

## **AJUSTE DE MODELOS SIMPLIFICADOS DE HIDROGERADORES USANDO SÉRIES TEMPORAIS DE VIBRAÇÃO E ALGORITMOS GENÉTICOS**

**Sidney Bruce Shiki, sbshiki@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Felipe Franzoni, felipe.franzoni2@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Samuel da Silva, sam.silva13@gmail.com<sup>1</sup>**  
**Geraldo Carvalho Brito Jr, gcbrito@itaipu.gov.br<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Centro de Engenharias e Ciências Exatas (CECE), Av. Tancredo Neves, n.º 6731, Parque Tecnológico Itaipu (PTI), CEP 85856-970, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

<sup>2</sup>Itaipu Binacional, Av. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguaçu, PR, Brasil.

**Resumo:** A modelagem matemática do comportamento dinâmico das unidades geradoras da usina hidrelétrica Itaipu Binacional é de fundamental importância estratégica. Neste sentido, este trabalho propõe um processo de ajuste de parâmetros em um modelo dinâmico simplificado com dois graus de liberdade. Neste modelo se assume que os componentes elásticos são os valores nominais de projeto e estão sujeitos a incertezas nos valores reais de parâmetros equivalentes de rigidez em mancais, rigidez magnética, filmes de óleos, guias, entre outros. O primeiro passo deste método é usar os dados reais de vibração radial dos mancais medidos em uma das unidades geradoras para identificação das frequências naturais do sistema usando um modelo auto-regressivo com média móvel (ARMA). Após identificar estas frequências naturais com os dados reais, uma função objetivo baseada em um resíduo entre estes valores e as frequências calculadas analiticamente com o modelo a ajustar é implementada. Um algoritmo genético é empregado para minimizar este resíduo de forma iterativa em função dos parâmetros desconhecidos do modelo. Diversas simulações mostram a capacidade do ajuste de parâmetros deste modelo visando torna-lo representativo do comportamento real da máquina e para que possa ser usado em aplicações futuras de prognóstico.

**Palavras-chave:** ajuste de modelos, hidrogeradores, modelo ARMA, séries temporais de vibração.

### **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente a Usina Hidroelétrica de Itaipu possui 20 unidades geradoras de cerca de 700 MW cada, desempenhando função estratégica, visto que é responsável pelo fornecimento de 95% da energia elétrica consumida no Paraguai e mais de 20% da demanda brasileira (Brito Jr, 2005). Sendo assim, a detecção, o diagnóstico e a previsão de defeitos nos hidrogeradores de Itaipu são de grande importância para a manutenção da capacidade de produção da usina e, conseqüentemente, para o sistema elétrico de ambos os países.

Desse modo, a utilização de modelos matemáticos representativos do comportamento dinâmico dos hidrogeradores é essencial, visto que sua utilização possibilitaria maior controle da integridade estrutural dessas máquinas. No entanto, quando as previsões de modelos analíticos são comparadas com resultados experimentais, frequentemente se descobre que o grau de correlação entre ambos é insuficiente para permitir a aplicação do modelo com confiança (Mottershead e Friswell, 1993). Conseqüentemente, técnicas de ajuste de modelos tem sido empregadas com o intuito de minimizar as diferenças entre o modelo analítico e os respectivos resultados experimentais.

Em vários trabalhos as técnicas de ajuste de modelos têm sido aplicadas com diferentes objetivos. Em Pereira (1996) é proposta uma metodologia para detecção de defeitos em estruturas mecânicas. Esse método cria um modelo de elementos finitos como referência da estrutura sem dano e, por meio do ajuste baseado na correlação entre funções de resposta em frequência, detecta mudanças nas características dinâmicas da estrutura medidas durante sua operação. Kim e Park (2004) discute a necessidade de se tratar o problema de ajuste de modelo como um problema de otimização multiobjetivo, além de enfatizar sobre a importância de se selecionar adequadamente os parâmetros de ajuste. Além disso, este trabalho propõe um algoritmo genético baseado no conceito de grupo Pareto-Ótimo para aplicação no ajuste do modelo de uma placa simples. Em Zivanovic *et al* (2007) é feita uma descrição completa da modelagem por elementos finitos da ponte Podgorica em Montenegro, seguida de um processo de ajuste do modelo. O autor discute sobre a necessidade, em sua aplicação, de um ajuste manual do modelo matemático antes do procedimento propriamente dito, o que melhorou significativamente a correlação entre o modelo analítico e os dados experimentais.

Também foi utilizada uma análise baseada na sensibilidade das respostas dinâmicas para decidir quais os parâmetros a serem utilizados no processo de correção do modelo de elementos finitos.

No presente trabalho é feito o ajuste de um modelo simplificado com dois graus de liberdade representativo da dinâmica da unidade geradora 09A da usina de Itaipu proposto por Brito Jr *et al* (2007). Um modelo auto-regressivo com média móvel (ARMA) é usado para identificar as frequências naturais da máquina a partir dos dados reais de vibração medidos nos mancais de uma das unidades geradoras. Os parâmetros mais sensíveis do modelo são ajustados visando aproximar os valores das frequências naturais com os valores identificados experimentalmente. O problema inverso tratado é solucionado com o uso de análise de sensibilidade e algoritmos genéticos. Todos os passos necessários são apresentados neste artigo.

## 2. MODELO SIMPLIFICADO DA UNIDADE GERADORA

Conforme Brito *et al* (2007) a unidade geradora 09A foi modelada para permitir a análise do comportamento dinâmico dessa máquina rotativa. Este modelo pode ser bem representado com dois graus de liberdade no plano, o deslocamento radial ( $x(t)$ ) e o deslocamento angular ( $\theta(t)$ ) como mostrados na Fig. (1).

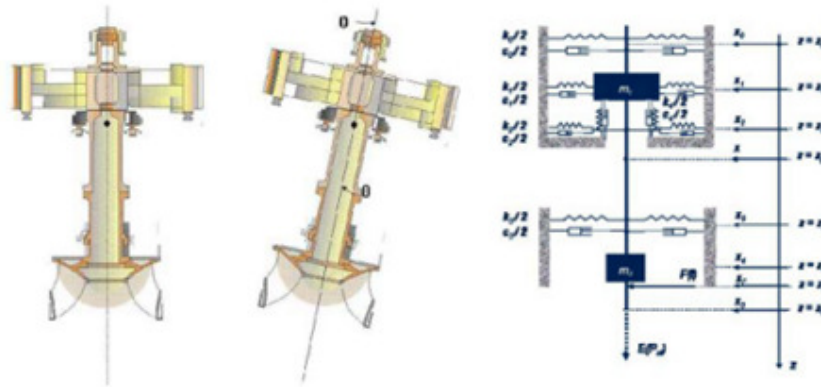


Figura 1. Detalhe dos graus de liberdade da máquina e seu modelo físico.

O modelo matemático correspondente, desconsiderando o amortecimento pode ser descrito por:

$$\begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}(t) \\ \ddot{\theta}(t) \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x(t) \\ \theta(t) \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F(t) \\ -Z_{FG} F(t) \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Os parâmetros inerciais na Eq. (1) são fornecidos por:

$$m_{11} = m_{Total} = 2780ton \quad m_{12} = m_{21} = 0 \quad m_{22} = J = 1,36 \times 10^8 kg \cdot m^2$$

sendo  $m_{Total}$  a massa total da máquina composta pela massa do rotor da turbina incluindo a água e a massa do rotor do gerador e  $J$  é o momento de inércia relativo ao centro de massa. Os parâmetros de rigidez são mostrados nas equações abaixo:

$$k_{11} = k_0 + k_1 + k_2 + k_3 \quad (2)$$

$$k_{12} = -k_0 Z_{0g} - k_1 Z_{1g} - k_2 Z_{2g} - k_3 Z_{3g} \quad (3)$$

$$k_{21} = -k_0 Z_{0g} - k_1 Z_{1g} - k_2 Z_{2g} - k_3 Z_{3g} \quad (4)$$

$$k_{22} = k_0 Z_{0g}^2 + k_1 Z_{1g}^2 + k_2 Z_{2g}^2 - k_3 Z_{3g}^2 + k_5 R^2 \quad (5)$$

sendo  $k_0 = 0,83 \times 10^9$  N/m a rigidez radial do mancal guia superior do gerador,  $k_1 = -0,6 \times 10^9$  N/m a rigidez radial magnética do entreferro do gerador,  $k_2 = 1,25 \times 10^9$  N/m a rigidez radial do mancal guia combinado do gerador,  $k_3 = 1,43 \times 10^9$  N/m a rigidez radial do mancal guia da turbina,  $k_5 = 32,0 \times 10^9$  N/m a rigidez axial do mancal de escora,  $z_{0g} = 7,8$  m,  $z_{1g} = 4,8$  m,  $z_{2g} = 2,8$  m,  $z_{3g} = -5,7$  m são distâncias relativas ao centro de massa, e  $R = 2,1125$  m é o raio de

circunferência do ponto de pivotamento das sapatas do mancal de escora. Estes parâmetros foram obtidos por testes e valores nominais e estão sujeitos a incertezas.

Obviamente este modelo tem várias simplificações. O modelo não leva em conta o comportamento não-linear dos coeficientes dinâmicos de filmes de óleo dos mancais guia, assim como os efeitos dinâmicos dos labirintos da turbina. Outra grande simplificação é considerar que a unidade geradora oscila em um plano. É também uma simplificação considerável desconsiderar a rigidez axial, a qual é, em geral, muito maior que a rigidez dos mancais para este tipo de máquina. Finalmente, a flexibilidade axial também não é considerada. Este modelo, apesar de simplificado têm se mostrado útil para uma primeira análise e monitoramento das condições dessas máquinas rotativas. Em Silva e Brito Jr (2009) é mostrado um método de detecção de danos baseado no modelo ARMA e no controle estatístico de processos (SPC), utilizando o modelo matemático simplificado da unidade geradora para simulação de vibrações radiais.

### 3. MODELO ARMA

Cada conjunto de medidas amostradas da vibração radial do mancal  $g_i(k)$  representa as séries temporais correspondentes a  $m$  posições de medidas e  $n$  instantes discretos de tempo. Cada série temporal  $g_i(k)$  é normalizada para remover tendências Eq. (6) (Wirsching *et al.*, 1995):

$$x_i(k) = \frac{g_i(k) - \mu(g_i)}{\sigma(g_i)} \quad (6)$$

sendo  $x_i(k)$  é o sinal com média nula e desvio padrão unitário,  $g_i(k)$  é o sinal amostrado e  $\mu(g_i)$  e  $\sigma(g_i)$  são os operadores média e desvio padrão, respectivamente. Com o objetivo de melhorar a resolução em frequência em uma banda baixa, uma operação de decimação adequada pode ser implementada (Diniz *et al.*, 2004).

Um modelo auto-regressivo com média móvel (ARMA) é construído a partir de um sinal amostrado (Ljung, 1998):

$$A(q^{-1})x(k) = C(q^{-1})e(k) \quad (7)$$

sendo  $e(k)$  o erro entre os sinais medidos e a saída do modelo ARMA. Os polinômios no operador de atraso  $q^{-1}$ ,  $A(q^{-1})$  e  $C(q^{-1})$ , são apresentados na Eq. (8):

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} \\ C(q^{-1}) &= 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} \end{aligned} \quad (8)$$

sendo  $na$  e  $nc$  as ordem de atrasos dos polinômios. A escolha de tais ordens é crucial para a predição e ajuste do modelo ARMA. Neste trabalho usa-se o critério de informações de Akaike como índice para avaliar as ordens mais adequadas segundo tal critério (Aguirre, 2007). Na estimação dos polinômios de atraso da Eq. (8) pode utilizar diversos métodos, a grande maioria são variações do método dos mínimos quadrados e podem ser encontrados em Aguirre (2007), muitos destes encontram-se implementados em pacotes disponíveis em softwares como o Matlab® e Scilab®.

Para validar o modelo, dois métodos podem ser utilizados, o primeiro consiste na comparação direta entre os resultados do modelo e os dados amostrados. O segundo consiste em uma análise de resíduos através da função de correlação cruzada (FCC) entre os resíduos e o sinal de saída. Para ambos os testes usam-se dados diferentes dos utilizados na obtenção do modelo.

As raízes dos polinômios  $A(q^{-1})$  estão diretamente relacionados com as frequências naturais e fatores de amortecimento de um sistema linear, pois são os pólos discretos da função de transferência. Os pólos discretos  $z$  devem ser convertidos para o domínio contínuo  $s$  (Laplace) através de um procedimento de mapeamento, como a transformação bilinear (Diniz *et al.*, 2004) para serem relacionados com os parâmetros modais. A relação entre os pólos contínuos e os parâmetros modais de frequências naturais e fatores de amortecimento pode ser descrita por:

$$s_n = -\zeta_n \omega_n \pm \omega_n \sqrt{1 - \zeta_n^2} j \quad (9)$$

sendo  $s_n$  os pólos contínuos da função de transferência,  $\zeta_n$  os fatores de amortecimento,  $\omega_n$  as frequências naturais e  $j$  é o número complexo.

### 4. AJUSTE DE MODELOS

Um tipo de problema frequentemente encontrado na engenharia é chamado problema inverso, onde o modelo de um determinado sistema deve ser construído ou refinado, dado informações de saída ou entrada do sistema (Mottershead e Friswell, 1993). Várias atividades na engenharia podem ser consideradas problemas inversos: ajuste de modelos, análise modal experimental, estimação de parâmetros, identificação de danos, identificação de forças de entrada, etc.

No problema de ajuste de modelos procura-se corrigir as diferenças encontradas entre um modelo analítico e as respostas dinâmicas medidas em ensaios de vibração feitos em uma estrutura. O procedimento geral deste método é mostrado no fluxograma da Fig. (2).

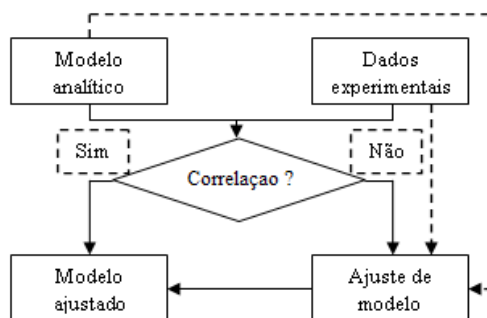


Figura 2. Fluxograma do processo de ajuste de modelos.

As diferenças encontradas no modelo analítico podem ser originadas de várias fontes como (Steffen Jr e Rade, 2005):

- Simplificações adotadas na modelagem;
- Dificuldade na modelagem de efeitos dissipativos (amortecimento);
- Erros de discretização;
- Erros de origem numérica originados durante a solução da equação do movimento;
- Incertezas nos valores de alguns parâmetros devido à dificuldade de determinar com precisão algumas propriedades físicas e geométricas (soldas, juntas, entre outras).

A literatura diferencia os métodos de ajuste de modelo em duas classes: os métodos diretos e os iterativos ou paramétricos (Zivanovic *et al*, 2006). A primeira classe faz ajustes diretamente nas matrizes de massa e rigidez do modelo, de modo que as alterações resultantes desse processo carecem de significado físico. A segunda classe, de métodos iterativos, concentra-se no ajuste dos parâmetros físicos que indiretamente modificam as matrizes de massa e rigidez. Apesar de serem computacionalmente mais custosos, os métodos iterativos são mais utilizados devido à característica de que as correções feitas no modelo podem ter uma melhor interpretação física.

## 5. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

As matrizes de massa, amortecimento e rigidez contêm toda informação a respeito das características físicas e geométricas da estrutura modelada (Steffen Jr e Rade, 2005). No entanto, uma importante informação para o processo de ajuste de modelo é o quanto seu comportamento dinâmico varia como resultado de alterações em suas propriedades físicas e geométricas. Sendo assim, a análise de sensibilidade procura estabelecer as relações entre as respostas dinâmicas e a variação de determinados parâmetros estruturais. Do ponto de vista matemático, o procedimento relativo a essa análise corresponde a calcular as derivadas parciais das respostas do modelo em relação aos parâmetros de ajuste. Desse modo, a sensibilidade das respostas dinâmicas  $\mathbf{r}$  em relação a um determinado parâmetro  $p_i$ , avaliado para certo valor  $p_i = p_i^0$  é definida por:

$$\left. \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial p_i} \right|_{p_i^0} = \lim_{\Delta p_i \rightarrow 0} \frac{\mathbf{r}(M(p_i^0 + \Delta p_i), C(p_i^0 + \Delta p_i), K(p_i^0 + \Delta p_i)) - \mathbf{r}(M(p_i^0), C(p_i^0), K(p_i^0))}{\Delta p_i} \quad (10)$$

sendo  $M$  a matriz de massa,  $C$  a matriz de amortecimento,  $K$  a matriz de rigidez e  $\Delta p_i$  é um pequeno incremento no valor de  $p_i^0$ . Este valor pode ser calculado de dois modos: pela derivada parcial analítica, o que por vezes pode ser muito custoso, ou aproximando-se por diferenças finitas.

Em Zivanovic *et al* (2007) e Bakir *et al* (2007), valores de sensibilidade são aplicados para auxiliar na escolha dos parâmetros a serem atualizados no processo de ajuste. Os parâmetros de sensibilidade nula ou próxima de zero são descartados pois seria necessária uma grande alteração desses parâmetros para obter mínimas alterações das respostas dinâmicas da estrutura. Sendo assim, preferem-se os valores com elevada sensibilidade (positiva ou negativa), visto que seu efeito é mais intenso sobre as respostas do modelo.

## 6. SOLUÇÃO DO PROBLEMA INVERSO

De forma geral, os problemas de otimização podem ser definidos como a determinação de variáveis, de modo que uma determinada função objetivo atinja um valor extremo (máximo ou mínimo) sujeito a algumas restrições do próprio problema. Os algoritmos para solução de problemas de otimização são geralmente distinguidos em duas classes, os métodos clássicos que baseiam-se no cálculo de gradientes (derivadas) que fornecem a direção de busca do algoritmo

(Goldberg e Luna, 2000), e os métodos heurísticos que variam os parâmetros a otimizar baseados em decisões randômicas (Tebaldi, 2003). Apesar da popularidade dos métodos clássicos, frequentemente não é possível assegurar que a solução final encontrada por essas estratégias seja o ótimo global, o que depende do nível de complexidade do problema de otimização (Levin e Lieven, 1997). Para estes casos, recorre-se a algoritmos heurísticos como: algoritmos genéticos, recozimento simulado e enxame de partículas.

Os algoritmos genéticos são métodos de busca e otimização que simulam os processos naturais de evolução, por meio da seleção natural das espécies descrita por Charles Darwin (Michalewicz, 1996; Goldberg, 1989). São métodos de grande robustez e aplicabilidade na resolução de problemas. No procedimento geral de um algoritmo genético básico, primeiramente é criada de forma aleatória uma população inicial de cromossomos ou indivíduos, os quais representam possíveis soluções do problema codificadas usualmente de forma binária. Em seguida cada cromossomo é avaliado por uma medida de qualidade denominada *fitness* que se relaciona à função objetivo do problema. Após isso, operadores de cruzamento e mutação são aplicados, gerando assim uma nova população de cromossomos. Esse processo é repetido iterativamente até que determinado critério de parada seja atingido, ou até certo número de gerações pré-definido. O fluxograma de um algoritmo genético básico é mostrado na Fig. (3).

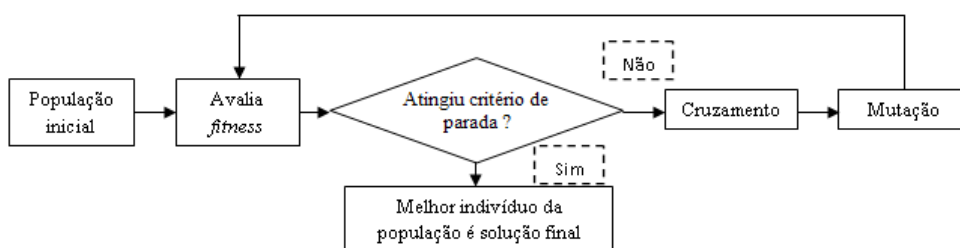


Figura 3. Fluxograma de um algoritmo genético básico.

## 7. RESULTADOS

### 7.1. Identificação experimental das frequências naturais do hidrogerador

Os dados de vibração da unidade 09A são medidos em três posições diferentes: nos eixos superior e inferior do gerador e no eixo superior da turbina, sendo que em cada ponto tem-se dois sensores em posições defasadas 90° entre si, denominadas X(Brasil) e Y(montante), totalizando 6 medidas de vibração Fig. (4). Os dados são relativos à vibração radial do eixo e são medidos em  $\mu\text{m}$ . A taxa de amostragem foi de 1,2 kHz armazenando 29977 amostras em cada sensor instalado, os testes foram realizados em regime permanente. Os dados são processados analogicamente com um filtro passa baixa em 1 kHz. Neste trabalho, apenas a primeira frequência natural foi identificada e utilizada posteriormente para o ajuste do modelo visto que os dados utilizados não possuíam informações sobre o segundo modo.

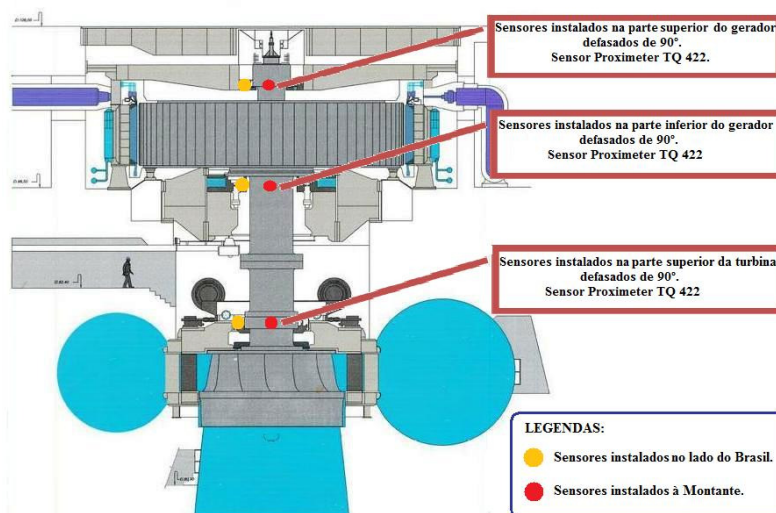


Figura 4. Corte da unidade 09A com os pontos medidos.

Antes da construção dos modelos ARMA faz-se um procedimento para garantir que o sinal tenha média nula e desvio padrão unitário, usando a Eq. (6). Os dados são também dizimados obtendo-se assim 2998 amostras. Os sinais são então divididos em duas partes, sendo que uma parte será utilizada na construção dos modelos e a outra será utilizada para os procedimentos de validação dos modelos.

Com os dados devidamente amostrados modelos ARMA são construídos a partir de cada conjunto de dados. Os polinômios de atraso foram determinados através do método do erro de previsão (Bodeux e Golival, 2001), já as ordens de regressão de tais polinômios foram escolhidas com o auxílio do critério de informações de Akaike (Aguirre, 2007), sendo este utilizado iterativamente para cada conjunto de amostras testando um grande número de ordens com a ajuda dos gráficos gerados escolheu-se uma ordem que ajustasse bem todos dados.

Os polinômios  $A(q^{-1})$  obtidos são denominadores de funções de transferência (equação característica), o objetivo é levantar as frequências presentes nos sinais de vibração e considerar um valor médio para caracterizar cada uma destas como sendo da unidade geradora ou oriundas de fatores externos Tab. (1).

Utiliza-se de algumas características físicas das unidades geradoras de 50 Hz para descarte de algumas frequências:

- A rotação nominal (90,9 RPM);
- O número de pás da turbina (13 pás);
- O número de pás diretrizes do distribuidor (24 pás);
- O número de pólos do gerador (66 pólos);

Tabela 1. Frequências da unidade geradora oriundas de características físicas.

Descrição da origem da frequência	$f$ [Hz]
Frequência de rotação e suas harmônicas	1,52
Frequências de origens eletromagnéticas	50, 100, 200
Frequência de passagem das pás	19,7
Frequência de passagem das pás diretrizes	36
Frequência de passagem dos pólos do gerador	100

Nas Figuras 5, 6, 7, e 8 mostram-se os procedimentos aqui descritos executados para um dos sinais (mancal guia superior do gerador em Y). O bom ajuste encontrado entre os dados através da comparação direta Fig. (7), comprova a eficácia do modelo ARMA para previsão em casos onde a entrada do sistema é desconhecida. A análise de resíduos comprova que o modelo ARMA representa bem a dinâmica contida no sinal, pois a correlação está dentro da faixa de tolerância, o que comprova que os resíduos do modelo tem característica aleatória.

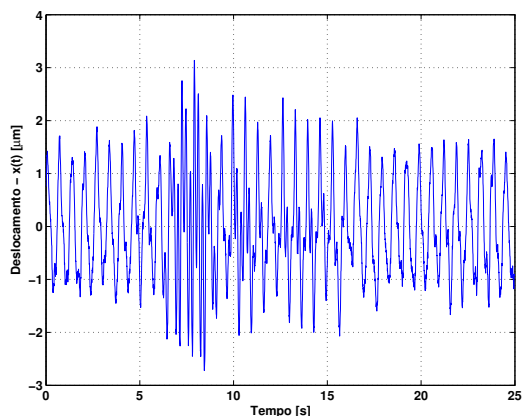


Figura 5. Sinal amostrado.

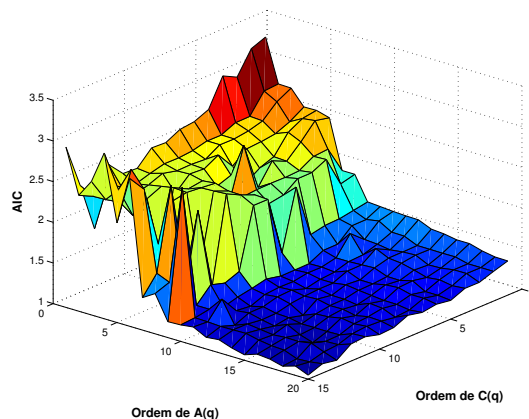


Figura 6. Critério de informações de Akaike.

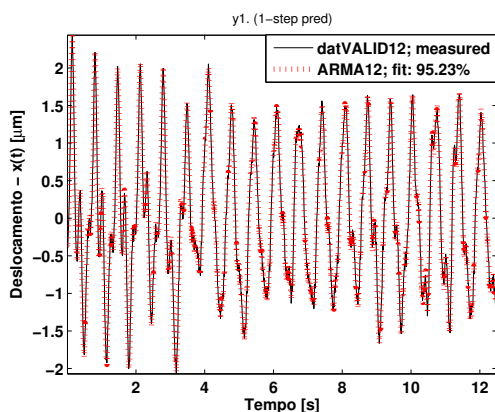


Figura 7. Comparação direta entre o sinal amostrado e o gerado pelo modelo.

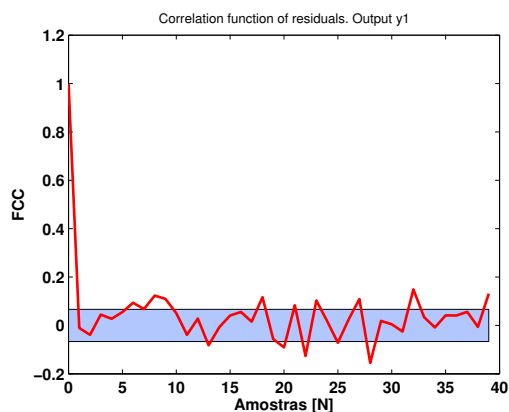


Figura 8. Correlação cruzada entre o sinal amostrados e os resíduos do modelo.

A Tab. (2) mostra a primeira frequência encontrada para todos os sinais.

**Tabela 2. 1ª Frequência natural identificada em cada sinal.**

Sinal	$f_1$ [Hz]
Mancal superior do gerador em X	4,62
Mancal superior do gerador em Y	4,55
Mancal guia inferior do gerador em X	4,54
Mancal guia inferior do gerador em Y	4,62
Mancal guia da turbina em X	4,56
Mancal guia da turbina em Y	4,55
Média	4,57

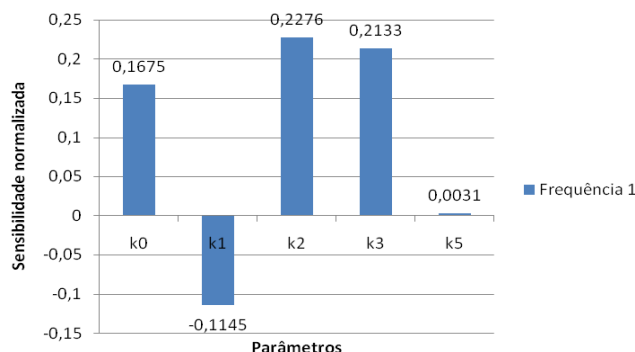
A média encontrada é tomada como sendo o valor verdadeiro deste parâmetro, e será utilizada para ajustar a 1ª frequência natural encontrada no modelo matemático.

## 7.2. Análise de sensibilidade

Para efetuar a análise de sensibilidade, utilizou-se a equação de sensibilidade normalizada Eq. (11) calculada pela aproximação por diferenças finitas progressiva proposta em Zivanovic *et al* (2007).

$$S_{norm\ i,j} = \frac{\Delta R_i}{\Delta P_j} \frac{P_j}{R_i} \quad (11)$$

sendo  $\Delta R_i$  a variação da resposta dinâmica,  $\Delta P_j$  é a variação do parâmetro a se calcular a sensibilidade,  $P_j$  é o valor do parâmetro onde se calcula a sensibilidade e  $R_i$  é sua respectiva resposta. A Eq. (11) permite que os valores de sensibilidade de diferentes parâmetros possam ser comparados. Para este trabalho comparou-se a sensibilidade dos valores de rigidez ( $k_0$ ,  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_5$ ) mostrados na seção 2 e a resposta utilizada foi o valor da primeira frequência natural. Calculou-se a variação das respostas para um incremento de 1% no valor dos parâmetros de rigidez. Na Fig. (9) mostra-se a sensibilidade da primeira frequência para cada parâmetro.



**Figura 9. Gráficos de sensibilidade dos parâmetros de rigidez.**

Observando a Fig. (9) nota-se que os dois parâmetros de rigidez mais sensíveis são  $k_2$  e  $k_3$ , e o parâmetro mais insensível, por sua vez, é o valor  $k_5$ . Desse modo, para o processo de ajuste do modelo escolheu-se para serem atualizados, apenas os parâmetros  $k_2$  e  $k_3$ .

## 7.3. Ajuste do modelo simplificado do hidrogerador

O procedimento de ajuste do modelo da unidade geradora de Itaipu descrito na seção 2 foi feito utilizando-se um algoritmo genético. Para realizar a modificação dos parâmetros  $k_2$  e  $k_3$  foram utilizadas as equações:

$$k_{2aj} = k_{2or} \times (1 + \alpha_2) \quad (12)$$

$$k_{3aj} = k_{3or} \times (1 + \alpha_3) \quad (13)$$

sendo  $k_{2aj}$  e  $k_{3aj}$  são os valores modificados de rigidez,  $k_{2or}$  e  $k_{3or}$  são os valores originais do modelo de vibração inalterado, e  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  representam a fração a qual os valores originais são acrescidos ou decrescidos. O algoritmo genético implementado codifica  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$  em vetores binários que representam números reais com ponto flutuante. Cada indivíduo da população possui em seu código genético os valores codificados de  $\alpha_2$  e  $\alpha_3$ , permitindo que com o passar das

gerações cada indivíduo tenha esses valores variados com o objetivo de minimizar uma função objetivo. Esta função baseia-se no erro relativo da primeira frequência natural:

$$\min J(p(\alpha)) = \left| \frac{\omega_{aj}(p(\alpha)) - \omega_{exp}}{\omega_{exp}} \right|, \text{ onde } -50\% < \alpha < 50\% \quad (14)$$

sendo  $\omega_{aj}$  a frequência natural obtida por meio da resolução de um problema de altovalor e autovetor a partir da Eq. (1) com os valores de rigidez alterados,  $\omega_{exp}$  é a frequência obtida pela análise do sinal de operação,  $p$  é o vetor com os parâmetros de rigidez a se ajustar,  $\alpha$  é uma fração de crescimento ou decrescimento dos parâmetros de rigidez e  $J$  é a função objetivo ou *fitness* do indivíduo.

As configurações do algoritmo genético implementado são mostradas na Tab. (3). Mais detalhes sobre os parâmetros de controle dos algoritmos genéticos podem ser encontrados na literatura (Michalewicz, 1996).

**Tabela 3. Configurações do algoritmo genético.**

<b>Tipo de seleção</b>	Torneio
<b>Tipo de cruzamento</b>	Um ponto
<b>Range de <math>\alpha</math></b>	[-0,5 0,5]
<b>Casas após a vírgula</b>	2
<b>Tamanho da população</b>	100
<b>Quantidade de participantes do torneio</b>	5
<b>Quantidade de iterações (gerações)</b>	100
<b>Taxa de cruzamento</b>	0,8
<b>Taxa de mutação</b>	0,1

Para garantir que o *fitness* do melhor cromossomo de cada geração evolua com o passar das gerações, o algoritmo genético foi implementado com um modelo elitista (Michalewicz, 1996), onde o melhor indivíduo é sempre passado para as gerações posteriores. Os melhores indivíduos encontrados para cada uma das 10 execuções da rotina de otimização são mostrados na Tab. (4).

**Tabela 4. Resultados do ajuste de modelo.**

	$\alpha_2$	$\alpha_3$	<i>Fitness</i>		$\alpha_2$	$\alpha_3$	<i>Fitness</i>
<b>1</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06	<b>6</b>	-0,47	0,03	3,59E-05
<b>2</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06	<b>7</b>	-0,03	-0,38	4,49E-05
<b>3</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06	<b>8</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06
<b>4</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06	<b>9</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06
<b>5</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06	<b>10</b>	-0,17	-0,28	7,19E-06

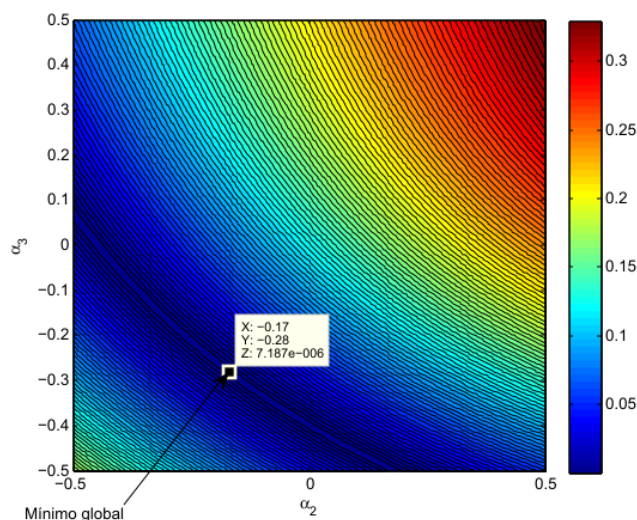
Na Tab. (5) é mostrada a comparação entre o melhor resultado e os valores iniciais do modelo original.

**Tabela 5. Comparação entre os valores iniciais e o melhor ajuste encontrado.**

	$k_2$ [N/m]	$k_3$ [N/m]	Primeira frequência natural [Hz]	Erro da frequência
<b>Valor inicial</b>	1,25E+09	1,43E+09	5,14	0,12
<b>Valor após o ajuste</b>	1,04E+09	1,03E+09	4,57	7,19E-06

Os resultados mostram que em oito das execuções do algoritmo genético conseguiu-se o mesmo resultado onde a correção de  $k_2$  foi ajustada em -17% e de  $k_3$  em -28%, e o erro da primeira frequência natural teve o valor de  $7,19 \times 10^{-6}$ . Para se estimar a eficiência do algoritmo genético, na Fig. (9) é mostrada a superfície correspondente à função objetivo do problema de otimização com seu respectivo mínimo global.





**Figura 10. Função objetivo do problema de ajuste de modelo indicando o mínimo global.**

Ao analisar a Tab. (4) e a Fig. (10) percebe-se que o algoritmo de otimização implementado conseguiu encontrar o mínimo global ( $\alpha_2 = -0,17$ ;  $\alpha_3 = -0,28$ ) em 80% das execuções do algoritmo genético apesar da grande região onde existem mínimos locais (região azul escuro). Estes resultados demonstram a capacidade de algoritmos de otimização heurísticos em encontrar valores ótimos globais.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um ajuste do modelo de uma unidade geradora de Itaipu. Inicialmente foi extraída a primeira frequência natural do sinal de vibração radial. Após isso, esse valor foi considerado como o valor real e o modelo foi então ajustado, por meio de algoritmos genéticos, com o objetivo de minimizar o erro entre a frequência do modelo e a experimental por meio da alteração dos valores de rigidez.

A análise modal realizada utilizando o modelo ARMA apresentou pólos reais negativos ou complexos conjugados, sendo este um índice de estabilidade do modelo. A utilização dos algoritmos genéticos na resolução do problema inverso mostrou-se adequada visto que conseguiu encontrar os ajustes ótimos do modelo para a configuração fornecida do algoritmo.

Em trabalhos futuros a técnica de ajuste de modelo será aplicada com o intuito de minimizar a diferença entre o modelo analítico e o experimental do hidrogerador englobando além da segunda frequência natural, outras formas de correlacionar estes dois modelos como *modal assurance correlation* (MAC) e *frequency response assurance correlation* (FRAC) (Pereira, 1996). Esta abordagem tornará o ajuste de modelo um problema de otimização multiobjetivo que poderá ser resolvido também pela técnica dos algoritmos genéticos.

## 9. AGRADECIMENTOS

O primeiro e segundo autor agradecem respectivamente ao PTI – Ciência e Tecnologia e ao PIBIC/CNPq pelo apoio financeiro fornecido. Todos os autores agradecem a Universidade Estadual do Oeste do Paraná e a Itaipu Binacional pelo suporte fornecido.

## 10. REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A., 2007, Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais. Editora UFMG, 3.º Edição.
- Bakir, P.G., Reynders, E., De Roeck, G., 2007, "Sensitivity-based Finite Element Model Updating using Constrained Optimization with a Trust Region Algorithm", Journal of Sound and Vibration.
- Bodeux, J.B. and J.C. Golinval, 2001, Application of ARMA models to the identification and damage detection of mechanical and civil engineering structures. Smart Materials and Structures, Vol. 10, pp. 479-489.
- Brito Jr, G.C., 2005, "Application of Simplified Statistics Models in Hidro Generating Unit Health Monitoring", "Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems", John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, Inglaterra.
- Brito Jr, G.C., Brol, K.A., Brol, K.B., 2007, "Dynamic Behavior of Large Rotating Electric Machines (Analysis with Simplified Analytical Models)", International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery, Calgary, Alberta, Canadá.
- Diniz, P. S. R., Silva, E. A. B., Lima Netto, S., 2004, Digital Signal Processing. Bookman Company, 1.º Edição.
- Ewins, D. J., 2001, Modal Testing: Theory, Practice and Application, 2.º Edição, Wiley.

- Goldbarg, M.C., Luna, P.C.L., 2000, "Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos", 1ª Edição, Editora Campus, Rio de Janeiro, Brasil.
- Goldberg, D.E., 1989, "Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning", Addison-Wesley, Massachusetts, Estados Unidos.
- Kim, G., Park, Y., 2004, "An Improved Updating Parameter Selection Method and Finite Element Model Update using Multiobjective Optimization Technique", Mechanical Systems and Signal Processing.
- Levin, R.I., Lieven, 1997, N.A.J., "Dynamic Finite Element Model Updating using Simulated Annealing and Genetic Algorithms", Mechanical Systems and Signal Processing.
- Ljung, L., 1998, System Identification: Theory for the Use, 2nd edition, Prentice-Hall.
- Michalewicz, Z., 1996, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 3ª Edição, Springer, Charlotte, Estados Unidos.
- Mottershead, J.E., Friswell, M.I., 1993, "Model Updating in Structural Dynamics: a Survey", Journal of Sound and Vibration.
- Pereira, J.A., "Detecção e Localização de Falhas Estruturais Utilizando Técnicas de Ajustes de Modelos Baseadas em Funções de Resposta em Freqüência", 1996, tese de doutorado, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil.
- Silva, S., Brito Jr, G.C., 2009, "Damage Detection in Large Rotating Electric Machines Using Time Series Analysis", 8ª Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications.
- Steffen Jr, V., Rade, D.A., 2005, "Model-Based Inverse Problems in Structural Dynamics", "Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems", John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, Inglaterra.
- Tebaldi, A., 2003, "Detecção de Falhas Estruturais Usando Sensores e Atuadores Piezoelétricos e Algoritmos Genéticos", dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
- Zivanovic, S., Pavic, A., Reynolds, P., 2007, "Finite Element Modeling and Updating of a Lively Footbridge: The Complete Process", Journal of Sound and Vibration.
- Wirsching, P. H.; Paez, T. L. and Heith, O., 1995, Random Vibrations: Theory and Practice. John Wiley & Sons, Inc.

## 11. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# SIMPLIFIED MODEL UPDATING OF GENERATING UNITS USING VIBRATION TIME SERIES AND GENETIC ALGORITHMS

Sidney Bruce Shiki, [sbshiki@gmail.com](mailto:sbshiki@gmail.com)<sup>1</sup>  
Felipe Franzoni, [felipe.franzoni2@gmail.com](mailto:felipe.franzoni2@gmail.com)<sup>1</sup>  
Samuel da Silva, [sam.silva13@gmail.com](mailto:sam.silva13@gmail.com)<sup>1</sup>  
Geraldo Carvalho Brito Jr, [gcbrito@itaipu.gov.br](mailto:gcbrito@itaipu.gov.br)<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Western Paraná State University (UNIOESTE), Centro de Engenharias e Ciências Exatas (CECE), Av. Tancredo Neves, n.º 6731, Itaipu Technological Park (PTI), CEP 85856-970, Foz do Iguassu, PR, Brazil.

<sup>2</sup> Itaipu Binacional, Av. Tancredo Neves, 6731, CEP 85866-900, Foz do Iguassu, PR, Brasil.

**Abstract.** *The mathematical modeling of the dynamic behavior of generating units of Itaipu Binacional Dam is strategically important. So, in this paper is proposed a model updating process in a simplified analytical dynamic model with two degrees of freedom. In this model it is assumed that the elastic components are the nominal design values and are subjected to uncertainty in the parameter equivalent values of bearings stiffness, magnetic stiffness, oil films, guides and others. The first step in this method is to use real data of radial bearings vibration measured in one of the generating units to identify the natural frequencies of the system by using the autoregressive moving average model (ARMA). After the natural frequencies identification with experimental data, an objective function is implemented based on the error between these values and the frequencies analytically calculated with the updated model. A genetic algorithm is used to minimize this error by an iterative way in function of unknown model parameters. Simulations show the capacity of model updating with the objective to make it representative of the machine real behavior and that can be used in future applications in prognosis.*

**Keywords:** *model updating, generating units, genetic algorithms, ARMA model, vibration time series.*