

# MONITORAÇÃO DE VIBRAÇÕES NAS LINHAS DE RECIRCULAÇÃO DAS BOMBAS DE ALIMENTAÇÃO DO GERADOR DE VAPOR DA USINA NUCLEAR ANGRA I.

Alfredo José Alvim de Castro, Daniel Kao Sun Ting e William Rego Ferreira\*

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Av. Lineu Prestes 2.242  
05508-000 - Butantã, São Paulo, SP, Brasil

\*Eletronuclear – Divisão de Engenharia  
Rua da Candelária 65 - Centro  
20091-020 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

## RESUMO

A segurança e a confiabilidade são os critérios principais no projeto e operação de uma central nuclear. Contudo, devido ao envelhecimento da planta e de seus componentes, torna-se difícil assegurar que o que foi originalmente construído e qualificado dentro de padrões altamente rígidos seja garantido após alguns anos. Para assegurar segurança, confiabilidade, disponibilidade e capacidade na maioria das centrais nucleares tem sido introduzido o conceito de gerenciamento do envelhecimento através de técnicas de manutenção preditiva. Neste trabalho são apresentadas as assinaturas da monitoração das vibrações das válvulas e dos blocos redutores de pressão da linha de recirculação do sistema de alimentação dos geradores de vapor bem como dos mancais das respectivas bombas. Os dados de vibrações foram adquiridos após a realização de reparos tais como: troca das válvulas originais da linha de recirculação e modificações nos blocos de redução de pressão. Os resultados mostraram que após a realização das manutenções não ocorreram maiores anomalias e as assinaturas obtidas servirão como referência para acompanhar o envelhecimento e a tendência de falhas destas linhas. A monitoração de vibrações em componentes de centrais nucleares está se tornando uma prática crescente como ferramenta para manutenção preditiva.

**Keywords:** vibration , control valves, predictive maintenance , nuclear power plant .

## I. INTRODUÇÃO

As bombas de água de alimentação dos geradores de vapor da usina de Angra I, quando em operação, precisam ter uma vazão mínima de 2.800 gpm. Durante a partida destas bombas (FW1A, FW1B), ou numa condição de baixo fluxo de alimentação de água para os geradores de vapor, suas válvulas de recirculação abrem-se para garantir o fluxo mínimo de proteção às bombas, direcionando o fluxo para os condensadores .

A instalação anterior contava com um bloco de orifícios de redução de pressão, que dissipava 90% da pressão de descarga das bombas de água de alimentação dos geradores de vapor que é igual a 1.400psig ( $\approx$  100 bar), ficando aproximadamente 10% restantes por conta da válvula de recirculação. Por possuírem um "trim" comum e não estarem dimensionadas para dissipar tanta energia, bastavam algumas aberturas / fechamentos para o início de um vazamento crescente através das válvulas de recirculação, desperdiçando uma grande quantidade de energia.

Para solucionar este problema, a Eletronuclear projetou e especificou nova instalação com uma válvula

com um "trim" especial, com 12 estágios internos de redução de pressão, permitindo a dissipação de 70 % da pressão, deixando os 30% restantes por conta do bloco de orifícios.

Na nova instalação, as linhas de recirculação trabalham com 12 estágios internos de quebra de pressão na válvula, mais seis placas de orifícios multi-perfuradas e o dissipador no interior do condensador, totalizando 19 estágios de redução de pressão.

A grande vantagem de se quebrar as pressões em um número maior de estágios, está na redução do fator de cavitação através de cada estágio, na redução das velocidades nas "venas-contractas", reduzindo o desgaste das válvulas e dos blocos conectores com orifícios, a vibração e o ruído acústico.

O objetivo deste trabalho foi adquirir dados de vibrações nas duas válvulas novas e nos blocos de orifícios para a Eletronuclear na partida da nova instalação e criar um banco de dados contendo um "baseline" das características de vibração das válvulas e dos blocos de orifícios.

## II. AQUISIÇÃO DOS DADOS

Para a realização das medidas de vibrações foi utilizado um sistema digital baseado em um computador portátil, uma interface PCMCIA na qual foi instalado e configurado um cartão analógico digital da National Instruments com resolução de 12 bits e frequência de amostragem de 500 MHz, um bloco de conexão da National Instruments e dois acelerômetros piezoelétricos da Bruel&Kjaer com base magnética e seus respectivos amplificadores de carga. Os acelerômetros utilizados são similares e podem trabalhar em temperaturas de até 250 °C possuindo sensibilidade da ordem de 84mV/g e frequência de ressonância de 18kHz, sendo g a aceleração da gravidade. A Fig.1 apresenta um desenho esquemático da aquisição de sinais.

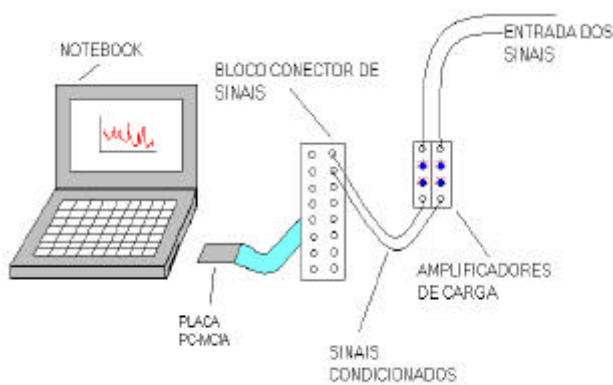


Figura 1. Sistema de Aquisição de Dados.

O programa para a aquisição de dados foi desenvolvido a partir do "software Labview 5.0" da National Instruments. O programa foi configurado para aquisição de até 8 canais multiplexados em modo diferencial. No trabalho realizado utilizou-se 02 canais, correspondentes aos acelerômetros, a uma frequência de amostragem de 2.000 Hz em cada medida.

Para a medida das vibrações nas novas instalações das linhas de recirculação da água de alimentação dos geradores de vapor, os acelerômetros foram instalados na direção vertical por meio de sua base magnética respectivamente na face superior do corpo das válvulas e no flange de entrada do bloco de orifícios, conforme Fig. 2. Desta forma, as medidas tomadas corresponderam a acelerações em direções verticais ao escoamento.

Com o objetivo de obter informações complementares para analisar a influência das bombas FW1A e FW1B nas vibrações das válvulas e dos blocos de orifícios realizou-se medidas nos mancais 1 e 2 nas direções radial horizontal, radial vertical e axial. Os mancais 1 e 2 correspondem respectivamente ao mancal de escora do lado do impelidor e mancal deslizante do lado do acoplamento.

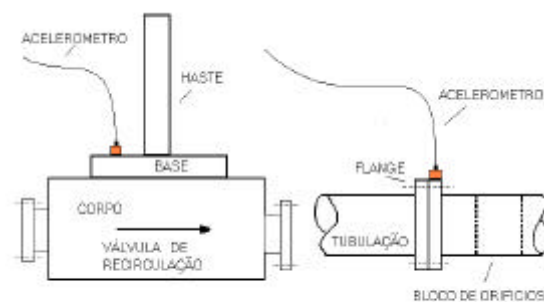


Figura 2. Posicionamento dos Sensores na Válvula de Recirculação e no Bloco de Orifícios.

## III. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para obtenção dos resultados, os dados adquiridos na usina Angra I foram processados com o "software Matlab 5.3" [1] tanto no domínio do tempo como no domínio de frequência.

Numa primeira etapa os arquivos digitais dos sinais gravados foram desdobrados nos diferentes regimes no domínio temporal como transiente de partida, transiente de desligamento e regime estacionário. Estes dados foram convertidos para valores de aceleração em unidades de gravidade [g] através dos fatores de sensibilidade e de amplificação dos sensores, gerando-se com isto um banco de dados com 11 condições experimentais.

Numa segunda etapa realizou-se a integração dos valores de aceleração para análise dos dados no campo de velocidade [mm/s] [2]. Para a integração numérica foi utilizado o método do trapézio e um filtro digital passa alta com corte em 3 Hz.

Para análise dos resultados no domínio temporal calculou-se valores estatísticos como rms, picos máximos e mínimos, terceiro momento ("skewness") e quarto momento ("kurtosis") tanto para o sinal original de aceleração como para o sinal de velocidade obtido por meio de integração e filtragem.

O valor rms ou valor eficaz de um sinal é definido como a raiz quadrada do momento de segunda ordem:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (1)$$

onde x(t) é o sinal ao longo do tempo, T o tempo, x<sub>i</sub> o sinal digitalizado e N corresponde ao número total de pontos digitalizados do sinal.

Toda aparição de um defeito se traduz por um aumento do nível vibratório da máquina ou de um equipamento [3]. Desta forma o valor rms de um parâmetro de vibração (deslocamento, velocidade, aceleração) de uma máquina ou equipamento é utilizado para detecção da presença de anomalias. Este valor pode então ser comparado com valores normalizados ou com os valores obtidos anteriormente nas mesmas condições de medida de maneira a construir uma curva de tendência.

O "skewness" dos dados nos dá o terceiro momento da distribuição em relação a origem sendo definido por:

$$S = \frac{m_3}{s^3} = \frac{1}{N \cdot s^3} \sum_{i=1}^N [x_i - m]^3 \quad (2)$$

onde m significa o primeiro momento da distribuição ou o valor médio do sinal,  $m_3$  terceiro momento da distribuição e  $\sigma$  o desvio padrão.

Um valor negativo para o "skewness" significa que a distribuição dos dados da amostra (sinal gravado) está desviada para a esquerda e valor positivo, desvio para a direita. Quanto melhor distribuído os dados em uma curva gaussiana, mais próximo de zero se torna o "skewness".

A "kurtosis" é calculada através do quarto momento da amostra em relação a origem e é utilizada para definir pontos espúrios na distribuição. A "kurtosis" é definida através da Eq.(3):

$$K = \frac{m_4}{s^4} = \frac{1}{N \cdot s^4} \sum_{i=1}^N (x_i - m)^4 \quad (3)$$

onde  $m_4$  representa o quarto momento da distribuição.

Um conjunto de dados com uma distribuição estatística normal(gaussiana) possui "kurtosis" da ordem do valor 3.

Convém observar que os parâmetros S e K são adimensionais e servem para quantificar a assimetria e o achatamento da distribuição do sinal que podem estar estatisticamente associado a falhas.

A análise no domínio da frequência é realizada através do cálculo da função densidade de potência espectral (PSD) para os sinais de aceleração e de velocidade dos equipamentos e da função coerência entre os sinais de aceleração.

A função PSD de um sinal estacionário randômico (ergódico) representa a distribuição de energia nas diferentes frequências e pode ser calculada pela transformada de fourier da função de autocorrelação. A função de autocorrelação nos mostra como um sinal se correlaciona consigo mesmo no domínio do tempo através da introdução de tempos de atraso no sinal e do cálculo da correlação entre os sinais com atraso de tempo e o sinal original. As Equações 4 e 5 nos mostram as expressões de cálculo para a Autocorrelação e o PSD.

$$R_{XX}(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot x_i(t-t) \quad (4)$$

$$P_{XX}(w) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{XX}(m) e^{-jwm} \quad (5)$$

onde  $w = 2\pi \cdot f$  representa a frequência angular e f a frequência em Hz.

Para cálculo do PSD com o Matlab 5.3 foi utilizada a função numérica psd baseada no método de Welch considerando arquivos de sinais digitais com 30.000 pontos, transformada de fourier com 2048 pontos, frequência de amostragem= 2000Hz, janelas de apodisação de 2048 pontos e sobreposição de janelas em 1024 pontos.

A função coerência é utilizada como uma medida normalizada de similaridade entre dois sinais. Se os dois sinais possuem a mesma informação para uma determinada frequência, a coerência para esta frequência é igual a 1. Se os dois sinais são totalmente independentes um do outro, então a coerência entre os dois é nula. Para calculá-la precisamos conhecer a densidade espectral de potência dos sinais e da correlação cruzada. As Equações 6, 7 e 8 nos mostram as expressões matemáticas para cálculo da correlação cruzada, densidade espectral da correlação cruzada e a coerência.

$$R_{XY}(t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i(t) \cdot y_i(t-t) \quad (6)$$

$$P_{XY}(w) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} R_{XY}(m) e^{-jwm} \quad (7)$$

$$g_{XY}(w) = \frac{|P_{XY}(w)|^2}{P_{XX}(w) \cdot P_{YY}(w)} \quad (8)$$

Para cálculo da coerência com o Matlab 5.3 foi utilizada a função numérica cohere com as mesmas considerações de cálculo citadas para a função numérica psd.

#### IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As Tabelas 1, 2 e 3 apresentam os valores rms, "skewness" e "kurtosis" das acelerações e velocidades obtidas nas válvulas de recirculação, blocos de orifícios e mancais 1 e 2 das bombas respectivas as linhas A e B, Bombas FW1A e FW1B.

Observando as Tabelas 1 e 2, verificamos que os níveis máximo de  $Acel_{RMS}$  ocorreram quando da medida inicial na linha B, respectivamente 0,13g e 0,31g para a válvula de recirculação e para o bloco de orifícios. Nesta ocasião a Divisão de Engenharia e de Manutenção da Usina de Angra I se deu conta de problemas com o eixo da bomba FW1B. Após providências de reparo da bomba FW1B executou-se uma segunda etapa de medidas com a linha de recirculação B, cujos valores de  $Acel_{RMS}$  caíram para valores bem inferiores, principalmente no bloco de orifícios (0,08g), mostrando que a falha no eixo da bomba gerou excitação em toda a linha B.

Com relação ao "Skewness" e a "Kurtosis" podemos afirmar, que após o reparo da bomba FW1B, eles apresentaram valores mais próximos de uma distribuição estatisticamente bem comportada para a válvula e o bloco de orifícios da linha B de recirculação.

Para efeitos de comparações com a medidas realizadas nos mancais das bombas FW1A e FW1B utilizamos a norma ISO2372 [4], "Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200rev/s". Assumindo o grupo G, que é válido para grandes máquinas com fundação bastante rígida e pesada cuja frequência natural excede a rotação da máquina e cuja potência é maior que 75 kW, podemos verificar diferentes faixas de

limites para as velocidades rms em mm/s denotando as seguintes condições de vibrações:

-Boa	0 a 1,8 mm/s rms
-Permitida	1,8 a 4,5 mm/s rms
-Tolerável	4,5 a 11,2 mm/s rms
-Não permitida	> 11,2 mm/s rms

Segundo a norma ISO2372, os valores de velocidade rms obtidos nestes mancais, Tabela 3, estão dentro das condições Boa e Permitida.

Interessante se observar que as maiores acelerações e velocidades nas bombas das linhas A e B ocorreram no mancal 2, mancal próximo à transmissão entre o motor elétrico e a bomba. Essa transmissão ocorre por meio de um sistema de engrenagens.

Da Tabela 3 o leitor também pode observar os valores estatísticos do "skewness" e da "kurtosis" para a aceleração medida e a velocidade calculada numericamente. Os dados de "skewness" nos mostram valores bem próximos de zero nos casos das  $Acel_{RMS}$  dos mancais da bomba FW1A do que para os mancais da bomba FW1B, mostrando que a distribuição estatística dos dados  $Acel_{RMS}$  de FW1A se aproxima mais de uma curva gaussiana do que os da bomba FW1B. Após a integração e filtragem para obtenção dos valores de  $Vel_{RMS}$ , os valores de "skewness" se aproximam bastante de zero para ambas as bombas, FW1A e FW1B. Também se observa a ocorrência de "kurtosis" em torno de 3 para a  $Acel_{RMS}$  da bomba FW1A e um pouco menores que 3 para as  $Acel_{RMS}$  da bomba FW1B. Após a integração e filtragem para obtenção dos valores de  $Vel_{RMS}$ , os valores de "kurtosis" se aproximam bastante de 3 para ambas as bombas, FW1A e FW1B.

Num estudo futuro, os dados dos regimes estacionários podem ser melhor trabalhados para tentar relacionar falhas com o aumento da "kurtosis" e para a exclusão dos pontos espúrios da distribuição.

TABELA 1. Valores RMS das Acelerações e Velocidades nas Válvulas das Linhas de Recirculação A e B

	linha A	linha B	linha B após reparo FW1B
$Acel_{rms}$ [g]	0,11	0,13	0,05
$Acel_{skew}$	0,02	0,03	0,03
$Acel_{Kurt}$	6,29	7,34	3,17
$Vel_{rms}$ [mm/s]	2,7	3,3	0,8
$Vel_{skew}$	0,05	-0,20	-0,09
$Vel_{Kurt}$	3,11	2,86	2,71

TABELA 2. Valores RMS das Acelerações e Velocidades nos Blocos de Orifícios das Linhas A e B

	linha A a frio	linha B a frio	linha B a quente
$Acel_{rms}$ [g]	0,09	0,31	0,08
$Acel_{skew}$	0,20	0,16	0,09
$Acel_{Kurt}$	6,66	4,63	2,89
$Vel_{rms}$ [mm/s]	2,10	7,90	2,10
$Vel_{skew}$	0,23	-0,14	0,04
$Vel_{Kurt}$	3,01	2,81	2,84

TABELA 3. Valores RMS das Acelerações e Velocidades nos Mancais das Bombas das Linhas A e B

Posição	Mancal 1 A			Mancal 2 A		
	Vert.	Axial	Horiz.	Vert.	Axial	Horiz.
$Acel_{RMS}$ [g]	0,08	0,10	0,08	0,18	0,22	0,19
$Acel_{SKEW}$	-0,09	0,01	0,05	-0,03	0,00	0,04
$Acel_{KURT}$	3,04	3,04	2,89	3,19	2,36	2,81
$Vel_{RMS}$ mm/s	1,1	1,6	1,6	3,3	2,0	3,5
$Vel_{SKEW}$	0,06	-0,01	0,14	0,10	-0,09	0,01
$Vel_{KURT}$	2,84	2,79	2,93	2,73	2,80	2,84
Posição	Mancal 1 B após reparo FW1B			Mancal 2 B após reparo FW1B		
	Vert.	Axial	Horiz.	Vert.	Horiz.	
$Acel_{RMS}$ [g]	0,10	0,14	0,05	0,17	0,19	
$Acel_{SKEW}$	0,36	0,16	0,13	0,22	-0,35	
$Acel_{KURT}$	2,90	2,78	2,91	2,41	2,25	
$Vel_{RMS}$ [mm/s]	1,6	1,3	0,9	2,4	1,6	
$Vel_{SKEW}$	0,01	0,13	0,00	0,04	0,03	
$Vel_{KURT}$	2,86	2,98	3,03	2,88	2,93	

As Figs. 3 e 4 apresentam respectivamente os gráficos de PSD da aceleração para a válvula e bloco de orifícios linha A e da aceleração para a válvula e bloco de orifícios linha B após reparo da bomba FW1B. No caso da Fig.4 é apresentada também a Coerência entre os sinais de aceleração.

As Figs. 5 e 6 apresentam respectivamente os gráficos de PSD das acelerações para o mancal 2 da bomba FW1A direções vertical/axial estacionário a quente e mancal 2 bomba FW1B direções vertical / horizontal após reparo.

As Figs. 3, 4, 5 e 6 mostram gráficos de "Power Spectral Density- PSD " no domínio da frequência com picos bem determinados, isto é assinatura dos equipamentos nos diferentes casos medidos. Através do conhecimento das frequências destes picos e de suas intensidades podemos tentar caracterizar o fenômeno que está ocorrendo no equipamento e excitando o mesmo à vibrações.

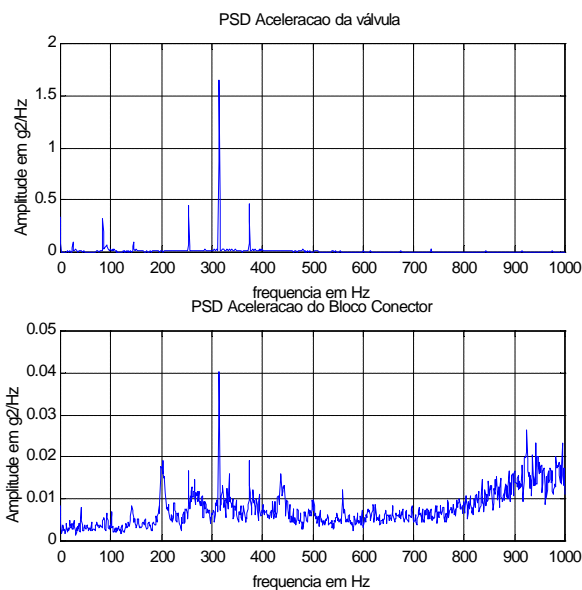


Figura 3. Funções PSD para a Válvula e o Bloco de Orifícios da Linha de Recirculação A .

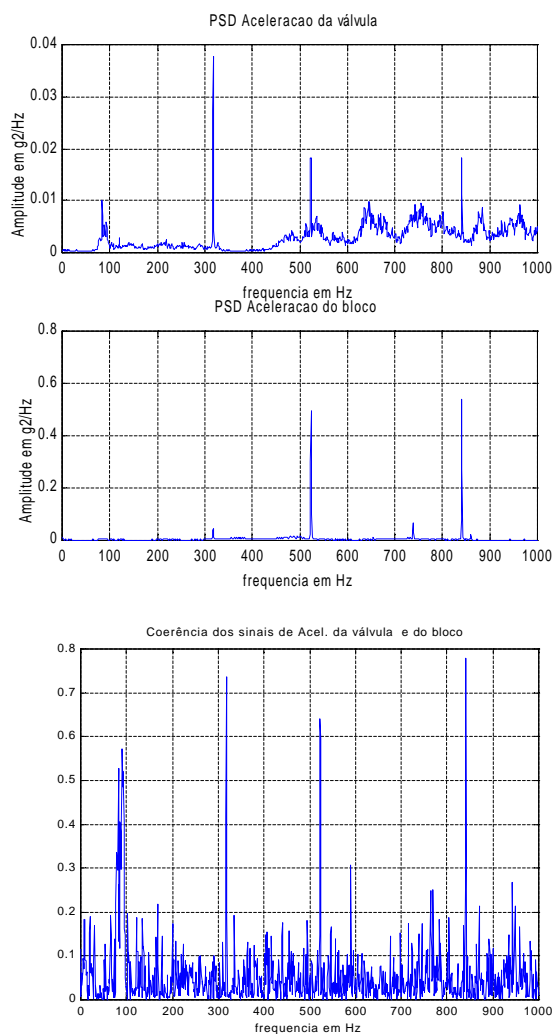


Figura 4. Funções PSD e Coerência para a Válvula e o Bloco de Orifícios da Linha de Recirculação B após reparo da Bomba FW1B .

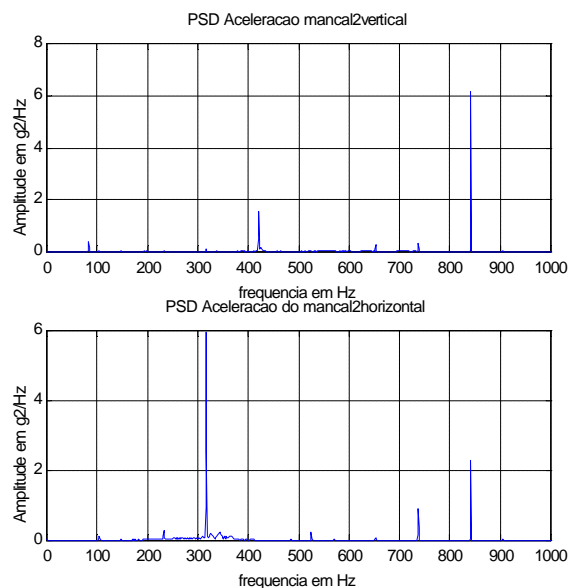


Figura 5. Funções PSD para o Mancais 2 da Bomba FW1A Direções Vertical e Axial.

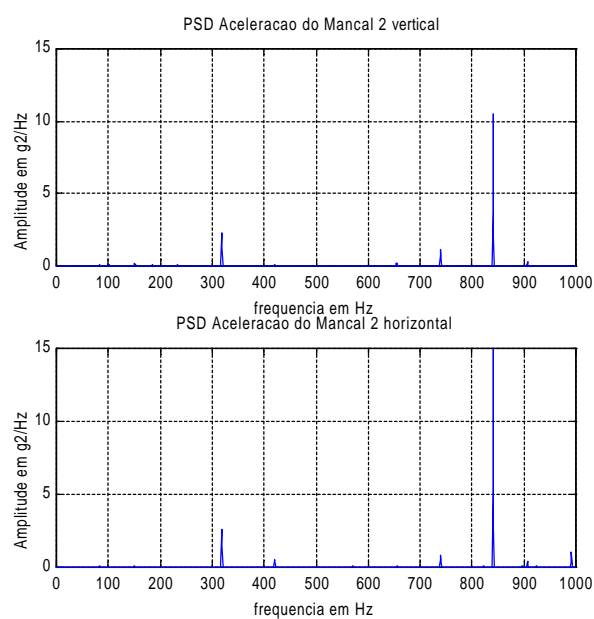


Figura 6. Funções PSD para o Mancais 2 da Bomba FW1B(após reparo) Direções Vertical e Horizontal.

Nas Figuras apresentadas, principalmente PSD de mancais e das válvulas, verificamos a ocorrência da frequência fundamental de 84 Hz e suas harmônicas, predominantemente a de quinta ordem (5 vezes=420 Hz) e de décima ordem (10 vezes=840 Hz). A excitação na frequência de 84 Hz e suas harmônicas se deve a rotação do impelidor da bomba em torno de 5020 rpm, mostrando a influência da rotação da bomba na excitação da válvula de recirculação e do bloco de orifícios através do escoamento. As harmônicas de quinta e décima ordem são amplificadas devido ao número de pás do impelidor ser igual a 5 .

No caso da linha A observamos a ocorrência do pico de maior intensidade na frequência característica de 314 Hz. Ele surge tanto para a válvula como para o bloco de orifícios e principalmente nas direções horizontais dos mancais 1 e 2. Para a válvula e os mancais surge um outro

par de picos com distância de 60 Hz ao pico de 314 Hz, 254 e 374 Hz , sendo que o pico de 254 Hz corresponde ao terceiro harmônico da rotação da bomba FW1A. A frequência de 314 Hz tem sua origem no sistema de engrenagens de transmissão da bomba , o qual é próximo ao mancal 2.

Da Linha A, Fig.3, podemos também citar que existem várias picos de banda larga com frequências não bem definidas que estão relacionadas ao bloco de orifícios, da mesma forma observamos que o nível de ruídos aumenta com o crescimento da frequência. Estas frequências estão ligadas à estrutura dos equipamentos e a fenômenos termohidráulicos (cavitações, “venas contractas” , vórtices, ressonâncias do fluido,etc..) que ocorrem nos equipamentos.

Das Figs. 4 e 6 podemos observar que as excitações principais na linha B ocorrem nas frequências 84, 314 , 521 e no décimo harmônico da rotação da bomba , 840 Hz , sendo que a origem principal da excitação à 840 Hz se dá através do mancal 2. O gráfico de coerência entre os sinais da válvula e do bloco de orifícios constata este fato através dos altos valores para estas frequências.

Como já descrito anteriormente a frequência de 314 Hz tem como fonte de origem o sistema de transmissão da própria bomba. A frequência de 521Hz surge com grande intensidade tanto na válvula como no bloco conector tendo sua origem no mancal 1 da bomba B e estando relacionada com o sistema de resfriamento do selo mecânico da bomba FW1B.

## V. CONCLUSÕES

O trabalho realizado permitiu a montagem do "baseline" de vibrações das válvulas de recirculação e dos blocos de orifícios das Linha A e B de recirculação dos geradores de vapor de Angra 1 através do levantamento das acelerações e cálculo dos níveis rms e das assinaturas de vibrações através da densidade espectral de potência (PSD) . De posse destes resultados, a Eletronuclear poderá planejar a monitoração periódica destas vibrações para acompanhar a sua evolução e a tendência de falhas nas novas linhas de recirculação.

Como observação geral podemos citar que os níveis de aceleração medidos nas válvulas e nos blocos de orifícios são inferiores a 0.15 g (  $\approx 1,5 \text{ m/s}^2$ ) e também que os valores obtidos para os mancais estão dentro das condições Boa e Permitida definidos pela norma ISO2372 e que a maior parte dos picos que surgem nas assinaturas espectrais das válvulas e dos blocos de orifícios são induzidas pelo escoamento e por problemas de transmissão na bomba.

## REFERÊNCIAS

- [1] Mathworks Inc., **Signal Processing Toolbox - User's Guide**, Mathworks Inc, Natick , 263pp., 1998.
- [2] Constantinides, A., **Applied Numerical Methods with Personal Computers** , McGraw Hill , New York , 626pp, 1987.
- [3] Wovk , V., **Machinery Vibration - Measurement and Analysis** , McGraw Hill Inc. , New York , 358pp, 1991.
- [4] ISO 2372, **Mechanical vibration of machines with operating speeds from 10 to 200 rev/s**, 19pp, 1974.

## ABSTRACT

The safety and reliability are the primary criteria in the design and operation of a nuclear power plant. However, due to the aging of the plant and its components, it is difficult to assure that what was originally built and qualified under strict standards is still guaranteed. In order to assure safety, reliability, availability and capacity, aging management through predictive maintenance techniques are being introduced in most plants around the world.

In this present work, the monitoring of the vibrations signatures at the Angra I nuclear power plant steam generators feedwater systems main components such as the main feedwater pumps, pressure breaker blocks and the by pass valves, is presented. The vibration data was acquired, afterwards some major repairs were performed and during the startup commissioning procedures. Some of the major repairs performed are: changing of one pump shaft with balancing and alignment, replacement of the original bypass control valves by new disk stack type pneumatic control valves.

The results show that no major vibrations anomaly is present after the maintenance indicating adequacy of the repairs made. The monitoring of the vibration in nuclear power plant components is being increasingly used as a tool for predictive maintenance.