

IDENTIFICAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO SIMPLIFICADO DE UMA UNIDADE GERADORA USANDO ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Felipe Franzoni^a, Sidney Bruce Shiki^a, Samuel da Silva^a e Geraldo Carvalho Brito Jr.^{a,b}

^aGrupo de Pesquisa em Dinâmica de Estruturas e Máquinas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), Centro de Engenharias e Ciências Exatas (CECE), Av. Tarquínio Joslin dos Santos, n.º. 13//, CEP 85870-900, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, felipe.franzoni2@gmail.com, sbshiki@gmail.com, samsilva@unioeste.br, <http://www.foz.unioeste.br>

^bItaipu Binacional, Av. Tancredo Neves, n.º 6731, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil, gcbrito@itaipu.gov.br, <http://www.itaipu.gov.br>

Palavras-chave: Hidrogerador, modelos ARMA, análise modal operacional, ajuste de modelos, algoritmos genéticos.

Resumo. Este trabalho propõe um procedimento de identificação de parâmetros modais em uma unidade geradora da usina de Itaipu Binacional. O procedimento aqui proposto é baseado na utilização de um modelo auto-regressivo com média móvel (ARMA) determinado a partir de sinais reais de vibração radial relativa dos mancais para extração dos parâmetros modais do sistema. Os pólos discretos do modelo ARMA são correlacionados com os pólos contínuos do sistema e estes, por sua vez, podem ser utilizados para se determinar os parâmetros modais de frequência natural e fator de amortecimento. Uma análise é realizada de maneira que algumas frequências provenientes de características operacionais da máquina são descartadas, como, a frequência de passagem das pás da turbina, a frequência de rotação e suas harmônicas, frequência de passagem das pás diretrizes, frequência de passagem dos pólos do gerador e as frequências eletromagnéticas. Neste contexto, um modelo matemático simplificado baseado nas equações de Newton-Euler que descreve a dinâmica deste sistema tem seus parâmetros elásticos e inerciais ajustados com base nos resíduos entre a frequência natural experimental (modelos ARMA) e a frequência natural analítica (modelo matemático). Estes resíduos são minimizados utilizando algoritmos genéticos visando identificar os parâmetros inerciais e elásticos deste modelo matemático. Os resultados mostram que um modelo simplificado pode representar de maneira satisfatória o comportamento dinâmico de uma unidade geradora e pode ser utilizado para uma primeira avaliação de predição do sistema.

1 INTRODUÇÃO

Equipamentos girantes são comumente encontrados na indústria, uma vez que pode-se citar diversos exemplos de sistemas mecânicos que possuam algum componente com movimento rotativo em todos setores industriais. Um exemplo típico de máquina rotativa encontrada em usinas hidrelétricas são os hidrogeradores. Na usina de Itaipu Binacional tem-se 20 turbinas do tipo Francis produzindo cerca de 700 MW cada. Estima-se que cada turbina produza cerca de 1 milhão de dólares em energia por dia, tal energia é responsável pelo abastecimento de cerca de 20% da demanda brasileira e 95% da demanda paraguaia. Sendo assim, a manutenção de um equipamento com tal importância econômica deve ser otimizada, garantindo elevados índices de confiabilidade e disponibilidade dos equipamentos.

Neste contexto, visando um maior controle da integridade estrutural destas máquinas é comum a utilização de modelos matemáticos representativos do comportamento dinâmico dos hidrogeradores. Porém, quando os resultados de modelos analíticos são comparados com resultados experimentais, é comum encontrar um baixo grau de correlação entre ambos, impossibilitando assim a aplicação do modelo com confiança (Mottershead e Friswell, 1993). Consequentemente, técnicas de ajuste de modelos tem sido empregadas com o intuito de minimizar as diferenças entre o modelo analítico e os respectivos resultados experimentais.

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

Segundo Brito *et al* (2007) a unidade geradora 09A foi modelada para permitir a análise do comportamento dinâmico dessa máquina rotativa. Tal modelo possui 2 graus de liberdade, o deslocamento radial ($x(t)$) e o deslocamento angular ($\theta(t)$) como mostrados na Figura 1.

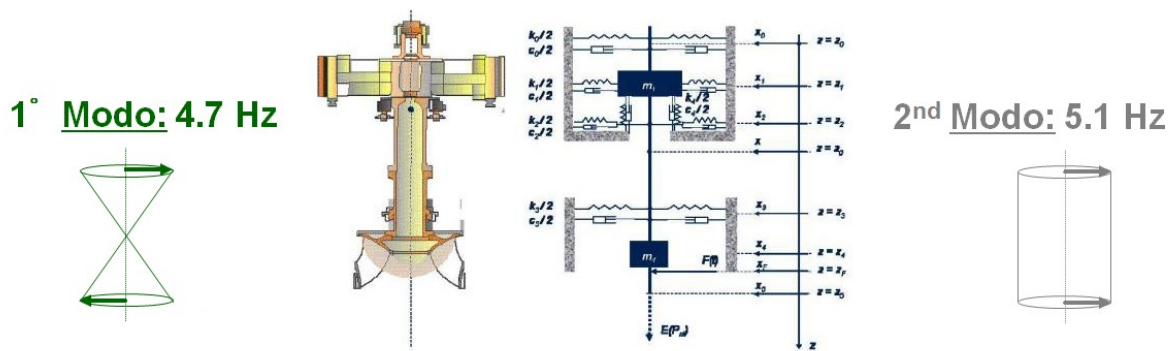


Figura 1: Detalhe dos graus de liberdade da máquina e seu modelo físico.

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 nominais de projeto na Eq. (1) são fornecidos por:

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

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 de projeto e estão sujeitos a incertezas.

Diversas simplificações foram realizadas no levantamento deste modelo como, por exemplo, o modelo não considera as não linearidades existentes na viscosidade do óleo que lubrifica os mancais, tão pouco os efeitos dinâmicos devido aos labirintos da turbina. Ressalta-se também que não considera-se movimentos da

unidade geradora fora do plano e que o empuxo hidráulico atua sempre na direção axial. Este modelo, apesar de simplificado, tem 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 usando (Wirsching *et al.*, 1995):

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

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 obtido através de uma relação entrada/saída do sistema, onde a entrada do sistema é considerada pseudo-aleatória, esta abordagem tem grande aplicação para casos práticos onde não se pode determinar a excitação do sistema (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 $A(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$ são descritos em função do operador de atraso q^{-1} e são apresentados:

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

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 implementado num algoritmo de busca exaustiva como índice para avaliar as ordens mais adequadas segundo tal critério (Aguirre, 2007). Já para 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®.

A parte mais importante de um procedimento de identificação de sistemas é a validação do modelo, pois é neste momento que se sabe se o modelo obtido descreve o sistema satisfatoriamente de acordo com a sua finalidade. Neste contexto, para validar o modelo, dois métodos podem ser utilizados, o primeiro consiste na comparação direta entre os resultados do modelo e os dados amostrados,

verificando-se assim a capacidade de predição do modelo. O segundo consiste em uma análise de resíduos através da função de correlação cruzada (FCC) entre os resíduos e o sinal de saída, testando-se assim se o modelo está representando a dinâmica contida no sinal. Para ambos os testes usam-se dados diferentes dos utilizados na obtenção do modelo, garantindo-se assim uma maior confiabilidade nestes procedimentos (Ljung, 1998).

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) para serem relacionados com os parâmetros modais, isto é realizado através de um procedimento de mapeamento, neste caso foi utilizada a transformação bilinear (Diniz *et al.*, 2004). A relação entre os pólos contínuos e os parâmetros modais de frequências naturais e fatores de amortecimento pode ser descrita por (Inman, 2007):

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

sendo s_n os pólos contínuos da função de transferência, ζ_n os fatores de amortecimento, ω_n as frequências naturais e j é o número complexo.

4 AJUSTE DE MODELOS

Um problema frequentemente encontrado na engenharia é denominado problema inverso, onde o modelo de um sistema é construído ou refinado fornecido certos dados de entrada e/ou saída (Mottershead e Friswell, 1993). Muitas atividades da engenharia podem ser considerados problemas inversos: ajuste de modelos, identificação da força de entrada, análise modal experimental, estimação de parâmetros, identificação de danos, etc. O ajuste de modelo procura corrigir diferenças entre o modelo analítico e as respostas dinâmicas medidas em ensaios de vibração realizados na estrutura. O procedimento geral deste método é mostrado no fluxograma da Figura 2.

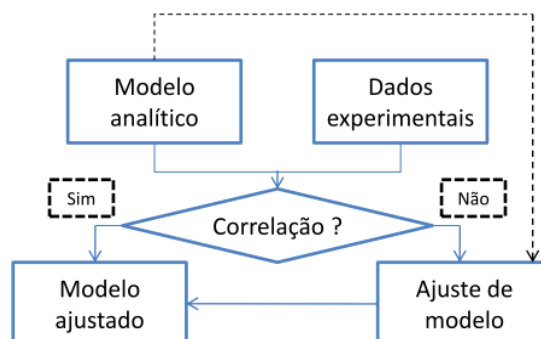


Figura 2: Fluxograma do processo de ajuste de modelo.

As discrepâncias encontradas no modelo analítico podem ser originadas de várias fontes (Steffen Jr e Rade, 2005), (Friswell e Mottershead, 1995):

- Simplificações da teoria adotada para a modelagem;
- Dificuldade na modelagem de efeitos dissipativos (amortecimento);
- Erros de discretização;
- Erros numéricos ocorrido durante a solução das equações do movimento;
- Incertezas dos valores de alguns parâmetros do sistema, assim como das entradas do modelo, resultantes da dificuldade em estimar precisamente valores de propriedades físicas e geométricas.

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 Δp_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 Figura 3.

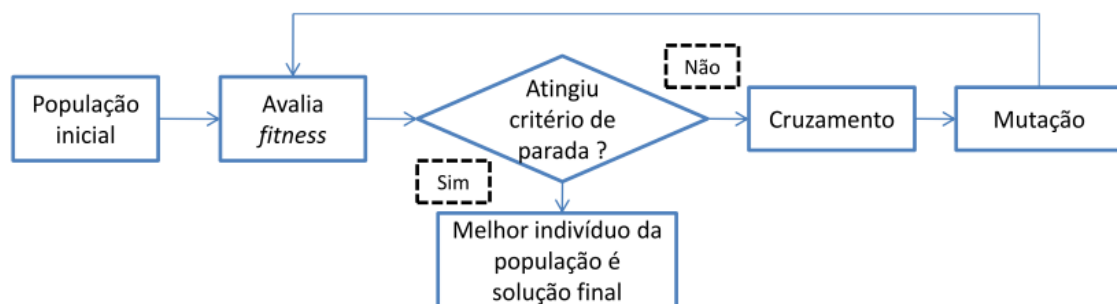


Figura 3: Fluxograma de um algoritmo genético básico.

7 RESULTADOS

7.1 Parâmetros modais referentes aos dados experimentais

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, conforme Figura 4. Os dados são relativos à vibração radial do eixo em relação aos mancais e são medidos em μm . A taxa de amostragem foi de 1,2 kHz armazenando 29977 amostras em cada sensor instalado, os testes foram realizados com a máquina operando em regime permanente. Os dados são processados analogicamente com um filtro passa baixa em 1 kHz.

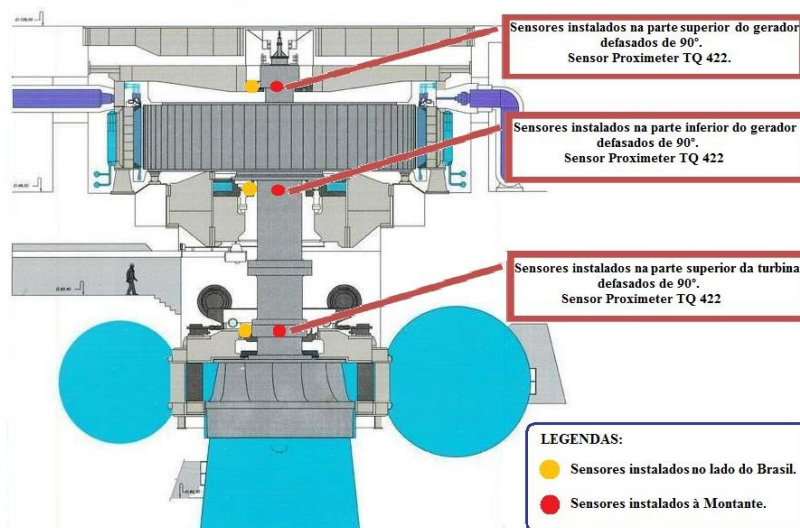


Figura 4: Corte da unidade 09A com os pontos medidos.

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. Os sinais amostrados antes do pré-processamento descrito anteriormente podem ser visualizados nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10.

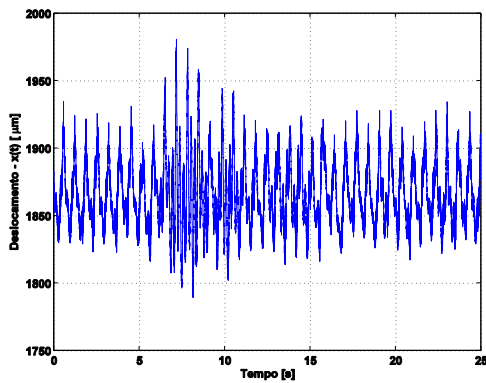


Figura 5: Deslocamento em X do mancal guia superior do gerador.

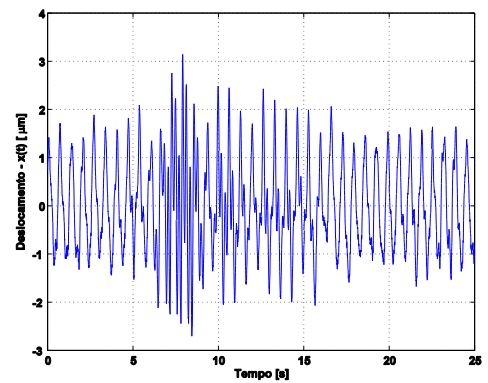


Figura 6: Deslocamento em Y do mancal guia superior do gerador.

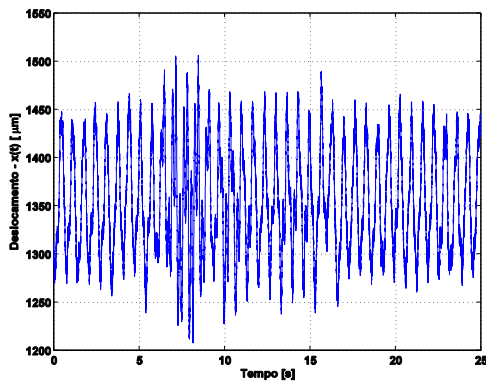


Figura 7: Deslocamento em X do mancal guia inferior do gerador.

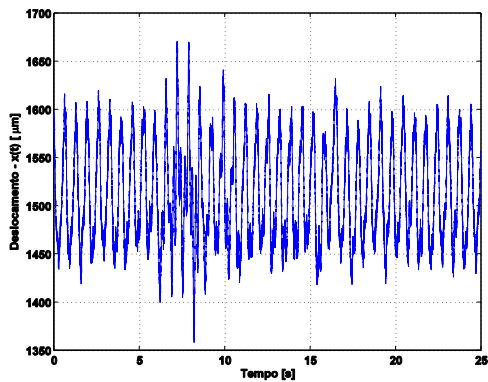


Figura 8: Deslocamento em Y do mancal guia inferior do gerador.

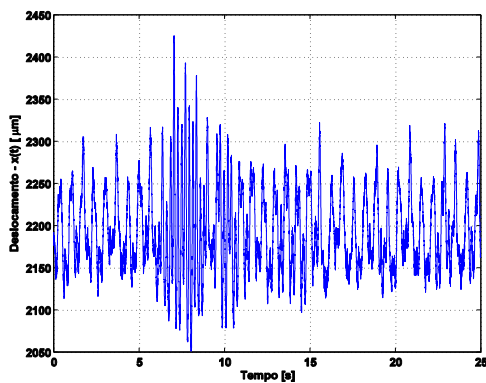


Figura 9: Deslocamento em X do mancal guia da turbina.

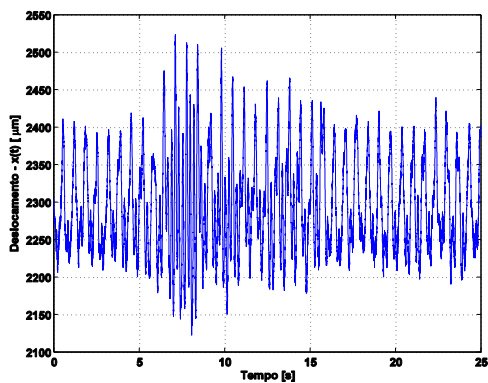


Figura 10: Deslocamento em Y do mancal guia da turbina.

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 predição (Bodeux e Golinval, 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. As Figuras 11, 12, 13, 14, 15 e 16 mostram os resultados deste procedimento de busca exaustiva.

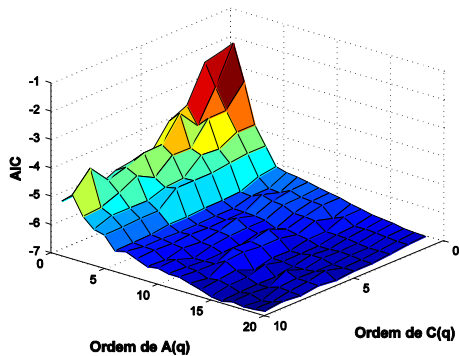


Figura 11: Referente ao deslocamento em X do mancal guia superior do gerador.

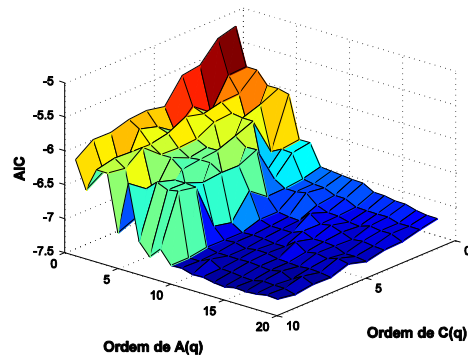


Figura 12: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia superior do gerador.

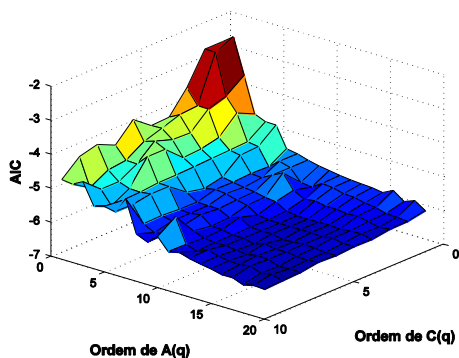


Figura 13: Referente ao deslocamento em X do mancal guia inferior do gerador.

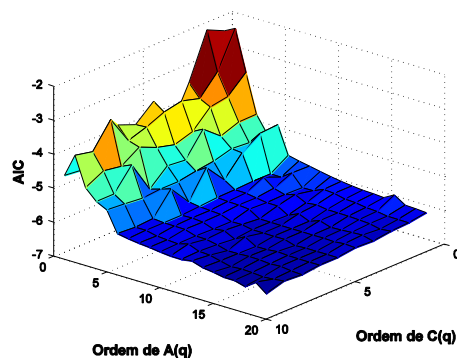


Figura 14: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia inferior do gerador.

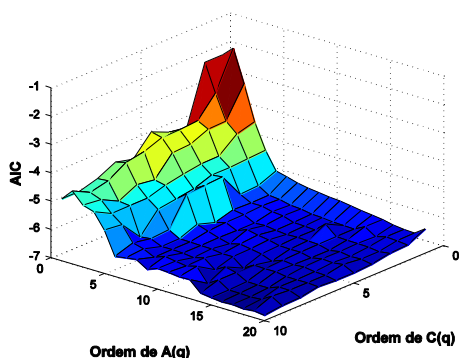


Figura 15: Referente ao deslocamento em X do mancal guia da turbina.

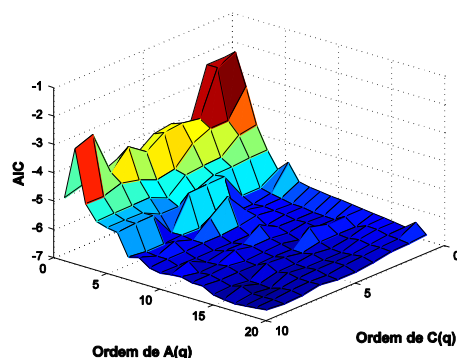


Figura 16: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia da turbina.

Com a análise dos gráficos, chegou-se a conclusão que uma ordem de 14 e 6 para n_a e n_c , respectivamente, é suficiente para garantir uma boa representação de todos

os sinais. As Figuras 17, 18, 19, 20, 21 e 22 mostram a comparação direta entre o sinal gerado pelo modelo ARMA e o sinal amostrado para cada caso.

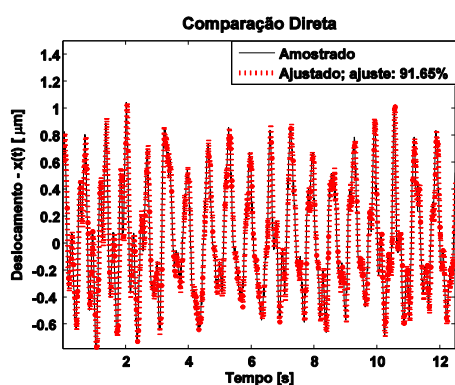


Figura 17: Referente ao deslocamento em X do mancal guia superior do gerador.

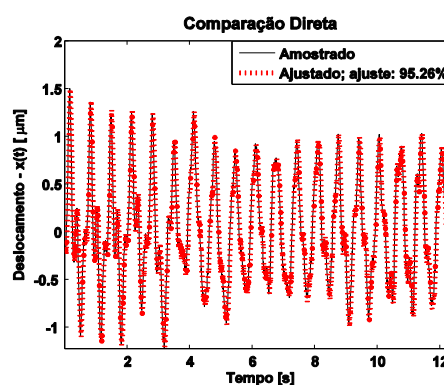


Figura 18: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia superior do gerador.

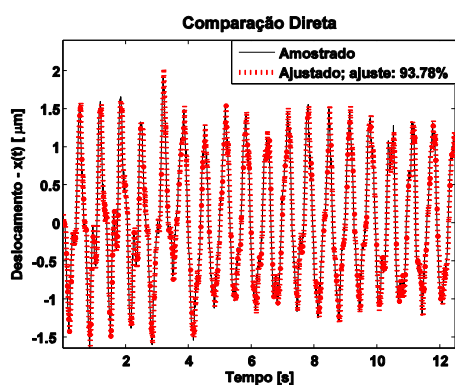


Figura 19: Referente ao deslocamento em X do mancal guia inferior do gerador.

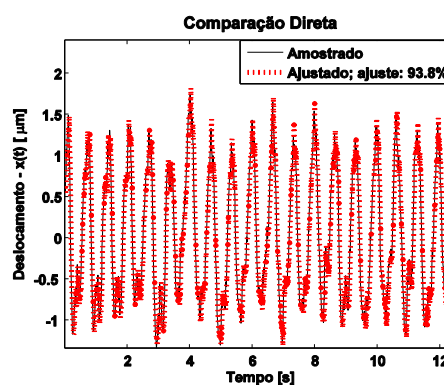


Figura 20: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia inferior do gerador.

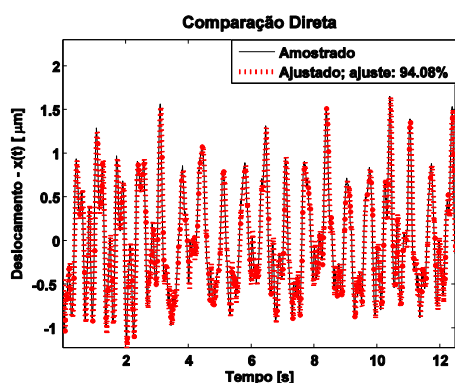


Figura 21: Referente ao deslocamento em X do mancal guia da turbina.

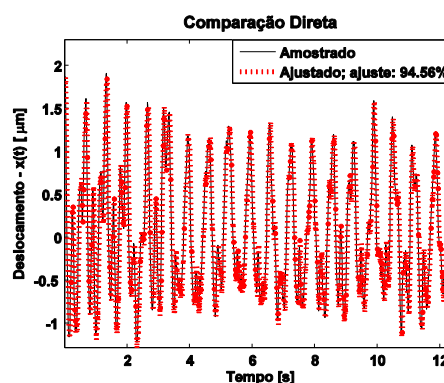


Figura 22: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia da turbina.

De maneira geral, todos os sinais apresentaram um bom ajuste neste procedimento de validação, o que comprova a eficácia do modelo ARMA para predição em casos onde a entrada do sistema é desconhecida. As Figuras 23, 24, 25,

26, 27 e 28 mostram a função de correlação cruzada aplicada entre os resíduos do modelo e o sinal amostrado para cada caso.

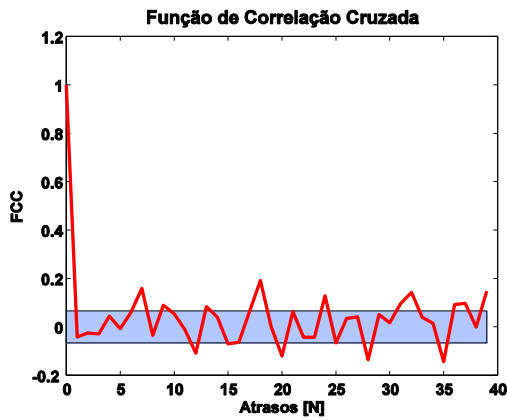


Figura 23: Referente ao deslocamento em X do mancal guia superior do gerador.

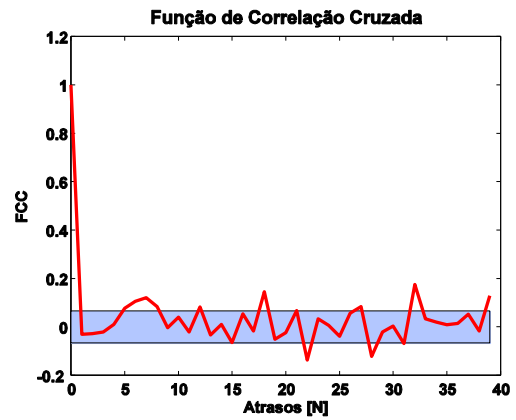


Figura 24: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia superior do gerador.

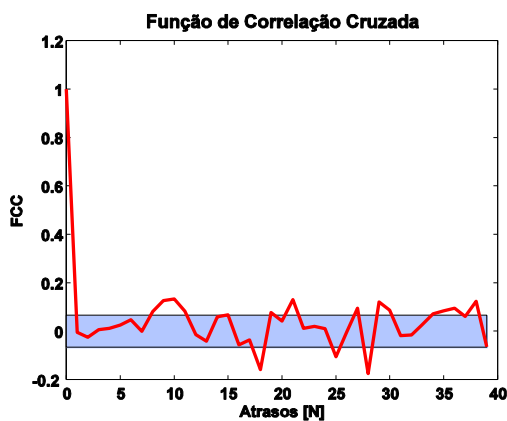


Figura 25: Referente ao deslocamento em X do mancal guia inferior do gerador.

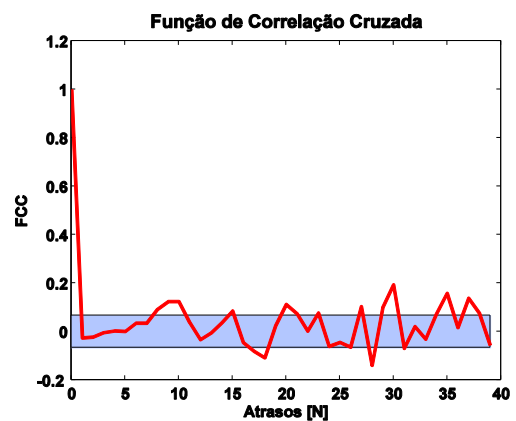


Figura 26: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia inferior do gerador.

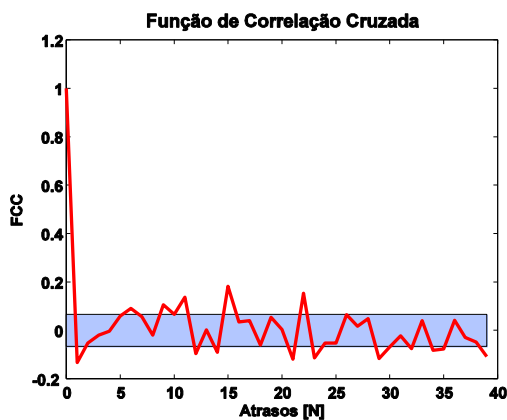


Figura 27: Referente ao deslocamento em X do mancal guia da turbina.

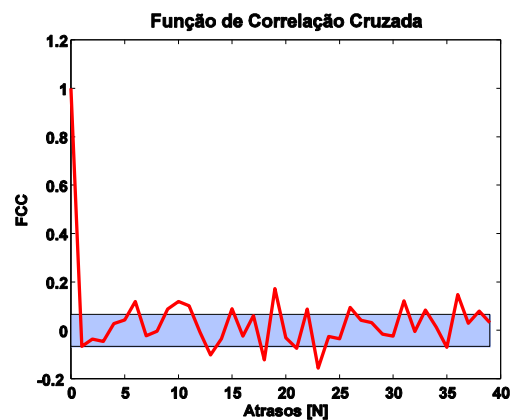


Figura 28: Referente ao deslocamento em Y do mancal guia da turbina.

A análise de resíduos comprova que os modelos ARMA representam bem a dinâmica contida nos sinais, pois a correlação, de maneira geral, está dentro da faixa de tolerância, o que comprova que os resíduos dos modelos têm característica aleatória.

Com os modelos ARMA devidamente construídos e validados, sabe-se que os polinômios $A(q^{-1})$ obtidos são denominadores de funções de transferência (equação característica). O objetivo é levantar as frequências naturais experimentais e considerar um valor médio para caracterizar cada uma destas como sendo da unidade geradora ou oriundas de fatores externos Tabela 1.

Utiliza-se de algumas características físicas das unidades geradores 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);

Descrição da origem da frequência	f [Hz]
Frequência de rotação e suas harmônicas	1,52
Frequências de origens eletromagnéticas	50, 100, 150
Frequência de passagem das pás	19,7
Frequência de passagem das pás diretrizes	36,36
Frequência de passagem dos pólos do gerador	100

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

A Tabela 2 mostra a primeira frequência encontrada com todos os sinais.

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

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

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

De modo a realizar a análise de sensibilidade foi utilizada a Eq. (11) da sensibilidade normalizada proposta por Zivanovic *et al* onde este valor é calculado aproximando a derivada parcial mostrada na Eq. (10) por meio de uma aproximação por diferenças finitas.

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

sendo ΔR_i a variação da resposta dinâmica para uma variação ΔP_j do parâmetro, P_j é o valor do parâmetro para calcular a sensibilidade e R_i a respectiva resposta. A Equação 11 permite a comparação direta da sensibilidade de vários parâmetros distintos. Neste trabalho as sensibilidades dos valores de rigidez (k_0 , k_1 , k_2 , k_3 e k_5) são comparadas, sendo que a resposta dinâmica utilizada são os valores das frequências naturais. As variações das respostas foram calculadas utilizando um incremento de 1% no valor de cada parâmetro de rigidez. A Figura 29 mostra a sensibilidade normalizada para cada um dos parâmetros e para as frequências naturais.

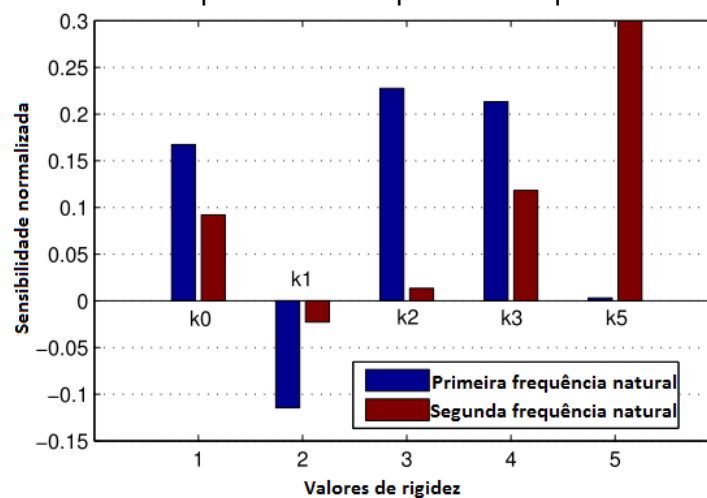


Figura 29: Gráfico de barras mostrando as sensibilidades das frequências naturais aos valores de rigidez.

7.3 Resolução do problema inverso utilizando algoritmos genéticos

O procedimento de ajuste do modelo simplificado da unidade geradora de Itaipu foi feita utilizando algoritmos genéticos. Para a atualização dos valores de rigidez foi utilizada a Eq. (12):

$$k_{naj} = k_{nor} \times (1 + \alpha_n) \quad (12)$$

sendo k_{naj} é o valor ajustado do valor de rigidez n para $n \in \{0,1,2,3,5\}$ como descrito na seção 2, k_{nor} é o valor original do parâmetro de rigidez n e α_n representa a fração a

qual o valor original foi acrescido ou decrescido. O algoritmo genético codifica os valores de α em vetores binários que representam números reais com ponto flutuante, que são os cromossomos do algoritmo genético.

Neste trabalho o parâmetro modal utilizado para o ajuste do modelo foi apenas a primeira frequência natural, visto que o dado experimental de vibração possuía informações apenas do primeiro modo. Sendo assim, escolheu-se os dois parâmetros de rigidez que possuem maior efeito sobre primeira frequência natural: k_2 e k_3 . Esses dois valores foram então atualizados por meio da Eq. (12) com o intuito de minimizar uma função objetivo baseada no erro da primeira frequência natural como descrito pela Eq. (13):

$$\text{Min } J(p(\alpha)) = \left| \frac{\omega_{1aj}(p(\alpha)) - \omega_{1exp}}{\omega_{1exp}} \right|, \text{ para } -50\% < \alpha < 50\% \quad (13)$$

sendo ω_{1aj} o valor da primeira frequência natural conseguida resolvendo o problema de autovalor e autovetor baseado na Eq. (1) com o valor modificado de rigidez, ω_{1exp} é a frequência obtida com o processamento do sinal de vibração experimental, p é o vetor com os parâmetros atualizados k_2 e k_3 em função de um vetor α com os valores de correção dos valores de rigidez α_2 e α_3 cuja variação foi limitada entre -50% e 50% de modo a garantir uma modificação pequena dos valores originais, e J é a função objetivo ou *fitness* dos cromossomos. O algoritmo genético utilizado para a resolução do problema inverso possui as configurações mostradas na Tabela 3.

Tipo de seleção	Torneio
Tipo de cruzamento	Um ponto
Intervalo de α	[-0,5 0,5]
Dígitos de precisão	2
Tamanho da população	100
Quantidade de participantes do torneio	5
Número de gerações (iterações)	100
Taxa de cruzamento	0,8
Taxa de mutação	0,1

Tabela 3: Configurações do algoritmo genético.

De modo a garantir que o *fitness* do melhor cromossomo (cromossomo de elite) de cada geração seja selecionado para a geração posterior, um modelo elitista foi implementado (Michalewicz, 1996). Neste estudo, 10 simulações foram feitas com o intuito de solucionar o problema de otimização proposto, os resultados são mostrados na Tabela 4.

Simulação	α_2	α_3	Fitness
1	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
2	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
3	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
4	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
5	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
6	-0,47	0,03	$3,59 \times 10^{-5}$
7	-0,03	-0,38	$4,49 \times 10^{-5}$
8	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
9	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$
10	-0,17	-0,28	$7,19 \times 10^{-6}$

Tabela 4: Resultados das simulações com algoritmos genéticos.

A Tabela 5 mostra uma comparação entre o melhor resultado encontrado (menor *fitness* ou erro) e os valores do modelo original.

	k_2 [N/m]	k_3 [N/m]	Primeira frequência natural [Hz]	Fitness
Valores originais	$1,25 \times 10^9$	$1,43 \times 10^9$	5,14	0,12
Valores após o ajuste	$1,04 \times 10^9$	$1,03 \times 10^9$	4,57	$7,19 \times 10^{-6}$

Tabela 5: Comparação entre os valores originais e após o ajuste.

Os resultados colocados nas tabelas 4 e 5 mostram que em 80% das simulações chegou-se a uma correção de -17% em k_2 e de -28% em k_3 resultando em um erro da primeira frequência natural de $7,19 \times 10^{-6}$. Os resultados de diferentes simulações neste caso podem levar a respostas diferentes devido à característica dos algoritmos genéticos de se basear em decisões aleatórias. A Figura 30 mostra a superfície da função objetivo deste problema mapeada por um procedimento de busca exaustiva.

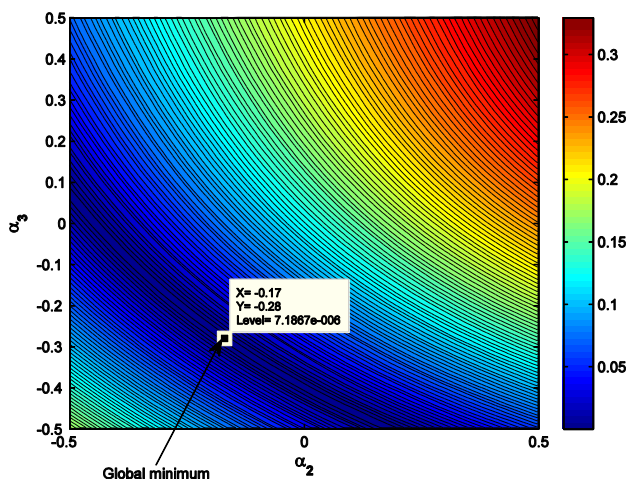


Figura 30: Função objetivo do problema de otimização indicando o mínimo global.

A Figura 30 mostra que apesar da grande região com mínimos locais (região azul escura), o algoritmo de otimização conseguiu encontrar o resultado ótimo do problema em 80% das simulações realizadas. Este resultado mostra a habilidade de algoritmos heurísticos em achar soluções ótimas para problemas complexos.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi proposto um ajuste do modelo de uma unidade geradora de Itaipu baseado em uma identificação do tipo caixa preta. Utilizou-se um procedimento de análise modal operacional através de modelos ARMA com a finalidade a primeira frequência natural do sinal de vibração radial fosse extraída. Esse valor foi considerado como o valor real deste parâmetro do sistema e o modelo matemático foi então ajustado, por meio de algoritmos genéticos, minimizando-se o erro entre a frequência do modelo e a experimental alterando-se os valores de rigidez.

O modelo ARMA se mostrou adequado para um procedimento de análise modal operacional, pois 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 hidrogenador 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.

REFERÊNCIAS

- Aguirre, L. A., *Introdução à Identificação de Sistemas - Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais*, 3^o Edição, Editora UFMG, 2007.
- Bakir, P.G., Reynders, E., De Roeck, G., Sensitivity-based Finite Element Model Updating using Constrained Optimization with a Trust Region Algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, No. 305, pp. 211-225, 2007.
- Bodeux, J. B. e Golinval, J.C., 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, 2001.
- Brito Jr, G.C., Brol, K.A., Brol, K.B., Dynamic Behavior of Large Rotating Electric Machines (Analysis with Simplified Analytical Models), *International Symposium on Stability Control of Rotating Machinery*, Calgary, Alberta, Canadá, 2007.
- Diniz, P. S. R., Silva, E. A. B. e Lima Netto, S., *Digital Signal Processing*, 1^o Edição, Bookman Company, 2004.
- Friswell, M. I., Mottershead, J. E., *Finite Element Model Updating in Structural*

- Dynamics*, 1º Edição, Springer, 1995.
- Goldberg, M.C., Luna, P.C.L., *Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos*, 1º Edição, Editora Campus, 2000.
- Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*, 1º Edição, Addison-Wesley, 1989.
- Inman, D. J., *Engineering Vibration*, 3º Edição, Prentice Hall, 2007.
- Ljung, L., *System Identification: Theory for the Use*, 2º Edição, Prentice-Hall, 1998.
- Michalewicz, Z., *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3º Edição, Springer, 1996.
- Mottershead, J.E., Friswell, M.I., Model Updating in Structural Dynamics: a Survey, *Journal of Sound and Vibration*, No. 167(2), pp. 347-375, 1993.
- Silva, S., Brito Jr, G.C., Damage Detection in Large Rotating Electric Machines Using Time Series Analysis, *8º Brazilian Conference on Dynamics Control and Applications*, 2009.
- Steffen Jr, V., Rade, D.A., *Model-Based Inverse Problems in Structural Dynamics Damage Prognosis for Aerospace, Civil and Mechanical Systems*, 1º Edição, John Wiley & Sons Ltd., 2005.
- Tebaldi, A., Coelho, L.S., Lopes Jr. V., Detecção de falhas em estruturas inteligentes usando otimização por nuvem de partículas: fundamentos e estudo de casos, *SBA Controle e Automação*, Vol. 17, No. 3, pp. 312-330, 2006.
- Wirsching, P. H., Paez, T. L. e Heith, O., *Random Vibrations: Theory and Practice*, 1º Edição, John Wiley & Sons, Inc, 1995.
- Zivanovic, S., Pavic, A., Reynolds, P., Finite Element Modeling and Updating of a Lively Footbridge: The Complete Process, *Journal of Sound and Vibration*, No. 301, pp. 126-145, 2007.