

Programa para cálculo e execução de equivalentes dinâmicos

Nilo J.P. de Macedo, FURNAS; Eduardo J.S. Pires de Souza, PUC-Rio
e Marcos Antonio Albuquerque, FURNAS

RESUMO

Este artigo técnico apresenta os resultados da pesquisa, Programa de P&D (ciclo 2000/2001), referente à aplicação da metodologia de cálculo de equivalentes dinâmicos, baseados em coerência de geradores, na determinação da representação reduzida de sistemas para os estudos com o Simulador de Sistemas Elétricos (SSE) de FURNAS.

PALAVRAS-CHAVE

Equivalentes Dinâmicos, Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência, Geradores Coerentes, Sinais Estabilizadores de Potência, Sistemas de Excitação.

I. INTRODUÇÃO

Os simuladores de sistemas elétricos dispõem, atualmente, de recursos poderosos para a modelagem detalhada dos diversos componentes de uma rede elétrica, mas a sua capacidade de representação de elementos é limitada. Assim, é necessária a redução do sistema original a um sistema equivalente, cujo tamanho seja compatível com a capacidade de representação do simulador.

Calcular um equivalente dinâmico, sem uma ferramenta computacional adequada, pode ser uma tarefa extremamente laboriosa e de sucesso duvidoso, sobretudo quando é necessário reduzir drasticamente a dimensão do sistema original, e representar a dinâmica de muitas unidades geradoras e seus controles através de poucas unidades equivalentes.

A metodologia de cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência permite a redução do sistema original a um sistema equivalente consistente, cujo tamanho pode ser determinado através de um índice que traduz a qualidade da coerência dos grupos de geradores formados. A medida de coerência considerada é o desvio médio da velocidade angular dos geradores, e o procedimento adotado no algoritmo de agrupamento garante a unicidade da composição dos grupos coerentes.

Nilo J. P. de Macedo é engenheiro sênior do Departamento de Estudos Elétricos da Operação de FURNAS (e-mail: nilojpm@furnas.com.br).

Eduardo J. S. Pires de Souza é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio (e-mail: pires@ele.puc-rio.br).

Marcos Antonio Albuquerque é engenheiro pleno do Departamento de Estudos Elétricos da Operação de FURNAS (e-mail: maarcos@furnas.com.br).

O método de cálculo de equivalentes dinâmicos baseados em coerência é particularmente adequado para os estudos em simuladores analógico-digitais, porque o equivalente é um modelo convencional de unidade geradora, com os sistemas de controle associados, o que torna sua implementação simples e imediata. O significado físico do equivalente facilita também a interpretação de resultados da simulação, permitindo alterações de parâmetros com facilidade, quando necessário.

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 eletromagnética (ATP, PSCAD/EMTDC, etc), e reduzir o esforço e o tempo gastos na sua preparação, Furnas e a PUC-Rio realizaram alguns testes utilizando uma versão acadêmica do programa EDINCO (Equivalentes DINâmicos por COerência) [1], obtendo excelentes resultados [2,3,4,5,6].

Este projeto de pesquisa consistiu em desenvolver e aperfeiçoar uma nova versão comercial do programa EDINCO para microcomputadores, atendendo a uma necessidade tecnológica de FURNAS. Os aperfeiçoamentos introduzidos no programa EDINCO objetivaram aumentar a sua capacidade de representação de modelos e introduzir novas facilidades para o usuário, gerando um aumento de produtividade e possibilitando uma maior competitividade no setor elétrico [7].

Os objetivos intermediários foram os seguintes:

- redimensionar o programa EDINCO para poder representar todo o sistema interligado brasileiro e MERCOSUL;
- agregar novos modelos de Regulador de Tensão e Sinal Adicional Estabilizador;
- automatizar o processamento do programa EDINCO com os programas ANAREDE e ANATEM;
- incluir um valor limite de impedância no cálculo da malha REI para melhorar a convergência da rede elétrica no processo de integração do equivalente ao caso base de fluxo de potência;
- desenvolver uma nova metodologia para a agregação de Sinais Estabilizadores com dupla entrada (PSS-2A). A metodologia utilizada anteriormente só permite a agregação de modelos com uma única entrada.

Neste artigo serão apresentados os resultados da aplicação da metodologia para dois sistemas testes:

- sistema *New England*, de cunho acadêmico, para testes de agregação do modelo de PSS com duas entradas (PSS-2A);
- sistema elétrico brasileiro, onde o sistema interno é constituído apenas pela usina de Itaipu, pelos sistemas de 765 KV e de corrente contínua, com os equipamentos associados, e o restante do sistema interligado S-SE-CO-N-NE é reduzido a um equivalente dinâmico com o menor número possível de máquinas, definido em função do índice de qualidade da coerência.

Serão apresentadas também algumas das dificuldades encontradas na aplicação desta metodologia, tendo em vista o elevado número de modelos de controles associados aos sistemas externos considerados, e as soluções possíveis para resolver este problema.

II. METODOLOGIA UTILIZADA

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 interno e barras de fronteira, 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, conforme ilustração da figura 1. A função deste equivalente dinâmico é de representar a dinâmica do sistema externo, e tem como principal objetivo apresentar comportamento dinâmico similar ao obtido com o sistema completo para uma dada perturbação, tal como curtos-circuitos, contingências de linhas de transmissão, transformadores, perdas de geração ou carga que ocorrem na área de interesse, sem perda significativa de precisão.

A ocorrência de um evento se propaga pelo sistema através de linhas de transmissão, causando a reação das unidades geradoras do sistema interligado, ou seja, provocando oscilações nas mesmas. Essas reações podem ter maior ou menor magnitude, dependendo da distância elétrica em relação ao local do distúrbio. Falhas no sistema interno, próximas às barras de fronteira, causam reações mais significativas do sistema externo, justificando a importância de se representar de forma adequada a dinâmica do sistema completo interligado nos estudos de estabilidade transitória.

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

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

O desvio de velocidade é uma medida mais eficaz que o desvio angular para identificar geradores coerentes, especialmente naqueles casos em que os geradores apresentam oscilações com frequências diferentes e pequenas diferenças de amplitude [8].

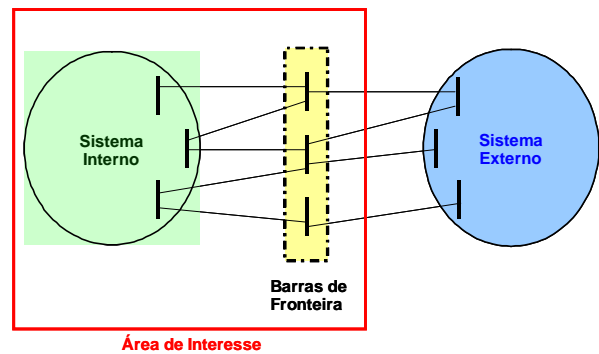


FIGURA 1 - Representação do sistema elétrico para o cálculo de equivalentes.

Conhecidos os grupos de geradores coerentes para um dado distúrbio, pode-se proceder a redução da rede e a agregação dinâmica [8,9].

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 [10].

A resposta de potência do modelo equivalente do sistema externo é importante para o desempenho dinâmico dos geradores do sistema interno. As trocas de potências sincronizantes entre os geradores no período transitório, devidas essencialmente aos desvios angulares, devem ser aproximadamente reproduzidas no sistema reduzido. As variações de potência dos geradores de cada grupo coerente são refletidas radialmente para as fronteiras, e daí para o sistema interno, em virtude dos fluxos de potência entre esses geradores permanecerem aproximadamente constantes durante o período transitório, em razão das diferenças angulares entre suas tensões terminais se manterem de modo aproximado. Os geradores equivalentes reproduzem de perto essas variações de potência dos grupos coerentes.

A agregação dinâmica de unidades geradoras coerentes, agrupadas em uma mesma barra, consiste na determinação dos parâmetros de uma ou mais unidades geradoras equivalentes, que apresentem o mesmo comportamento dinâmico das unidades originais, durante qualquer perturbação em que estas unidades permaneçam coerentes.

O problema da agregação dinâmica de modelos de unidades geradoras coerentes é tratado de acordo com a metodologia proposta por Germond e Podmore [9], baseada no ajuste de parâmetros de funções de transferência a partir da resposta em frequência. Os parâmetros dos modelos equivalentes, no entanto, são ajustados numericamente através do método de Levenberg-Marquardt [8]. O ajuste de parâmetros de funções de transferência a partir da resposta em frequência caracteriza um problema de otimização multivariável [8,9].

As características do modelo da unidade geradora equivalente 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.

Diante da diversidade de modelos de reguladores existentes no sistema brasileiro, vários ainda não representados na versão atual do programa EDINCO, é necessário fazer algumas adaptações na etapa de agregação dinâmica dos equipamentos de controle dos geradores do sistema externo (sistema de excitação, regulador de velocidade, PSS). Duas metodologias foram testadas para a obtenção do sistema de excitação de cada gerador equivalente:

- identificação da função de transferência e ajuste dos parâmetros através de um modelo ARMA (Auto Regressive Moving Average), a partir da resposta no domínio do tempo dos reguladores de tensão de cada grupo coerente (Figura 2);
- escolha, através de métodos heurísticos, do regulador de tensão e PSS de uma das unidades que fazem parte de cada grupo coerente (maior unidade) através de um programa auxiliar (Figura 3).

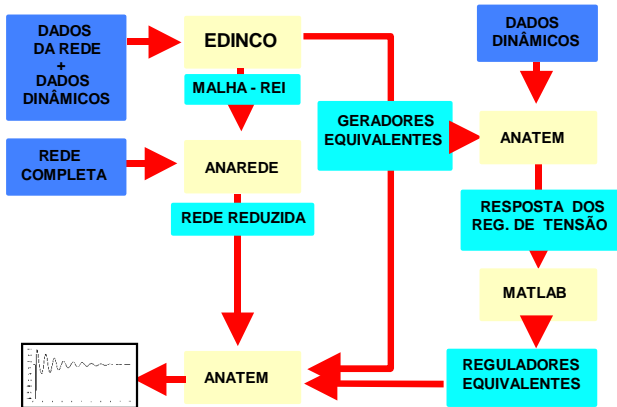


FIGURA 2. Atuação dos Programas - Esquema 1.

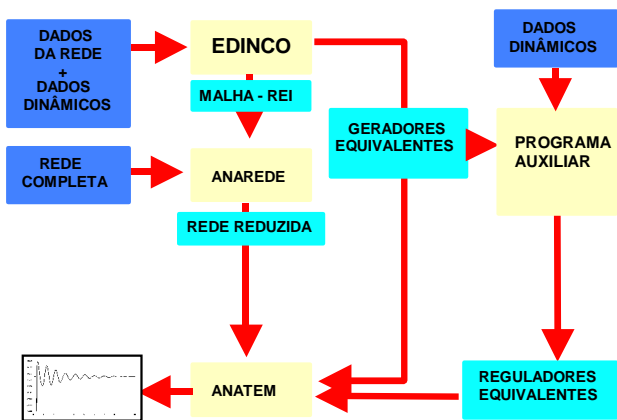


FIGURA 3 - Atuação dos Programas - Esquema 2

III. RESULTADOS

A. Sistema New England

A figura 4 mostra o diagrama simplificado deste sistema teste, sendo indicado o sistema interno e as fronteiras.

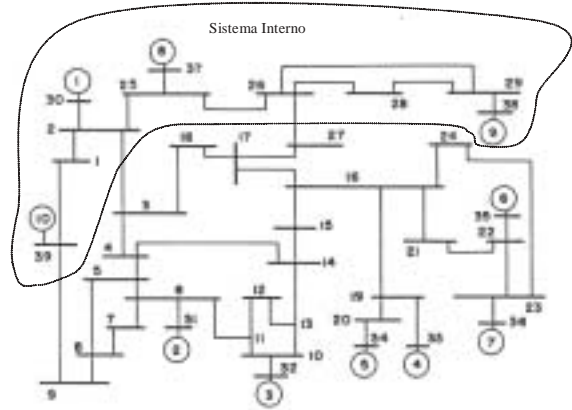


FIGURA 4 - Diagrama unifilar do sistema New England.

Nos resultados apresentados a seguir, todas as unidades geradoras coerentes, assim como os modelos equivalentes, estão equipados com estabilizadores de dupla entrada.

Teste de aplicação de curto-circuito trifásico na barra 29, com duração de 67 ms, e abertura da linha entre as barras 29 e 28. Considerando um fator de qualidade de 80%, forma-se o grupo coerente composto pelos geradores 2, 3, 6 e 7. As figuras 5, 6 e 7 mostram o desempenho dos sistemas completo e equivalente (curva azul tracejada), comparando as curvas de oscilação angular do gerador 8, potência elétrica do gerador 1 e tensão na barra de carga 1.

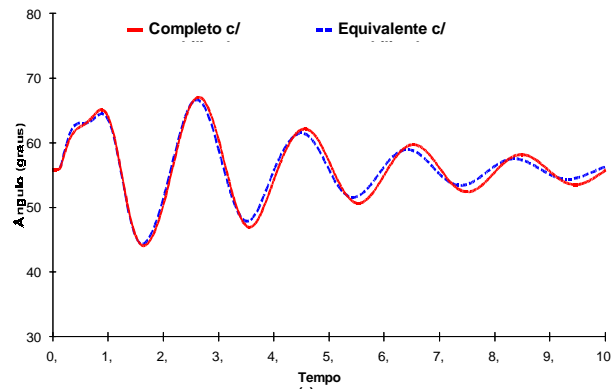


FIGURA 5 - Curvas de oscilação angular do gerador 8.

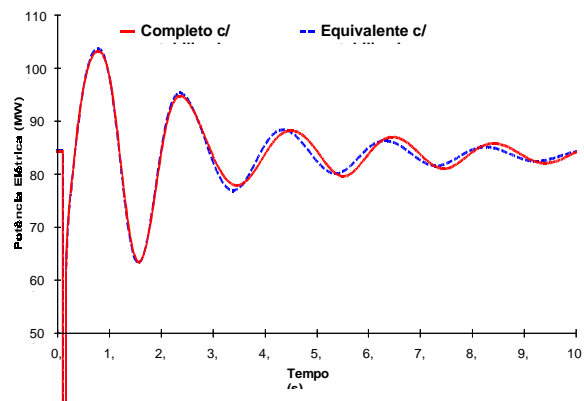


FIGURA 6 - Curvas de potência elétrica do gerador 1.

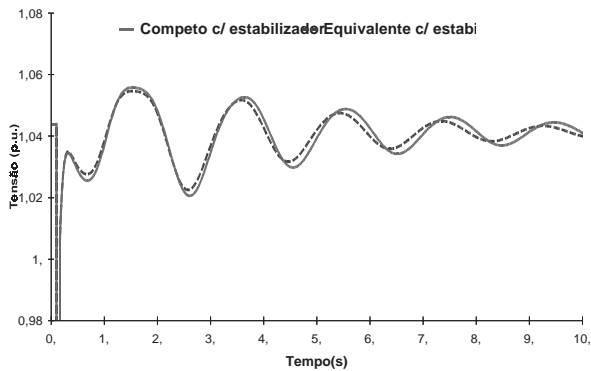


FIGURA 7 - Curvas de tensão na barra de carga 1.

Com os testes realizados, verificou-se que o sistema equivalente representou satisfatoriamente a dinâmica do sistema completo. As curvas referentes às variáveis selecionadas mostraram que o sistema equivalente apresenta oscilação similar à do sistema completo para os eventos considerados, comprovando que a metodologia adotada para agregação dinâmica, aplicada a modelos de estabilizadores de dupla entrada, proporcionou a obtenção de equivalentes precisos. Para a agregação de estabilizadores utilizando esta metodologia é necessário que os seus sinais de entrada sejam iguais, e o sinal de saída do PSS esteja conectado na entrada do regulador de tensão.

B. Sistema Brasileiro

A figura 8 mostra o diagrama simplificado do sistema em estudo (sistema interno e fronteiras), constituído apenas pela usina de Itaipu e pelos sistemas de 765 KV e de corrente contínua, com os equipamentos associados.

El o CC

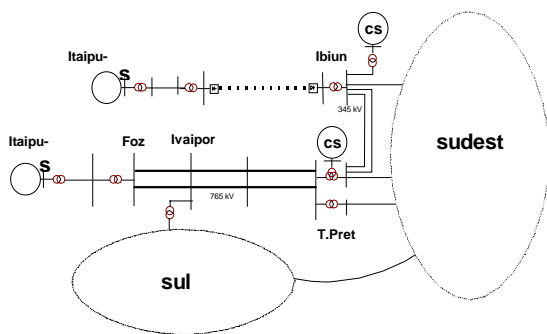


FIGURA 8 - Diagrama unifilar do sistema em estudo.

O sistema elétrico brasileiro utilizado para testar a metodologia foi obtido do banco de dados do ONS e refere-se a um caso base de março de 2002, cenário de carga pesada, possuindo 2815 barras, 5445 linhas/ transformadores e 270 geradores. Após a identificação dos grupos de geradores coerentes, realizada considerando-se um índice de qualidade da coerência de 95%, e a agregação dinâmica dos geradores de cada grupo, o sistema externo passou a ser representado por 17 máquinas síncronas equivalentes, e 31 geradores não-coerentes que não foram agrupados.

As figuras 9 a 13 mostram algumas curvas obtidas através de simulações dinâmicas com o programa ANATEM, para validação do equivalente dinâmico do sistema externo, sem considerar a redução estática da rede elétrica. A emergência considerada foi uma falta trifásica em Tijuco Preto 345 kV por 100 ms, e abertura de um circuito entre Tijuco Preto e Ibiuna. Pode-se notar que apesar do local da falta ser próximo das barras de fronteira com o sistema externo, as variações de tensão no sistema interno, a geração de potência ativa e reativa de Itaipu-60 Hz, a potência ativa e a corrente no elo CC apresentaram um erro bastante pequeno.

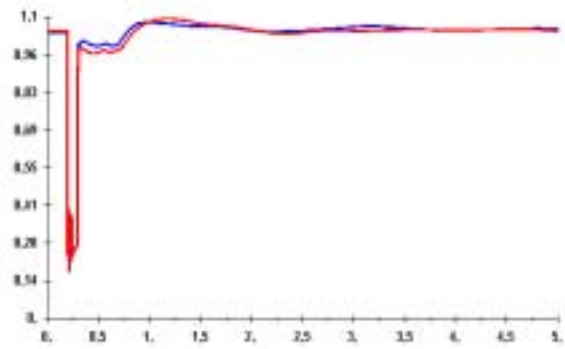


FIGURA 9 - Tensão em Ibiuna 345 KV (pu).

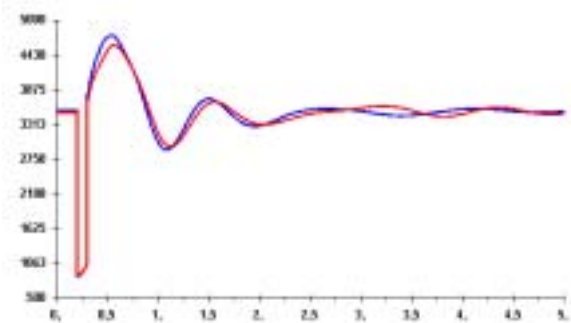


FIGURA 10 - Potência ativa em Itaipu-60Hz (MW).

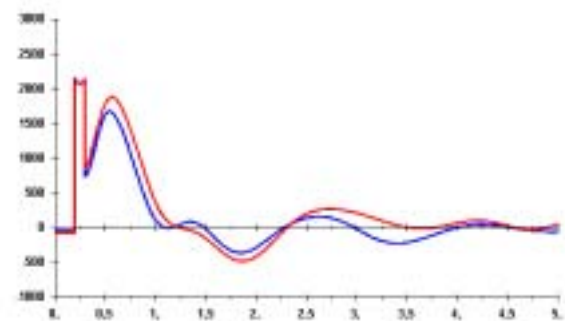


FIGURA 11 - Potência reativa em Itaipu-60Hz (MVar).

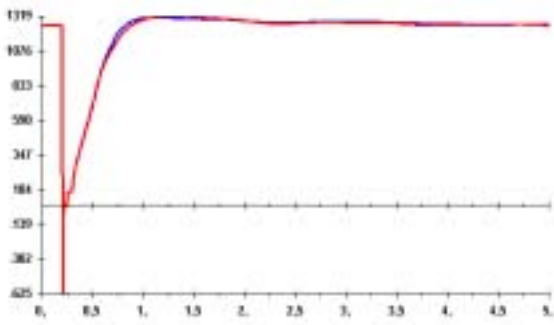


FIGURA 12 - Potência ativa no pólo 1 do elo CC (MW).

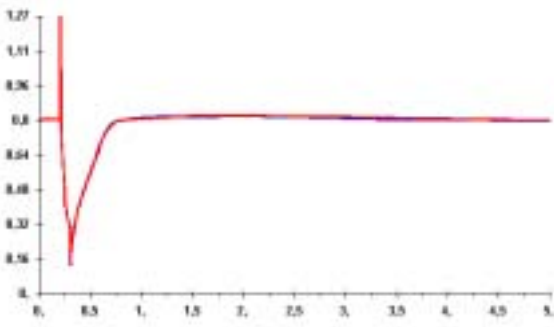


FIGURA 13 - Corrente no pólo 1 do elo CC (pu).

Para uma redução ainda maior do número de geradores do sistema externo, seria necessário reduzir o índice de qualidade da coerência para valores da ordem de 80%. Devido a problemas de convergência no programa de fluxo de potência, durante a etapa de inclusão da malha REI, não foi possível utilizar fatores de qualidade inferiores a 95%.

IV. CONCLUSÕES

Uma nova versão do programa EDINCO para microcomputadores foi desenvolvida. O programa foi redimensionado de modo a atender as novas dimensões do sistema interligado do MERCOSUL, considerando a integração do sistema N/NE/CO/SE/S brasileiro com os sistemas da Argentina, Paraguai e Uruguai. A versão disponibilizada possui capacidade para ler dados de um sistema elétrico com 300 geradores, 3000 barras e 6000 linhas e transformadores.

O programa EDINCO foi originalmente desenvolvido para ler e transferir dados para programas não mais utilizados como ferramentas de análise do sistema elétrico. Foram desenvolvidas novas interfaces para os programas ANAREDE e ANATEM (Cepel), utilizados atualmente pelas empresas do setor elétrico nas análises de desempenho dinâmico do sistema.

Foi incluído um valor limite de impedância no cálculo da malha REI para melhorar a convergência da rede elétrica, no processo de integração do equivalente ao caso base de fluxo de potência. Devido à necessidade de reduções drásticas da rede para representação no Simulador de Sis-

temas Elétricos, esta alteração no programa não foi suficiente para eliminar os problemas de convergência no programa de fluxo de potência utilizado (ANAREDE).

Foram desenvolvidos programas auxiliares para a preparação automática dos dados de entrada do programa EDINCO, convertendo alguns componentes (Elos de Corrente Contínua, Compensadores Estáticos de Reativo, Capacitores Série Controlados a Tiristores, Motores de Indução, etc) em cargas ou modelos passivos, sem alterar o ponto de operação do sistema elétrico. Também foram desenvolvidos programas para a preparação automática dos dados dinâmicos para o programa de estabilidade eletromecânica ANATEM, utilizando os arquivos dos geradores equivalentes fornecidos pelo EDINCO e estabelecendo critérios para a escolha dos modelos para o Regulador de Tensão e PSS da máquina equivalente.

Foi desenvolvida uma nova metodologia para a agregação de Sinais Estabilizadores com dupla entrada (PSS-2 A) [11].

Todas as alterações e desenvolvimentos no programa EDINCO, previstos no cronograma do projeto para o ciclo 2000/2001, foram realizados. Entretanto, para efeito prático de obtenção de equivalentes dinâmicos visando sua utilização no Simulador de Sistemas Elétricos de FURNAS, foram encontradas algumas limitações na metodologia atual:

- Para a obtenção dos reguladores de tensão e velocidade equivalentes através dos atuais algoritmos do programa EDINCO é necessário que todos os reguladores das unidades geradoras do sistema interligado brasileiro sejam modelados no programa. Tal tarefa se mostrou inviável pelo grande número de controladores, e a necessidade de manutenção contínua do programa para a inclusão de novos modelos, ou atualização dos existentes. Uma solução para eliminar esta limitação é alterar os algoritmos do EDINCO para utilizar, como um dos dados de entrada, a resposta em frequência dos reguladores fornecida pelo programa PACDYN (Cepel). O programa PACDYN já possui um banco de dados com todos os modelos dos reguladores do sistema interligado brasileiro e é continuamente atualizado pelo ONS;
- A identificação da função de transferência e ajuste dos parâmetros através de um modelo ARMA (Auto Regressive Moving Average), a partir da resposta no domínio do tempo dos reguladores de tensão de cada unidade, apresentou problemas numéricos em alguns testes e resultados espúrios.
- 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 resultados razoáveis para fatores de qualidade da coerência de até 95%. Entretanto, para se configurar como uma metodologia viável para aplicações no Simulador de Sistemas Elétricos seriam necessários testes com fatores de qualidade da ordem de 80% ou menores.

- Nas aplicações em que é necessária uma redução drástica do sistema, com fatores de qualidade da coerência inferiores a 95%, foram encontrados problemas de convergência no programa de fluxo de potência ANAREDE (Cepel). Durante o processo de inclusão das impedâncias da malha REI, fornecidas pelo EDINCO para inserir os geradores equivalentes na rede elétrica e eliminar as unidades que foram agrupadas, a interligação entre regiões eletricamente muito distantes dificulta a convergência do programa de fluxo de potência. Uma possível solução, que precisa ser investigada, seria alterar os algoritmos do EDINCO para agrupar os geradores considerando o índice de qualidade da coerência, e definindo os geradores equivalentes por área do sistema elétrico.

Alguns problemas podem surgir na etapa de redução estática da rede elétrica, e precisam ser investigados para a aplicação desta metodologia nos estudos com simuladores digitais ou analógicos em tempo real. Tais problemas referem-se principalmente à necessidade de eliminação de interligações com resistências negativas, ou cargas com parte ativa negativa, que podem surgir durante a redução estática da rede elétrica. Esta limitação de representação de resistências negativas no SSE pode comprometer a qualidade do equivalente calculado, implicando na necessidade de ajustes de parâmetros dos controles das máquinas equivalentes e ajustes na modelagem da carga equivalente do sistema externo.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a significativa colaboração do Engenheiro Fernando Mendonça da Fonseca neste projeto, desenvolvendo os programas auxiliares para preparação automática de dados e arquivos dinâmicos mencionados neste trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E.J.S. Pires de Souza, "Projeto de pesquisa: Equivalentes dinâmicos de sistemas de potência (2ª fase)", Documentação do programa EDINCO, Convênio Eletrobrás / Fundação Pe. Leonel Franca (FPLF/PUC-Rio) No. ECV 310/86, 20 p., Maio 1992.
- [2] E.J.S. Pires de Souza, J.L. Jardim, and N.J.P. de Macedo, "Power system transient stability assessment using dynamic equivalents and transient energy functions", in Proc. V Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning, Vol. II, pp. 413-417, Recife-PE, May 1996.
- [3] E.J.S. Pires de Souza, N.J.P. de Macedo, M.F. Meireles, and J.L. Jardim, "Aplicação de equivalentes dinâmicos baseados em coerência em estudos com simulador em tempo real de sistemas elétricos", Anais do XIV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Informe Técnico FL/GAT/09, Belém-PA, Outubro 1997.
- [4] E.J.S. Pires de Souza and N.J.P. de Macedo, "Avaliação da segurança dinâmica de sistemas de potência utilizando equivalentes dinâmicos baseados em coerência", in Proc. Third Latin-American Congress: Electricity Generation and Transmission, Vol. 2, pp. 621-624, Campos do Jordão-SP, Novembro 1997.
- [5] E.J.S. Pires de Souza and N.J.P. de Macedo, "Application of coherency-based dynamic equivalents in the interconnected Brazilian system", in Proc. Cigre International Symposium on Power System Issues in Rapidly Industrialising Countries, paper 230-04, CD-ROM, Kuala Lumpur, Malaysia, September 1999.
- [6] E.J.S. Pires de Souza and N.J.P. de Macedo, "Application of coherency-based dynamic equivalents in the interconnected Brazilian system", Revista Eletroevolução, Cigré-Brasil, No.19, pp. 14-17, Março 2000.
- [7] E.J.S. Pires de Souza, "Projeto: Programa para cálculo e execução de equivalentes dinâmicos", Relatório Final, Programa de P&D, ciclo 2000/2001, Contrato Furnas / PUC-Rio (FPLF) No. 14095, 31 p., Janeiro 2003.
- [8] E.J.S. Pires de Souza and A. M. Leite da Silva, "An efficient methodology for coherency-based dynamic equivalents, IEE Proc., Part C, Vol. 139, No. 5, pp.371-382, September 1992.
- [9] A.J. Germond and R. Podmore, "Dynamic aggregation of generating unit models", IEEE Trans., Vol. PAS-97, pp.1060-1069, July/Aug 1978.
- [10] W. F. Tinney and W.L. Powell, "The REI approach to power network equivalents", in Proc. PICA Conf., pp.314-320, 1977.
- [11] M.A. Albuquerque, "Agregação dinâmica de modelos de estabilizadores com dupla entrada para o cálculo de equivalentes dinâmicos", Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Outubro 2002.