



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GAT.04
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO – IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA CA E CC - GAT

**PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DIGITAL
APLICADO À UMA UNIDADE GERADORA DA USINA DE TUCURUÍ.**

Jânio J. De Lana (*) Eletronorte	Fabício G. Nogueira UFPA	Carlos T. C. Jr UFPA	Walter Barra. Jr UFPA
José A. L. Barreiros UFPA	Orlando F. Silva UFPA	Marcus C. M. Gomes UFPA	Anderson R. B. Moraes UFPA

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e os resultados de ensaios em campo de um estabilizador de sistema de potência (ESP) digital projetado para amortecer um modo de oscilação local com frequência de 1,6 Hz em uma unidade hidrogeradora de 350 MW da Usina Hidrelétrica de Tucuruí. São apresentadas também as técnicas de controle digital e de identificação de modelos de sistemas que foram utilizados no projeto do ESP.

PALAVRAS-CHAVE

Estabilizador de Sistemas de Potência, Deslocamento Radial de Pólos, Identificação de Sistemas.

1.0 - INTRODUÇÃO

A Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí é formada por 23 geradores principais, sendo 12 unidades de 350 MW (primeira etapa) e 11 unidades de 390 MW (segunda etapa), totalizando uma capacidade total de mais de 8 GW, compartilhados através da conexão com o sistema interligado nacional (SIN). Estudos anteriores e testes em campo realizados em uma máquina da primeira etapa da usina, revelaram a ocorrência de um modo de oscilação eletromecânica com frequência em torno de 1,6 Hz, que está sendo pouco amortecido pelo estabilizador de sistema de potência analógico da respectiva máquina.

Estes fenômenos são extremamente indesejáveis, pois reduzem a quantidade de potência transmitida e diminuem consideravelmente a vida útil das máquinas. Portanto, a presença destas oscilações aumenta os riscos de paradas não programadas, diminuindo assim a disponibilidade do sistema. Como estes efeitos estão relacionados à natureza física dos sistemas de potência, eles não podem ser evitados. Portanto, as oscilações eletromecânicas devem ser devidamente amortecidas, minimizando assim seus efeitos prejudiciais [1].

Dentre os dispositivos utilizados para melhorar o desempenho dinâmico dos sistemas de potência, pode-se destacar os estabilizadores de sistemas de potência (ESP), que através de um sinal de controle adicional, contribuem com um amortecimento das oscilações eletromecânicas. Geralmente, este controlador amortecedor atua através do regulador automático de tensão (RAT), visto que a resposta deste sistema é rápida.

Neste trabalho, será apresentado o desenvolvimento e testes em campo de um ESP projetado para amortecer o modo local de oscilação com frequência de 1,6 Hz. 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 de sistemas realizados em campo; na seção 4, são abordadas as estratégias de controle do ESP digital projetado; os testes em malha fechada na UHE de Tucuruí são apresentados na seção 5; e na seção 6 apresentam-se as conclusões do trabalho.

2.0 - DESCRIÇÃO DO ESP DIGITAL DESENVOLVIDO

O ESP desenvolvido neste trabalho foi implementado em um sistema embarcado baseado em um controlador de sinais digitais, DsPIC. O sinal de entrada utilizado é a potência ativa do gerador, que é proveniente de um transdutor de potência. Este sinal é processado por um circuito condicionador, para assim poder ser digitalizado pelo conversor analógico-digital de 12 bits interno do DsPIC. O sinal de controle do ESP é processado por um circuito de saída, que realiza a adequação do sinal para ser injetado no circuito somador do RAT analógico do gerador. O sistema dispõe de uma porta de comunicação serial, para a transmissão dos dados de entrada e saída, e de um teclado e *display* de cristal líquido para a parametrização do controlador pelo usuário. A Figura 1 ilustra a arquitetura de hardware do sistema.

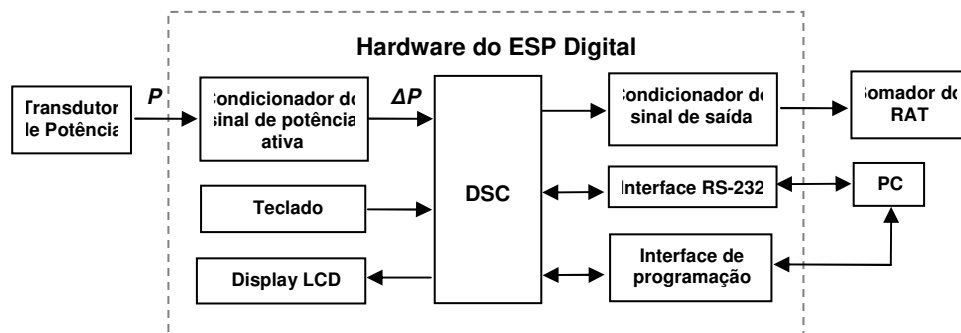


Figura 1 – Diagrama em blocos do hardware do ESP digital.

O controlador desenvolvido pode funcionar em quatro modos de operação: modo de resposta ao degrau, modo de identificação, modo de controle e modo de configuração. No primeiro modo, o sistema aplica um degrau com amplitude e duração configuráveis no RAT do gerador, coleta a resposta da planta e envia a um microcomputador PC os dados de entrada e saída, para análises mais complexas que exigem alto poder computacional. Em modo de identificação, é executado um algoritmo de geração de uma seqüência binária pseudo-aleatória (SBPA) aplicada em um ponto de soma do RAT. Ao mesmo tempo, os pares de dados de entrada e saída coletados são enviados ao PC, onde com o auxílio de um algoritmo de mínimos quadrados não recursivo, é estimado e validado um modelo paramétrico da planta na presente condição de operação.

Em modo de controle, o ESP adquire o sinal de variação de potência ativa e processa a lei de controle programada, gerando um sinal de controle que é aplicado no somador do RAT. No modo de configuração, o usuário do sistema pode parametrizar o controlador através de um teclado e um menu exibido em um display LCD.

3.0 - TESTES DE IDENTIFICAÇÃO EM CAMPO

Os ensaios, para levantamento de modelos da planta e controle em malha-fechada do ESP, foram realizados na unidade hidrogeradora número 08 (350 MW), pertencente à primeira casa de força da UHE de Tucuruí. Os sinais de excitação e de controle foram injetados em um ponto de soma do circuito somador do RAT da unidade geradora em questão. Durante os ensaios, a máquina estava gerando 228 MW de potência ativa, absorvendo 16 Mvar de potência reativa. O ESP analógico da máquina foi desativado para a realização dos testes com o ESP digital desenvolvido neste trabalho. A Figura 2 ilustra a instrumentação de aquisição de dados montada ao lado do RAT analógico durante os ensaios em campo.



Figura 2 – Instrumentos instalados ao lado do armário do RAT durante os testes em campo na UHE de Tucuruí.

3.1 Resposta ao Degrau do Sistema

A resposta ao degrau é um recurso muito útil para um conhecimento inicial do comportamento dinâmico de um sistema, revelando características importantes para a sua modelagem. Portanto, foram aplicadas variações do tipo degrau no ponto de soma do RAT. A variação degrau foi parametrizada para gerar variações de aproximadamente 0.01 pu na potência ativa do gerador. O gráfico da Figura 3 ilustra a resposta ao degrau da máquina. Nota-se que o amortecimento da oscilação eletromecânica precisa ser melhorado.

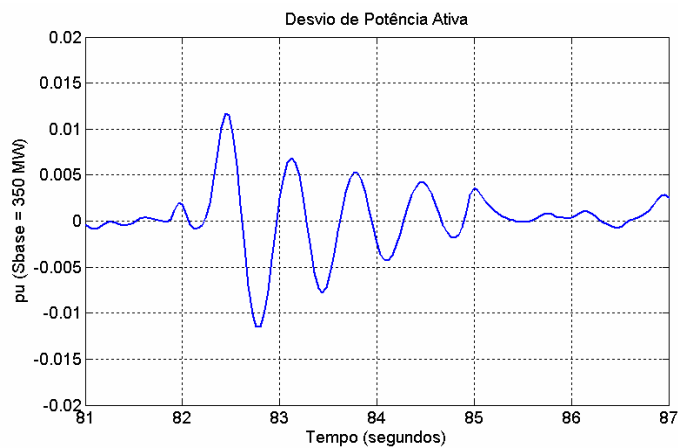


Figura 3 - Resposta ao degrau do sistema sem ESP.

3.2 Projeto da SBPA e Coleta de Dados

Como o sistema em estudo é de elevada complexidade, para fins de controle é suficiente identificar modelos paramétricos lineares capazes de representar a dinâmica na faixa de operação de interesse. O processo de identificação é baseado nas relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e de saída, que no caso são, o sinal injetado no RAT e o sinal proporcional a potência ativa do gerador, respectivamente.

Com o intuito de extrair informações dinâmicas da planta, é injetada na entrada do sistema uma seqüência binária pseudo-aleatória (SBPA), projetada para excitar o sistema em uma faixa de frequências em torno do

modo de oscilação de interesse. A SBPA é gerada através de um registrador de deslocamento com N células, que a cada período T_b atualiza a saída com uma nova amostra da seqüência pseudo-aleatória. Os parâmetros N e T_b são escolhidos de acordo com a faixa efetiva de freqüências desejada. A Equação 1 mostra a relação entre as variáveis [2].

$$\frac{1}{(2^N - 1)T_b} \leq f_{desejada} \leq \frac{0.44}{T_b} \quad (1)$$

No processo de identificação do gerador, foram usados $T_b = 80$ ms e $N = 9$, resultando em uma freqüência mínima de 0,02Hz e frequência máxima de 5,5 Hz. Os pares de dados foram coletados com um período de amostragem de 40 ms. A Figura 4 ilustra uma parte dos sinais de entrada e saída adquiridos.

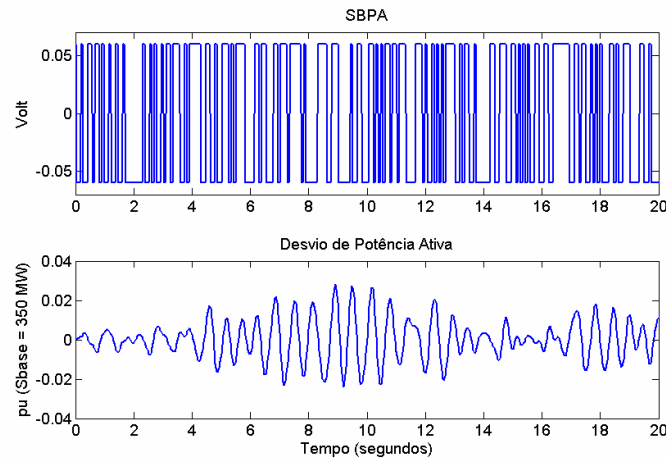


Figura 4 - (a) SBPA aplicado no RAT (b) Sinal de desvio de potencia ativa do gerador.

A análise dos dados no domínio da freqüência mostrou que o espectro do sinal de desvio de potência é caracterizado por um pico com freqüência em torno de 1,6 Hz, que é a freqüência do modo de oscilação eletromecânica que deve ser amortecida (Figura 5 (a)). O espectro do sinal SBPA se caracteriza por ser aproximadamente plano na faixa especificada pelo projeto, o que garante que o sinal de teste se comporta como um ruído branco entre 0,02 hz e 5,5 hz (Figura 5 (b)).

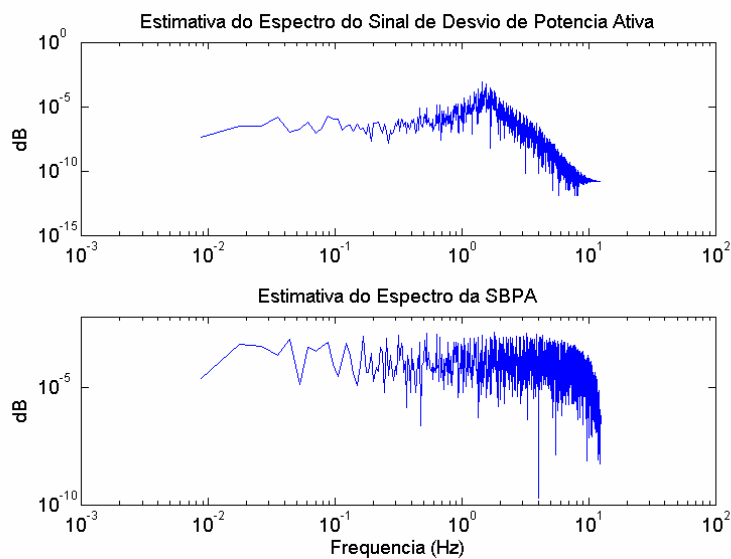


Figura 5 - (a) Espectro do desvio de potência ativa (b) Espectro da SBPA.

3.3 Estimação de um Modelo Paramétrico

O modelo paramétrico estimado para o sistema 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 predição, entre a saída do modelo estimado e a saída da planta. A estrutura escolhida para o modelo linear é do tipo ARX de tempo discreto na forma [3]:

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + e(t) \quad (2)$$

onde $u(t)$ 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:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + \dots + a_{nA}q^{-nA} \quad (3)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} + \dots + b_{nB}q^{-nB} \quad (4)$$

onde n é a ordem do modelo e a_n e b_n são os parâmetros a serem estimados pelo algoritmo de mínimos quadrados.

Após análise dos dados estimados, uma estrutura com modelo ARX de quarta ordem mostrou-se adequado. Os parâmetros desse modelo foram estimados com um intervalo de amostragem de 40 ms e os valores obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos parâmetros do modelo estimado.

Parâmetro	a1	a2	a3	a4	b1	b2	b3	b4
Valor	-2.2906	1.9721	-0.7191	0.1341	-0.0076	-0.0292	-0.0289	0.0468

3.4 Validação do Modelo

Os dados de entrada e saída coletados foram subdivididos em dois conjuntos, sendo um usado na estimação e outro usado na validação do modelo. A Figura 6 ilustra a comparação entre a saída real do sistema e a saída estimada por um modelo de quarta ordem estimado. O resultado indica o bom desempenho do modelo paramétrico estimado. Percebe-se que o modelo capturou satisfatoriamente a dinâmica oscilatória do modo eletromecânico observável.

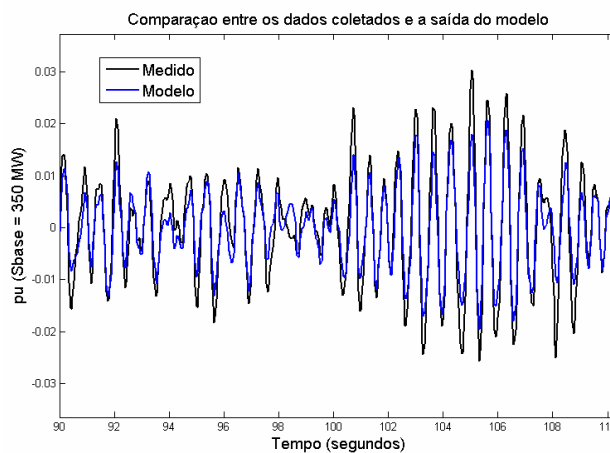


Figura 6 - Comparação entre a saída medida e a saída do modelo.

O mapa de pólos e zeros para o modelo ARX identificado é ilustrado na Figura 7. Pode-se observar que existem dois pólos complexos dominantes bem próximos ao círculo unitário, o que indica que o sistema apresenta um modo de oscilação pouco amortecido, que no caso é o modo de 1,6 Hz.

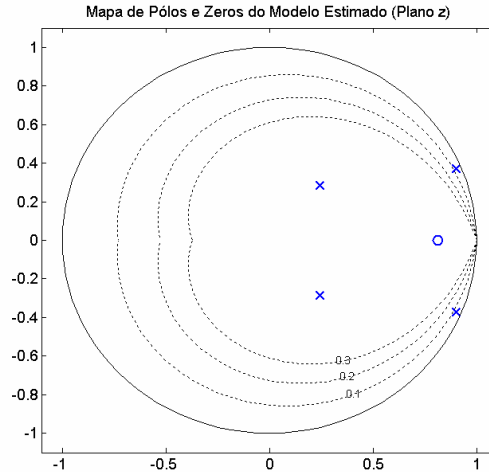


Figura 7 - Mapa de pólos e zeros do modelo de 4ª ordem estimado.

4.0 - PROJETO DO CONTROLADOR DIGITAL

Após a identificação de um modelo paramétrico para o sistema no ponto de operação considerado, é possível determinar os coeficientes do controlador digital. A lei de controle do ESP digital foi projetada de acordo com a técnica de posicionamento de pólos, que determina um controlador que resulte um sistema em malha fechada com características especificadas pelo projetista [4], [5]. Assim sendo, o controlador é projetado para um sistema, na forma:

$$A(k)y(k) = B(q)u(k) \quad (5)$$

A técnica de posicionamento de pólos resume-se na busca dos polinômios $R(z^{-1})$ e $S(z^{-1})$ que satisfaçam a equação polinomial (6), conhecida como Equação Diofantina.

$$A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}) = D(z^{-1}) \quad (6)$$

onde os polinômios $A(z^{-1})$ e $B(z^{-1})$ são conhecidos (modelo da planta), $D(z^{-1})$ é o polinômio com os parâmetros desejados pelo projetista e $R(z^{-1})$ e $S(z^{-1})$ são os polinômios com os parâmetros do controlador que serão calculados.

Como o objetivo do ESP é aumentar o amortecimento natural (ζ) do modo pouco amortecido capturado pelo modelo identificado da planta, sem alterar significativamente a frequência natural (ω_n), o polinômio $D(z^{-1})$ foi definido através do método de deslocamento radial de pólos, no qual o objetivo é deslocar radialmente os pólos dominantes em direção à origem do círculo unitário do plano z , através de um fator α (fator de contração radial), onde $0 \leq \alpha \leq 1$. Este método é um caso particular da técnica de posicionamento de pólos.

Esta operação é realizada através de um fator de contração radial α ($0 < \alpha < 1$), o qual pode ser calculado pelo projetista utilizando a seguinte fórmula:

$$\alpha = \exp[-(\zeta_d - \zeta)\omega_n T_s] \quad (7)$$

onde ω_n é a frequência do modo pouco amortecido (1,6 Hz) e T_s é o intervalo de amostragem (40 ms).

Portanto, os parâmetros R e S do controlador são calculados através da resolução do seguinte sistema linear:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & b_1 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & 1 & 0 & b_2 & b_1 & 0 & 0 \\ a_2 & a_1 & 1 & b_3 & b_2 & b_1 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & b_4 & b_3 & b_2 & b_1 \\ a_4 & a_3 & a_2 & 0 & b_4 & b_3 & b_2 \\ 0 & a_4 & a_3 & 0 & 0 & b_4 & b_3 \\ 0 & 0 & a_4 & 0 & 0 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\alpha-1)a_1 \\ (\alpha^2-1)a_2 \\ (\alpha^3-1)a_3 \\ (\alpha^4-1)a_4 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde a_n e b_n são os coeficientes do modelo discreto da planta, α é o fator de deslocamento radial e r_n e s_n são os coeficientes do controlador. As Tabelas 2 e 3 ilustram os parâmetros do controlador digital do ESP, projetado respectivamente para um ζ_d de 0,2 e 0,3.

Tabela 2 - Valores dos parâmetros do controlador digital projetado para $\zeta_d = 0,2$ ($T_s = 0,04$ segundos).

Parâmetro	r0	r1	r2	r3	s1	s2	s3
Valor	-2.5250	3.5145	-1.4971	0.3272	0.0979	-0.0193	-0.1143

Tabela 3 - Valores dos parâmetros do controlador digital projetado para $\zeta_d = 0,3$ ($T_s = 0,04$ segundos).

Parâmetro	r0	r1	r2	r3	s1	s2	s3
Valor	-4.3138	5.9217	-2.5125	0.5458	0.1680	-0.0268	-0.1906

5.0 - TESTES DO ESP DESENVOLVIDO

Após o projeto do controlador digital, os parâmetros calculados foram atualizados no ESP embarcado e assim a malha do sistema foi fechada, com o controlador funcionando em modo de controle. Para avaliar o desempenho do ESP, foi aplicada uma perturbação do tipo degrau (0,01 pu) no mesmo ponto dos ensaios anteriores. Através da Figura 8, percebe-se que o ESP contribui com o amortecimento da oscilação eletromecânica.

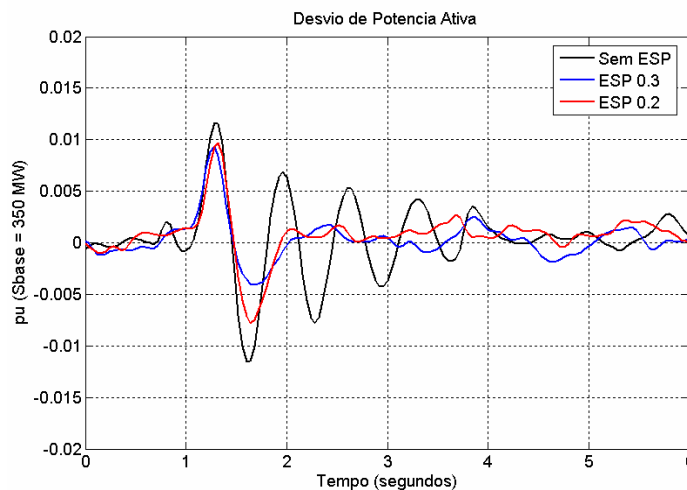


Figura 8 – Comparação da resposta ao degrau do sistema com e sem ESP.

Com o ESP operando em malha-fechada, foram estimados modelos paramétricos para o sistema, com a mesma metodologia que foi apresentada na seção 3. A Figura 9 ilustra a resposta em frequência dos modelos estimados com e sem o ESP. Percebe-se que o pico na faixa de 1,6 Hz foi amortecido no modelo estimado de dados com o ESP ativo.

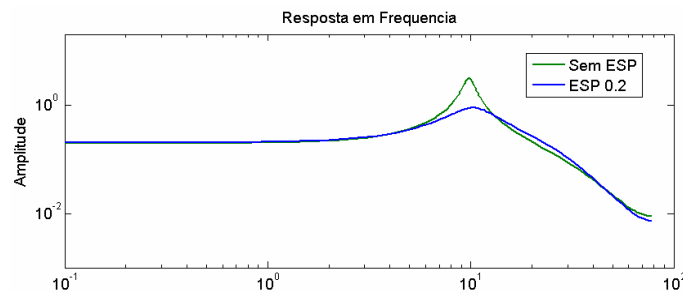


Figura 9 – Estimativa do espectro de frequência do sistema com e sem ESP.

A partir do mapa de pólos e zeros ilustrado na Figura 10, é possível notar o deslocamento radial dos pólos do sistema sem ESP para um ponto mais interno do círculo unitário, comprovando assim que o ESP projetado contribuiu para o amortecimento do modo de oscilação eletromecânica de 1,6 Hz.

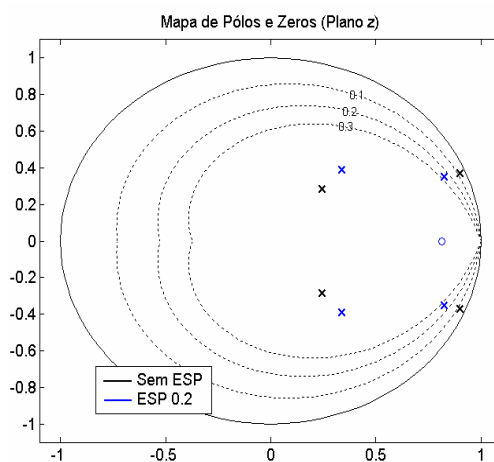


Figura 10 – Mapa de pólos e zeros do sistema com e sem ESP.

6.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas as técnicas de identificação e controle digital utilizadas no projeto de um ESP, projetado para amortecer um modo de oscilação eletromecânica em uma unidade geradora de 350 MW da UHE de Tucuruí.

Os resultados de testes de identificação e controle em malha-fechada realizados em campo, demonstraram que o ESP digital obteve ótimo desempenho, contribuindo com o amortecimento do modo de oscilação local da máquina.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Kundur, P. - **Power System Stability and Control**, McGraw-Hill, 1994.
- (2) Horowitz, P. and Hill, W. – **The Art of Electronics**, Cambridge University Press, New York, 2ª Edition, 1989.
- (3) K. J. Åstrom and B. Wittenmark - **Computer Controlled Systems: Theory and Design**, Prentice-Hall, 1997.
- (4) Barreiros, J.A.L. - **A Pole-Shifting Self Tuning Power System Stabilizer**, Dissertação de Mestrado, UMIST, Manchester, 1989.
- (5) Nogueira, F. G. - **Desenvolvimento de um Estabilizador de Sistemas de Potência Via Malha de Velocidade Aplicado à uma Unidade Geradora da UTE de Santana**, Dissertação de Mestrado, UFPA, 2008.