



MONITORAMENTO DO COMPORTAMENTO VIBRATÓRIO DE HIDROGERADORES - ESTUDO DE CASO.

Turra, A. E.

Nascimento, L. P.

UNESP – Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Mecânica

Cx. Postal 31 - 15385-000 - Ilha Solteira – SP, Brasil

e-mail: turra@dem.feis.unesp.br

e-mail: depaula@dem.feis.unesp.br

Pederiva, R.

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Projeto Mecânico

Cx. Postal 6122 – 13083-970 – Campinas, SP, Brasil

***Resumo.** Os grupos hidroelétricos durante seu funcionamento suportam esforços dinâmicos de origem hidráulica, mecânica e elétrica que induzem vibrações e estabelecem um estado de tensões variáveis que provocam o envelhecimento e o desgaste de seus componentes. O estudo do comportamento vibratório dos grupos hidráulicos tem um crescente interesse devido a tendência de uma gradual automatização das centrais hidroelétricas com o objetivo de opera-las com um mínimo de pessoal. Isto implica em adotar técnicas de controle e monitoramento suficientes para garantir o bom funcionamento e a segurança estrutural. Além disso, requer-se um aumento da confiabilidade e segurança em todos os sistemas de produção de energia. Dentre as várias técnicas, a análise de vibrações é uma das mais potentes para a identificação de anomalias nas máquinas. Neste trabalho, realizado na UHE - Ilha Solteira/CESP, é apresentado o acompanhamento do comportamento vibratório de grupos hidráulicos, realizado nos últimos anos, para a avaliação do grau de deterioração do equipamento em função do tempo de funcionamento. Também, buscou-se identificar as variações no comportamento vibratório após a máquina passar por uma manutenção geral de seus componentes.*

***Palavras-chave:** Grupos hidroelétricos, Vibrações, Detecção de falhas*

1. INTRODUÇÃO

Os grupos hidroelétricos durante seu funcionamento suportam esforços dinâmicos de origem hidráulica, mecânica e elétrica que induzem vibrações e estabelecem um estado de

tensões variáveis que provocam o envelhecimento e o desgaste de seus componentes. Quando o nível de deterioração de uma máquina chega a um certo ponto, começa a operar de modo anômalo. Se tal anomalia não é corrigida, os danos evoluem até chegar à sua completa indisponibilidade, seja por não oferecer as condições para as quais foi projetada, seja pela ruptura de algum de seus componentes. O nível de deterioração de uma máquina rotativa se reflete nas amplitudes das vibrações. Os níveis de vibrações excessivos são perigosos para o funcionamento das máquinas e estão limitados por algumas normas vigentes, como por exemplo a ISO/TC103/SC2 (1994).

O estudo do comportamento vibratório dos grupos hidráulicos têm um crescente interesse devido a diversos fatores, alguns dos quais são os seguintes: Gradual automatização das centrais hidroelétricas com o objetivo de operá-la com um mínimo de pessoal. Isto implica em adotar técnicas de controle e monitoramento suficientes para garantir o bom funcionamento e a segurança estrutural dos grupos (Nascimento, 1995). Paralelamente, requer-se um aumento da confiabilidade e segurança em todos os sistemas de produção de energia. Este processo que se iniciou nas centrais nucleares, está se transferindo a todo tipo de centrais geradoras de energia. Em breve se prevê o aparecimento de normas mais restritivas que as atuais para o controle das máquinas, as quais obrigam a monitorar o estado de certos componentes.

A necessidade de aumentar a geração de energia elétrica, sem efetuar altos investimentos, associado à idade das unidades geradoras em operação, justificam estudos no sentido de aumentar a disponibilidade e prolongar a vida útil dos equipamentos. Isso conduz à necessidade de otimização dos procedimentos de manutenção. No caso específico de máquinas rotativas, implica basicamente em implementar um sistema de manutenção preditiva e monitorar as vibrações.

Atualmente, os avanços da tecnologia tem proporcionado múltiplos métodos que permitem a avaliação externa das condições das máquinas sem desmontá-las e, inclusive, sem para-las. Estas técnicas tem dado origem à chamada manutenção preditiva, que consiste na detecção, análise e correção de falhas mediante a comparação e análise de parâmetros medidos na máquina sem necessidade de parar o processo produtivo.

A análise de vibrações é uma das técnicas mais potentes e utilizadas para identificar falhas nas máquinas. O fato de que o estado de uma máquina está relacionado com as vibrações que produz, faz da análise de vibrações o método mais eficaz e versátil de manutenção preditiva, especialmente no caso das máquinas rotativas. Quando a máquina esta funcionando, cada elemento produz vibrações que podem ser medidas com sensores. Se um elemento determinado sofre um dano, as vibrações variam e esta variação é detectada.

O comportamento vibratório de grupos hidroelétricos é muito complexo devido a um grande número de forças dinâmicas (excitações) que aparecem quando as máquinas estão funcionando. Estas excitações, que resultam em vibrações, dependem do tipo de máquina e de sua interação com o sistema. Mesmo assim cada máquina tem comportamento distinto segundo seu projeto, instalação e ponto de funcionamento.

As máquinas são, em geral, cuidadosamente construídas e robustas. No entanto, a possibilidade de aparecimento de falhas é inerente aos desgastes envolvidos na conversão de energia mecânica em elétrica e vice-versa. Diversas partes dessas máquinas estão especialmente suscetíveis a falhas. O problema de detecção de falhas incipientes (manutenção preditiva) são questões fundamentais para a extensão de vida útil de máquinas rotativas.

Muitos trabalhos relacionados com análise de vibrações têm sido desenvolvidos com a

finalidade de se conhecer os mecanismos básicos que produzem as excitações e desta forma melhorar a eficácia das análises aumentando a confiabilidade na determinação do estado das máquinas. As vibrações produzidas por excitações de origem mecânica já são bastante conhecidas. Vladislavlev (1979) apresenta as principais, incluindo as técnicas usuais para a correção das anomalias que as originam.

Também tem-se feito investigações para alcançar um conhecimento mais preciso dos fenômenos hidráulicos mais importantes que produzem vibrações. Um estudo geral foi apresentado por Barozzi (1987). Se trata de um estudo puramente teórico no qual estão relatadas as excitações principais que ocorrem nos tipos de turbinas mais utilizados (Francis, Kaplan e Pelton).

Outros pesquisadores como Weber & Nascimento (1986) e Egusquiza & Nascimento (1993),(1994) têm investigado o comportamento de máquinas hidráulicas.

Considerando que no Brasil existem cerca de 120 centrais hidroelétricas e que 95% da energia produzida é de origem hidráulica, isso evidencia a importância de trabalhos nesta área no cenário nacional. Vários autores brasileiros já utilizaram a Usina Hidroelétrica de Ilha Solteira para desenvolvimento de trabalhos de pesquisa, Arruda et all (1982), Cardinali et all (1992), bem como Nascimento (1987) .

Neste trabalho, as análises foram realizadas em máquinas da UHE - Ilha Solteira que opera com uma turbina tipo Francis vertical de potência nominal de 160 MW e velocidade de rotação de 85,7 rpm. A máquina possui 2 mancais, sendo um guia da turbina (MGT) e outro combinado guia do gerador e de escora axial (MGG), conforme mostra a "Fig. 1". Os procedimentos experimentais e os resultados estão apresentados a seguir.

2. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Em função da baixa velocidade de rotação que apresenta essa máquina, os sensores sem contato para a medição de deslocamento relativo eixo/mancal são os mais indicados para a análise das vibrações, mesmo que com eles a análise do comportamento do sistema em frequências maiores possa ficar um pouco comprometida. A escolha desse tipo de sensor foi efetuada no início dos anos 80 quando decidiu-se pela instalação permanente de sensores para o monitoramento de todas as máquinas da central. Os primeiros sensores instalados foram desenvolvidos pelo GEPROM-UNICAMP que atualmente estão sendo trocados por outros já disponíveis no mercado, quando das paradas programadas para manutenção geral da máquina. Os sinais obtidos, antes da parada da máquina para manutenção, foram coletados com a cadeia de medição em operação. Os transdutores e os cabos, bem como os condicionadores, começavam a apresentar problemas de contato e blindagem sendo necessário a troca de toda a cadeia de medição. Aproveitando as paradas programadas para manutenção, efetua-se a troca do sistema de medidas e faz-se a calibração do sistema.

A UHE - Ilha Solteira vinha adotando um período de 3 a 6 meses como intervalo de medição e como os resultados mostravam-se compatíveis, ou seja, com pequenos incrementos nos níveis de vibração, decidiu-se manter a sistemática que estava sendo utilizada. Adicionalmente fez-se medidas em máquinas específicas para avaliar seu comportamento com variações das condições de operação, principalmente com a variação de cargas.

Os sensores estão instalados no mancal guia do gerador (MGG) e no mancal guia da

turbina (MGT), dispostos a 90° entre si nas direções da montante (MO) e do vertedouro de superfície (VS). Um esquema simplificado de um hidrogerador é apresentado na “Fig. 1”.

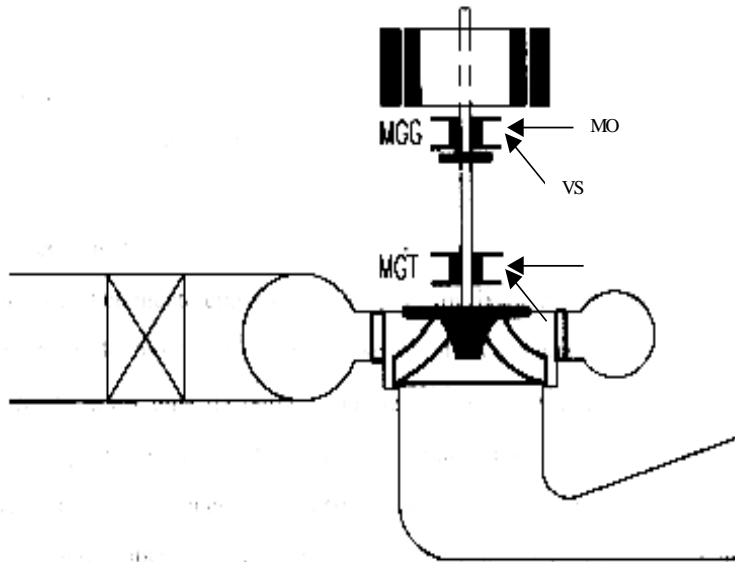


Figura 1 – Esquema simplificado de um hidrogerador.

O sinais foram adquiridos utilizando-se o sistema de aquisição Lynx Tecnologia - CESP e o software de aquisição AqDados, com frequência de amostragem de 500Hz e tempo de 20,48 segundos, totalizando 10 amostras de 1024 pontos. Posteriormente, os sinais adquiridos foram processados e analisados em laboratório através do “software” DASyLab para o processamento de espectros do sinal e análise de órbitas (“Fig. 2”).

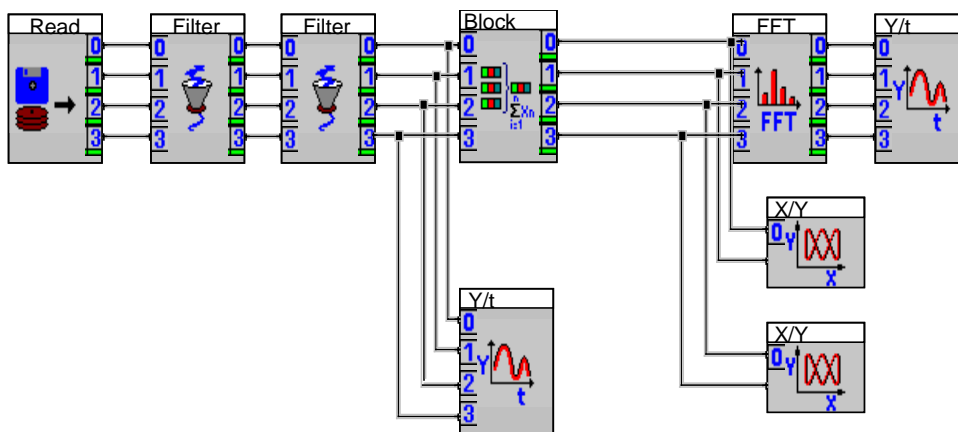


Figura 2 – Módulos do sistema de análise DASyLab.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nos grupos hidroelétricos é muito importante analisar o seu comportamento vibratório em diversas condições de cargas (cargas parciais) com a finalidade de se identificar frequências de excitação de origem hidráulica e, sobretudo, para se estabelecer a faixa de operação sobre a qual a máquina trabalha dentro das melhores condições dinâmicas. No caso da máquina em questão (máquina 16), apresenta-se na “Fig. 3” os espectros em frequência de deslocamentos relativos medidos no mancal guia do gerador na direção montante (MGGMO) medidos em fevereiro de 95 com a máquina nas condições de 80, 120, 140 e 160 MW de carga. Pode-se observar que, em geral, as amplitudes de vibração na frequência de rotação mantiveram-se praticamente constante em todas as cargas. Não obstante, nas cargas abaixo de 140 MW aparecem uma excitação produzida pelo surgimento de um fluxo com vorticidade helicoidal no tubo de sucção. Esta excitação manifesta-se na frequência que oscila entre 0,25 a 0,30 vezes a frequência de rotação e produz duas componentes de pulsação de pressão, uma do tipo rotacional e outra do tipo síncrona, Nishi et all (1993). A componente rotacional induz vibrações na estrutura no sentido radial, enquanto que a componente síncrona induz vibrações no sentido axial da máquina.

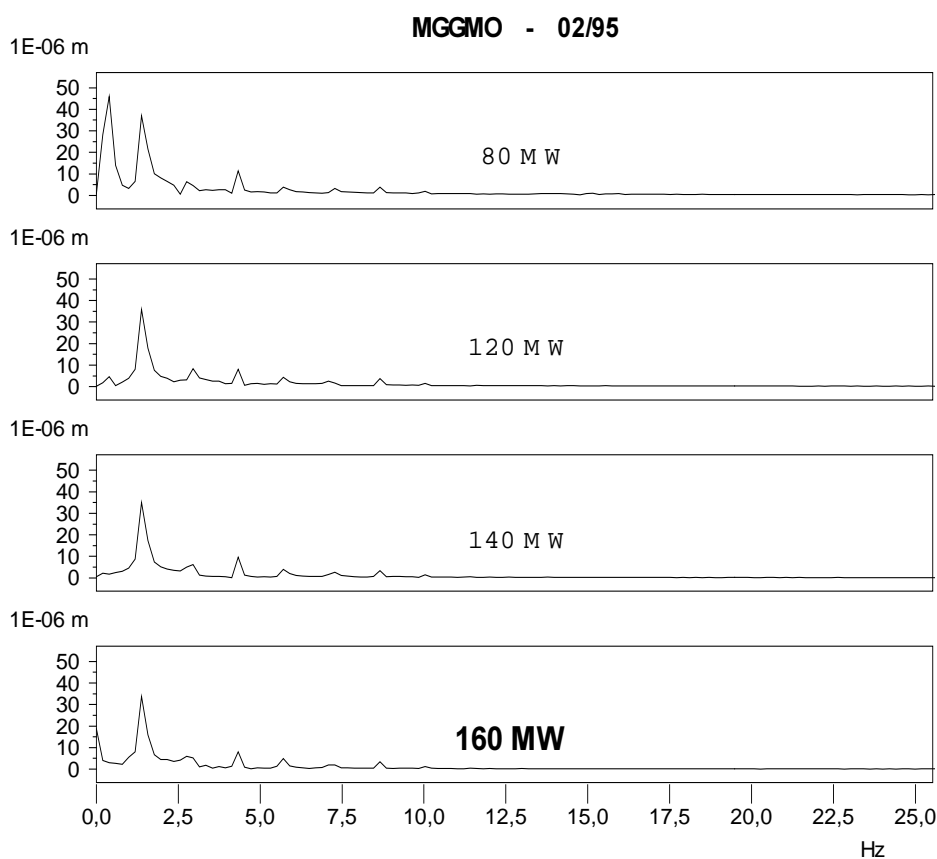


Figura 3 - Comportamento vibratório em função das condições de operação.

Para monitorar a máquina em função do tempo de funcionamento foram realizadas várias medições espaçadas de um certo período de tempo. A “Fig. 4” mostra os resultados destas medições obtidos no mancal guia do gerador na direção montante (MGGMO) com a máquina operando em sua potência nominal (160 MW). Pode-se observar que houve um aumento significativo na amplitude da frequência de rotação da máquina na medição realizada em setembro de 96, indicando um processo mais acelerado de degradação da máquina. Nas medições anteriores a amplitude desta excitação manteve-se praticamente inalterada.

Após a parada da máquina onde se efetuou uma manutenção geral (09/96), verificou-se que a mesma não tinha nenhum problema maior, o problema da UHE – Ilha Solteira continua sendo a cavitação, necessitando a deposição de uma quantidade enorme de eletrodo para a recuperação das pás da turbina. Este problema de cavitação é oriundo principalmente do modo de operação do sistema de geração de energia em função desta usina trabalhar como reguladora do sistema de distribuição.

Os níveis de vibração na frequência de rotação abaixou para 30 μm (0 – pico) que é um valor dentro do estabelecido por Normas para esta classe de máquina, ISO/TC103/SC2 (1994). Os níveis de vibração voltaram a subir já na medição de maio de 1997, mas ainda dentro dos padrões da Norma.

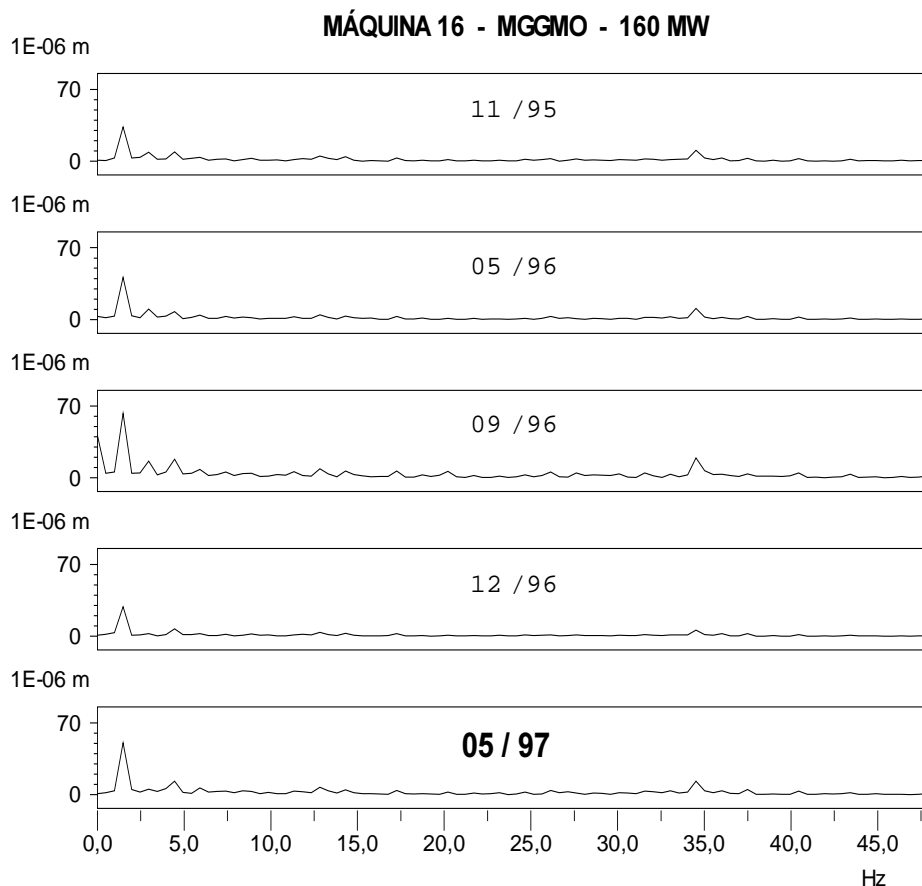


Figura 4 - Comportamento vibratório com o tempo de funcionamento da máquina.

A “Fig. 5” representa a órbita do eixo obtida no mancal do gerador com a medição de setembro de 1996, antes da máquina passar pelo processo de manutenção. Pela sua forma, tudo indica que a amplitude na frequência de rotação seja devido a um ligeiro desbalanceamento do gerador. Evidentemente, este problema manifesta-se com maior intensidade à medida em que as folgas nos mancais aumentam. Observa-se que após o ajuste nas folgas dos mancais, esta amplitude diminuiu bastante, quando novas medições foram realizadas em dezembro de 1996.

Um problema de origem hidráulica foi observado em uma outra máquina idêntica (máquina 12), a qual possui o mesmo projeto que a anterior analisada. Nesta máquina ocorre uma forte excitação devida a um problema de fluxo turbulento (vorticidade) na passagem da água pelo distribuidor e sua interação com a turbina (interação fluido-estrutura). Esta excitação se transmite por toda a máquina e ocorre na frequência de aproximadamente 33 Hz, que corresponde ao número de pás do distribuidor (24) multiplicado pela frequência de rotação. A “Fig. 6” apresenta os espectros indicando este problema que ocorre em todas as condições de funcionamento da máquina.

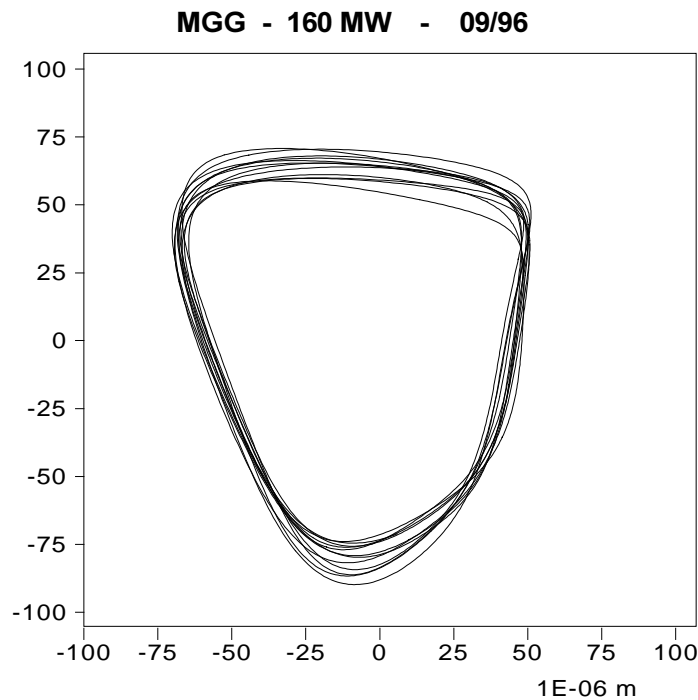


Figura 5 – Órbita do eixo no mancal guia do gerador.

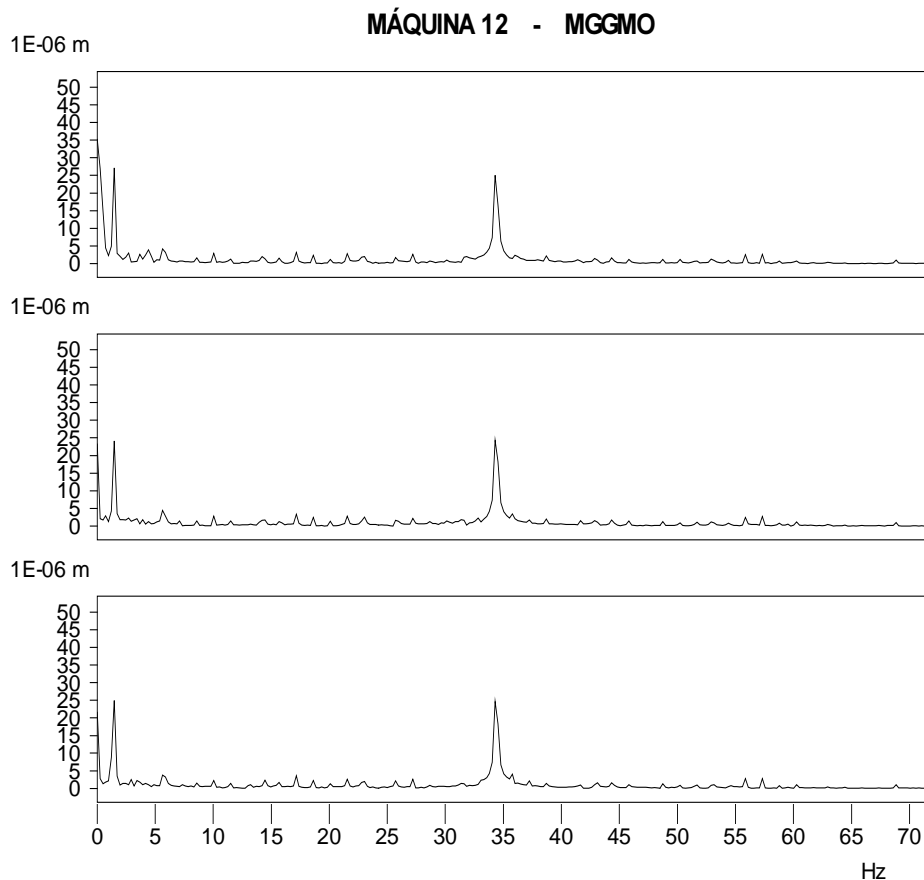


Figura 6 – Espectros indicando problema de origem hidráulica.

4. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos até agora pode-se estimar que o monitoramento dos parâmetros de deslocamento para a UHE – Ilha Solteira é um passo importante para a montagem de um banco de dados que associado ao acompanhamento de outros parâmetros pode produzir um importante sistema de diagnóstico. No caso específico desta central, ressalta-se ainda mais a importância de um controle mais preciso do comportamento vibratório das máquinas, tendo em vista que trata-se de uma usina de ponta, onde as máquinas têm que operar em cargas parciais a grandes períodos de tempo com a finalidade de regular as variações de demanda de energia elétrica diária. Em função desta característica de operação, o conhecimento do comportamento dinâmico de cada unidade geradora em cargas parciais possibilita a escolha do melhor conjunto de máquinas para suprir a demanda, onde este conjunto é o de melhor comportamento dinâmico para cada situação aumentando desta maneira a vida útil da central como um todo.

Observou-se que, em geral, que os níveis de vibração encontram-se dentro de padrões aceitáveis por recomendações de normas para este tipo de máquina, e os trabalhos de monitoramento têm contribuído para que isso venha ocorrendo. Entretanto, os problemas de

origem hidráulica, sobretudo a cavitação têm demandado as grandes preocupações, sendo necessário pesquisas específicas nesta área.

Agradecimentos

A CESP pela autorização de utilização de suas instalações e em especial ao pessoal técnico da UHE – Ilha Solteira.

REFERÊNCIAS

- Arruda, J. R. F. et al, 1982 Condition Monitoring of Large Francis Turbine and Generators on Hydro Power Stations, L'Energia Elettrica, n 10, pp. 331-336.
- Barozzi, A., 1987, Vibrations of Hydro-electric Generating Sets Caused by Hydraulic Phenomena, Electrica, n 12, pp. 25-37.
- Cardinalli, R. et al, 1992, Hydroelectric Machinery - A Nonlinear Model and a Proposed Diagnosis Method, IAHR Symposium, São Paulo, Br.,.
- Egusquiza, E.; Nascimento, L.P., 1993, Systematic Condition Monitoring and Diagnosis of Hydraulic Turbines, IV Conference on Uprating and Refurbishing Hydro Powerplants , Water Power & Dam Construction, Florence, Italy, pp. 179-189.
- Egusquiza, E.; Nascimento, L.P., 1994, "Fault Detection in Hydropower Plants", XIII IMEKO International Congress, Torino, Italy, vol.2, pp.1231-1236.
- ISO/TC103/SC2, 1994, Mechanical Vibration of Non-reciprocating Machines - Measurements on Rotating Shafts and Evaluation – Part 5: Guidelines for Machine Sets in Hydraulic Power Generation and Pump Plants.
- Nascimento, L. P., 1987, Estudos das Forças Excitadoras e da Modelagem Matemática de Máquinas Hidroelétricas, Dissertação de Mestrado, UNICAMP.
- Nascimento, L. P., 1995, Analisis del Comportamiento Vibratorio para el Mantenimiento Predictivo de Grupos Hidráulicos, Doctor Tesis, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona-Espanha.
- Nishi, M.; Okamoto, M.; Wang, X., 1993, Evaluation of Pressure Fluctuations Caused by Cavitated Spiral Vortex Core in the Swirling Flow of Elbow Draft Tube, IAHR Symposium , Lausanne, Switzerland.
- Vladislavlev, L. A., 1979, Vibration of Hydro Units in Hydroelectric Power Plants, Amerind Publ. Co., New Delhi.
- Weber, H.I.; Nascimento, L. P., 1986, Flexural Vibrations of Francis Turbines in Partial Load Operation in: *International Association for Hydraulic Research Symposium*, Montreal, pp. 67/1-67/13.

MONITORING OF THE VIBRATORY BEHAVIOR OF HYDROGENERATORS – A CASE STUDY.

Abstract: *The study of the vibratory behaviour of hydrogenerators has been increased due to trend of a gradual automation of the Hydroelectric Power Plant aiming at reduction*

of people working into the process of production of energy. This means to know the current dynamic parameters of the equipment in order to implement reliable and safety techniques of control and monitoring of their operation conditions. Vibration monitoring has been shown as one of the more adequate technique to be used into this kind machines. This work presents the monitoring of the vibratory behaviour of the hydrogenerators of the UHE-Ilha Solteira/CESP power plant developed in last three years in order to evaluate the deterioration of the machines due to the use. Additionally, it presents the variations of the vibratory behaviour of a machine after a general maintenance of its components.

Keywords: Hydroelectric Machine, Vibration, Fault Detection