



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

GAT - 13
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO IV
GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

COMISSONAMENTO DO ESTABILIZADOR DE SISTEMA DE POTÊNCIA DA USINA DE ANGRA 1

**Eduardo M. Brandi *
FURNAS**

**Nelson Zeni
REIVAX**

**Jose R. B. Marinho
ELETRONUCLEAR**

**Venilton R. de Oliveira
ONS**

**Nilo J. P. Macedo
FURNAS**

**Adriano A. Barbosa
ONS**

RESUMO

Este artigo tem como objetivo apresentar os resultados de testes de comissionamento do Estabilizador de Sistemas de Potência (ESP ou PSS em inglês) instalado na Usina Nuclear de Angra 1. São apresentadas as comparações dos resultados obtidos em campo com as simulações efetuadas pelo ONS em seus estudos sistêmicos, visando ao ajuste e a otimização de parâmetros desse equipamento.

A realização de estudos através de simulação digital é fator importante para verificação da adequação e proposição dos ajustes dos modelos frente a diversas configurações do sistema, melhorando o desempenho do mesmo. Para a realização destes estudos é imprescindível e uma pré-condição essencial a utilização de modelos acurados do sistema bem como dos seus controladores em operação.

Palavras Chave

Estabilizador de Sistema de Potência, Regulador Automático de Tensão, Identificação de Sistemas, Testes de Comissionamento.

1.0 - MOTIVAÇÃO

Após a ocorrência do desligamento de parte do Sistema Interligado Nacional (SIN), mais precisamente nas Regiões Sul/Sudeste/Centro-Oeste, às 22:40 do dia 11 de Março de 1999, várias ações foram tomadas no âmbito da Eletrobrás, ONS e demais concessionárias.

Dentre as ações tomadas pela Eletrobrás/ONS foram estabelecidas forças tarefas, designadas formalmente pela Eletrobrás e por determinação Ministerial do MME, das quais podemos destacar aquelas designadas para revisão completa dos Esquemas de Controle de Emergências, força tarefa esta de grande abrangência, tendo em vista o número de concessionárias/geradoras envolvidas, e as Forças Tarefas para Estudo do Ilhamento das Usinas Nucleares e Térmicas, bem como a Força Tarefa para estudos pré-operacionais de Angra 2.

Como resultado dos estudos realizados nas diversas forças tarefas acima mencionadas, tornou-se necessário a utilização de PSS na Usina de Angra 1, a qual não possuía este componente em seu projeto original, tendo em vista às condições do Sistema Interligado à época. A Usina de Angra 2 já incorporara este componente em sua concepção de projeto, sendo que seu comissionamento foi efetuado durante a primeira tomada de carga da usina.

Este componente é um dispositivo altamente especializado, que tem como finalidade principal amortecer as oscilações eletromecânicas, próprias do Sistema Interligado, na faixa de 0,5 à 2 Hz, sem problemas de instabilização do modo da excitatriz, ruídos, oscilações torsionais e nem de distúrbios de tensão por variação da geração, por rejeição de carga ou por distúrbios na Turbina, no ponto onde a Usina conecta-se ao Sistema Interligado.

* Rua Real grandeza 219, A-301 * – Rio de Janeiro- RJ - BRASIL
Tel.: (021) 2528-3575 - e-mail: embrandi@furnas.com.br

Sua saída atua diretamente no Regulador Automático de Tensão e, portanto, requer alto grau de desempenho e confiabilidade, tendo em vista a sua atuação direta na Excitação do Gerador, garantindo-se uma operação segura e com amortecimento adequado das oscilações eletromecânicas para toda a faixa de operação da usina geradora.

A definição quanto a necessidade de instalação, tornou-se bastante premente a partir de março de 2000, tendo em vista o cronograma de conclusão dos trabalhos da Força Tarefa de Ilhamentos das Usinas Nucleares e Térmicas, o qual sinalizava para Setembro daquele ano a sua implantação junto às concessionárias. Deste modo esforços foram mobilizados para que fosse possível ter este componente instalado ainda durante esta parada de reabastecimento de combustível e manutenção programada P9. Dado o prazo exíguo existente, procurou-se implantar a solução que menor impacto causasse à Usina de Angra 1.

Inicialmente adotou-se uma solução do tipo modular e que fosse possível instalá-lo no próprio gabinete do Regulador de Tensão do Gerador de Tensão da Usina de Angra 1. Tal solução não foi adotada pois necessitaria a implementação de medidas bastante drásticas quanto ao remanejamento de circuitos de corrente e tensão no referido Regulador e que não refletiriam, em suma, a melhor prática de Engenharia.

Optou-se, então, por instalá-lo junto ao painel do DEHC de Controle da Turbina, incorporando-se novos transdutores de potência, necessários para aumento de confiabilidade e de disponibilidade do próprio DEHC.

Nas consultas prévias mantidas visando a uma possível substituição do PSS de Angra 2, foram consultadas concessionárias/geradoras públicas e privadas tendo sido recomendados na totalidade dos contatos o PSS REIVAX, de concepção modular, em substituição ao PSS original suprido, de concepção analógica e com especificação diversa dos requisitos técnicos apresentados pelo ONS à época para os novos PSS, que requeria equipamento do tipo integral de potência acelerante.

2.0 - PRIMEIRAS SIMULAÇÕES E TESTES DE CAMPO

Esta etapa do trabalho teve início em junho de 2001, com a preparação de um primeiro conjunto de ajustes a serem implantados em campo [1]. Foram realizados os estudos digitais no ONS, utilizando-se os modelos em uso daquele momento pelo ANATEM. Nestes estudos foi verificado o desempenho da usina frente às perturbações, tanto para a rede completa, quanto para as condições de ilhamento do sistema. Os resultados das análises realizadas no ONS haviam indicado que o PSS de ANGRA 1 era eficaz no amortecimento do modo local da usina (1,57 Hz), mas não contribuía significativamente no amortecimento do modo da área Rio (1,2 Hz) para contingências no sistema de 500 kV.

Autovalor	Amortecimento	Frequência de Oscilação
-0.67+j9.87	6.8%	1.57Hz

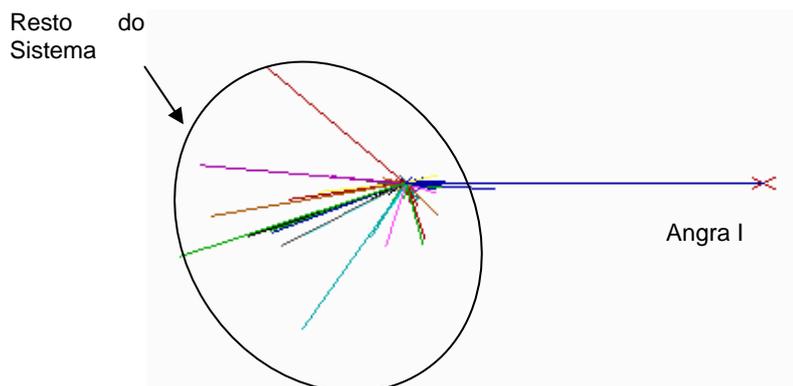


FIGURA 1

A maior contribuição do PSS foi observada nos casos de ilhamento da área Rio, contribuindo para amortecer os modos de oscilação entre Angra 1 e as máquinas das LIGHT.

Autovalor	Amortecimento	Frequência de Oscilação
-3.33+j8.64	36.0%	1.38Hz

Nesta oportunidade, foram definidos os ajustes dos compensadores de avanço-atraso que deveriam ser implementados na usina de Angra 1 durante os testes de campo.

No entanto, durante o período de ensaios da usina, observou-se que as frequências críticas obtidas durante os testes de degrau em carga foram em torno de 0,87 Hz (provavelmente o modo de oscilação de Itaipu 60 Hz) e 1,32 Hz (modo local). Verificou-se que o comportamento do sistema de excitação era diferente daquele observado no modelo em utilização nos estudos. Com isso os ajustes propostos, naquele momento, foram descartados e um novo processo de definição e avaliação dos ajustes do PSS de Angra 1 teve que ser desencadeado pelo grupo de estudos.

Nesta oportunidade, verificou-se que o atraso na resposta do sistema de excitação era maior que o esperado, o que dificultou um ajuste adequado de fase do PSS para as frequências de oscilação mais altas.

3.0 - IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO E PARÂMETROS DO REGULADOR E MÁQUINA

Como as frequências observadas durante os testes iniciais, foram diferentes da obtida nas simulações digitais, foi necessário reavaliar a origem desta diferença através da identificação do modelo do controlador de tensão-AVR, do conversor do Sistema de Excitação e a verificação dos parâmetros das máquinas (constantes de tempo, inércia, reatâncias).

A identificação buscou gerar um modelo confiável para tal sistema, sendo obtida através do levantamento das funções de transferência dos cartões em malha aberta, com ensaios de entrada e saída de sinal; ensaio do gerador em vazio, ensaios do gerador em carga; simulações comparativas para refinamento dos parâmetros. etc [2]. Uma vez obtidos os resultados dos ensaios em campo, procedeu-se a consolidação e validação do novo modelo para AVR e o sistema de excitação, Figura 2 [3], [4].

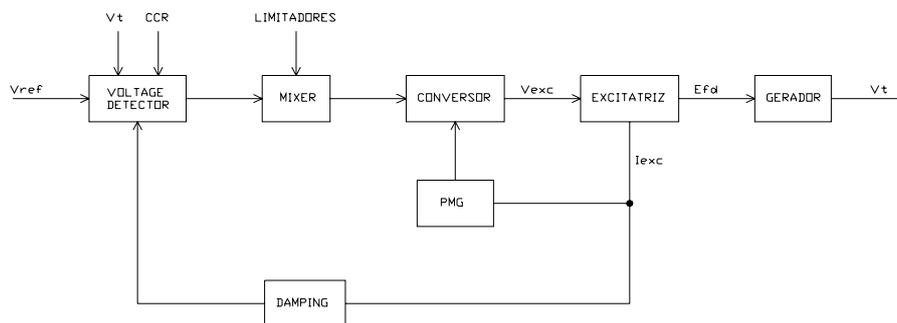


FIGURA 2 - Diagrama de Blocos AVR e Sistema de Excitação

Na figura 3 é apresentado o Diagrama de blocos com as funções de transferências do sistema de excitação.

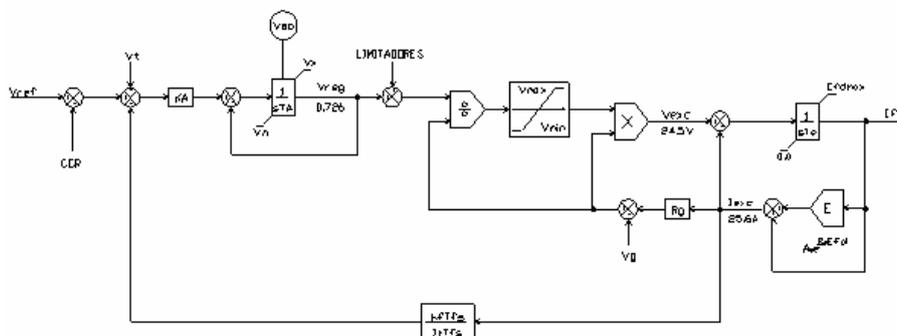


FIGURA 3 – Diagrama de Blocos do Sistema de Excitação

As figuras 4 e 5 apresentam, respectivamente, as variações da tensão terminal do gerador para degraus de $\pm 1,45\%$ e $\pm 9,33\%$ (valores medidos) na referência do Regulador de Tensão com a máquina em vazio, obtidas a partir dos testes de campo (curva amarela) e os resultados obtidos com o novo modelo do sistema de excitação no programa digital ANATEM (curva vermelha).

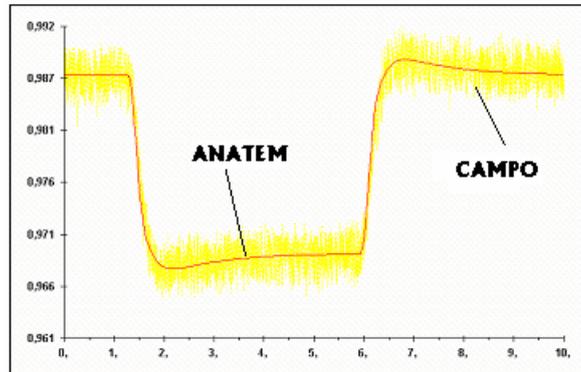


FIGURA 4–Tensão Terminal - Degrau $\pm 1,45\%$

Além do novo modelo do RT levantado através de testes de campo pela REIVAX, os seguintes parâmetros precisaram ser modificados para que os resultados obtidos no programa ANATEM fossem mais coerentes com os apresentados no relatório de Campo:

Parâmetro	Modelo REIVAX	Modelo ANATEM
Ka	448 pu/pu	501 pu/pu
Ta	9,3 ms	6,0 ms

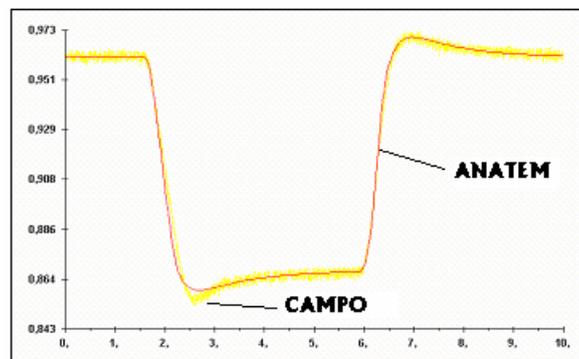


FIGURA 5 - Tensão Terminal - Degrau 9,33%

Além das modificações no modelo do RT, os seguintes parâmetros precisaram ser modificados para que os resultados fossem mais coerentes:

Parâmetro	Valor Antigo	Novo Valor
T'd ₀	5,62 s	5,30 s (1)
H	2,731 s	3,859 s (2)
X'q	65,1%	80,0% (3)
B7(CCR)	0,06 pu/pu	0,076 pu/pu (4)

(1) - sugerido pela REIVAX

(2) - calculado pela ELETRONUCLEAR

(3) - ajustado para obter a frequência de oscilação

(4) - ajustado para obter o valor de regime permanente da tensão terminal para o degrau em carga

4.0 - DEFINIÇÃO DOS NOVOS AJUSTES DO PSS

Com o novo conjunto de ajustes levantados em campo para o modelo do regulador de tensão [2] e implementados no ANATEM, verificou-se que a frequência de oscilação do modo local da usina, alterou-se de 1,57 Hz para 1,2 Hz [3], valores compatíveis com os resultados obtidos nos testes de campo. A Figura 6 mostra o *mode shape* de potência elétrica para a frequência de 1,2 Hz, onde se verifica que este modo de oscilação na frequência 1,2 Hz pertence a usina de Angra 1.

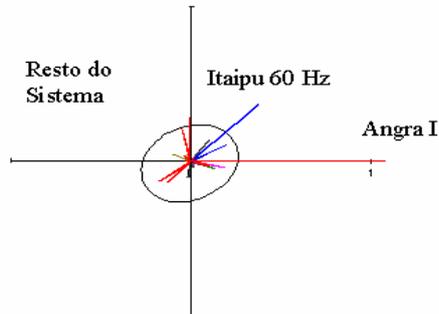


FIGURA 6 - Mode shape de Potência Elétrica ($f = 1,2$ Hz)

Após esta consolidação, novos ajustes para o PSS foram obtidos, testados e implementados no campo, são eles :

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
K _{pss}	2,5	T5	0,3s
T1	0,35s	T6	0,3s
T2	0,05s	Tw1	3,0s
T3	0,35s	Tw2	3,0s
T4	0,05s		

As figuras 7 a 10 apresentam, respectivamente, as variações da potência ativa e da tensão terminal do gerador, para degraus de 3% na referência do Regulador de Tensão com a usina em carga de 600 MW, considerando o PSS desligado e ligado. Pode-se observar que o novo modelo consegue reproduzir a frequência do modo local registrada durante os testes de comissionamento e que a presença do PSS é efetiva para amortecer a oscilação de 1,25 Hz.

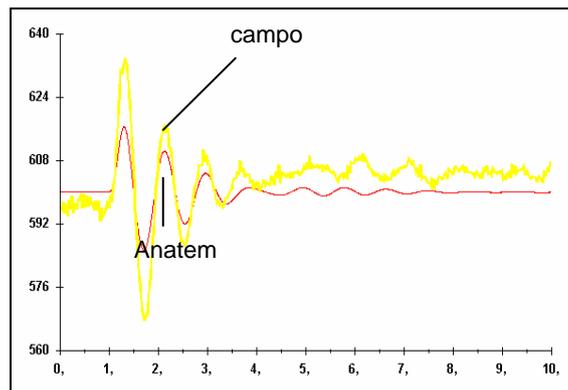


FIGURA 7 – Potência Elétrica s/ PSS

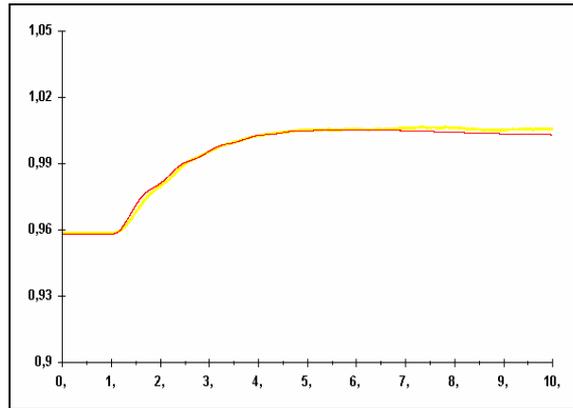


FIGURA 8 – Tensão Terminal s/ PSS

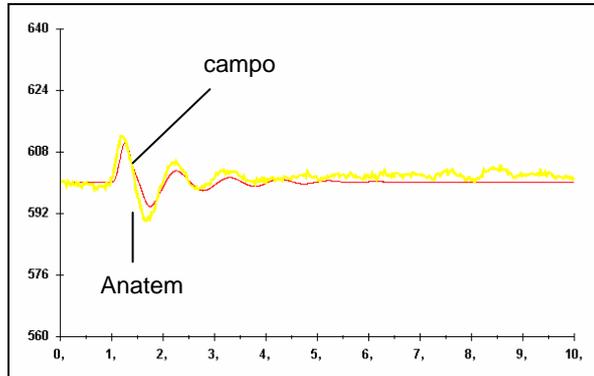


FIGURA 9 – Potência Elétrica c/ PSS

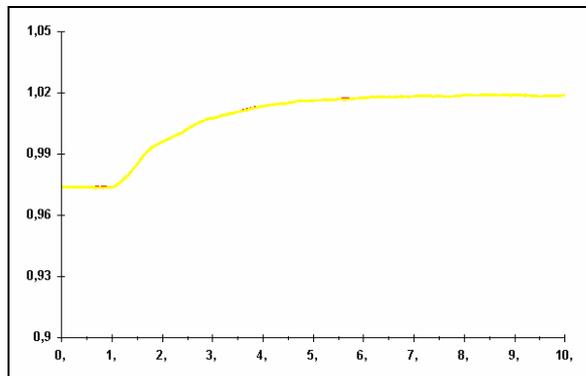


FIGURA 10 – Tensão Terminal c/ PSS

A Figura 11 apresenta a influência do PSS no amortecimento nas oscilações de potência elétrica da usina após um degrau de -4% na referência de tensão

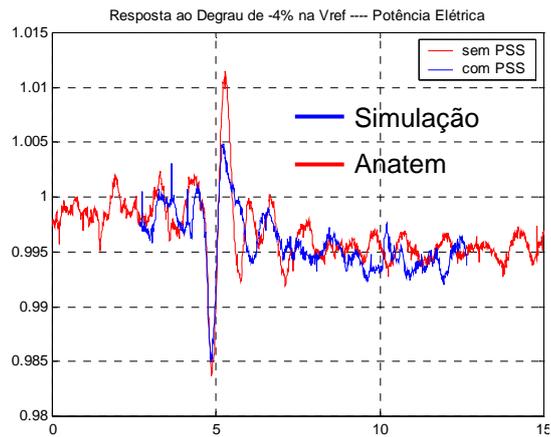


FIGURA 11–Resposta ao degrau com/sem PSS

A Figura 12 apresenta o resultado comparativo da simulação do caso de degrau no ANATEM, com o resultado de teste de campo.

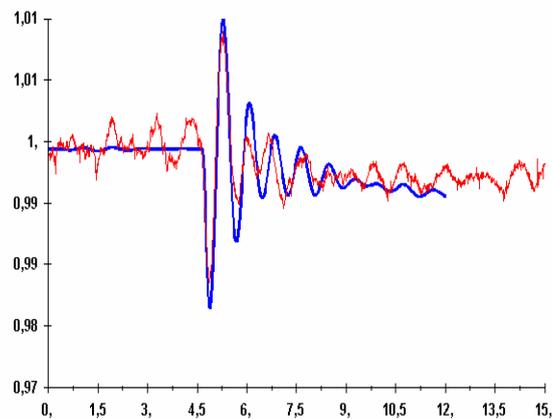


FIGURA 12 – Comparação ANATEM x Campo

5.0 - RESPOSTA EM FREQUÊNCIA

Com o intuito de comparar as respostas freqüenciais medida e calculada via modelo, através de simulações de injeção de sinal senoidal com 1% de amplitude na referência do Regulador de Tensão, foi montada a Tabela 1. Vê-se que os erros estão dentro de faixas toleráveis.

TABELA 1 - Comparação das respostas freqüenciais

f (Hz)	Vt ensaio		Vt modelo		Erro	
	Módulo	Fase	Módulo	Fase	Módulo	Fase
0,506	0,8534	-48,429	0,9785	-49,722	14,7%	2,7%
0,804	0,7123	-72,930	0,7985	-76,551	12,1%	5,0%
0,901	0,6650	-79,168	0,7440	-84,327	11,9%	6,5%
1,001	0,6035	-85,032	0,6853	-91,524	13,6%	7,6%
1,105	0,5580	-91,911	0,6310	-97,455	13,1%	6,0%
1,203	0,5125	-97,469	0,5835	-102,631	13,8%	5,3%

Além disto, resolveu-se avaliar o uso do algoritmo de Levy-Sanathanan [5] na determinação da resposta em freqüência, haja vista a sensível simplificação de ensaio que ele propicia. A Tabela 2 apresenta os resultados de tal comparação no modelo e nos registros de campo.

TABELA 2–Comparação das respostas freqüências

f (Hz)	Vt ensaio		Levy Ensaio		Vt modelo		Levy Modelo	
	Módulo	Fase	Módulo	Fase	Módulo	Fase	Módulo	Fase
0,506	0,8634	-48,429	0,9454	-52,270	0,9785	-49,722	0,9667	-53,845
0,804	0,7123	-72,930	0,7770	-79,667	0,7935	-76,551	0,7798	-82,385
0,901	0,6650	-79,168	0,7182	-86,980	0,7440	-84,327	0,7240	-90,536
1,001	0,6035	-85,032	0,6705	-94,761	0,6853	-91,524	0,6647	-98,637
1,105	0,5580	-91,911	0,6089	-103,146	0,6310	-97,455	0,6083	-106,097
1,203	0,5125	-97,469	0,5491	-109,211	0,5835	-102,631	0,5602	-112,775

Note-se que o erro, na comparação com o ensaio de campo, variou de 3,8° a 11,5°. Já na comparação com a simulação, vê-se que o algoritmo gerou erros de 4,1° a 10,1°. Os erros verificados, tanto em amplitude quanto em fase, são bastante aceitáveis. O ganho de tempo propiciado pelo uso do algoritmo, tanto durante os ensaios quanto durante a análise, compensa em muito tais erros. Note-se, ainda, que a comparação foi efetuada em níveis diferentes de degrau (os sinais senoidais com 0,6% de amplitude na referência e as respostas ao degrau com 1,55% na referência) e que as curvas utilizadas para comparação aproveitavam trechos da resposta ao degrau positivo, já no fim dos registros, haja vista o comportamento menos linear do sistema com relação aos degraus negativos.

6.0 - CONCLUSÕES

Os resultados de campo comprovaram não somente a eficácia dos ajustes do PSS para o amortecimento das oscilações, mas também que a modelagem e os parâmetros determinados para o gerador e seu sistema de excitação estão corretos.

As comparações entre os registros oscilográficos e as simulações com o Anatem mostram que o controle de tensão e a freqüência de oscilação estão de acordo com o comportamento verificado em campo.

A representação da usina, tanto da máquina quanto do regulador, está adequada para estudos de estabilidade;

O algoritmo de Levy-Sanathanan apresenta excelentes resultados e propicia ganhos apreciáveis de tempo e de análise na identificação dos modos de oscilação.

7.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos que participaram neste projeto, ao grupo de manutenção e operação da Usina de Angra 1, a equipe de testes de FURNAS, particularmente ao técnico Ramil Teixeira e ao Eng Angelo Mibiele da REIVAX.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ajuste do Estabilizador de Sistema de Potência da UNE Angra 1 – ONS – N.T. 03/055/01
- [2] Identificação do Sistema de Excitação da UTN de Angra 1 – Relatório de Ensaio e Estudos, REIVAX – F 02019.
- [3] Avaliação do modelo para análise de estabilidade eletromecânica da Usina Nuclear de Angra 1 no programa ANATEM – Rel. Técnico DEEO.O.005.2002 de agosto/2002
- [4] Otimização do Regulador de Tensão e Ajustes do PSS da UTN Angra I – ONS – Relatório Técnico RE 03/278/2002
- [5] SANATHANAN, C.K. & KOERNER, J., Transfer Function Synthesis as a Ratio of Two Complex Polynomials, IEEE Transactions on Automatic Control, vol 8, no 56, 56-58, 1963