
ESTABILIZADOR DE SISTEMAS DE POTENCIA DIGITAL APLICADO A UMA UNIDADE GERADORA DA UHE DE TUCURUI

Fabrcio G. Nogueira¹
fnogueira@ufpa.br

Carlos T. da Costa Junior¹
cartav@ufpa.br

Paulo S. Nascimento Filho¹
paulosnf@gmail.com

Marcus Ciro Gomes¹
marcuscmg@gmail.com

Walter Barra Junior¹
walbarra@ufpa.br

José A. L. Barreiros¹
barreiro@ufpa.br

Anderson R. B. Moraes¹
andersonrbm@gmail.com

Jânio José de Lana²
janio.lana@eletronorte.gov.br

¹ Universidade Federal do Pará (UFPA)
Instituto de Tecnologia
Campus Universitário do Guamá, Belém, Pará, 66075-900

² Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte)
Usina Hidrelétrica de Tucuruí, Tucuruí, Pará.

Abstract: This paper presents the development and results of field tests of a digital power system stabilizer (PSS), designed for the damping of electromechanical oscillations in interconnected systems. Experimental tests were performed in a 350 MVA hydrogenerator unit, of the Tucuruí Power Plant. The PSS damper control law was embedded in a digital hardware system based on a digital signal controller (DSPIC 30f5011). The structure of the control law is in discrete time RST canonical form, and the controller parameters were calculated using the pole shifting technique. For purposes of the controller design, the dynamics of the plant, in the considered operating point, was represented by a parametric model, which was estimated from data measured in the field. The experimental results showed an excellent performance of the damping of electromechanical modes observable UHE Tucuruí by digital PSS.

Keywords: Power System Stabilizer, Electromechanical Oscillations, Pole Placement

Resumo Este trabalho apresenta o desenvolvimento e resultados de testes de campo de um estabilizador de sistemas de potência (ESP) digital, destinado ao amortecimento de oscilações eletromecânicas em sistemas interligados. Os testes experimentais foram efetuados em uma das unidades hidrogeradoras, de 350 MVA, da UHE de Tucuruí. A lei de controle amortecedor do ESP digital foi embarcada em um sistema de *hardware* baseado em um controlador digital de sinais (DSPIC 30f5011). A estrutura da lei de controle é na forma canônica RST, de tempo discreto, sendo os parâmetros do controlador calculados através da técnica de deslocamento radial de pólos. Para fins de projeto, a dinâmica da planta, no ponto de operação considerado, foi representada por um modelo paramétrico, o qual foi estimado a partir de dados medidos em campo. Os resultados experimentais mostraram um excelente desempenho do ESP digital no amortecimento de um dos modos eletromecânicos observável na UHE de Tucuruí.

Palavras Chaves: Estabilizador de Sistemas de Potência, Oscilações Eletromecânicas, Posicionamento de Pólos.

Artigo submetido em 12/05/2010 (Id: 01147)

1ª revisão em 03/08/2010

2ª revisão em 25/11/2010

Publicação recomendada pelo Prof. Alexandre Bazanella

1 INTRODUÇÃO

Oscilações eletromecânicas são fenômenos que ocorrem entre geradores interligados em um sistema elétrico de potência. Estas oscilações são prejudiciais, pois diminuem as margens de estabilidade do sistema de potência, podendo limitar sensivelmente a quantidade máxima de potência transmitida. Os efeitos também causam prejuízos à estrutura física da planta de geração, visto que as oscilações eletromecânicas se refletem em esforços nos eixos das máquinas, e por conseqüência a redução da vida útil das mesmas (Kundur, 1994) (Rogers, 2000).

A presença destas oscilações aumenta os riscos de paradas não programadas, diminuindo assim a disponibilidade do sistema. Como estes fenômenos estão relacionados à natureza física dos sistemas elétricos de potência, eles não podem ser evitados. Portanto, as oscilações eletromecânicas devem ser devidamente amortecidas através de sistemas de controle automático, minimizando assim seus efeitos prejudiciais.

O dispositivo de controle mais utilizado para o amortecimento de oscilações eletromecânicas são os estabilizadores de sistemas de potência (ESP), que atuam modulando a referência de tensão do regulador automático de tensão (RAT) da respectiva unidade geradora. Como sinal de realimentação para o ESP, diversos sinais podem ser considerados, sendo que os mais utilizados são a velocidade angular do rotor, a potência ativa, ou a potência acelerante, a qual é obtida por estimação a partir de medidas da velocidade angular e da potência ativa.

O estudo de técnicas de controle para amortecimento de oscilações eletromecânicas tem sido uma ativa área de pesquisa nos últimos anos, indo desde técnica de controle convencional, até o uso de técnicas avançadas de controle, incluindo estratégias de controle adaptativo generalizado (Barreiros, 1995), técnicas de controle baseado em inteligência computacional (Costa Junior, 1999) (Barra Junior et al., 2005), e metodologias de controle robusto (Ferreira et al., 2006). Muitas dessas técnicas digitais de controle têm sido testadas somente em ambiente de simulação computacional ou, no máximo, em modelos de laboratório em escala reduzida (Ramakrishnaa & Malik, 2009). Dessa forma, uma das contribuições principais do presente artigo, é apresentar um caso completo de desenvolvimento e testes de um sistema de controle estabilizador em um sistema real de grande porte (UHE de Tucuruí). Vale observar que exemplos de implementação e avaliação experimental de técnicas modernas de controle digital em sistemas reais de grande porte, como é o caso do estudo apresentado neste artigo, são raramente encontrados na literatura científica.

Assim sendo, neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento e resultados de testes de campo de um ESP digital, para o amortecimento de oscilações eletromecânicas observáveis em sinais mensuráveis nas unidades geradoras da UHE de Tucuruí. A lei de controle amortecedor do ESP digital foi embarcada em um sistema de *hardware* baseado em um controlador digital de sinais (DSPIC 30f5011), desenvolvido especificamente para

esta aplicação. A estrutura da lei de controle é na forma canônica RST, de tempo discreto, sendo os parâmetros do controlador calculados através do uso da técnica de deslocamento radial de pólos (Landau & Zito, 2006). Para fins de projeto, a dinâmica da planta, no ponto de operação considerado, foi representada por um modelo paramétrico, o qual foi estimado a partir de dados medidos em campo, em uma das unidades hidrogeradoras da UHE de Tucuruí. Os resultados experimentais mostraram um excelente desempenho do ESP digital no amortecimento de um dos modos eletromecânicos observáveis na planta.

O artigo está organizado da seguinte forma: na Seção 2, é descrita a arquitetura do *hardware* do controlador desenvolvido; na Seção 3, são apresentados os testes de identificação realizados em campo; na Seção 4, é abordado o método de controle por posicionamento de pólos, utilizada no cálculo dos parâmetros da lei de controle do ESP digital. Os testes de controle na UHE de Tucuruí são apresentados e discutidos na Seção 5. Finalmente, na Seção 6, apresentam-se as conclusões do trabalho.

2 HARDWARE DO ESP DIGITAL

Uma característica especial do sistema de *hardware* do ESP digital desenvolvido neste trabalho, é que a lei de controle amortecedor do ESP demanda uma considerável capacidade de representação numérica da CPU, para uma execução eficiente do algoritmo de controle. Conforme será mostrado mais adiante, a estrutura da lei de controle utilizada é na forma de um filtro digital, representado por equação a diferenças. Os coeficientes dessa lei de controle devem ser do tipo ponto flutuante de elevada precisão (precisão de 32 bits). Além disso, visando obter maior flexibilidade para inclusão de novas funcionalidades em versões futuras do equipamento, como adaptação, por exemplo, optou-se por um *hardware* baseado em controlador digital de sinais (modelo DSPIC30f5011), uma vez que, para esta plataforma, existe boa disponibilidade de compiladores C para programação em alto nível. Este enfoque mostrou-se mais flexível que a opção de implementar a lei de controle em um *hardware* baseado em controladores lógicos programáveis (CLPs) comercialmente disponíveis.

Assim sendo, o protótipo do ESP digital desenvolvido neste trabalho foi implementado na forma de um sistema embarcado, o qual está ilustrado de forma simplificada no diagrama em blocos da Figura 1. O sistema de *hardware* do ESP digital é formado basicamente por três módulos, sendo um módulo para realizar a interface dos sinais analógicos de entrada e saída, o módulo principal que é responsável por executar a lei de controle amortecedor do ESP digital, e um módulo dedicado às tarefas de comunicação do ESP com outros dispositivos digitais, tais como microcomputadores (PC), para exibição e análise dos dados adquiridos.

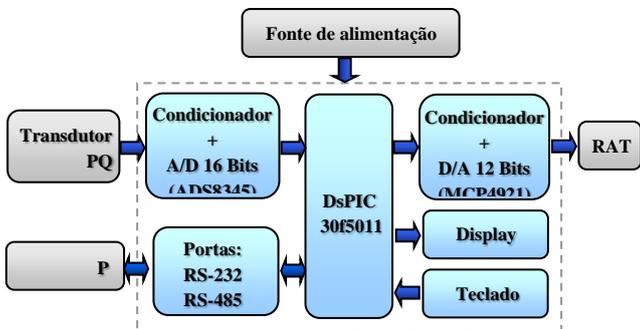


Figura 1 – Diagrama em blocos simplificado do *hardware* do ESP digital.

As variáveis de entrada para o controlador são sinais analógicos obtidos do condicionamento de variáveis mensuráveis no estator do gerador. O condicionamento consiste de filtragem passa-baixa para rejeição de ruídos, filtragem passa-alta, para rejeição de componentes CC nos sinais medidos, e ajuste de nível de tensão para digitalização por parte do *hardware* do ESP digital. A principal variável medida da saída do gerador é a potência ativa, a qual é obtida através do uso de um transdutor PQVI, o qual fornece um sinal analógico proporcional ao valor instantâneo da potência ativa medida nos terminais da unidade geradora (Figura 1). O sinal de saída do transdutor é um valor de tensão em na faixa de 0 a 5 volts. Após a etapa de condicionamento, o sinal de medida estará pronto para a amostragem e digitalização, através de um conversor analógico-digital (A/D) de 16 bits (ADS8345).

O valor numérico do sinal de controle produzido pelo ESP digital é convertido para um nível de tensão analógica correspondente, o qual é então adicionado ao valor da referência de tensão do regulador automático de tensão da unidade geradora (Figura 1), modulando esta referência quando o sistema estiver sujeito a oscilações eletromecânicas.

A troca de informações do ESP digital com outros dispositivos é realizada através de portas de comunicação serial RS-232 e RS-485. Durante os ensaios em campo, o sistema pode ser conectado a um computador (PC), com um programa de interface homem-máquina (IHM), possibilitando o armazenamento e monitoramento dos dados de entrada e saída da planta. A parametrização do ESP digital pode ser realizada com o auxílio da IHM, ou através de um teclado e uma tela LCD embutidos no próprio *hardware* do controlador embarcado (ou seja, do ESP digital).

O processamento digital do sistema embarcado do ESP é realizado por um controlador de sinais digitais (DSPIC 30f5011), que pode ser programado em linguagem C, o que facilita consideravelmente o desenvolvimento e incorporação de novas funcionalidades ao controlador. O *software* embarcado no controlador é formado basicamente por rotinas de: processamento digital dos sinais analógicos, processamento da lei de controle do ESP digital, interface com a IHM local e interfaces de comunicação serial. Esta estrutura modular

facilita sobremaneira a interação do usuário do sistema durante os testes de campo.

2 IDENTIFICAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO DA PLANTA

O conhecimento de um modelo dinâmico para representar a planta no ponto de operação considerado, é necessário para o projeto de um sistema de controle bem ajustado. Existem diversas metodologias para a obtenção de tais modelos. Uma delas é a modelagem baseada na física do sistema (modelo fenomenológico), tal abordagem tem a severa desvantagem de necessitar de elevado nível de informação a priori sobre a planta. Na prática, observa-se que tal nível de conhecimento sobre a planta nem sempre estará acessível ao projetista, principalmente quando se trata de sistemas reais de complexidade elevada, como é o caso de sistemas elétricos de geração de energia. Em tais situações, é muito mais indicado o emprego de metodologias experimentais de identificação paramétrica, o que permite obter modelos dinâmicos da planta através do processamento de dados coletados em campo, exigindo pouco conhecimento prévio sobre valores de grandezas físicas do sistema real em estudo.

Dessa forma, neste trabalho, os parâmetros dos modelos matemáticos utilizados para fins do projeto da lei de controle do ESP digital, foram estimados através do emprego de métodos de identificação paramétrica, que utilizam medidas de entrada e saída coletadas na planta. Para uma correta estimação dos parâmetros do modelo, é necessário que exista uma correlação significativa entre tais variáveis. Os pares de dados foram coletados durante testes de campo realizados em uma UGH de 350MVA, pertencente à casa de máquinas 1 da UHE de Tucuruí.

A Figura 2 ilustra o diagrama em blocos simplificado da planta modelada. A planta a ser identificada inclui tanto a dinâmica do sistema de potência quanto a dinâmica associada aos filtros analógicos de condicionamento do sinal de potência elétrica. Vale ressaltar que normalmente os efeitos dinâmicos da instrumentação são desprezados em estudos de simulação computacional. No entanto, em implementações práticas, como é o caso deste trabalho, deve-se levar em conta tais efeitos, uma vez que, em sistemas reais, existe considerável incerteza em relação aos valores atuais dos parâmetros das máquinas e da instrumentação, em comparação com aqueles fornecidos nos manuais dos fabricantes. Além disso, operações de manutenção fracamente documentadas também podem contribuir para ampliar as incertezas.

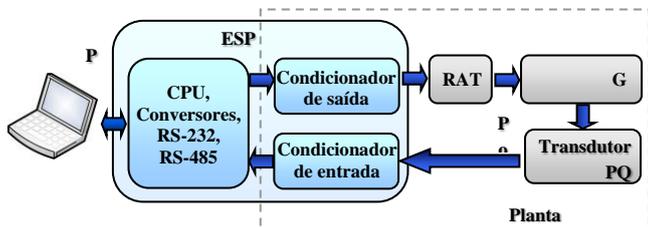


Figura 2 – Diagrama em blocos da planta modelada para o projeto do controlador do ESP digital.

Durante a etapa de coleta de dados para a estimação do modelo paramétrico da planta, a ação de controle do ESP digital foi bloqueada, estando ativadas somente as funções de aquisição de dados e de injeção de sinais de teste, conforme ilustrado na Figura 2.

2.1 Projeto e Geração dos Sinais de Teste para Excitação da Planta

Com o objetivo de extrair informação dinâmica da planta, durante a coleta dos dados o sistema deve ser levemente perturbado em torno do ponto de operação atual. Uma variação de grau de pequena amplitude na referência do RAT é um recurso muito utilizado para se obter uma estimativa preliminar do comportamento dinâmico da planta. Quando um modelo mais preciso é necessário, deve-se garantir que a faixa dinâmica de interesse, correspondente às oscilações eletromecânicas, seja uniformemente excitada.

Um sinal de excitação que aproxime as características de um ruído branco, excitando uniformemente a dinâmica da planta na faixa de frequência dos modos eletromecânicos, é um sinal de teste adequado para ser aplicado durante a etapa de coleta dos dados. Tal sinal de teste permite obter dados representativos da dinâmica da planta, contribuindo para a obtenção de modelos paramétricos de bom desempenho quanto à captura da informação relevante sobre os modos eletromecânicos dominantes. Assim sendo, um sinal de teste do tipo seqüência binária pseudo-aleatória (SBPA) é um sinal que apresenta tais características, podendo ser projetada para excitar o sistema em uma faixa de frequências em torno do modo de oscilação de interesse.

De acordo com Horowitz & Hill (1989), um sinal de teste do tipo SBPA pode ser projetado para excitar uniformemente uma faixa dinâmica de frequências definida em um intervalo $f_{\min} \leq f \leq f_{\max}$, onde f_{\min} e f_{\max} são respectivamente os limites inferior e superior da faixa de frequências excitadas. Uma seqüência SBPA é gerada digitalmente a partir de uma estrutura do tipo registrador de deslocamento com realimentação, conforme ilustrado na Figura 3. Para projetar o sinal de teste SBPA, o projetista deverá especificar os valores desejados de f_{\min} e f_{\max} e calcular os valores do número de células, N , e o intervalo de geração de amostras do

registrador de deslocamento, T_B , usando as seguintes fórmulas de projeto:

$$f_{\max} = \frac{0,44}{T_B} \quad (1)$$

$$f_{\min} = \frac{1}{(2^N - 1)T_B} \quad (2)$$

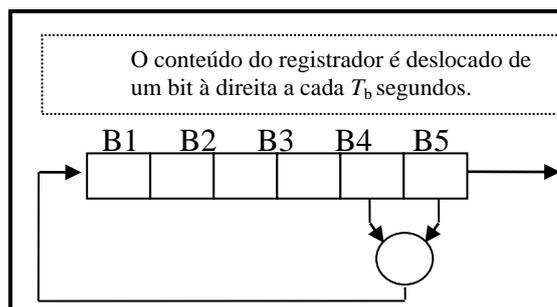


Figura 3 – Registrador de deslocamento para geração de sinal de teste SBPA, exemplo mostrado para um registrador com $N=6$ células.

2.2 Ensaios de Identificação em Campo

Os ensaios para aquisição de dados foram realizados em uma unidade hidrogeradora de 350 MVA (UGH 08), pertencente à casa de força número 1 da UHE de Tucuruí. Por restrições operacionais internas da própria concessionária, bem como devido ao nível de autorização concedida pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), para a realização deste tipo de teste em máquinas do Sistema Interligado Nacional (SIN), a aplicação de sinais de teste foi autorizada para ser efetuada em somente uma das máquinas da UHE.

Os sinais de teste, para excitação da planta, foram injetados em um ponto de soma do circuito somador do regulador automático de tensão (RAT), da respectiva unidade geradora, conforme esquema ilustrado na Figura 4. O ponto de operação da unidade geradora, durante os ensaios realizados, foi o seguinte: potência ativa $P_T = 300$ MW, potência reativa $Q_T = -16$ Mvar e valor RMS de tensão $V_T = 13,75$ kV. Durante o ensaio para a coleta de dados, foi desativada a ação do ESP analógico da máquina onde os testes foram efetuados (UGH 08), enquanto que os ESPs analógicos das demais máquinas permaneceram ativados.

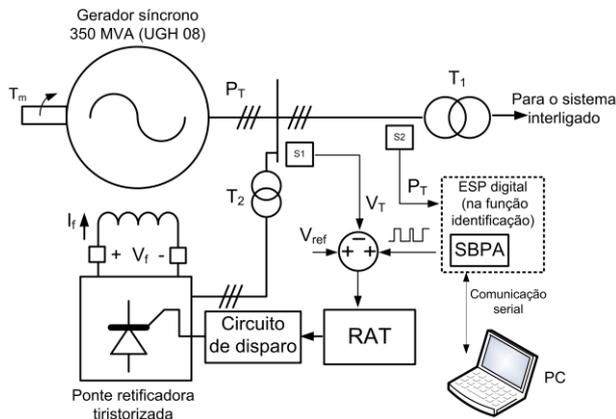


Figura 4 – Esquema simplificado dos testes de identificação executados na UGH 08 de Tucuruí.

A Figura 5 ilustra o ESP digital desenvolvido em ação durante testes em campo realizados em uma das unidades geradoras de 350MVA, da UHE de Tucuruí. O ESP digital foi instalado no armário do regulador automático de tensão da unidade hidrogeradora.

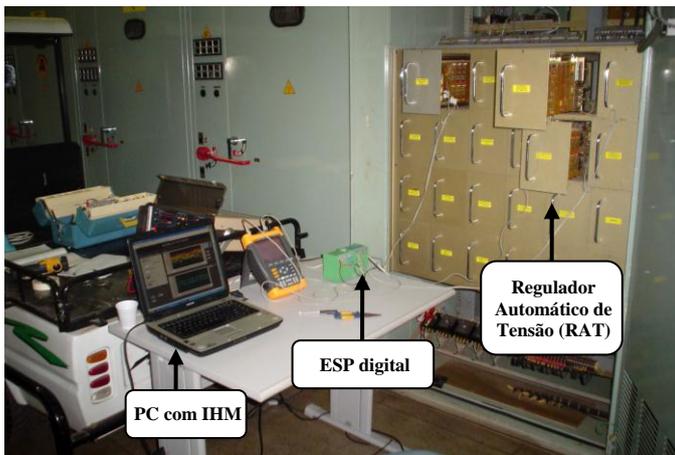


Figura 5 - Equipamentos instalados ao lado do RAT durante os ensaios em campo.

A resposta da potência ativa a uma variação degrau de pequena amplitude aplicado à referência do RAT é apresentada na Figura 6. Este ensaio é um recurso muito útil para a obtenção de um conhecimento inicial sobre o comportamento dinâmico da planta, revelando características importantes para a sua modelagem. A variação degrau foi parametrizada para gerar variações máximas de aproximadamente 0.01 pu na potência ativa do gerador, não afetando substancialmente a operação do sistema. Através deste teste foi possível observar o modo de oscilação eletromecânica (possivelmente um modo intraplanta) com frequência de 1,56 Hz, aproximadamente.

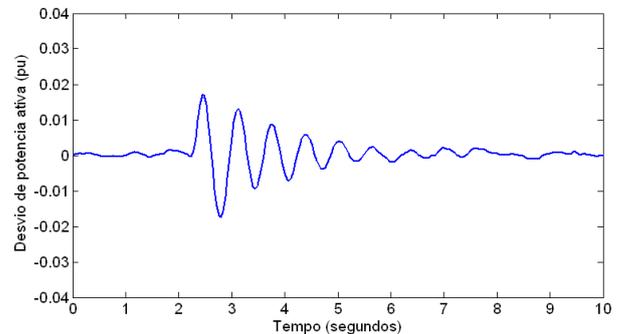


Figura 6 – Resposta do sistema a um degrau aplicado na referência do RAT.

No processo de identificação do sistema, o sinal de teste SBPA de pequena amplitude (1,4% da referência de tensão) foi parametrizado com $T_b = 80$ ms e $N = 9$, o que significa que a faixa de frequências excitada foi de 0,02 Hz a 5,5 Hz. Os pares de dados de entrada e saída foram coletados com um intervalo de amostragem de 40 ms. A Figura 7 apresenta uma parte dos sinais de entrada e saída adquiridos. O sinal de entrada é o desvio na referência de tensão do RAT (em pu), enquanto que o sinal de saída é o desvio na potência ativa de saída do gerador (em pu).

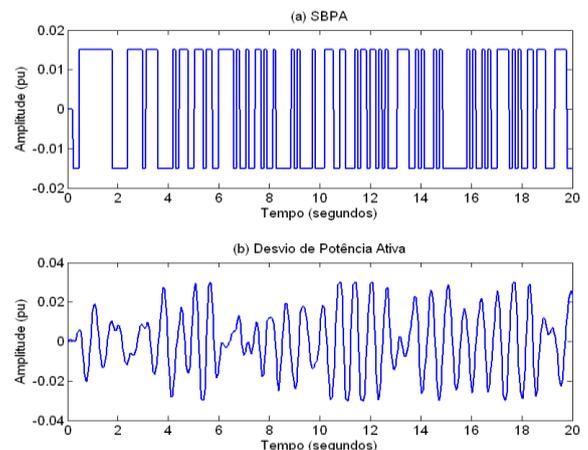


Figura 7 – Dados de entrada (SBPA) e saída (Potência Ativa) coletados em campo.

A Figura 8 apresenta a estimativa do espectro dos sinais de entrada e saída obtida a partir do processamento dos dados medidos no teste. Como esperado, no espectro dos dados que representam a resposta da planta, percebe-se claramente um pico em torno de 1,56 Hz, o que caracteriza o modo de oscilação pouco amortecido (Figura 8 (a)). Nota-se que o espectro da SBPA, por sua vez, é aproximadamente plano em torno da faixa especificada no projeto, caracterizando a semelhança com um ruído branco na faixa entre 0,02 hz e 5,5 hz (Figura 8 (b)), conforme foi projetado.

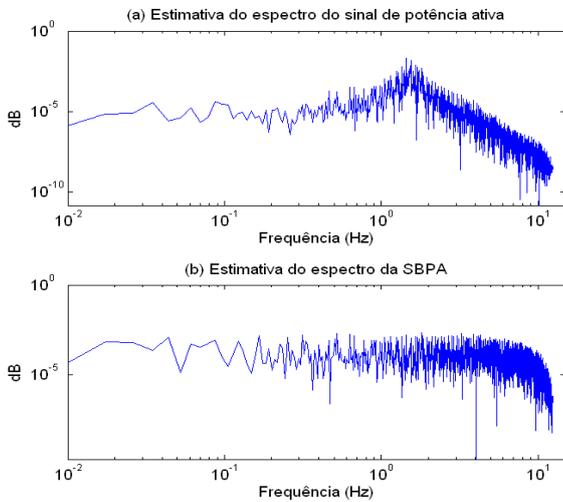


Figura 8 – Estimativa do espectro dos dados de entrada e saída adquiridos durante os ensaios de identificação.

Após a análise dos dados adquiridos em campo, foi realizado então o pré-processamento dos dados, o qual consistiu da retirada da componente DC do sinal de potência ativa e a divisão em dois subconjuntos de dados, sendo um utilizado no processo de estimação do modelo e outro usado para a validação do mesmo.

A estrutura selecionada para o modelo paramétrico linear foi do tipo ARX de tempo discreto, na forma (Landau, 2006):

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (3)$$

Na equação (3), $u(t)$ e $y(t)$ são os respectivos sinais de entrada e saída, d é o atraso de transporte discreto, $e(t)$ é o erro de modelagem e $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ são polinômios na forma:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_nAq^{-nA} \quad (4)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_nBq^{-nB} \quad (5)$$

Onde n é a ordem do modelo e a_n e b_n são os parâmetros a serem estimados. No caso da identificação de um modelo para projeto do ESP, $u(t)$ é uma perturbação SBPA aplicada à referência do RAT, enquanto $y(t)$ é a medida do desvio da potência ativa na saída do gerador, medida no transdutor PQVI.

O modelo paramétrico estimado para representar a dinâmica da planta, no ponto de operação considerado, foi obtido através de um algoritmo de mínimos quadrados não recursivo que minimiza a soma dos quadrados do erro de previsão, entre a saída do modelo estimado e a saída medida da planta.

Desta forma, os parâmetros de um modelo ARX de 4ª ordem foram estimados com um intervalo de amostragem de 40 ms, sendo que os valores obtidos são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros do modelo estimado ($T_s = 40$ ms).

Parâmetro	a1	a2	a3	a4
Valor	-2,2906	1,9721	-0,7191	0,1341
Parâmetro	b1	b2	B3	b4
Valor	-0,0076	-0,0292	-0,0289	0,0468

O modelo identificado capturou adequadamente o modo eletromecânico dominante. A Tabela 2 apresenta os pólos do modelo identificado, onde percebe-se a existência de um par de pólos com baixo amortecimento relativo (0,066) e com frequência natural de aproximadamente 1,56 Hz. Este par de pólos representa o modo de oscilação eletromecânica, que deve ter o amortecimento aumentado pela ação do ESP digital. O modo com frequência maior (5,18 Hz) provavelmente é um modo do sistema de excitação e encontra-se bem amortecido.

Tabela 2 – Pólos do modelo estimado ($T_s = 40$ ms).

Pólos	Amortecimento relativo	Frequência (Hz)
$0,9 \pm j0,372$	0,066	1,559
$0,245 \pm j0,285$	0,75	5,188

A comparação entre a saída real do sistema e a saída estimada pelo modelo ARX de quarta ordem é apresentada na Figura 9. Observa-se que o modelo capturou satisfatoriamente a dinâmica do modo de oscilação eletromecânico de 1,56 Hz.

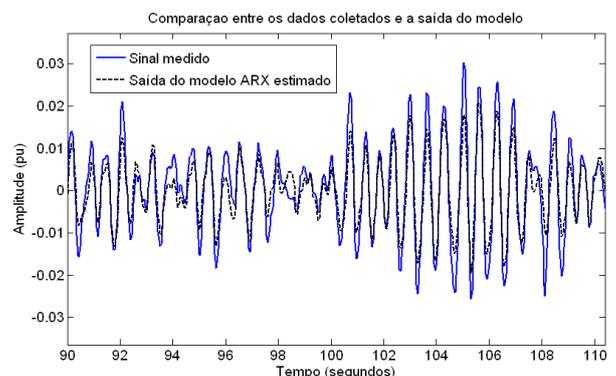


Figura 9 – Comparação entre as saídas real e do modelo estimado do sistema.

3 CONTROLADOR DO ESP DIGITAL

3.1 Estrutura RST

A lei de controle do ESP digital é baseada em uma estrutura canônica RST, que é formada por três filtros digitais (R, S, e T), ajustáveis de acordo com a resposta desejada para o sistema de controle. Esta estrutura tem dois graus de liberdade, visto que os polinômios R e S são projetados para atender as especificações de desempenho de regulação do sistema, enquanto o polinômio T é projetado a fim de atingir o desempenho desejado para o rastreamento da referência do

controlador (Landau, 2006). No caso do ESP, como a referência desejada é nula, visto que é apenas um controlador amortecedor, o polinômio T não é utilizado.

Os polinômios $R(q^{-1})$ e $S(q^{-1})$, do controlador, são expressos na forma:

$$R(q^{-1}) = r_0 + r_1q^{-1} + r_2q^{-2} + \dots + r_{nr}q^{-nr} \quad (6)$$

$$S(q^{-1}) = 1 + s_1q^{-1} + s_2q^{-2} + \dots + s_{ns}q^{-ns} \quad (7)$$

O diagrama em blocos da Figura 10 apresenta a estrutura simplificada do ESP digital desenvolvido. As oscilações eletromecânicas são medidas através do sinal de potência ativa. O ruído de medição do sinal é atenuado através de um filtro passa-baixas analógico de primeira ordem, com constante de tempo de 0,2 segundos (T_f). A componente DC é eliminada por um filtro passa-altas (*washout*), com constante de tempo de 3 segundos (T_w). Após a filtragem, o sinal é então digitalizado e processado pelo controlador RST. O sinal de controle resultante é aplicado a um saturador que limita a excursão do sinal em $\pm 10\%$ do valor da referência de tensão do regulador automático de tensão. E finalmente o sinal digital de saída do controlador é convertido para um sinal analógico adequado para aplicação no ponto de soma do RAT.

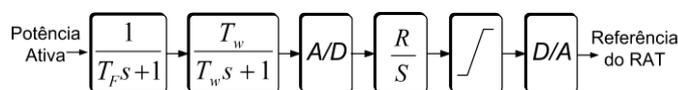


Figura 10 – Diagrama em blocos do controlador do ESP digital.

3.2 Posicionamento de Pólos

Os parâmetros dos polinômios $R(q^{-1})$ e $S(q^{-1})$ do ESP digital foram calculados através da técnica de posicionamento de pólos, que tem como objetivo determinar um controlador que gere um sistema em malha fechada estável com características especificadas de acordo com o desempenho desejado para a planta (máximo sobre-sinal, amortecimento, frequência natural, etc.). Para isto, os pólos do sistema controlado devem ser deslocados para uma nova posição satisfazendo o desempenho desejado (Åstrom, 1997) (Bobál, 2005).

A técnica de posicionamento de pólos, no caso do ESP digital, resume-se na busca dos polinômios $R(q^{-1})$ e $S(q^{-1})$ que satisfaçam a equação polinomial (8), conhecida como Equação Diofantina.

$$A(q^{-1})S(q^{-1}) + B(q^{-1})R(q^{-1}) = D(q^{-1}). \quad (8)$$

Onde $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ são os polinômios do modelo da planta obtidos na etapa de identificação (Seção 3), e $D(q^{-1})$ é um polinômio cujas raízes são os pólos desejados pelo projetista para a planta em malha fechada. $D(q^{-1})$ é especificado pelo projetista de acordo com o desempenho desejado.

Como o objetivo do ESP é ampliar o amortecimento natural (ζ) do modo pouco amortecido, capturado pelo modelo identificado da planta, sem alterar significativamente a frequência natural (ω_n) do respectivo modo, o polinômio $D(q^{-1})$ foi definido através do método de deslocamento radial de pólos, no qual o objetivo do controle é deslocar radialmente os pólos dominantes em direção à origem do círculo unitário no plano z , através de um fator α (fator de contração radial), calculado através da equação:

$$\alpha = \exp[-(\zeta_d - \zeta)\omega_n T_s] \quad (9)$$

, com $0 \leq \alpha \leq 1$. As variáveis ζ e ω_n são respectivamente o amortecimento e a frequência natural do modo de oscilação identificado, e T_s é o intervalo de amostragem (40 ms). Os valores de ζ e ω_n são obtidos dos parâmetros do modelo ARX identificado, enquanto que o projetista deve especificar o valor do amortecimento desejado ζ_d .

Os parâmetros dos polinômios $R(q^{-1})$ e $S(q^{-1})$ do controlador podem ser calculados através da resolução do seguinte sistema linear (para o caso do modelo da planta ser de 4ª ordem):

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & b_2 & b_1 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & b_3 & b_2 & b_1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 \\ a_4 & a_3 & a_2 & 0 & b_4 & b_3 & b_2 \\ 0 & a_4 & a_3 & 0 & 0 & b_4 & b_3 \\ 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha-1)a_1 \\ (\alpha^2-1)a_2 \\ (\alpha^3-1)a_3 \\ (\alpha^4-1)a_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Onde a_n e b_n são os coeficientes do modelo discreto da planta que foram previamente identificados, α é o fator de deslocamento radial especificado de acordo com o amortecimento desejado, e r_n e s_n são os coeficientes do controlador. A Tabela 3 ilustra os parâmetros do controlador digital do ESP, projetado para um ζ_d de 0,2.

Tabela 3 - Valores dos parâmetros do controlador RST ($T_s = 40$ ms).

Parâmetro	r0	r1	r2	R3
Valor	-2,5250	3,5145	-1,4971	0,3272
Parâmetro	s1	s2	s3	
Valor	0,0979	-0,0193	-0,1143	

4 TESTES DE CONTROLE EM CAMPO

O ESP digital desenvolvido foi testado na mesma unidade geradora na qual foram realizados os ensaios de identificação. Logo após os ensaios para o levantamento do modelo da planta, os parâmetros do controlador digital foram calculados através do método de deslocamento radial de pólos e atualizados na lei de controle embarcada no programa do módulo digital.

4.1 Degrau Aplicado na Referência do RAT

Foram realizados diversos testes de controle para a avaliação do desempenho do controlador operando em malha fechada. A Figura 11 ilustra a resposta a um degraú com amplitude de 0,01 pu aplicado na referência do RAT. É possível observar o bom desempenho do controlador no amortecimento do modo de oscilação eletromecânica.

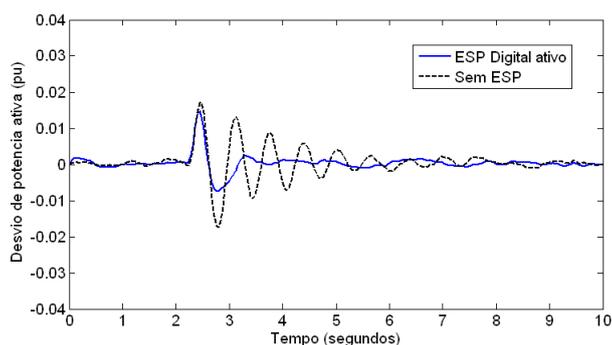


Figura 11 – Comparação da resposta ao degraú do sistema com e sem o ESP digital.

O correspondente sinal de controle do ESP digital, durante a resposta ao degraú aplicado na referência do RAT, é ilustrado na Figura 12, mostrando a suavidade de atuação do ESP digital.

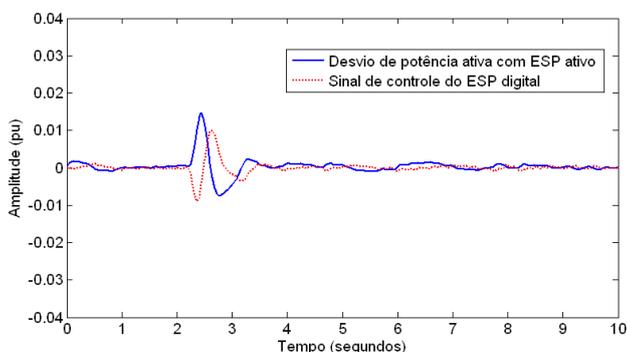


Figura 12 – Resposta do sistema e sinal de controle do ESP digital.

4.2 Identificação com ESP Digital Ativo

Para verificar experimentalmente o deslocamento dos pólos referentes ao modo eletromecânico dominante, um modelo paramétrico discreto com a mesma estrutura do modelo utilizado para o projeto do controlador (ARX de 4ª ordem), foi estimado para o sistema agora com o ESP digital ativado. Este modelo foi estimado de acordo com a metodologia apresentada na Seção 3 deste trabalho. Portanto, durante a etapa de coleta de dados, um sinal de teste SBPA foi somado à saída de controle do ESP digital. A Tabela 4 apresenta os parâmetros do modelo ARX estimado. Este modelo ARX é um modelo de ordem reduzida, capturando a dinâmica do sistema em malha fechada com o ESP digital.

Tabela 4 - Valores dos parâmetros do modelo estimado para o sistema com o ESP digital ativo ($T_s = 40\text{ms}$).

Parâmetro	a1	a2	a3	a4
Valor	-2,2906	1,9721	-0,7191	0,1341
Parâmetro	b1	b2	b3	b4
Valor	-0,0076	-0,0292	-0,0289	0,0468

Os pólos do modelo estimado do sistema com o ESP digital ativo são mostrados na Tabela 5. O amortecimento relativo do modo eletromecânico subiu de 0,066 para 0,263, comprovando assim a atuação desejada para o ESP implementado. Percebe-se que o modo com frequência mais elevada (4,313 Hz) não sofreu grande influência com a inclusão do ESP, visto que este modo continuou bem amortecido.

Tabela 5 – Pólos do modelo estimado para o sistema com o ESP digital ativo.

Pólos	Amortecimento relativo	Frequência (Hz)
$0,825 \pm j0,350$	0,263	1,655
$0,337 \pm j0,388$	0,614	4,313

Na Figura 13 apresenta-se uma comparação entre as respectivas respostas em frequência dos modelos estimados com e sem o ESP digital ativado. Percebe-se claramente no modelo estimado com o ESP digital ativo, que o pico em torno de 1,56 Hz foi consideravelmente atenuado, mostrando a efetividade do controle amortecedor desenvolvido (ESP digital).

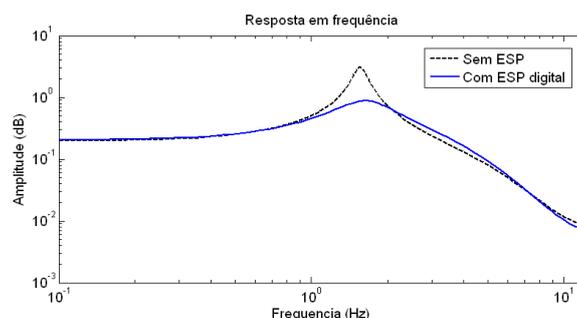


Figura 13 – Estimativa da resposta em frequência dos modelos identificados.

O posicionamento dos pólos do modelo identificado para o sistema operando com o ESP digital ativado, pode ser observado no mapa de pólos e zeros apresentado na Figura 14. É claramente observável que o ESP digital contribuiu para o amortecimento do modo de oscilação eletromecânica de 1,56 Hz da planta, visto que os pólos do sistema sem ESP foram deslocados radialmente para um ponto mais interno do círculo unitário, conforme o objetivo do projeto do ESP digital.

Nota-se também que o aumento do amortecimento do modo eletromecânico causa a diminuição do amortecimento dos modos de maior frequência. Devido a este efeito, o valor de amortecimento dos pólos dominantes não deve ser exagerado, estando geralmente na faixa entre 10% a 30%. Nos testes

experimentais o valor foi de 20% (ζ de 0,2), o qual foi considerado plenamente satisfatório, conforme os resultados experimentais apresentados nesta Seção.

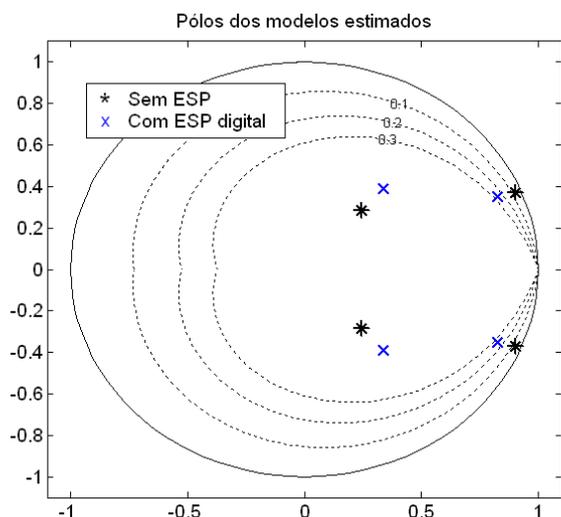


Figura 14 – Comparação entre os mapas de pólos e zeros (plano z) dos modelos estimados para o sistema com e sem o ESP digital.

4.3 Degrau Aplicado na Referência do Regulador de Velocidade

Geralmente, em sistemas elétricos interligados, o acoplamento entre as potências reativa e ativa é fraco. Porém, com a inclusão de um ESP com entrada de potência ativa, variações de carga na máquina podem interferir na tensão de campo da máquina, através da ação do ESP, gerando assim transitórios indesejáveis na tensão terminal e potência reativa (Ferraz, 2002).

Estas variações de carga são comuns na operação de unidades geradoras, acontecendo por exemplo, durante o rampeamento de potência ativa e em zonas de turbulência e de cavitação da turbina hidráulica.

Para avaliar o impacto desse efeito adverso, nesta Seção do artigo, serão apresentados os resultados de ensaios que tiveram como objetivo observar o comportamento da máquina durante a ocorrência de grandes variações na potência mecânica da máquina.

O ensaio de campo consistiu da aplicação de um degrau de 0,1 pu na referência de carga do regulador de velocidade da unidade geradora. O teste foi realizado em três situações: sem ESP, com ESP analógico e com ESP digital desenvolvido neste trabalho.

O ESP analógico é um ESP convencional que também tem como entrada o sinal de potência ativa. O diagrama em blocos da Figura 15, apresenta a estrutura e os valores dos parâmetros do ESP analógico convencional da unidade geradora.

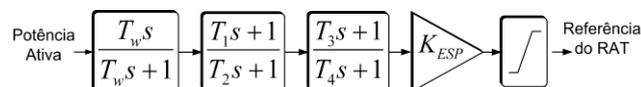


Figura 15 – Diagrama em blocos do ESP analógico da unidade geradora.

Os valores dos parâmetros do ESP convencional da unidade hidrogeradora, são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores dos Parâmetros do ESP Analógico da Unidade Hidrogeradora.

Parâmetro	T_w	T_1	T_2	T_3	T_4	K
Valor	2,2	0,04	0,8	0,2	0,4	2,75

A Figura 16 mostra a comparação das respostas da planta para os três casos citados.

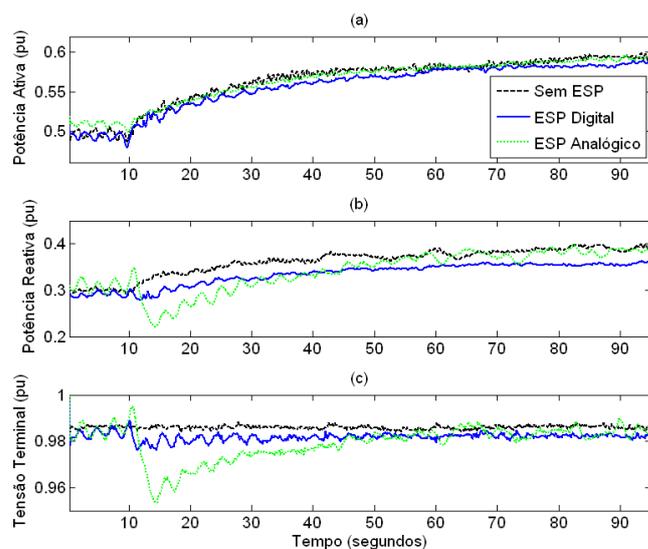


Figura 16 – Resposta da máquina para um degrau aplicado na referência de carga do RV.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 16, é possível observar claramente que inicialmente a máquina encontra-se em um nível de potência baixo (0,5 pu), que é uma zona de trabalho evitada na operação da unidade hidrogeradora, devido à ocorrência de oscilações causadas por efeitos de turbulência e cavitação na turbina hidráulica. Comparando-se as respostas para os três casos, percebe-se que para os casos da máquina sem ESP e com o ESP digital, as oscilações da potência ativa são pouco refletidas na potência reativa, e, por conseguinte, na tensão terminal do gerador. Porém, quando o ESP analógico está ativo, este efeito adverso é bem pronunciado. Conforme mostrado nas Figuras 16(b) e 16(c).

Durante a resposta ao degrau de 0,1 aplicado na referência do RV, é notável o transitório gerado na tensão terminal e potência reativa para o caso com o sistema operando com o ESP analógico. Este transitório é bem menor quando a máquina opera com o ESP digital desenvolvido. Após a máquina atingir o valor de regime do degrau, está estabilizada em um valor de potência onde os efeitos de cavitação são amenizados.

5 CONCLUSÕES.

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e testes de campo de um ESP digital, destinado ao amortecimento de oscilações eletromecânicas locais observáveis na UHE de Tucuruí. O projeto do controlador foi totalmente efetuado no domínio de tempo discreto, utilizando-se a estratégia de deslocamento radial dos pólos. Os testes de campo do ESP digital foram realizados em uma das unidades hidrogeradoras da UHE de Tucuruí, sendo que os resultados demonstraram um excelente desempenho do controlador quanto à melhoria do amortecimento do modo de oscilação eletromecânica observado.

Vale ressaltar que o modo de oscilação de 1,56 Hz, observado nos ensaios, possivelmente é um modo do tipo intra-planta, ocorrendo entre a máquina onde foram autorizados os testes e as demais máquinas da UHE. Para a sintonia do controlador para contribuir no amortecimento de outros modos, tais como os modos local e inter-área norte-nordeste, possivelmente será necessário desenvolver um sistema digital que permita a aplicação simultânea do sinal de teste em um grupo de unidades geradoras da UHE, o que não foi feito neste trabalho tanto por limitações de recursos, quanto devido ao grau de autorização obtido para os testes. Os autores esperam realizar este tipo de teste em projetos futuros.

De acordo com a metodologia apresentada no artigo, se o sinal de teste conjuntamente aplicado a um conjunto de unidades geradoras excitar adequadamente os modos inter-área, a informação sobre esses modos dominantes será capturada pelo modelo paramétrico identificado, o qual será então utilizado no projeto da lei de controle amortecedor do ESP digital, que proporcionará uma melhoria do amortecimento do referido modo.

Uma vantagem adicional da estratégia apresentada, é que a mesma não necessita de um conhecimento a priori detalhado referente aos parâmetros físicos e estrutura do sistema de potência, uma vez que o projeto do controlador é baseado no uso de modelos identificados experimentalmente a partir de medidas de entrada e saída da planta.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao suporte financeiro que esta pesquisa recebeu das Centrais Elétricas do Norte do Brasil (Eletronorte), através do projeto de P&D 953. Os autores também agradecem ao CNPQ pelo apoio recebido através de bolsa de doutorado e de produtividade em desenvolvimento tecnológico.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- Äström, K.J. and Wittenmark, B. (1997). *Computer Controlled Systems: Theory and Design*. Prentice-Hall.
- Barra Junior., W.; Barreiros, J.A.L.; da Costa Júnior, C. T. e Ferreira, A.M.D. (2005). Controle Fuzzy aplicado à melhoria da estabilidade dinâmica em sistemas elétricos de potência. *Controle & Automação*, Vol. 16, No. 2, pp. 173-186.
- Barreiros, J.A.L. (1995). Métodos de Controle Adaptativo Aplicados à Síntese de Estabilizadores de sistemas de Potência” Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC.
- Bobál, V.; Böhm, J.; Fessl, J. and Macháček, J. (2005). *Digital Self-tuning Controllers: Algorithms, Implementation and Applications*. Springer.
- Costa Junior, C.T. (1999). Méthodes de Commande Adaptative par Supervision pour la Régulation d'un Générateur Entraîné par Turbine Hydraulique. These de Docteur, Institut National Polytechnique de Grenoble, France.
- Ferraz, J.C.R.; Martins, M.; Zeni Jr., N.; Soares, J.M.C. and Taranto, G.N. (2002). Adverse Increase in Generator Terminal Voltage and Reactive Power Transients Caused by Power System Stabilizers. Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting. New York.
- Ferreira, A.M.D.; Barreiros, J.A.L.; Barra Junior, W. e Brito de Souza, J.R. (2006) A robust adaptive LQG/LTR TCSC controller applied to damp power system oscillations. Electric Power Systems Research.
- Horowitz, P. and Hill, W. (1989). *The Art of Electronics*, Cambridge University Press. New York, 2ª Edition.
- Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill.
- Landau, I.D. & Zito, G. (2006). *Digital Control Systems: Design, Identification and Implementation*. Springer.
- Ramakrishnaa, G. and Malik, O.P. (2009). Adaptive PSS using a simple on-line identifier and linear pole-shift controller. Electric Power Systems Research.
- Rogers, G. J. (2000). *Power System Oscillations*. Kluwer Academic Publishers Group.