

CONTROLE PREDITIVO GENERALIZADO COM SUPERVISÃO FUZZY NUMA REDE DE MODELOS LOCAIS PARA SÍNTESE DE ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA

CARLOS T. DA COSTA JR., JOSÉ A. L. BARREIROS, WALTER BARRA JR., CARLOS T. L. PEDREIRA

Laboratório de Controle e Sistemas, Depto. de Eng. Elétrica, Universidade Federal do Pará
Campus Universitário do Guamá - CEP: 66075-900 - Belém-PA, Brasil.

E-mails: tavares@ufpa.br, barreiro@ufpa.br, barra@ufpa.br, tulio@ufpa.br

Resumo - Este trabalho apresenta um Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) adaptativo digital, que opera utilizando uma estrutura de controle auto-ajustável. Os modelos paramétricos são pré-identificados para diversos pontos de operação em um plano PxQ (plano das potências ativa e reativa), para formar uma rede de modelos locais (RML). Esses parâmetros são armazenados, sob a forma de uma tabela, em um microcomputador que implementa a ação de controle. Em funcionamento, o supervisor identifica o ponto de operação atual e determina o modelo os parâmetros do modelo da planta usando uma interpolação suave. Então, para este modelo, a lei de controle do ESP é projetada baseada no controle preditivo generalizado. Os testes apresentados comprovam o bom desempenho do ESP proposto em comparação ao de um ESP convencional.

Abstract - This work presents a digital adaptive Power System Stabilizer (PSS) which operates in a self-tuning structure. The parametric models are identified for several differently selected operating points in a PxQ plane (plane of active and reactive powers) to form a Local Model Network (LMN), and their parameters are saved under the form of a look-up table in the microcomputer that implements the control action. During working, a fuzzy logic based supervisor identifies the current operating point and determines the parameters of the plant model from the LMN, using a soft interpolation. Then, using this plant model, the PSS control law is designed based on the generalized predictive control (GPC) method. Tests are presented showing good performance for this PSS, when compared to a conventional (fixed parameters) one.

Keywords— Generalized predictive control; fuzzy logic supervisor; local model network; adaptive control; power system stabilizer.

1. Introdução

O objetivo principal de um Estabilizador de Sistema de Potência (ESP) implementado numa máquina síncrona é melhorar a estabilidade dinâmica do sistema, fornecendo um torque elétrico de amortecimento adicional através do sistema de excitação da máquina. O projeto de um ESP é normalmente feito usando um modelo linear do sistema de potência numa dada condição de operação (de Mello et al., 1969; Larsen et al., 1981). Devido às grandes variações que podem ocorrer nas condições de operação durante o funcionamento dos sistemas de potência, vários autores têm proposto realizar o projeto de ESPs por meio de técnicas adaptativas, com permanente identificação dos parâmetros do sistema, de modo tal que o controlador é sempre sintonizado para a real condição de operação do sistema (Chen et al., 1986; Bazanella et al., 1994; Barreiros et al., 1992, 1998; Malik, et al., 1993; Norum, et al., 1993).

Como a implementação dos Reguladores Automáticos de Tensão, (denominados AVR, devido às iniciais em Inglês), com tecnologia digital nas máquinas síncronas estão começando a se tornar rotina (Hirayama et al., 1993; Reivax., 1997)., o emprego de ESPs adaptativos tendem a se tornar mais comuns, visto que podem ser facilmente implementados, como um simples complemento do AVR

Neste trabalho, para o projeto da lei de controle do ESP, usa-se a estrutura de um controlador adaptativo auto-ajustável indireto (Åström et al., 95).

Porém, ao invés de realizar identificação permanente dos parâmetros de um modelo da planta do sistema, que implica em um grande esforço computacional, optou-se por usar uma técnica diferente. Nesta técnica, os parâmetros do modelo são determinados através de um supervisor baseado em lógica *fuzzy*, a partir de uma rede de modelos locais (Hunt et al., 1997). Primeiro, escolhem-se diversos pontos num plano PxQ (formado pelas potências ativa e reativa geradas) cobrindo toda a faixa de operação para o sistema. Então, com o sistema operando em cada um destes pontos, realizam-se estimações dos parâmetros de modelos estruturais para o sistema, usando um algoritmo baseado na minimização do quadrado do erro entre as saídas do sistema e do modelo (Landau, 1993), para formar uma Rede de Modelos Locais (denominadas LMN, das iniciais em Inglês). Estes modelos paramétricos são então armazenados numa tabela para consulta em tempo real. Durante a operação, nos instantes de amostragem, um supervisor digital do sistema identifica o atual ponto de operação e determina um modelo paramétrico, a partir da rede, empregando um sistema *fuzzy* baseado no método de Takagi e Sugeno (Wang., 1997). Este modelo serve então como base para construir o controlador (Tavares da Costa, 1999). Neste trabalho, a lei de controle empregada para o projeto do ESP foi baseada no método do Controle Preditivo Generalizado (GPC) (Barreiros et al., 1998). É mostrado, por meio de testes com perturbações aplicadas ao sistema, que o ESP proposto, com supervisão por lógica *fuzzy*, apresenta melhores resultados de desempenho do que aqueles obtidos com um ESP a parâmetros fixos. Além disto, o esforço computacional envolvido é pequeno quando

comparado com esquemas adaptativos baseados em permanente estimação recursiva dos parâmetros do modelo da planta.

2 Projeto do ESP Preditivo Generalizado

Para a construção da Rede de Modelos Locais, a determinação dos parâmetros do modelo atual da planta por supervisão baseada em lógica *fuzzy* e o projeto da lei de controle para o ESP, quarenta e nove pontos de operação representativos foram escolhidos no plano $P \times Q$, das potências ativa e reativa na saída da máquina síncrona (a qual, neste trabalho, está conectada a uma barra infinita). Estes pontos foram obtidos da combinação (interseção) de sete pontos de coordenadas para P com sete pontos de coordenadas para Q , em valores por unidade (*pu*). Eles estão mostrados na Figura 1.

Para cada ponto, os parâmetros de um modelo linearizado ao redor deste ponto são estimados. Optou-se por usar um modelo estrutural discreto de quarta ordem (Tavares da Costa, 1999), do tipo ARMAX (Auto-Regressive Moving Average with *eX*ogenous input), que, em termos do operador atraso q^{-1} , tem a seguinte forma (Landau, 1993):

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

onde y , u e e são a saída da planta, sua entrada e uma seqüência do tipo ruído branco discreto, respectivamente; $C(q^{-1})=1$, neste trabalho, e os polinômios $A(q^{-1})$ e $B(q^{-1})$ têm a forma:

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + a_3q^{-3} + a_4q^{-4}, \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + b_3q^{-3} \end{aligned} \quad (2)$$

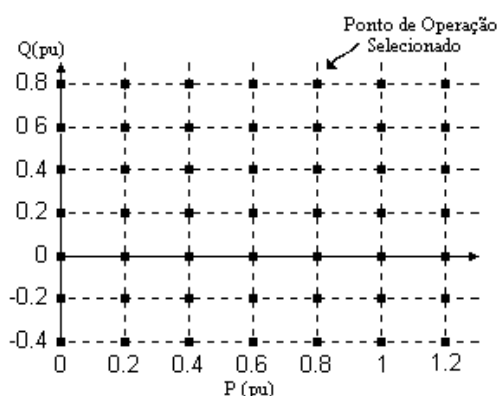


Figura 1: Pontos de operação selecionados onde as estimações dos modelos são realizadas.

A lei do controle preditivo generalizado é obtida da minimização da seguinte função de custo (Barreiros et al., 1998):

$$J = E \left\{ \sum_{k=1}^{N_y} [y(t+k) - w(t+k)]^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \rho u^2(t+k-1) \right\} \quad (3)$$

onde N_y e N_u são horizontes de predição de saída e de controle, respectivamente, e ρ representa um peso finito sobre as ações de controle futuras (até N_u , com peso infinito após este instante). Neste trabalho, usou-se $N_y = 7$, $N_u = 2$ e $\rho = 0.01$, com período de amostragem de 50 ms (Barreiros et al., 1998).

3 Supervisor Baseado em Lógica Fuzzy

O desenvolvimento da abordagem da lógica fuzzy aqui adotada é limitada apenas a estrutura do supervisor. Discussões mais detalhadas sobre controladores baseados em lógica fuzzy são amplamente disponíveis, e.g. (Wang., 1997). Para o supervisor proposto aqui, a tabela contendo os coeficientes dos modelos da LMN é manipulada sob uma configuração do sistema fuzzy de Takagi e Sugeno, com os valores das potências ativa e reativa (P e Q) servindo como entradas para a tabela. Isto é, de acordo com o atual ponto de operação no plano $P \times Q$, o supervisor determina os coeficientes do modelo atual em uma maneira similar a de um controlador a ganhos programáveis. Entretanto, as regras baseadas em lógica fuzzy permitem que as mudanças nos coeficientes do modelo da planta, quando alguma falta ocorre no sistema, seja feita de uma maneira contínua e suave. Deste modo, os coeficientes do modelo da planta não são necessariamente aqueles que foram identificados, em modo *off line*, para os pontos escolhidos, mas sim uma média ponderada dos coeficientes dos pontos escolhidos mais próximos, onde a distância em relação a esses pontos é o peso da participação de cada ponto.

Os sinais de potência ativa e reativa nos instantes de amostragem t , $P(t)$ e $Q(t)$, respectivamente, são representados como variáveis lingüísticas fuzzy. Para a variável P , divide-se seu universo de discurso em intervalos de 0.2 pu a partir de $P=0$ até $P=1.2$ pu, e, para estas posições, são designados conjuntos fuzzy apropriados. Assim, existem sete conjuntos fuzzy para P (P_1, P_2, \dots, P_7). Similarmente, a mesma partição é feita para o universo de discurso da variável Q que, neste estudo, vai de $Q=-0.4$ pu a $Q=0.8$ pu. Assim, existem também sete conjuntos fuzzy para a variável lingüística Q (Q_1, Q_2, \dots, Q_7). Por simplicidade, foram escolhidas funções de pertinência triangulares e trapezoidais para $P(k)$ e $Q(k)$, conforme mostrado na Figura 2. Observe que as funções trapezoidais são utilizadas somente para os conjuntos fuzzy nas extremidades dos respectivos intervalos.

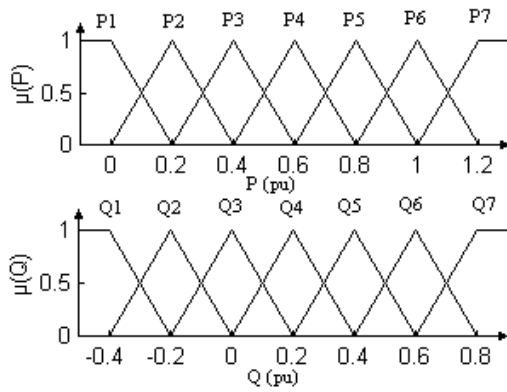


Figura 2: Funções de Pertinência para $P(k)$ e $Q(k)$.

Após representar P e Q como variáveis fuzzy, o próximo passo é definir regras de lógica fuzzy em uma configuração de Takagi e Sugeno usando essas variáveis P e Q . Cada regra de supervisão $R^{(l)}$ que define um coeficiente c_m do modelo da planta é da forma:

$$R^{(l)}: \quad \begin{array}{ll} \text{SE} & P \text{ é } P_i^l \\ \text{E} & Q \text{ é } Q_j^l \\ \text{ENTÃO} & c_m \text{ é } c^l \end{array} \quad (3)$$

onde P_i^l e Q_j^l são conjuntos fuzzy e c^l é um real representando um coeficiente do modelo da planta (de $A(z^{-1})$ ou de $B(z^{-1})$) para a regra l em questão.

Na representação acima, um sinal específico (P ou Q) pode ter uma pertinência não nula para um ou dois conjuntos Fuzzy. Para uma entrada dada pelo par (P, Q) , o valor do coeficiente do modelo da planta (sistema de potência) considerado, $c=f(P, Q)$, é uma média ponderada de c^l :

$$c(P, Q) = \frac{\sum_{l=1}^L w^l c^l}{\sum_{l=1}^L w^l} \quad (5)$$

onde $L = 49$ é o número total de regras para cada topologia (número de pontos (P, Q) onde os parâmetros do modelo do sistema de potência foram estimados *off-line*) e o peso w^l implica o valor global da premissa de $R^{(l)}$ (parte “Se” da regra) em relação à entrada considerada. Este peso é calculado por

$$w^l = \mu_{P_i^l}(P) \cdot \mu_{Q_j^l}(Q) \quad (6)$$

A partir desta definição de w^l e considerando as funções de pertinência escolhidas para P e Q , é facilmente notado que, para qualquer par de entrada (P, Q)

$$\sum_{l=1}^L w^l = 1 \quad (6)$$

Então, a fórmula para calcular o coeficiente considerado pode ser reescrita como (Tavares da Costa, 1999):

$$c(P, Q) = \sum_{l=1}^L w^l c^l \quad (7)$$

Assim, para determinar o modelo atual a ser utilizado, a fórmula acima deve ser aplicada para todos os coeficientes a_i e b_j ($i = 1, \dots, 4; j = 0, \dots, 3$) do modelo (Eqs. (1) – (2)). Na próxima seção, serão apresentados resultados a partir de testes realizados no sistema máquina-barra infinita, usando o estabilizador aqui proposto e comparando seu desempenho com o de ESPs digitais, a parâmetros fixos, bem projetados usando um ponto de operação determinado.

4 Resultados

Para avaliar o desempenho do estabilizador proposto neste trabalho, usou-se um sistema do tipo máquina-barra infinita, mostrado na Figura 3. Especificamente, a planta é baseada no modelo de um gerador incorporando: a variação do fluxo de campo; as variações de fluxo devidas a circuitos amortecedores no eixo d e no eixo q ; e um sistema de excitação simples incluindo um regulador automático de tensão (com alto ganho) mostrado na Figura 4. As equações deste sistema são descritas pelo modelo 4, da referência (Arrilaga, 1983), e os parâmetros correspondentes são apresentados no Apêndice.

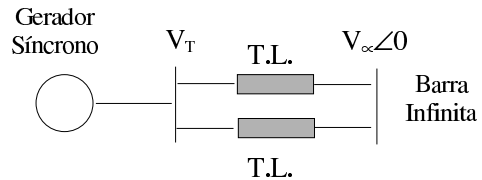


Figura 3: Sistema Máquina Barra Infinita.

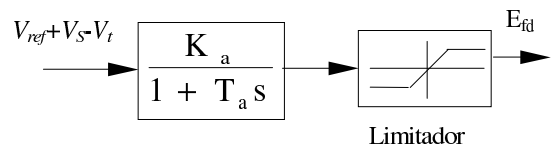


Figura 4: Sistema de Excitação

Para efeito de comparação, mostraremos aqui também as respostas de dois ESPs digitais de estruturas fixas, com mesmo período de amostragem. O primeiro é um ESP com parâmetros fixos que foi projetado pelo método da alocação de pólos, visando-se aumentar o amortecimento dos pólos mal-amortecidos, por deslocamento radial deles para o centro do círculo unitário do plano- z , com um fator multiplicativo constante ($\alpha=0,75$). Este ESP tem função de transferência de terceira ordem e seu projeto foi baseado em um modelo com a mesma estrutura dada pela Eq. (1) e com seus parâmetros

estimados para o ponto de operação $P_o = 0.75 pu$ e $Q_o = 0.1 pu$. O segundo ESP de estrutura fixa é um controlador GPC com $N_y = 7$, $N_u = 2$ e $\rho = 0.01$, mas que, para minimizar a função de custo J , baseia-se sempre no mesmo modelo e parâmetros utilizados para projetar o ESP pelo método da alocação de pólos.

As vantagens do estabilizador adaptativo proposto neste trabalho, com respeito à estabilidade dinâmica, são demonstradas de uma maneira mais fácil se o sistema operar em regiões afastadas do ponto de operação onde foram projetados os ESPs a parâmetros fixos. Pontos com pequenos valores de P seriam pontos bem afastados deste ponto de projeto. Porém, nessas condições de pouca potência ativa sendo transmitida, o amortecimento natural do sistema de potência já é suficientemente bom, sem a necessidade de estabilizadores. Então, foi escolhido como teste, variações que afastem o ponto de operação para a região negativa de Q , mas ainda com um valor considerável para P . Nessas situações, um ESP fornece um nítido amortecimento adicional ao sistema que, nesses casos, necessitam realmente de estabilizadores bem ajustados para uma boa operação.

Assim, o teste aqui realizado consistiu de uma redução, no instante $t=5s$, de 20% na tensão de referência, a partir do ponto de operação inicial ($P_o=0.75, Q_o=0.1$). Após esta falta, o ponto de operação passa a ser $P = 0,75$ e $Q = -0,264$. Em seguida, em $t=15s$, aplicou-se um curto-circuito, com duração de 75 ms, seguido de bem-sucedida eliminação dessa falta (sem perda de linha). A Figura 5 mostra as curvas do ângulo do rotor para esta falta nos seguintes casos: a) sistema com ESP a parâmetros fixos; por alocação de pólos; b) sistema compensado pelo ESP preditivo generalizado de estrutura fixa, e c) sistema compensado pelo ESP preditivo generalizado com supervisão baseada em lógica fuzzy.

Na Figura 5, observa-se que os três ESPs apresentaram bom desempenho como resposta à primeira falta, com certa vantagem para o ESP de estrutura fixa projetado por alocação de pólos. Porém, após a ocorrência da segunda falta, que se dá em um ponto de operação distante de (P_o, Q_o), somente os ESPs como controle preditivo generalizado foram capazes de manter a estabilidade do sistema, permanecendo o gerador em síncrono com a barra-infinita. Entre os ESPs projetados por GPC, o ESP preditivo generalizado com supervisão baseada em lógica fuzzy apresentou um desempenho ainda um pouco superior (menores sobre-sinais máximos e tempos de oscilação mais curtos) que o do ESP preditivo generalizado de estrutura fixa, devido à capacidade de adaptação do supervisor fuzzy.

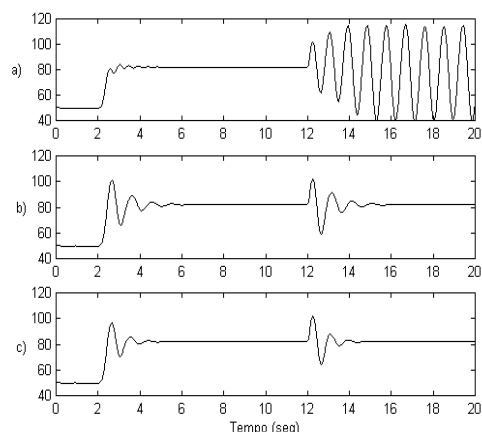


Figure 5: Ângulo dos rotores (em graus).

5 Conclusão

O ESP adaptativo proposto neste trabalho é projetado determinando-se os parâmetros do modelo da planta do sistema, a partir de uma rede de modelos locais, usando-se um supervisor baseado em lógica fuzzy. O projeto do controlador é então realizado pelo método do controle preditivo generalizado, minimizando-se uma função de custo que penaliza as excursões da variável controlada e o esforço de controle em horizontes pré-estabelecidos. Este ESP mostrou-se capaz de melhorar bastante a estabilidade dinâmica de sistemas de potência. O desempenho geral obtido pelo estabilizador proposto, no teste apresentado, é superior ao obtido por estabilizadores a parâmetros fixos, bem projetados, notadamente quando o sistema está operando em pontos distantes daquele usado na obtenção do modelo para o projeto. Embora possa ser dito que um sistema raramente opere em condições tão extremas quanto a do teste aqui apresentado, melhoras similares também foram observadas em diversos outros testes realizados, em muitas situações diferentes de operação.

Deve ser enfatizado que o estabilizador aqui proposto pode ser facilmente implementado num simples microcomputador, o que está tornando-se comum no projeto de modernos AVR's. O esforço computacional para a síntese deste ESP é pequeno em comparação com estabilizadores adaptativos que usam permanente identificação da planta do sistema por estimação recursiva de seus parâmetros. Assim, o microcomputador pode também ser usado para realizar outras tarefas, como monitoração de variáveis, diagnóstico, alarme e outras funções do sistema.

4 Apêndice

A. Equações não-lineares usadas para o gerador síncrono.

$$\Delta \dot{\omega} = (T_m - T_e - K_d \Delta \omega) / 2H \quad (8)$$

$$\dot{\delta} = \omega_o \Delta \omega \quad (9)$$

$$\dot{E}'_q = [E'_f + (X_d - X'_d)I_d - E'_q] / T'_{do} \quad (10)$$

$$\dot{E}''_q = [E'_q + (X'_d - X''_d)I_d - E''_q] / T''_{do} \quad (11)$$

$$\dot{E}''_d = [-(X_q - X''_q)I_q - E''_d] / T''_{qo} \quad (12)$$

$$E''_q - V_q = R_a I_q - x''_d I_d \quad (13)$$

$$E''_d - V_d = R_a I_d + x''_q I_q \quad (14)$$

$$P_e = V_d I_d + V_q I_q + R_a (I_d^2 + I_q^2) \quad (15)$$

onde a notação e o significado das variáveis e dos parâmetros são aqueles normalmente usados para as equações de geradores síncronos [1-2].

B. Parâmetros do Sistema.

Parâmetros do gerador Síncrono em pu (base de 1000 MVA), com tempos em s:

$$\begin{aligned} H &= 4.27; R_a = 0.001; K_d = 0; \\ X_d &= 1.445; X'_d = 0.316; X''_d = 0.179; \\ X_q &= 0.959; X''_q = 0.162; \\ T'_{do} &= 5.26; T''_{do} = 0.028; T''_{qo} = 0.157. \end{aligned}$$

Parâmetros do AVR com excitatriz estática, (modelo de primeira ordem com ganho, constante de tempo e limitador), dados respectivamente por:

$$K_a = 200; T_a = 30 \text{ ms}; -6 < E_{fd} < 6$$

Resistência e reatância das linhas em pu (para cada linha):

$$R_e = 0.02; X_e = 0.415; B_e = 0$$

Referências Bibliográficas

Arilaga, J., Arnold, C.P., e Harker, B.J. (1983). Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley & Sons Ltd.

Aström, K. J. e Wittenmark, B. (1995). Adaptive Control, Addison Wesley, Reading Massachusetts, Second Edition.

Barreiros, J. L. B., Silva, A. S. e Simões Costa, A. J. (1992). Um Estabilizador de Sistema de Potência Auto-Ajustável baseado em um Método de Alocação de pólos Implícita, Anais do IX Congresso Brasileiro de Automação, pp 263-267.

Barreiros, J. L. B., Silva, A. S. e Simões Costa, A. J. (1998). A Self-Tuning Generalized Predictive Power

System Stabilizer, *Electric Power & Energy Systems*, Vol.20, Nº3, pp.213-219.

Bazanella, A. S., Barreiros, J. L. B., e Silva, A. S. (1994). Um Estabilizador Auto-Ajustável para Sistemas de Potência, Anais do X Congresso Brasileiro de Automação, pp 518-520.

Cheng, S., Chow, Y. S., Malik, O P. e Hope, G. S. (1986). An Adaptive Synchronous Machine Stabilizer, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol.1, No. 3, pp 101-109.

de Mello, F. P. e Concordia, C.(1969). Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control, *IEEE Trans. on Power Apparatus e Systems*, Vol.88, No. 4, pp 316-327.

Hirayama, K, Tone, Y., Takagi, K, Murakami, H., Shibata, M., Nagamura, H. e Takagi, Y. (1993). Digital AVR Application to Power Plants, IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol..8, Nº. 4, pp 602-609.

Hunt, K. J. e T. A. Johansen, T. A. (1997). Design and Analysis of Gain-Scheduled Control Using Local Controller Networks. *International Journal of Control*, Vol. 66, Nº 5,, pp. 619-651.

Landau, I. D. (1993). Identification et commande de Systemes. *Traité des Nouvelles Technologies, Serie Automatique*. Ed. Hermes, Deuxième Edition.

Larsen, E. V e Swann, D. A (1981). Applying Power System Stabilizers - Parts1-3, *IEEE Trans. on Power Apparatus e Systems*, Vol.100, pp 3017-3046.

Malik, O. P., Mao, C. X., Hope, G. S. e Hancocck, G. C. (1993) Tests with a Microcomputer based Adaptive Synchronous Machine Stabilizer on a 400 Mw Thermal Unit, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol. 8, Nº1, pp..6-12.

Norum, W. E. e Bollinger, K. E. (1993). Lab and Field Tests of a self-tuning Power System Stabilizer, IEEE Trans. On Energy Conversion, Vol .8, Nº3, pp.1017-1023.

Reivax Automação e Controle (1997), Regulador de tensão RTX300 Modelo Microprocessado : características básicas, Florianópolis-SC-BR.

Tavares da Costa Jr., C. (1999). Adaptive Control Methods by Supervision for the Regulation of a Generator Entrained by Hydraulic Turbine, *PhD Thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, France* (in French).

Wang, L.X. (1997). A Course in Fuzzy Systems and Control, *Prentice-Hall International, Inc.*