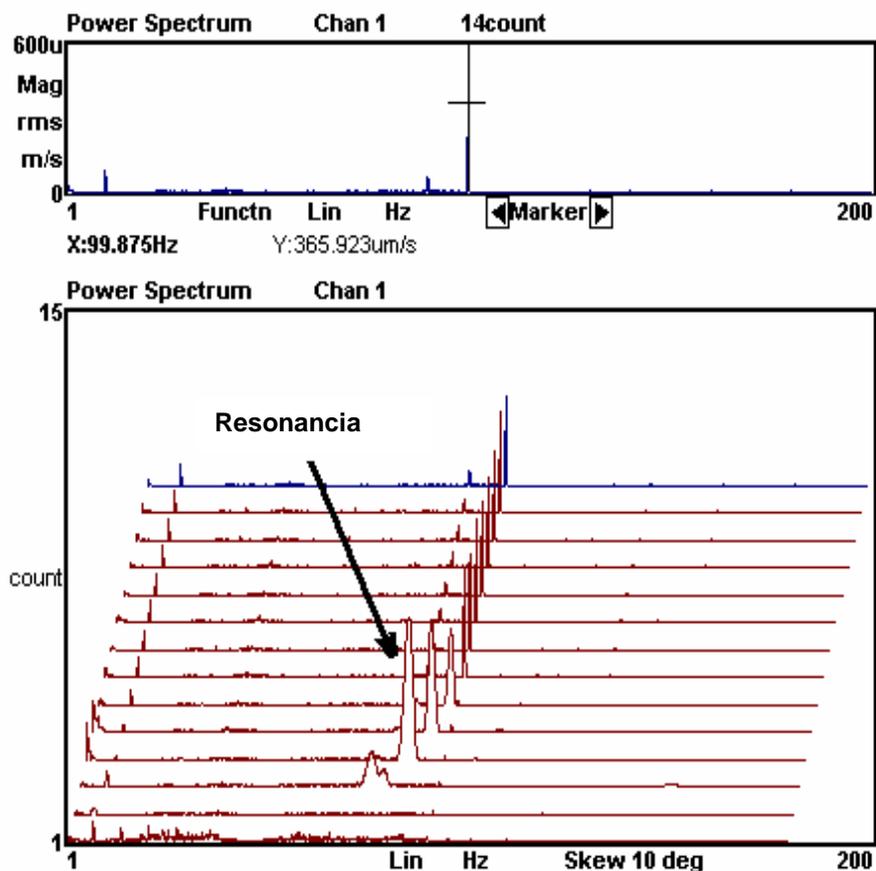


Figura 9. Síntoma espectral de una resonancia.

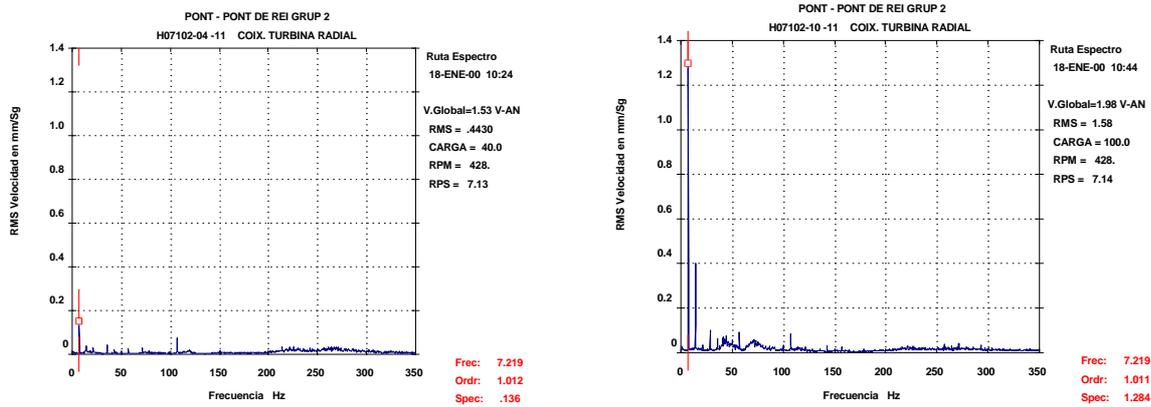


Figura 10. Identificación de un desbalance hidráulico en el rodete de un grupo hidroeléctrico.
(a) Máquina al 40 % de carga. (b) Máquina al 100 % de carga.

3.2. Interacción rodete – difusor.

Genera una fluctuación de presión alrededor del rodete que depende principalmente de la combinación del número de álabes del rodete y del número de directrices del distribuidor, del diseño del rodete, de la holgura entre rodete y distribuidor (a menor holgura mayor amplitud en la fluctuación de presión). Dicha pulsación puede verse amplificada por resonancias hidráulicas en el rodete y resonancias mecánicas en el rotor, generando tensiones considerables en el rodete así como fluctuaciones de presión en la tubería forzada. En función del modo diametral que se excite en el rodete, pueden aparecer vibraciones axiales y/o radiales con una amplitud considerable. La excitación generada por la interacción aparece a nfb , siendo fb la frecuencia de paso de álabes ($fb = zb \cdot ff$) y zb el número de álabes del rodete (ver figura 11).

3.3. Antorcha.

Cuando una turbina está operando a cargas parciales o en sobrecarga, el flujo que sale del rodete tiene una

componente de rotación. El remolino formado por dicha rotación genera una zona de baja presión en su núcleo que tiende a cavitarse y que se conoce como antorcha. La antorcha produce una deformación del flujo a la salida del rodete y genera una fluctuación de presión circunferencial. Tal fluctuación genera una fluctuación axial de la masa del fluido en tubos de aspiración acodados que puede entrar en resonancia con las frecuencias propias del tubo de aspiración o de la tubería forzada provocando un funcionamiento inestable de la máquina. A cargas parciales, el movimiento de rotación del vórtice crea pulsaciones de presión con frecuencias que oscilan entre 0.25 y 0.35 veces la frecuencia de rotación. Con la máquina operando a sobrecarga el vórtice se vuelve recto y más centrado respecto a la tubería y en esta condición la frecuencia de excitación es aproximadamente $(0.75 \div 1) \times ff$. Ejemplos de estos dos casos pueden apreciarse en la figura 12.

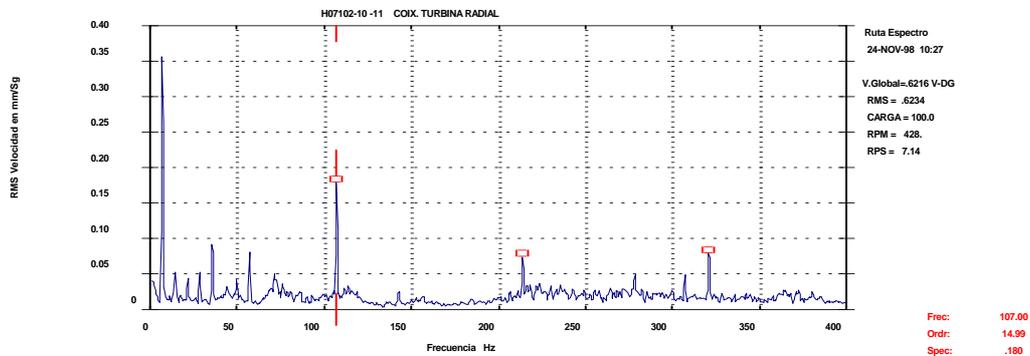


Figura 11. Síntoma espectral de la fluctuación de presión en el rodete

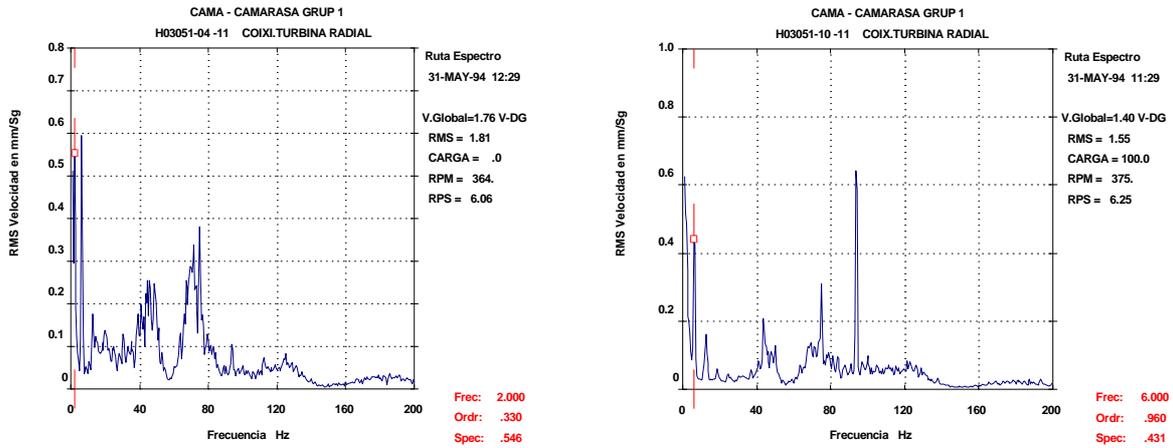


Figura 12. Síntoma espectral de la presencia de problemas de antorcha.
 (a) Máquina con carga parcial. (b) Máquina con carga máxima.

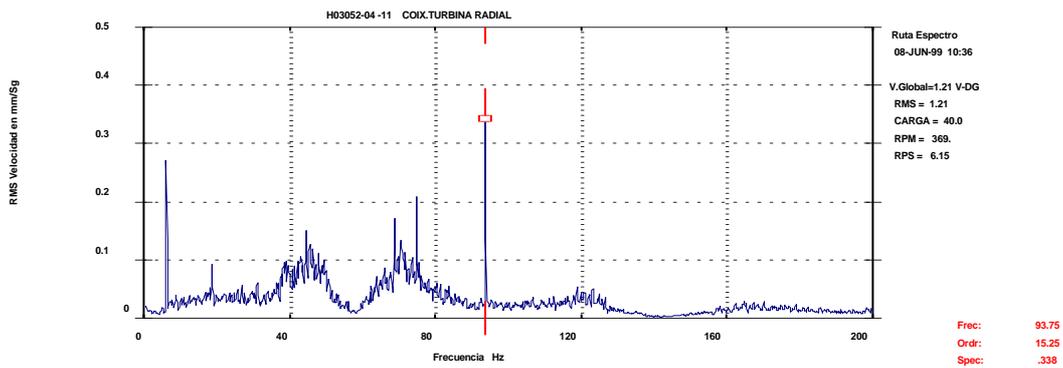


Figura 13. Síntoma espectral de una frecuencia propia excitada por turbulencia.

3.4. Turbulencia.

La turbulencia se caracteriza por fluctuaciones de tipo caótico generadas durante el movimiento de un fluido, especialmente en la parte trasera de un cuerpo atravesado por el fluido. Puede ser externa, generada detrás de la válvula de entrada y que entra en la máquina, o turbulencia generada dentro de la máquina, ya sea por flujo recirculante a cargas parciales, por capa límite o en la estela de las directrices del distribuidor [3]. Puede generar vibraciones de consideración, especialmente cuando excita frecuencias propias del rotor o de la estructura. Un ejemplo de esto se muestra en la figura 13.

3.5. Cavitación.

Este fenómeno consiste en la formación y actividad de cavidades en los líquidos. Cuando la presión de un líquido baja aproximadamente al valor de la presión de

vapor, se producen cavidades que son transportadas por la corriente del líquido y que cuando arriban a zonas de mayor presión, implosionan violentamente. Las excitaciones debido a la cavitación generalmente son de banda ancha y pueden ocurrir a bajas y a altas frecuencias, en función del tipo de máquina y de su punto de funcionamiento. La cavitación, en su fase inicial, genera ruido de alta frecuencia (puede estar por encima de 200 kHz). Cuando está desarrollada y las cavidades son mayores se generan vibraciones y ruido de baja frecuencia [7, 10].

3.6. Resonancia hidráulica.

Ocurre cuando la frecuencia de una pulsación de presión es aproximadamente igual a una frecuencia modal de los circuitos. La interacción hidráulica de la máquina con sus circuitos puede generar fuertes oscilaciones de presión si ocurren resonancias.

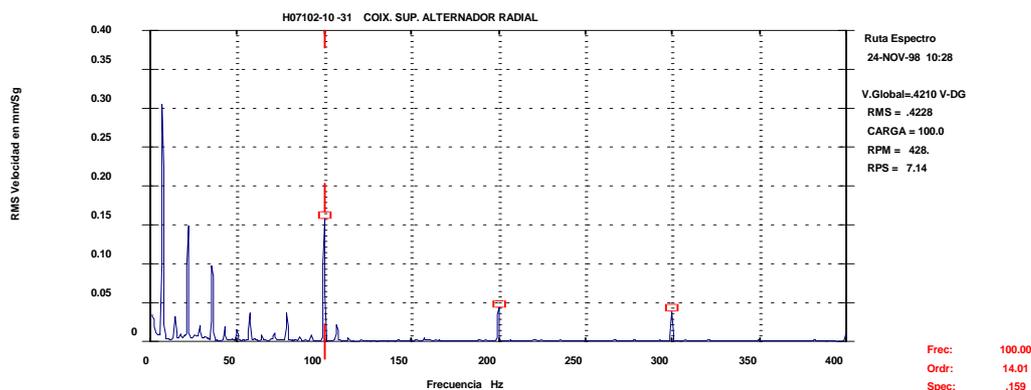


Figura 14. Síntoma espectral de problemas de origen eléctrico.

4. Síntomas espectrales asociados a fuerzas excitadoras de origen eléctrico.

El campo de fuerzas magnéticas que se establece en el alternador produce fuerzas sobre el rotor y el estator. En caso de holguras no uniformes, daños o mal funcionamiento de las bobinas, las fuerzas no compensadas producen una vibración igual a $n f_{pol}$, donde f_{pol} es la frecuencia de paso de polos. Un ejemplo de esta situación se muestra en la figura 14.

5. Conclusiones.

Se han podido comprobar, sobre la base de las mediciones de campo realizadas, las particularidades espectrales de los principales problemas vibratorios que pueden presentar los grupos hidroeléctricos. El conocimiento de estos síntomas espectrales es sumamente importante para establecer las bandas de monitorado que permitan dar seguimiento al comportamiento dinámico de estas máquinas como parte de un programa de mantenimiento predictivo.

Dado que el estudio teórico del comportamiento dinámico en estos casos es muy complicado debido a la multitud de fuerzas excitadoras de difícil simulación y por la complejidad de la respuesta estructural, cobra mayor importancia la investigación experimental en máquinas reales, a fin de tener un mayor conocimiento de las amplitudes y características vibratorias de las mismas. Tal conocimiento contribuye a mejorar las estrategias de monitorado, tanto para la protección de las máquinas como para la aplicación de acciones predictivas.

6. Referencias.

1. Bolleter, U. On Rotordynamics of Compressors, Pumps and Hydraulic Turbines. 3th IFTOMM Conference. Karlovac, Yugoslavia. 1989.

2. Cabrera J., "Estimación del comportamiento modal de sistemas mecánicos", Tesis doctoral, Centro de Estudios Innovación y Mantenimiento, CUJAE, La Habana, 2000.
3. Coantic, M. La Physique de la Turbulence. La Houille Blanche, pp. 505 – 516. 1987.
4. Egusquiza, E. Fault Detection in Hydro Power Plants. Proceedings of the XIII IMEKO World Congress. Vol. 2. Torino. September, 1994.
5. Egusquiza, E. (et al). Vibration Behaviour in Hydro Power Plants. Field data analysis. Hydraulic Machinery and Systems 20th IAHR Symposium. Charlotte, N.Carolina, USA. 2000.
6. Estévez A., "Estudio de síntomas vibratorios para el diagnóstico de daños en grupos hidroeléctricos", Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 2000.
7. Laperrousaz, E. (et al). Prediction Cavitation in Francis Turbine on the Basic Scale Model Testing. IAHR Symposium. Beijing, China. 1994.
8. Nascimento L.P., "Análisis del comportamiento vibratorio para el mantenimiento predictivo de grupos hidroeléctricos", Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1995.
9. Norman, R. Rotordynamics. Vibration and Oscillation of Hydraulic Machinery. OHASHI Ed. England. 1995.
10. Phillips, J. M. (et al). On-line Detection of Erosive Cavitation in Hydroturbines. The International Journal of Hydropower & Dams. V1. I2. 1994.
11. Robles F.D., "La personalización de firmas espectrales en grupos hidroeléctricos", Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, 1998.

Spectral Symptom Identification Associated to Problems in Power Plant Machines.

Abstract.

The application of predictive maintenance strategies is an actual trend in power plants. Predictive actions are based on machine condition monitoring, and vibration measurements and analysis play a prevailing role in order to control the machine condition. Based on a large number of vibration measurements made on real machines, this paper shows how different problems in these machines during operation are identified in vibration spectra.

Key words: Mechanical vibrations, exciting forces, resonances, dynamic behaviour, vibration spectrum, predictive maintenance.