



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

GAT 28  
14 a 17 Outubro de 2007  
Rio de Janeiro - RJ

#### **GRUPO IV**

#### **GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT**

#### **MODELAGEM DE REGULADORES DE TENSÃO EQUIVALENTES UTILIZANDO O BANCO DE DADOS DO PROGRAMA PACDYN**

**Niló J.P. Macedo\*    Fernando Mendonça da Fonseca    Eduardo J. S. Pires de Souza**

**Furnas Centrais Elétricas S.A.**

**PUC-Rio**

#### **RESUMO**

O crescimento dos sistemas de energia elétrica, associado à necessidade de intervalos de integração muito pequenos nos estudos dinâmicos, devido à presença de vários dispositivos de controle, tem tornado o tempo de CPU desses estudos muito alto. Uma maneira de acelerar o processo, sem perda significativa de precisão, é reduzir o tamanho do modelo do sistema por meio de equivalentes dinâmicos. Além desta aplicação, os estudos com simuladores em tempo real representam outra motivação para a utilização de equivalentes dinâmicos.

Neste artigo serão apresentados resultados de testes do programa EDINCO, utilizando a resposta em frequência de diversos reguladores de tensão do banco de dados do PACDYN para a obtenção de reguladores de tensão equivalentes, considerando o sistema *New England* como exemplo de aplicação da metodologia.

#### **PALAVRAS-CHAVE**

Equivalentes Dinâmicos; Geradores Coerentes; Agregação Dinâmica; Reguladores de Tensão

#### **1.0 - INTRODUÇÃO**

Visando melhorar a qualidade do equivalente dinâmico do sistema elétrico representado nos estudos realizados em simuladores de sistemas elétricos em tempo real (RTDS), ou em programas de estabilidade eletromecânica, e reduzir o esforço e o tempo gastos na sua preparação, vem sendo desenvolvida uma série de aperfeiçoamentos na metodologia do programa EDINCO (1) para o cálculo de equivalentes baseados em coerência de geradores (2,3).

Para a obtenção do sistema equivalente deve-se subdividir o sistema completo interligado em duas partes. A primeira parte representa a região de interesse (sistema em estudo) onde são simuladas as contingências. A segunda parte representa o sistema externo, que corresponde à região do sistema que se deseja representar pelo equivalente dinâmico. A função deste equivalente dinâmico é representar a dinâmica do sistema externo, e tem como principal objetivo apresentar comportamento dinâmico similar ao obtido com o sistema completo para perturbações tais como curtos-circuitos, contingências de linhas de transmissão ou transformadores, perdas de geração ou carga que ocorrem na área de interesse, sem perda significativa de precisão.

O cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência apresenta três etapas básicas:

- ⇒ identificação dos geradores coerentes;
- ⇒ redução estática da rede;
- ⇒ agregação dinâmica de modelos.

No presente trabalho, o problema da agregação dinâmica é tratado segundo a metodologia proposta por Germond e Podmore (4). Os parâmetros dos modelos lineares equivalentes são ajustados através do método de Levenberg-Marquardt (5,6). A identificação dos geradores coerentes é realizada por um método de simulação linear que considera o desvio médio da velocidade angular dos geradores como medida de coerência (7). Conhecidos os grupos de geradores coerentes para um dado distúrbio, pode-se proceder à redução estática da rede e à agregação dinâmica dos modelos das unidades geradoras coerentes.

A redução da rede consiste na eliminação de barras terminais dos geradores coerentes e de barras de carga. Antes de se iniciar o procedimento de eliminação de barras, é necessário transferir os geradores de cada grupo coerente para uma barra terminal comum, utilizando-se a formulação REI (8).

As características dos modelos das unidades geradoras equivalentes geralmente são determinadas a partir do modelo de cada unidade individual de um grupo coerente, considerando-se separadamente a dinâmica do rotor e os modelos da máquina síncrona, sistema de excitação, estabilizador, regulador de velocidade e turbina.

O agrupamento dos geradores coerentes é feito através de um algoritmo que processa as medidas de coerência ordenadas até uma dada tolerância, previamente calculada em função de um índice de qualidade da coerência e da menor e maior medidas, combinado com um índice de proximidade elétrica entre os geradores de cada grupo coerente. O procedimento adotado neste algoritmo garante a unicidade da composição dos grupos coerentes formados (7,9).

Para a obtenção dos reguladores de tensão e velocidade equivalentes através dos algoritmos originais do programa EDINCO (1) era necessário que todos os reguladores das unidades geradoras do sistema interligado brasileiro fossem modelados no programa. Tal tarefa é inviável não apenas pelo grande número de controladores, mas também devido à necessidade de manutenção contínua do programa para a inclusão de novos modelos, ou atualização dos existentes. Uma forma de resolver o problema da modelagem dos reguladores de tensão dos geradores equivalentes foi desenvolver uma nova subrotina para o programa EDINCO (1), considerando como dado de entrada as respostas em frequência dos reguladores de tensão obtidas através do programa PACDYN (3,10). O PACDYN (10) possui um banco de dados, continuamente atualizado pelo ONS, com todos os modelos dos reguladores do sistema interligado brasileiro.

Para testar a eficiência do programa EDINCO (1) na preparação de equivalentes dinâmicos de partes do sistema interligado e contornar a necessidade de introduzir novos modelos neste programa, algumas alternativas foram testadas para a obtenção do sistema de excitação de cada gerador equivalente:

- escolher, através de métodos heurísticos, o regulador de tensão e PSS de uma das unidades que fazem parte de cada grupo coerente (maior unidade)(9);
- utilizar, como um dos dados de entrada, das respostas em frequência dos reguladores, levantadas diretamente dos equipamento reais nas usinas ou geradas pelo programa PACDYN (3,10).

A escolha, através de métodos heurísticos, do regulador de tensão e PSS de uma das unidades que fazem parte de cada grupo coerente (maior unidade) apresentou bons resultados nos testes, considerando índices de qualidade da coerência de até 95% (9). Entretanto, para se configurar como uma metodologia viável para aplicações envolvendo reduções drásticas do sistema elétrico, ainda serão necessários mais testes com índices de qualidade da coerência de 80% ou menores. A simplificação do problema de agregação dinâmica de reguladores de tensão através da escolha do regulador de tensão e PSS da maior unidade geradora de cada grupo coerente nem sempre pode ser utilizada. Em grupos coerentes com geradores de tamanhos semelhantes e com reguladores de tensão com respostas em frequência muito diferentes, ainda seria necessário verificar qual estrutura de regulador de tensão para o regulador equivalente apresentaria os melhores resultados.

No presente trabalho são apresentados alguns resultados preliminares ao se utilizar a resposta em frequência em malha aberta de reguladores de tensão do sistema brasileiro, obtidos do banco de dados do programa PACDYN (10), como um dos dados de entrada para o programa EDINCO (1).

## 2.0 - NOVO ALGORITMO PARA AGREGAÇÃO DINÂMICA DE REGULADORES DE TENSÃO

Seja  $G_E(s)$  a função de transferência (FT) do sistema de excitação. Desprezando o sinal do estabilizador, o modelo equivalente aos modelos de sistema de excitação das unidades geradoras de um dado grupo coerente apresenta a função de transferência  $G_E^{eq}(s)$ .

Desprezando os limites do regulador de tensão, a saída  $\Delta E_{fd}$  é expressa para cada modelo como:

$$\Delta E_{fd_j}(s) = G_{E_j}(s) \times \Delta V_T(s)$$

onde  $GE_j(s)$  é a FT linear de cada modelo e o erro da tensão terminal  $\Delta V_T$  é a entrada comum para cada sistema de excitação de um dado grupo de geradores coerentes, assumindo esta entrada pequena o bastante de forma que nenhum dos sistemas de excitação encontre seus limites.

Sendo  $W_j(s)$  um fator que pondera a contribuição individual de cada um dos modelos de sistema de excitação dos geradores coerentes, a FT agregada de um grupo coerente pode ser obtida como apresentado na Figura 1 (4). A resposta em frequência da FT agregada é utilizada como referência para o ajuste de parâmetros da função de transferência escolhida para representar o regulador de tensão equivalente.

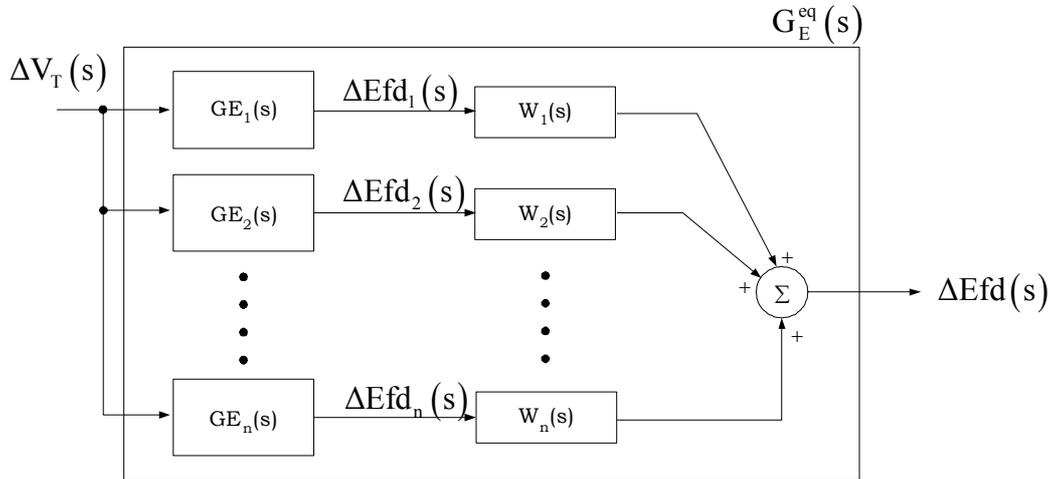


FIGURA 1 – Determinação da função de transferência agregada de um grupo coerente.

Pesquisas recentes na área de agregação dinâmica de modelos (11-15) vêm sendo desenvolvidas no sentido de se investigar a melhor estrutura para o modelo equivalente, sendo conhecidos os modelos das unidades geradoras de cada grupo coerente. Neste trabalho, entretanto, pretende-se ajustar os parâmetros de modelos previamente escolhidos para o regulador de tensão equivalente conhecendo-se apenas a resposta em frequência dos sistemas de excitação dos geradores coerentes.

Para possibilitar a utilização da resposta em frequência como um dado de entrada, uma nova subrotina de agregação dinâmica foi desenvolvida para o programa EDINCO (1), onde a resposta em frequência do regulador de tensão de cada unidade geradora,  $GE_j(s)$ , é extraída de uma tabela, ao invés de ser calculada internamente. Estas respostas em frequência são processadas para a determinação da resposta de cada grupo coerente, ou seja, a resposta da FT agregada. A tabela deve conter as respostas em frequência de todos os reguladores de tensão do sistema externo, previamente obtidas, na faixa de 0,01 a 10 Hz.

Nesta nova rotina de agregação as respostas em frequência são obtidas sem o conhecimento das FTs dos modelos individuais, e o programa permite ao usuário que o modelo MD01 de excitatriz rotativa ou o modelo MD20 de excitatriz estática, referentes a modelos de reguladores de tensão do ANATEM (16), sejam escolhidos como modelos equivalentes para o ajuste entre as FTs agregada e equivalente.

Após a leitura dos valores da resposta em frequência dos reguladores de tensão dos geradores do sistema externo, o programa EDINCO (1) determina, automaticamente, a respectiva resposta em frequência de cada grupo coerente, denominada resposta da FT agregada, para a resolução do problema da agregação dinâmica desses modelos.

Durante a etapa dos cálculos dos parâmetros do regulador de tensão equivalente, quando se conhece previamente a estrutura dos reguladores individuais de cada gerador coerente, os valores iniciais dos parâmetros do regulador de tensão equivalente são calculados utilizando-se os parâmetros de cada modelo individual. A escolha dos valores iniciais para o modelo equivalente é importante para o processo de convergência do método de Levenberg-Marquardt (5,6), e pode levar a resultados fisicamente não realizáveis, tais como constantes de tempo negativas. Ao se fornecer diretamente ao programa EDINCO (1) as respostas em malha aberta de cada regulador, não se conhece previamente os parâmetros dos modelos individuais. Neste caso, o programa considera o ganho equivalente igual ao valor do módulo da FT agregada na frequência de 0,01 Hz (menor frequência). Para as constantes de tempo dos filtros LEAD-LAG do modelo MD20, considerou-se o seguinte critério para a determinação das estimativas iniciais: desprezando-se  $T_3$  e  $T_4$  ( $T_3 = 0s$  e  $T_4 = 0,01s$ ) e considerando  $T_1 = 1,0s$ , pode-se determinar uma estimativa para  $T_2$  utilizando uma aproximação do ganho transitório na frequência de 1,0 Hz (valor do módulo da FT agregada na frequência de 1,0 Hz).

### 3.0 - TESTES DE DESEMPENHO DINÂMICO DOS MODELOS

Para avaliar o desempenho da nova subrotina de agregação dinâmica de reguladores de tensão, foram realizadas algumas simulações utilizando o sistema “New England” e associando aos geradores os dados de algumas usinas do sistema elétrico brasileiro. A Figura 2 mostra o diagrama do sistema teste, com a indicação do sistema em estudo e do sistema externo. A Tabela 1 apresenta a relação das usinas consideradas nos testes preliminares. Na Figura 3 é apresentada a resposta em frequência em malha aberta dos reguladores de tensão dos geradores do sistema externo (módulo e fase).

Para o teste de aplicação de curto-circuito trifásico na barra 29, eliminado em 100 ms com a abertura da linha 29-28, considerando um índice de qualidade da coerência de 80%, foram obtidos dois grupos de geradores coerentes para o sistema externo. Os geradores 2 e 3 formaram o gerador equivalente 1 (GER EQ1) e os geradores 4,5, 6 e 7 formaram o gerador equivalente 2 (GER EQ2). As Figuras 4 e 5 mostram a resposta em frequência em malha aberta das FTs agregada e equivalente (curvas em azul), considerando o modelo MD20 de excitatriz estática para o equivalente. Os valores finais dos ganhos e constantes de tempo para os reguladores de tensão equivalentes foram os seguintes:

DRGT MD20	(No)	(Tm)	(Ka)	(T1)	(T2)	(T3)	(T4)	(Lmn)	(Lmx)
2901	105.7	2.227	5.140	0.004	0.010	-10.0	10.0		
2902	259.4	1.174	6.671	0.018	0.030	-10.0	10.0		
9999									

obs: GER EQ1=>2901; GER EQ2=>2902.

As Figuras 6 a 9 mostram o desempenho dos geradores do sistema em estudo, comparando as curvas de oscilação das potências elétricas considerando o sistema completo (curvas em azul) e o equivalente. Nestas figuras, também são apresentados os resultados considerando a representação de reguladores de tensão (RGTs) com o modelo MD20 nos geradores equivalentes (figuras a), e sem considerar a representação dos RGTs equivalentes (figuras b).

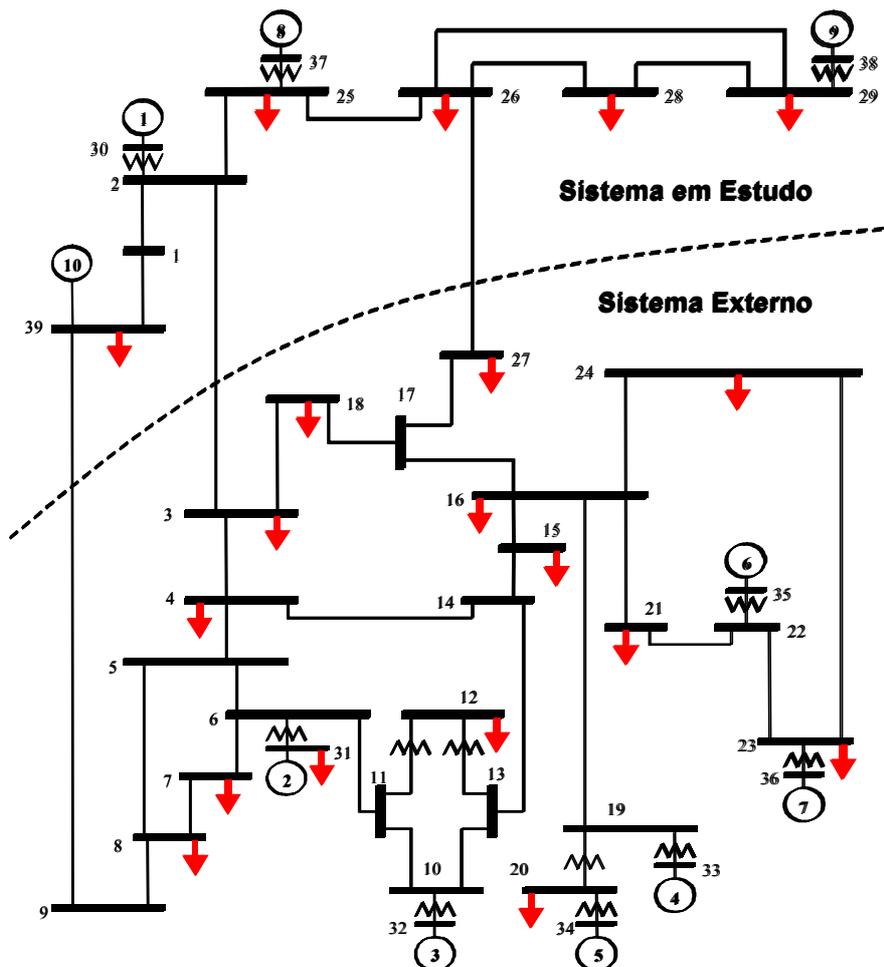


FIGURA 2 – Sistema teste “New England”.

TABELA 1 – Modelos de geradores considerados nos testes.

Nº GERADOR	MODELO CONSIDERADO	Ger. Equivalente $q_c=80\%$	Observação
1	Emborcação – 1GR	-	Sistema em Estudo
2	Salto Caxias – 2 GR	GER EQ1	Sistema Externo
3	Itumbiara – 2 GR	GER EQ1	Sistema Externo
4	Manso – 12 GR	GER EQ2	Sistema Externo
5	São Simão – 2 GR	GER EQ2	Sistema Externo
6	Corumbá – 6 GR	GER EQ2	Sistema Externo
7	Serra da Mesa – 2 GR	GER EQ2	Sistema Externo
8	Jupia – 5 GR	-	Sistema em Estudo
9	Salto Segredo – 3 GR	-	Sistema em Estudo
10	Ilha Solteira – 9 GR	-	Sistema em Estudo

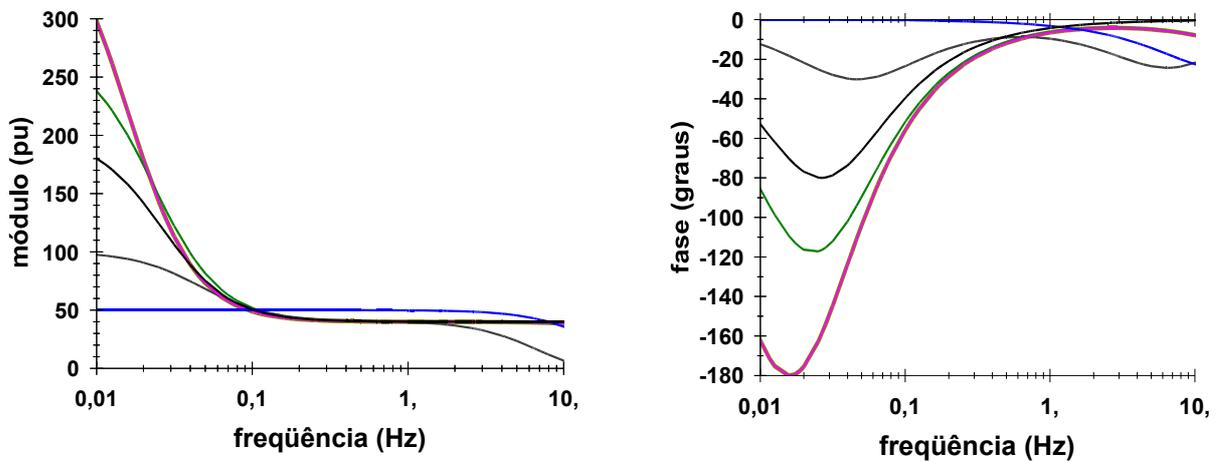


FIGURA 3 - Resposta em frequência dos reguladores de tensão dos geradores do sistema externo.

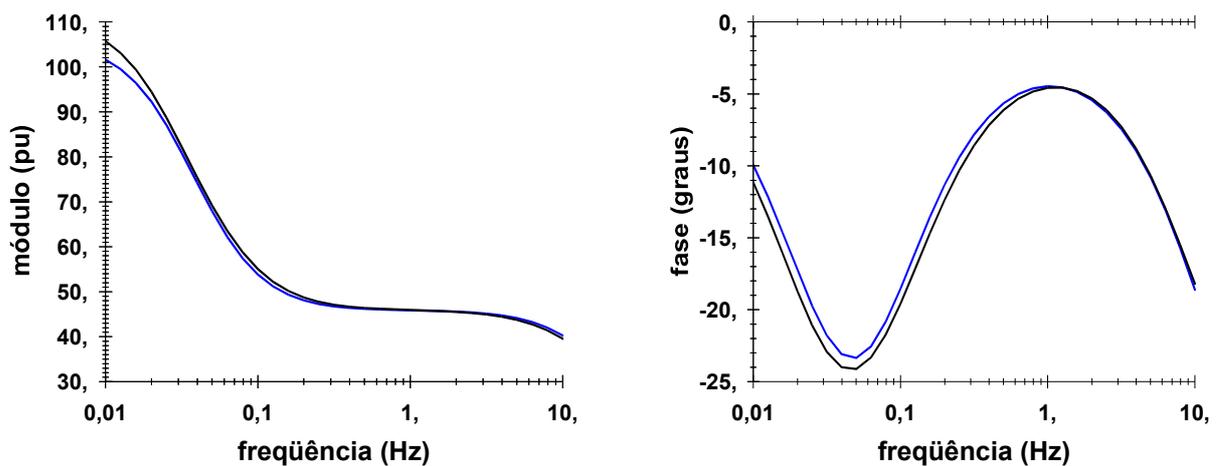


FIGURA 4 – Grupo (2,3): Resposta em frequência das FTs agregada e equivalente (MD20).

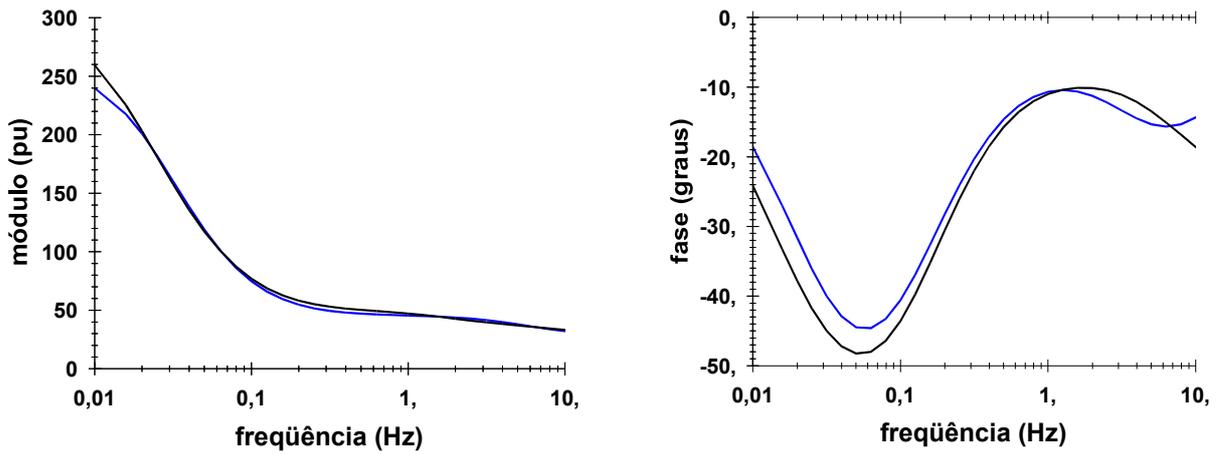


FIGURA 5 – Grupo (4,5,6,7): Reposta em frequência das FTs agregada e equivalente (MD20).

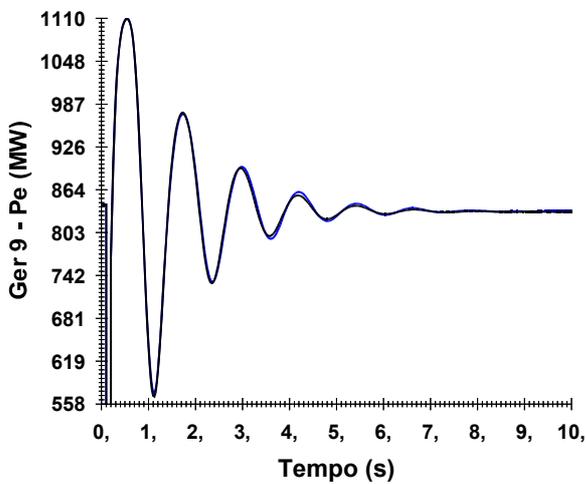


FIGURA 6 – (a) Gerador 9: RGTs equivalentes representados.

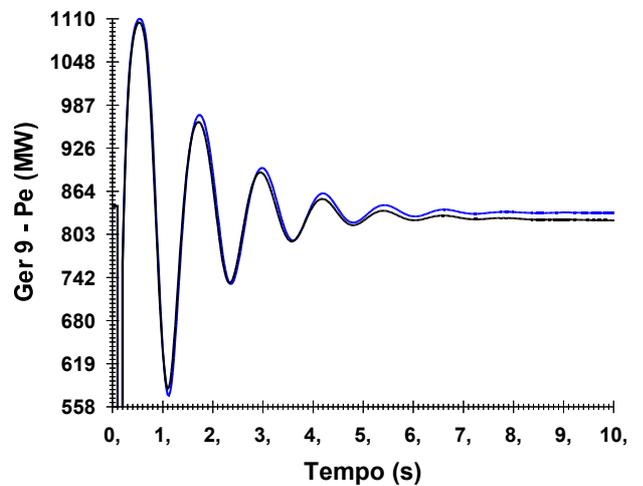


FIGURA 6 – (b) Gerador 9: RGTs equivalentes não representados.

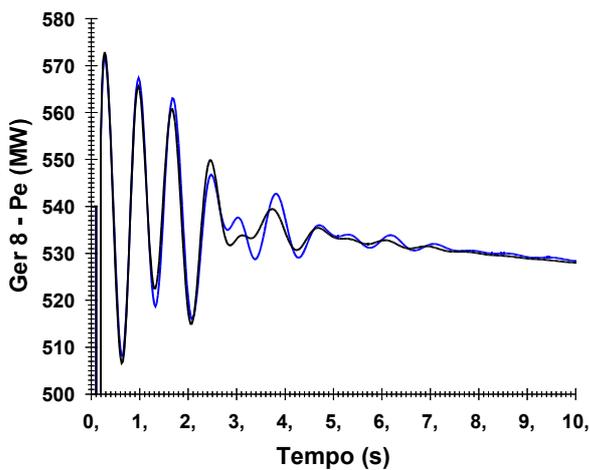


FIGURA 7 – (a) Gerador 8: RGTs equivalentes representados.

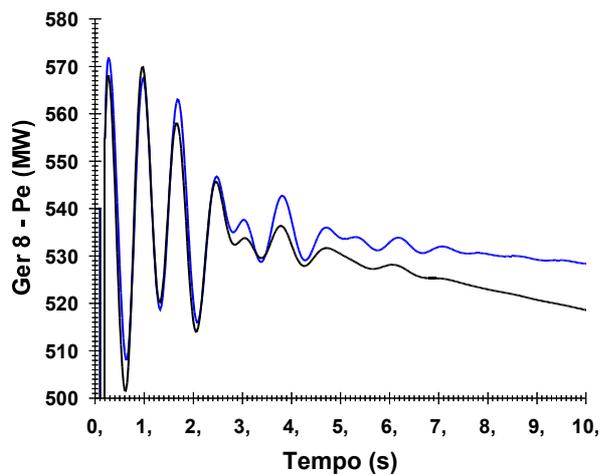


FIGURA 7 – (b) Gerador 8: RGTs equivalentes não representados.

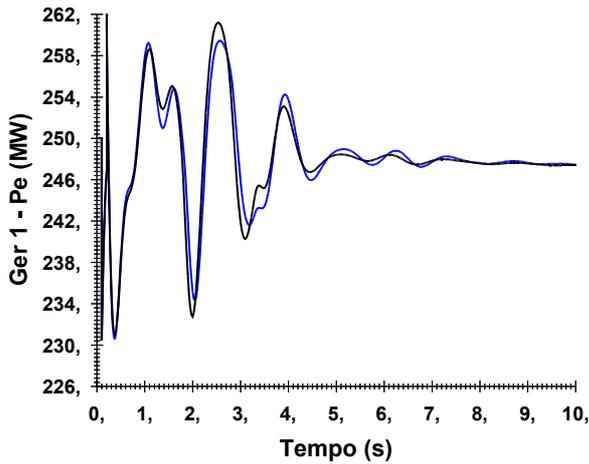


FIGURA 8 – (a) Gerador 1: RGTs equivalentes representados.

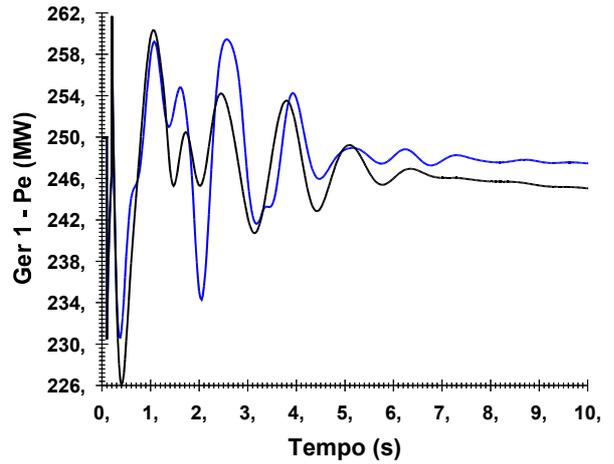


FIGURA 8 – (b) Gerador 1: RGTs equivalentes não representados.

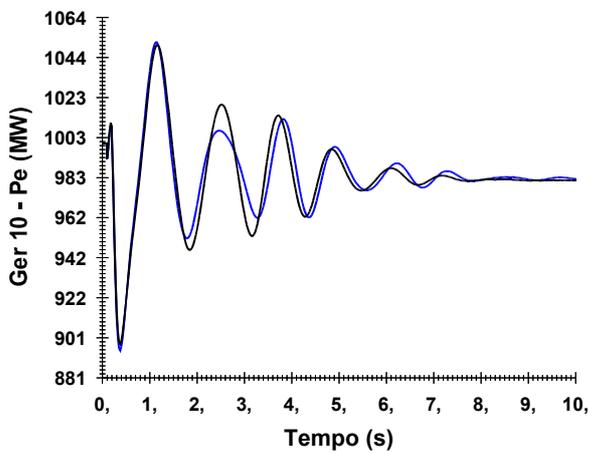


FIGURA 9 – (a) Gerador 10: RGTs equivalentes representados.

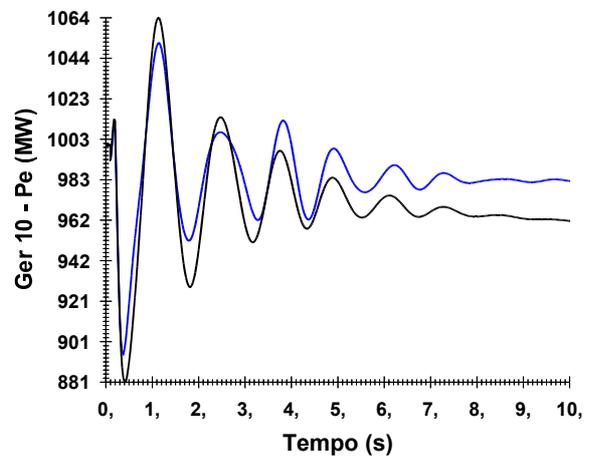


FIGURA 9 – (b) Gerador 10: RGTs equivalentes não representados.

#### 4.0 - CONCLUSÕES

A metodologia de cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência de geradores foi modificada na etapa de agregação dinâmica. Ao invés de representar todos os reguladores de tensão do sistema interligado nacional no programa EDINCO (1), tarefa inviável dado o número de controladores e a necessidade de manutenção contínua do programa para a inclusão de novos modelos ou atualização dos existentes, a resposta em frequência dos reguladores, necessária para a agregação dos modelos, passou a ser fornecida ao programa, seja por levantamento direto dos equipamentos reais nas usinas, ou gerada pelo programa PACDYN (10).

Dando continuidade ao aperfeiçoamento da metodologia para cálculo de equivalentes dinâmicos por coerência de geradores, a utilização do banco de dados do PACDYN (10) para a obtenção dos reguladores de velocidade equivalentes deverá ser objeto de uma nova etapa de desenvolvimento do programa EDINCO (1).

Apesar da simplicidade do sistema "New England", os resultados obtidos neste trabalho comprovaram a importância da representação dos reguladores de tensão equivalentes para a obtenção de um bom desempenho dinâmico do sistema em estudo. A partir destes resultados, novos testes serão realizados utilizando o sistema interligado brasileiro para o cálculo de equivalentes dinâmicos, considerando como sistema em estudo apenas um pequeno subsistema elétrico e efetuando reduções drásticas do restante do sistema interligado (9).

## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Programa EDINCO, Cálculo de Equivalentes Dinâmicos por Coerência, Manual do Usuário, Versão P03-03/2004, PUC-Rio / Furnas, 2004.
- (2) Programa para cálculo e execução de equivalentes dinâmicos - Macedo, N.J.P., Pires de Souza, E.J.S., Albuquerque, M.A. - II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (II CITENEL) - Vol. I, p. 282-287, Salvador, 2003.
- (3) Projeto P&D-Ciclo 2001/2002: Aperfeiçoamentos em programa para cálculo de equivalentes dinâmicos - Macedo, N.J.P., Pires de Souza, E.J.S., Fonseca, F.M. - III Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (III CITENEL), CD-ROM, p. 1-6, Florianópolis, 2005.
- (4) Dynamic aggregation of generating unit models - Germond, A.J., Podmore, R. - IEEE Trans. on Power App. and Syst., Vol. PAS-97, No. 4, p. 1060-1069, 1978.
- (5) A method for the solution of certain nonlinear problems in least squares - Levenberg, K. - Quarterly of Applied Mathematics, Vol. II, No. 2, p. 164-168, 1944.
- (6) An algorithm for least square estimation on nonlinear parameters - Marquardt, D.W. - SIAM Journal on Numerical Analysis, Vol. 2, No. 11, p. 431-441, 1963.
- (7) An efficient methodology for coherency-based dynamic equivalents - Pires de Souza, E.J.S., Leite da Silva, A.M. - IEE Proceedings-C, Vol. 139, No. 5, p. 371-382, 1992.
- (8) The REI approach to power network equivalents - Tinney, W.F., Powell, W.L. - Proceedings PICA Conference, p.314-320, 1977.
- (9) Dynamic performance evaluation of the interconnected Brazilian system using equivalents - Macedo, N.J.P., Pires de Souza, E.J.S., Fonseca, F.M., Albuquerque, M.A. - IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (IX SEPOPE), Paper SP-040, p. 1-5, CD-ROM, Rio de Janeiro, 2004.
- (10) Programa PACDYN, Análise da Estabilidade para Pequenas Perturbações, Versão 6.3, Cepel, 2005.
- (11) Aggregation of excitation systems including PSS to calculate power system dynamic equivalents - Pires de Souza, E.J.S., Araújo Pedro, M.B.D., Souza, F.L., Figueiredo, A.B.G. - VIII Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning ( VIII SEPOPE), paper IP-086, CD-ROM, p. 1-6, Brasília, 2002.
- (12) Selecting equivalent models in the excitation system dynamic aggregation problem - Pires de Souza, E.J.S., Araújo Pedro, M.B.D., Souza, F.L. - 14th Power Systems Computation Conference (PSCC 2002), session 26, paper 5, CD-ROM, Sevilla, Spain, 2002.
- (13) Agregação dinâmica de modelos de estabilizadores com dupla entrada para o cálculo de equivalentes dinâmicos - Pires de Souza, E.J.S., Albuquerque, M.A. - 5<sup>th</sup> Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, CD-ROM, p. 1-9, São Pedro-SP, 2003. (ISBN 85-903471-1-7)
- (14) Agregação dinâmica de modelos de turbinas e reguladores de velocidade - Paco, D.F.D., Pires de Souza, E.J.S. - 6<sup>th</sup> Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, paper A-135, CD-ROM, p. 1-8, Mar del Plata, Argentina, 2005. (ISBN 85-903471-2-5).
- (15) Agregação dinâmica de modelos de reguladores de tensão - Santos, S.S., Pires de Souza, E.J.S. - 6<sup>th</sup> Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, paper A-136, CD-ROM, p. 1-8, Mar del Plata, Argentina, 2005. (ISBN 85-903471-2-5).
- (16) Programa ANATEM, Análise de Transitórios Eletromecânicos, Manual do Usuário, V09-12/05a, Cepel, 2005.