



**XXI SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
23 a 26 de Outubro de 2011
Florianópolis - SC

GRUPO –GGH

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH

**CLASSIFICAÇÃO DE PADRÕES OPERACIONAIS DO ATUADOR HIDRÁULICO DO DISTRIBUIDOR DE UM
HIDROGERADOR UTILIZANDO TÉCNICAS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA E LÓGICA FUZZY –
RESULTADOS EXPERIMENTAIS**

**Marcelo Nascimento Moutinho
CENTRAIS ELÉTRICAS DO NORTE DO BRASIL S.A. – ELETROBRAS - ELETRONORTE**

RESUMO

Técnicas de classificação de padrões operacionais baseadas em Lógica Fuzzy e Estimação Paramétrica de sistemas dinâmicos serão utilizadas para descrever o comportamento do atuador servo-hidráulico do distribuidor de uma unidade de geração hidráulica. Os modelos matemáticos que descrevem o comportamento normal serão estimados e validados com dados reais provenientes da monitoração de uma unidade de geração hidráulica da Usina Hidroelétrica de Tucuruí, operada pela ELETROBRAS-ELETRONORTE. Os resultados apresentados indicam que os modelos são boas representações da dinâmica do equipamento e podem ser utilizados como modelos preditivos em técnicas de manutenção.

PALAVRAS-CHAVE: Classificação de padrões, Lógica Fuzzy, Identificação paramétrica de sistemas, Manutenção preditiva

1.0 - INTRODUÇÃO

O monitoramento contínuo de equipamentos elétricos de potência permite a identificação confiável do início de uma possível anomalia antes que a mesma evolua para uma condição mais grave onde os danos ao equipamento sob análise já são consideráveis. Essa identificação pode ser realizada a partir da comparação entre o comportamento esperado do equipamento, estimado por um padrão conhecido, e o comportamento real. No caso em que esse padrão é um modelo matemático que descreva as relações dinâmicas observadas nas variáveis monitoradas, o esquema é conhecido na literatura como Redundância Analítica ou Funcional. (do termo em inglês *analytical or functional redundancy*) (1) e (2) e o algoritmo de identificação de falhas é denominado Detecção e Identificação de Falhas (DIF) baseada em modelos (do termo em inglês *Model-based Fault Detection and Isolation*).

Um algoritmo de DIF baseado em modelos é formado por dois componentes: gerador de resíduos e o processo de tomada de decisão: o gerador de resíduos compara os valores atuais das entradas, saídas ou estados do processo com os valores estimados pelo modelo que descreve o seu comportamento normal; o processo de decisão é a lógica que transforma a informação do sinal de resíduo (conhecimento quantitativo) em informação qualitativa (condição de funcionamento normal ou anormal). Os algoritmos básicos de DIF baseada em modelos são descritos em (1), (3) e (4). A principal dificuldade de implementação de um algoritmo DIF baseado em modelos reside no fato de que a fidelidade do modelo afeta a sensibilidade do mecanismo de detecção da falha e a precisão da sua identificação e diagnóstico. Muitos sistemas reais não são passíveis de modelagem por meio de abordagens convencionais devido: à falta de conhecimento preciso sobre o sistema; ao comportamento fortemente não linear; ao elevado grau de incerteza; ou a características variantes no tempo.

O objetivo deste trabalho é projetar, com base em dados reais, um sistema de DIF baseado em modelos paramétricos e lógica Fuzzy. Esse algoritmo será avaliado experimentalmente utilizando dados de monitoração do

sistema de atuação hidráulica do distribuidor de um hidrogerador. Na Figura 1 é apresentado o diagrama de blocos da estratégia DIF proposta neste trabalho.

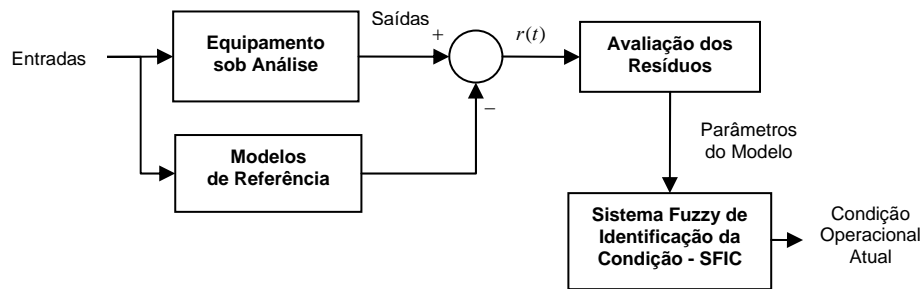


Figura 1 – Diagrama em blocos da estratégia DIF proposta.

A estratégia proposta é composta de duas etapas: a) Na primeira etapa são gerados os resíduos a partir da diferença entre o valor atual das saídas e as saídas dos modelos que descrevem o comportamento normal do equipamento analisado em diferentes condições operacionais; b) Na segunda etapa é realizada a avaliação dos resíduos onde é determinado qual modelo apresenta menor valor de resíduo. Os parâmetros desse modelo são repassados ao Sistema Fuzzy de Identificação da Condição Operacional (SFIC) que determina a condição atual do equipamento. No caso da ocorrência de um comportamento anormal provocado por alterações nas características físicas do processo monitorado surgirão alterações nos parâmetros do modelo e um resíduo elevado será gerado indicando que o comportamento do equipamento não corresponde a uma situação de normalidade.

O trabalho está organizado da seguinte forma: na Seção 2 é descrito o Sistema de Atuação Hidráulica (SAH) analisado no trabalho; na Seção 3 são descritos os resultados dos ensaios de identificação dos modelos matemáticos do equipamento analisado em diferentes condições operacionais; na Seção 4 é apresentado o projeto e a avaliação do Sistema Fuzzy de Classificação da Condição Operacional, utilizado para detectar a condição de operação com base na análise das alterações paramétricas nos modelos; e na Seção 5 são apresentadas as conclusões e as perspectivas de trabalhos futuros.

2.0 - CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE ATUAÇÃO HIDRÁULICA – SAH

O objetivo dessa seção é apresentar, de forma simplificada, a estrutura do Sistema de Atuação Hidráulica (SAH) da Unidade de Geração Hidráulica 16 (UGH-16) da Usina Hidroelétrica de Tucuruí (UHE-Tucuruí), o equipamento estudado nesse trabalho. Algumas informações da UGH-16 são apresentadas na Tabela 1:

Tabela 1 – Informações da UGH-16

| | |
|---|--------------------------|
| Número de Série | TFV-1484032-16 |
| Início de Serviço | 18 de maio de 2004 |
| Horas trabalhadas até julho/2007 | 14.134,73 |
| Tipo de Turbina | Francis de eixo vertical |
| Potência:[MW] | 396 |
| Velocidade:[RPM] | 81,8 |
| Queda:[m] | 61,7 |

O diagrama em blocos simplificado contendo o SAH e a cadeia de medição e de controle é descrito na Figura 2:

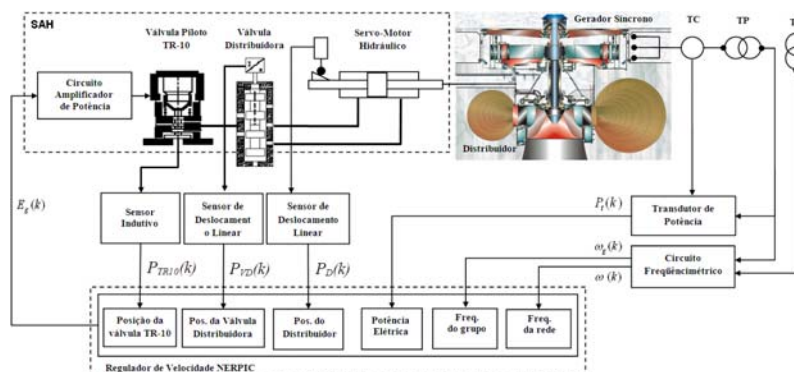


Figura 2 – Diagrama em blocos do SAH e da cadeia de medição e controle da segunda etapa da UHE-Tucuruí.

As funções dos elementos desse diagrama são apresentadas a seguir:

- 1 - Regulador de Velocidade (RV) – Tem a função de comandar a abertura e fechamento do distribuidor para regular a velocidade de rotação da turbina. No caso da segunda etapa da UHE-Tucuruí é utilizado o regulador eletrônico digital do tipo NEYRPIC 1500 de concepção ALSTOM POWER;
- 2 – Cadeia de medição com Transdutor de Potência Ativa e Circuito Frequencímetro – são utilizados pelo RV para implementar a lei de controle digital;
- 3 – Circuito Amplificador de potência - Condiciona o sinal de controle do RV para acionar a Válvula Piloto com níveis de potência adequados;
- 4 - Válvula Piloto (Modelo TR10) – É um amplificador hidráulico que comanda a Válvula Distribuidora Principal. Possui um sensor indutivo que informa ao RV sua posição pelo sinal $P_{TR10}(k)$;
- 5 - Válvula Distribuidora Principal (Modelo D100) - Comanda o movimento de abertura/fechamento do servomotor hidráulico. Sua posição é informada ao RV por meio de um sensor indutivo de posição sinal $P_{VD}(k)$;
- 6 – Servomotor Hidráulico – É responsável pelo acionamento do distribuidor da turbina. São utilizados 4 servomotores (SM1 a SM4) de duplo efeito que são ligados ao anel de regulação para posicionar as palhetas diretrizes do distribuidor. Sua posição é informada ao RV por meio do sinal $P_D(k)$ proveniente de um transdutor de posição;

Nesse trabalho será analisado o comportamento do servomotor-03 (SM3) do SAH da UGH-16. Algumas das especificações desse equipamento são apresentadas na Tabela 2. Na Figura 3 é apresentada uma fotografia do equipamento e o seu desenho.

Tabela 2 – Características dos servomotores do SAH da UGH-16

| Modo de Operação | Ação Dupla (Tracionando e Comprimindo) |
|--------------------------------------|--|
| TH = Torque hidráulico máximo [N.m.] | 67 870 |
| TP = Torque do pino limitador [N.m.] | 203 610 |
| Diâmetro do Êmbolo [m.m] | 540 |
| Diâmetro da haste [m.m.] | 200 |
| Pressão de Operação [M.Pa] | 6,4 |
| Máxima Força Comprimindo [kN] | 1450 |
| Máxima Força Tração [kN] | 1264 |

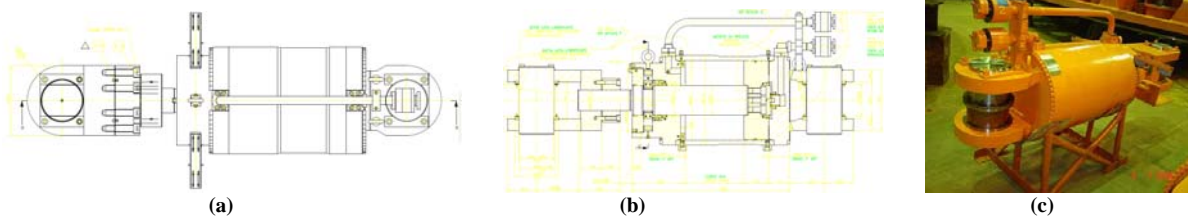


Figura 3 – (a) e (b) desenhos do servomotor; (c) – Fotografia do SM3 da UGH-16

Na próxima seção serão apresentados os procedimentos envolvidos nos ensaios de identificação realizados para verificar o comportamento do servomotor e determinar modelos matemáticos desse equipamento.

3.0 - ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO DOS MODELOS PREDITIVOS DO SM3

Para avaliar o comportamento do SM3 e identificar modelos matemáticos que descrevam o seu comportamento em diferentes condições operacionais. Nesta seção serão apresentados alguns resultados desses ensaios. Na Tabela 3 são apresentados os sinais que foram medidos durante os ensaios.

Tabela 3 – Sinais medidos durante os ensaios

| Sigla | Descrição | Unidade | Localização |
|-----------------------|--|--------------|---------------------------|
| P_{ASM03} | Pressão na câmara de abertura do SM3 | bar | SM3 |
| P_{FSM03} | Pressão na câmara de fechamento do SM3 | bar | SM3 |
| P_{AC} | Pressão no Acumulador Ar/óleo | bar | Unidade hidráulica |
| P_{FVD} | Pressão de fechamento da válvula distribuidora | bar | Válvula Distribuidora |
| S_{G01} a S_{G04} | Esforços mecânicos posições 01 a 04 | Adimensional | Biela da Palheta Diretriz |
| S_{G05} a S_{G08} | Esforços mecânicos posições 05 a 08 | Adimensional | Braço dos servomotores |
| P_{OT} | Potência Ativa | MW | Quadro Local de Controle |
| P_{SM03} | Posição do SM3 | % | Haste do servomotor-3 |

Os sinais P_{ASM03} e P_{FSM03} foram obtidos por meio de transdutores de pressão conectados nas câmaras de abertura e fechamento do SM3. Os sensores de deformação S_{G01} a S_{G08} foram colados diretamente na superfície da biela e

nos braços dos servomotores na seguinte ordem: S_{G01} e S_{G05} na Biela e no braço do SM1, respectivamente; S_{G02} e S_{G06} na Biela e no braço do SM2, e assim sucessivamente. O sinal de posição P_{SM03} foi obtido por meio de um transdutor resistivo conectado diretamente sobre a haste de acionamento do SM3. Nas figuras seguintes são apresentadas algumas localizações dos pontos monitorados durante os ensaios.

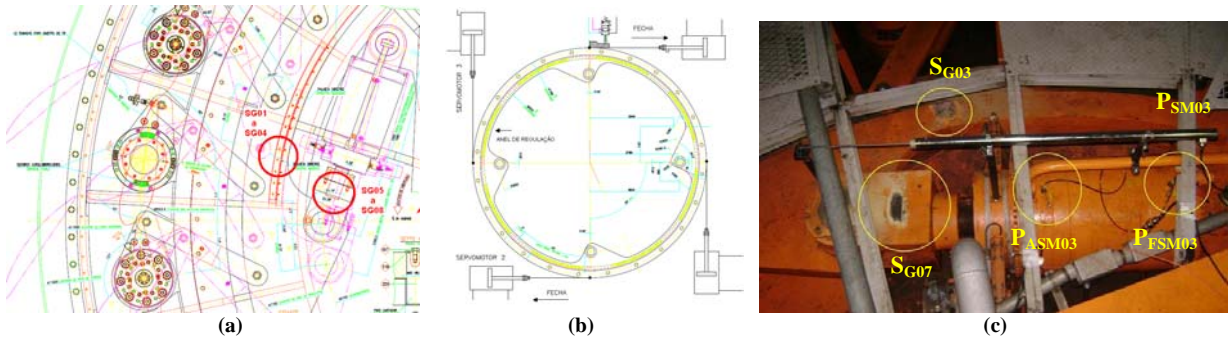


Figura 4 – (a) Posição dos sensores de esforço mecânico; (b) Anel de posicionamento das palhetas diretrizes do distribuidor; (c) Sensores de posição, pressão e esforço mecânico do SM3;

A identificação de um modelo matemático paramétrico simplificado que emule o comportamento do SM3 é um procedimento prático que pode ser dividido nas seguintes etapas:

- 1) Ensaio de identificação para verificação do comportamento dinâmico do SM3;
- 2) Análise estatística para identificar relações dinâmicas entre as variáveis monitoradas;
- 3) Escolha da estrutura do modelo;
- 4) Estimação e validação do modelo;

Na Figura 5 é apresentado o resultado de um dos ensaios realizados para avaliar o comportamento dinâmico do SM3 da unidade UGH-16 da UHE-Tucuruí. Nesse ensaio, que foi realizado em 28/06/2009 às 9:46 h AM, a unidade estava inicialmente sincronizada e com 50MW (0.12 p.u.). Foram aplicadas variações do tipo degrau na referência de potência ativa via comando manual no regulador de velocidade. Os comandos são aplicados em $t = 30s$, $180s$ e $370s$, aproximadamente, aumentando os patamares de potência ativa para 0,26 p.u., 0,38 p.u. e 0.51 p.u., respectivamente.

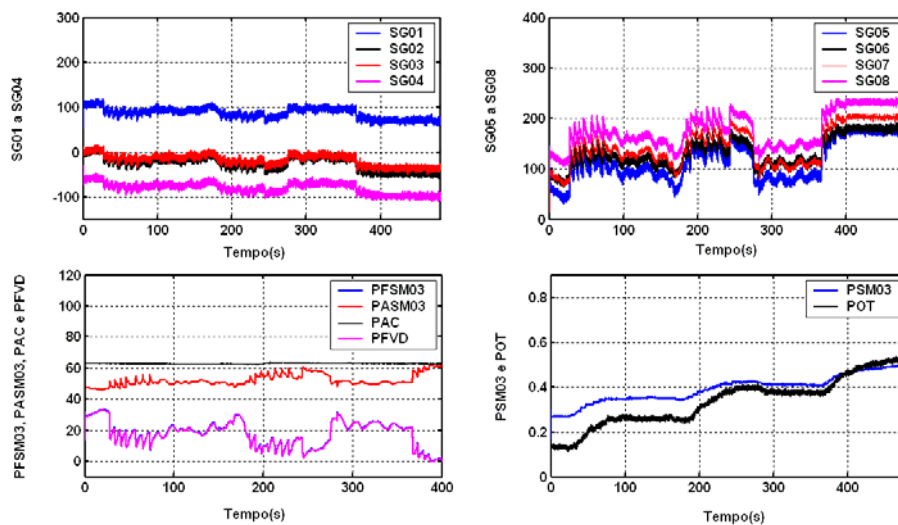


Figura 5 – Resultado de um dos ensaios de identificação do comportamento do SM3 da UGH-16. Aplicação de variações do tipo degrau na referência de potência ativa via comando manual.

O comportamento observado é o seguinte:

- 1 – Após o início da aplicação dos comandos, observa-se um transitório mecânico que provoca oscilações nos sinais P_{ASM03} e P_{FSM03} . A pressão na câmara de abertura, P_{ASM03} , é aumentada e a pressão na câmara de fechamento, P_{FSM03} , é reduzida após os comandos;
- 2 – A pressão de fechamento da válvula distribuidora, P_{FVD} , apresenta um comportamento muito semelhante ao apresentado pelo sinal P_{FSM03} , como pode ser observado pela superposição das curvas.
- 3 – Após a aplicação dos comandos, observa-se um aumento dos esforços mecânicos S_{G05} , S_{G06} , S_{G07} e S_{G08} e redução dos esforços mecânicos S_{G01} , S_{G02} , S_{G03} , e S_{G04} ;

4 – Uma oscilação semelhante a oscilação do sinal P_{ASM03} pode ser observada também no grupo de sinais S_{G05} , S_{G06} , S_{G07} e S_{G08} . Uma oscilação semelhante a oscilação do sinal P_{FSM03} também pode ser observada no grupo de sinais S_{G01} , S_{G02} , S_{G03} , e S_{G04} ;

5 – A pressão no tanque do acumulador, P_{AC} , permanece em aproximadamente 62 bar durante todo o ensaio sofrendo pequenas oscilações em torno desse valor. Conforme a carga aumenta, o sinal P_{ASM03} se aproxima do sinal P_{AC} e o sinal P_{FSM03} tende à zero.

6 – O padrão de comportamento dos sinais de pressão descrito para o SM3 também é observado nos outros servomotores (SM1, SM2 e SM4).

Está fora do escopo desse trabalho explicar as causas do comportamento dinâmico dos servomotores do sistema de atuação hidráulica com base em leis da física e modelos mecânicos. Para estabelecer de forma clara as relações de causa e efeito observadas nos ensaios realizados são necessários conhecimentos na área de engenharia mecânica e dinâmica de fluidos, conhecimentos esses que o autor deste informe técnico não possui. O objetivo principal do trabalho não é explicar, mas sim descrever o comportamento mecânico do sistema sob análise e classificar essa dinâmica em padrões ou assinaturas representadas por meio de modelos matemáticos paramétricos estimados em diferentes condições operacionais.

O objetivo da segunda etapa é identificar relações entre os sinais monitorados por meio de análise estatística. A seguinte Função de Autocorrelação (FAC) foi utilizada para identificar as correlações no tempo de um sinal discreto $y(k)$:

$$r_{yy} = \frac{\sum_{k=\tau+1}^N [y(k) - \bar{y}][y(k - \tau) - \bar{y}]}{\sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2} \quad (1)$$

sendo \bar{y} o valor médio do sinal $y(k)$ e k é o instante discreto, um múltiplo inteiro do intervalo de amostragem T_s .

Para avaliar o correlacionamento entre dois sinais discretos $u(k)$ e $y(k)$ foi utilizada a seguinte Função de Correlação Cruzada (FCC):

$$r_{yu} = \frac{\sum_{k=\tau+1}^N [y(k) - \bar{y}][u(k - \tau) - \bar{u}]}{\sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2} \quad (2)$$

sendo \bar{u} o valor médio do sinal $u(k)$.

Na Figura 6.a é apresentado o perfil e a magnitude da FAC para alguns sinais monitorados. Os resultados da análise de FAC indicam que alguns sinais monitorados estão correlacionados a valores anteriores principalmente nos primeiros valores de atrasos. Eles podem ser caracterizados por modelos Autoregressivos com Média Móvel e Entradas Externas (ARMAX, acrônimo em inglês para Autoregressive with Moving Average and Exogenous Input) [6]. O perfil da FAC exibe um padrão fixo nos primeiros retardos de tempo e segue-se um padrão composto de exponenciais amortecidas com uma ou duas inclinações. Na Figura 6.b é apresentado o perfil e a magnitude da FCC do sinal P_{ASM03} . Alguns sinais monitorados possuem correlações com o sinal P_{ASM03} principalmente nos atrasos próximo da origem. Com o aumento do número de atrasos, observa-se uma variação exponencial amortecida para as magnitudes das correlações. Um procedimento semelhante ao descrito aqui para o sinal P_{ASM03} foi realizado para os demais sinais da Tabela 2. Na Tabela 4 são apresentados os resultados da análise de correlações de alguns dos sinais monitorados.

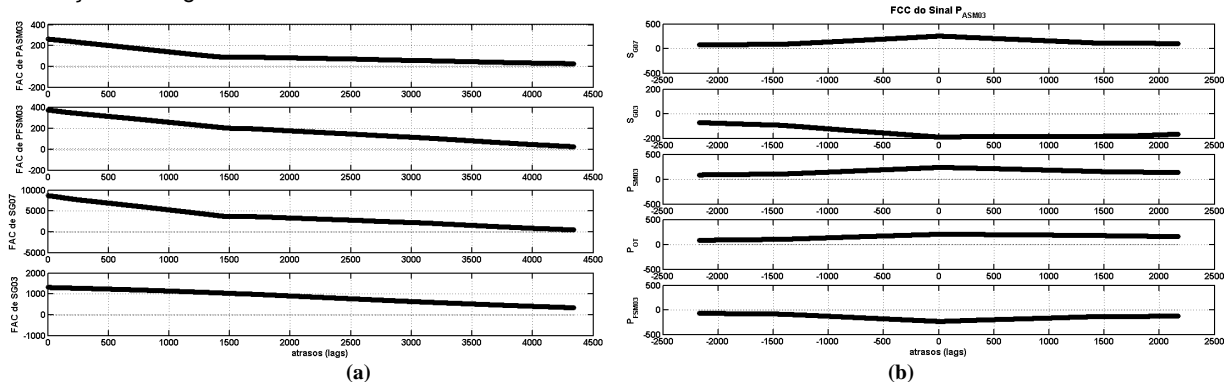


Figura 6 – (a) Perfil da FAC para alguns sinais monitorados. (b) Perfil da FCC do sinal P_{ASM03} .

Tabela 4 – Resultados da Análise de Correlações entre os sinais

| Sinal | FAC | FCC |
|-------------|-------------|--|
| P_{ASM03} | P_{ASM03} | S_{G03} , S_{G07} e P_{SM03} |
| P_{FSM03} | P_{FSM03} | S_{G03} , S_{G07} , P_{SM03} e P_{FVD} |

A terceira etapa consiste em especificar a estrutura do modelo matemático que será utilizado para representar o servomotor. Nesse trabalho a seguinte estrutura ARMAX será utilizada:

$$A(q^{-1})y(k) = q^{-d}B(q^{-1})U(k) + C(q^{-1})\varepsilon(k) \quad (4)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} \dots + a_{n_a}q^{-n_a}$$

$$B(q^{-1}) = [B_0(q^{-1}) \ B_1(q^{-1}) \ B_2(q^{-2})]$$

$$B_0(q^{-1}) = b_{00} + b_{01}q^{-1} + \dots + b_{0n_{b0}}q^{-n_{b0}}$$

$$B_1(q^{-1}) = b_{10} + b_{12}q^{-1} + \dots + b_{1n_{b1}}q^{-n_{b1}}$$

$$B_2(q^{-1}) = b_{20} + b_{21}q^{-1} + \dots + b_{2n_{b2}}q^{-n_{b2}}$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1q^{-1} + c_2q^{-2} \dots + c_{n_c}q^{-n_c}$$

sendo: k é o intervalo discreto um múltiplo inteiro do intervalo de amostragem; q^{-1} o operador atraso discreto; $\varepsilon(k)$ um ruído descorrelacionado que supostamente corrompe os dados do modelo concebido em um ambiente estocástico; $y(k)$ e $u(k)$ são os sinais de saída e entrada e d é o operador atraso discreto.

Os testes de resposta ao degrau realizados no sistema em estudo demonstraram que uma freqüência de amostragem de 30Hz são valores apropriados para representar a dinâmica do servo-motor. Os sinais de entrada e saída foram escolhidos com base nas correlações identificadas na Tabela 4 e na experiência dos engenheiros de manutenção especialistas da empresa. Os sinais escolhidos foram os seguintes:

$$y(t) = \bar{P}_\Delta(k)$$

$$P_\Delta(k) = P_{ASM03}(k) - P_{FSM03}(k)$$

$$U(k) = [P_{SM03}(k) \ S_{G03}(k) \ S_{G07}(k)]^T$$

A escolha dos valores n_a , n_{b0} , n_{b1} , n_{b2} e d foi realizada analisando a relação de custo e benefício entre a complexidade estrutural do modelo e sua capacidade de interpretar corretamente a dinâmica dos dados presentes no teste de identificação. Com base nessa análise, os valores encontrados para esses parâmetros foram $n_a = 2$, $n_{b0} = 3$, $n_{b1} = 2$, $n_{b2} = 1$, $n_c = 1$, $d = 0$.

A estimação e a validação do modelo, objetivos da etapa 4, foram realizadas no ambiente computacional MATLAB utilizando o Toolbox de Identificação de Sistemas (6). O método de estimação utilizado foi o de Mínimos quadrados não-recursivo. A massa de dados do ensaio foi dividida em duas partes: a primeira metade foi utilizada para a estimação dos parâmetros e a segunda para a validação. Na Figura 7 é apresentada a comparação entre a resposta do modelo e o sinal real $P_\Delta(k)$ com os dados de validação e de treinamento. Verifica-se que o modelo consegue explicar a dinâmica do sinal na maior parte do intervalo de tempo analisado, como pode ser comprovado pela superposição parcial das curvas.

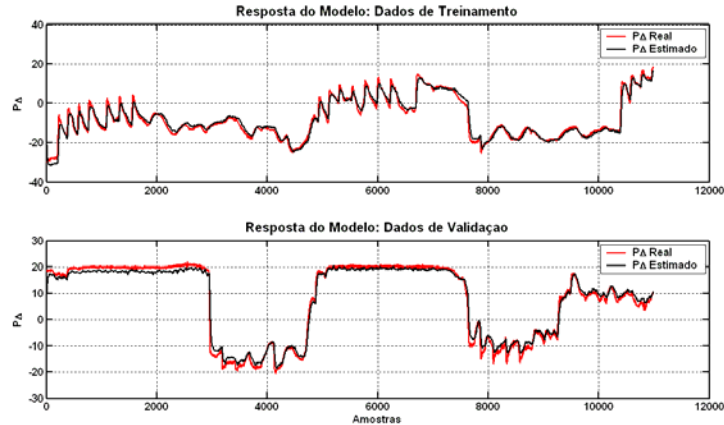


Figura 7 – Comparação entre o valor real do sinal $P_\Delta(k)$ e o valor estimado pelo modelo multivariável para o ensaio de aplicação de variações do tipo degrau na referência de potência ativa via comando manual.

Para mensurar a capacidade de predição do modelo da Eq. (4) o seguinte índice que mede o Erro Médio Quadrático (EMQ) foi utilizado neste trabalho:

$$EMQ = \frac{\sum_{k=0}^N [P_\Delta(k) - \bar{P}_\Delta(k)]^2}{N}$$

Quanto menor o valor de EMQ, mais próximo o sinal estimado $\bar{P}_\Delta(k)$ está do sinal real medido $P_\Delta(k)$ ao longo das N amostras analisadas. Para caracterizar o comportamento dinâmico do SM3 em outras condições operacionais foram realizados 7 ensaios dinâmicos em três condições operacionais diferentes: Partida, Redução de Carga e Aumento de Carga. Na Tabela 5 são apresentados os resultados da estimação e da validação dos modelos identificados em cada ensaio. A análise dos valores da tabela revela que em algumas situações existem irregularidades nos valores apresentados. Nas condições C₀₁-1 e C₀₁-2 são observados valores de E_{MQT} muito

acima dos valores de E_{MQV} . Esse fato pode estar relacionado a existência de relações não-lineares presentes nos dados de treinamento e que não foram adequadamente representadas pelo modelo linear.

Tabela 5: Condições operacionais observadas durante os ensaios.

| Condição Operacional | | Data | E_{MQT} | E_{MQV} |
|----------------------|------------------|---------------------|-------------------|------------------|
| ID | Descrição | | | |
| C ₀₁ -1 | Partida | 28/06/09 – 08:52:50 | 67.53594089172539 | 4.43242213345565 |
| C ₀₁ -2 | | 28/06/09 – 13:01:47 | 20.82005760191212 | 6.20654555142797 |
| C ₀₂ -1 | Redução de Carga | 28/06/09 – 09:42:30 | 0.58473460690685 | 1.05464631414351 |
| C ₀₂ -2 | | 28/06/09 – 13:01:47 | 2.41736470630475 | 2.13090002326599 |
| C ₀₂ -3 | | 28/06/09 – 13:21:04 | 3.16342485625763 | 5.13911868550898 |
| C ₀₃ -1 | Aumento de Carga | 28/06/09 – 09:46:40 | 3.90472454713649 | 3.29419532197727 |
| C ₀₃ -2 | | 28/06/09 – 13:35:17 | 1.60911617668589 | 5.44665572914608 |

Na Figura 8 são apresentados os valores dos parâmetros dos modelos identificados em cada um dos 7 ensaios realizados. Pode-se observar que os parâmetros de $C(q^{-1})$ apresentam pouca relevância quanto à variação da condição operacional, desta forma, estes podem ser descartados para a análise que se segue. Já os polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ apresentam uma relevância considerável quanto a condição operacional. O coeficiente a_1 , por exemplo, segue o seguinte padrão: apresenta valores próximos de -1 nos ensaios C₀₁-1 e C₀₁-2; valores na faixa de -0,6 a -0,8 nos ensaios C₀₂-1, C₀₂-2 e C₀₂-3, e valores em torno de -0,8 nos ensaios C₀₃-1 e C₀₃-2. O coeficiente a_2 tem outro padrão de variação: apresenta valores positivos próximos de zero nos ensaios C₀₁-1 e C₀₁-2; negativo em torno de 0,15 nos ensaios C₀₂-1, C₀₂-2 e C₀₂-3; e para os ensaios C₀₃-1 e C₀₃-2, apresenta valores negativos próximos de zero. Os coeficientes polinomiais b_{00} , b_{01} , b_{02} e b_{03} apresentam uma variação considerável em resposta às alterações da condição operacional mas essa variação não se dá de forma padronizada. Já os coeficientes b_{10} , b_{11} , b_{12} , b_{20} e b_{21} apresentam uma baixa variação em torno de zero. Na próxima seção será descrito o projeto de um sistema baseado em lógica Fuzzy para identificar a condição operacional com base nas variações dos coeficientes dos modelos identificados na Tabela 6.

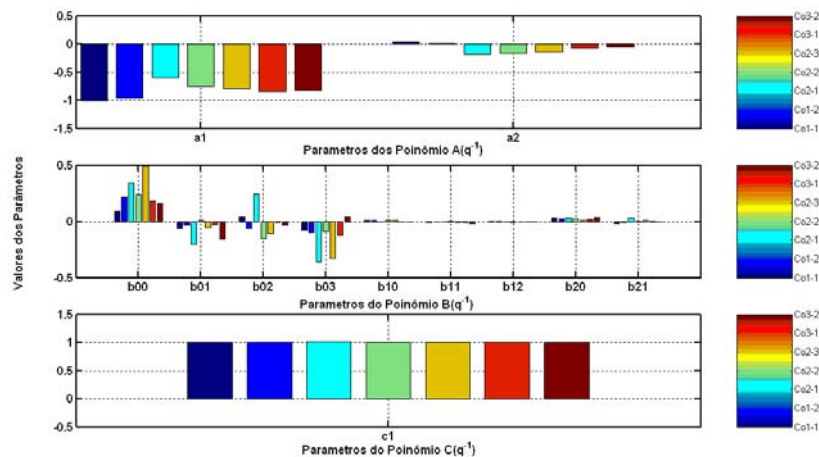


Figura 8 – Valores dos parâmetros dos polinômios $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$ e $C(q^{-1})$ em cada ensaio realizado.

4.0 - PROJETO DO SISTEMA FUZZY DE IDENTIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO OPERACIONAL - SFIC

Nesta seção será apresentado o projeto do Sistema Fuzzy de Identificação da Condição Operacional (SFIC) um dos componentes da estratégia DIF proposta neste trabalho. O objetivo do SFIC é correlacionar as alterações dos parâmetros do modelo do SM3 à condição operacional da UGH-16. Conforme descrito na seção 3 três condições são definidas: Partida, Redução de Carga e Aumento de Carga. Em cada condição foi realizada a estimação de um modelo matemático cujos parâmetros apresentam valores bem definidos em cada condição de operação. A primeira etapa do projeto do SFIC é a definição das variáveis de entrada. De acordo com a análise apresentada na seção anterior, os coeficientes a_1 e a_2 foram escolhidos como as variáveis de entrada do SFIC pois estes apresentam uma variação padronizada conforme a condição operacional é modificada. Uma vez definidas as variáveis de entrada e tendo conhecido os seus respectivos comportamentos, pode-se, portanto, definir os conjuntos fuzzy que caracterizam as alterações dos parâmetros dos modelos em resposta às alterações da condição operacional. Para isso serão utilizadas funções de pertinências gaussianas onde serão utilizadas 2 funções por entrada. Cada função de pertinência terá duas especificações: o centro e sua excentricidade.

A escolha do número de saídas do SFIC deve levar em consideração o mapeamento existente entre os valores dos parâmetros e as condições operacionais. Essa relação é descrita na Tabela 8 onde são apresentados os valores dos coeficientes dos modelos em cada ensaio e o valor desejado para as saídas do SFIC. Serão utilizadas três saídas uma para cada condição operacional: Co1 indica a condição Partida; Co2 indica Redução de Carga e Co3 que indica o Aumento de Carga. Cada saída deve ser igual a 1 quando os parâmetros nas entradas (a_1 e a_2) forem

referentes a condição operacional da saída e deve ser igual a zero em todas as outras situações. Neste trabalho cada uma das três saídas será representada por um Sistema Fuzzy de Sugeno com defuzzificador do tipo média ponderada. A combinação das entradas e a operação de implicação são realizadas com o operador mínimo. A operação de agregação utiliza a função máximo.

Tabela 8 – Valores dos coeficientes a_1 e a_2 em cada condição operacional.

| Condição: | | Parâmetros | | Saídas do SFIC | | |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----|-----|
| ID | Descrição | a_1 | a_2 | Co1 | Co2 | Co3 |
| C ₀₁ -1 | Partida | -1.01616683298874 | 0.03497336814450 | 1 | 0 | 0 |
| C ₀₁ -2 | | -0.95968374299746 | 0.01205287980095 | 1 | 0 | 0 |
| C ₀₂ -1 | Redução de Carga | -0.60072258198069 | -0.18224467556326 | 0 | 1 | 0 |
| C ₀₂ -2 | | -0.75829451955575 | -0.17286610186154 | 0 | 1 | 0 |
| C ₀₂ -3 | | -0.79456310650446 | -0.14284356660640 | 0 | 1 | 0 |
| C ₀₃ -1 | Aumento de carga | -0.84287909186743 | -0.08412845449000 | 0 | 0 | 1 |
| C ₀₃ -2 | | -0.82543834801131 | -0.05382016307700 | 0 | 0 | 1 |

As regras do SFIC, a localização dos conjuntos de entrada e os coeficientes das funções da saída foram definidos com o algoritmo de estimação de modelos fuzzy denominado *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System* (ANFIS), disponível no Toolbox de Sistemas Fuzzy do Matlab (6). AFINS é um algoritmo de ajuste de parâmetros de sistemas fuzzy de Sugeno baseado em dados de treinamento. Na Tabela 9 é apresentado o resultado do treinamento e da validação do SFIC. Os modelos dos ensaios C₀₁-2, C₀₂-1, C₀₂-2 e C₀₃-1 foram utilizados para o treinamento do SFIC e os modelos dos ensaios C₀₁-1, C₀₂-3, C₀₂-2 e C₀₃-1 foram utilizados para a validação. As saídas estimadas pelo SFIC são bem próximas dos valores especificados no projeto.

Tabela 9 – Resultado do Treinamento e da validação do SFIC

| Dados de Treinamento | | | |
|----------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Entradas | Saídas Estimadas pelo SFIC | | |
| ID | Co1 | Co2 | Co3 |
| C ₀₁ -2 | 0.99999947965688 | -0.00000000648407 | 0.0 |
| C ₀₂ -1 | 0.0 | 1.00000036149544 | 0.0 |
| C ₀₂ -2 | 0.0 | 0.99999888300219 | 0.0 |
| C ₀₃ -1 | 0.0 | 0.00000001182891 | 0.99999941809555 |
| Dados de Validação | | | |
| Entradas | Saídas Estimadas pelo SFIC | | |
| ID | Co1 | Co2 | Co3 |
| C ₀₁ -1 | 1.02835877936086 | 0.00075355991568 | -0.00000000000000 |
| C ₀₂ -3 | -0.00000000000000 | 0.99999888300219 | 0 |
| C ₀₃ -2 | -0.00000000000000 | -0.00548031234524 | 0.98995575613197 |

5.0 - CONCLUSÃO

Um conjunto de dados reais obtidos a partir da monitoração de um servomotor hidráulico foi utilizado para estimar os parâmetros de modelos lineares que emulam o comportamento desse equipamento em três condições operacionais. O método de estimação utilizado foi o de mínimos quadrados não recursivo e a validação, baseada na comparação da resposta no tempo, indicou que os modelos estimados são boas representações da dinâmica do equipamento analisado. De posse desses modelos, que correspondem ao comportamento normal, é possível detectar, prematuramente, problemas nos servomotores a partir da comparação entre a saída dos modelos e os sinais reais. Uma estratégia DIF baseada em lógica Fuzzy foi proposta. O esquema utiliza um método de identificação da condição operacional baseado nas alterações dos parâmetros dos modelos matemáticos de referência de comportamento normal. Até o presente momento, a estratégia DIF proposta ainda não foi validada com um caso real onde foi comprovada uma alteração no comportamento do SM3 e como essa alteração efetivamente modifica os parâmetros do modelo matemático. Para que essa comprovação seja possível é necessário reunir informação de monitoração em uma condição de falha comprovada. Esses estudos já estão em andamento e logo que possível serão reportados.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) - Patton, R. J., Frank, P. M., and Clark, R. N., editors (1989). Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application. Control Engineering Series. Prentice Hall, London
- (2) - Chen, J. and Patton, R. J. (1999). Robust Model Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems. Kluwer Academic
- (3) - Basseville, M. and Nikiforov, I. V. (1993). Detection of Abrupt Changes: Theory and Application. Prentice Hall
- (4) - Gertler, J. (1998). Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems. Marcel Dekker, New York.
- (5) - Wang, Li-Xin (1997). A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice Hall PTR.
- (6) - Ljung, Lennart, (2005). System Identification Toolbox 7 User's Guide.
- (7) - The MathWorks, Inc. (2002), Fuzzy Logic Toolbox User's Guide.

7.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Nascimento Moutinho nasceu em Belém, Pará, Brasil, em 19 de setembro de 1981. Formou-se no curso Técnico em Eletrônica pelo Centro Federal de Ensino Tecnológico do Pará (CEFET-PA) no ano de 2001. Um ano antes, ingressou no curso de graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará (UFPA), obtendo o título de Eng. Eletrônico, em agosto de 2004. Obteve, em fevereiro de 2007, seu mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPEGE) da referida instituição, onde atualmente realiza seu curso de doutorado. Desde março de 2007 está com as Centrais Elétricas do Norte do Brasil S/A, conhecida como ELETROBRAS-ELETRONORTE, onde suas principais atividades incluem o projeto de sistemas de monitoração, diagnóstico e controle de sistemas elétricos de potência baseados em técnicas de inteligência artificial e estratégias de controle digital avançadas. Já publicou artigos publicados em congressos nacionais e internacionais e em periódicos de circulação internacional.