



**XXII SNTPEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GAT/16  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – IV**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISES TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT**

**AValiação Dinâmica da Interligação Tucuruí-Manaus-Macapá do Subsistema Norte do SIN  
USANDO EQUIVALENTES Dinâmicos**

**Pitther Negrão      Dione J. Abreu Vieira      Bernard C. Bernardes  
João Paulo Abreu Vieira      Ubiratan Holanda Bezerra**

**PPGEE/UFGA**

**RESUMO**

Este artigo visa apresentar uma metodologia de cálculo de equivalentes dinâmicos de sistemas de potência utilizando algoritmos genéticos, e avaliar a estabilidade transitória da interligação Tucuruí-Manaus-Macapá do subsistema norte do SIN (Sistema Interligado Nacional). O método consiste em minimizar o erro absoluto entre as potências do sistema completo e do seu modelo equivalente. Para validação da metodologia proposta, foram utilizados dois sistemas elétricos, um de pequeno porte, conhecido como sistema de duas áreas do IEEE e outro de grande porte, o SIN, considerando a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá, substituindo os subsistemas Sudeste/Centro-Oeste/Sul e Nordeste por equivalentes dinâmicos. O método proposto apresentou resultados bastante satisfatórios com relação à coerência dos geradores, além de reduzir significativamente o tempo computacional de simulação no programa ANATEM.

**PALAVRAS-CHAVE**

Algoritmo genético, equivalentes dinâmicos, estabilidade transitória, Identificação de parâmetros, modelagem dinâmica.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Ao longo dos anos, os benefícios da interligação de diferentes sistemas elétricos tornaram-se evidentes. A interconexão de redes elétricas de áreas vizinhas permitiu não só uma operação mais econômica, onde a exploração de fontes de menor custo foi possível, mas também possibilitou um aumento na segurança e na confiabilidade dos sistemas elétricos. No Brasil, a primeira forte interligação elétrica foi propiciada, em 1963, pela usina hidrelétrica de Furnas e envolveu os maiores centros urbanos e industriais do país: São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte. Com o desenvolvimento dos sistemas elétricos das demais regiões do país, ocorreram sucessivas interligações interestaduais, culminando, em 1999, com a interligação dos grandes subsistemas Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste. Este grande sistema é hoje denominado Sistema Interligado Nacional (SIN). No entanto, o sistema elétrico nacional ainda apresenta vários sistemas isolados, usualmente atendendo a centros de consumo localizados em regiões ainda não interligadas ao SIN, na maioria dos casos por meio de geração térmica a diesel, que por sua vez é mais custosa e poluente do que outras formas de geração.

Esta realidade dos sistemas isolados é bem mais presente nos estados da região norte do país, como os estados do Pará, Amazonas, Acre, Rondônia, Roraima e Amapá. De forma a integrar parte da Amazônia ao SIN, foi licitada a concessão para construção e operação das linhas de transmissão e subestações que interligarão as regiões de Manaus, Macapá e da margem esquerda do Rio Amazonas entre as capitais do Amazonas e do Amapá. Esse empreendimento é conhecido como Interligação Tucuruí-Manaus-Macapá, prevista para iniciar a operação no ano de 2013. Contudo, embora os estudos energéticos de planejamento realizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apontem para soluções eficientes da interligação Tucuruí-Manaus-Macapá, o cenário desregulamentado do setor elétrico traz novos desafios para a operação interligada, uma vez que estes passam a

(\*) Rua Augusto Correa, nº 001 – Campus Universitário do Guamá – CEP 66075-110 Belém, PA, Brasil.  
Tel: (+55 91) 3321-8925 – Email: pitther.negrao@yahoo.com.br

operar de forma mais estressada, com reduzida margem de estabilidade. Entretanto, deve-se considerar ainda que a simulação dinâmica do SIN, com a modelagem completa e detalhada, é muito dispendiosa e requer esforço computacional considerável.

Com a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá ao subsistema Norte, o SIN terá sua estrutura física e complexidade aumentadas, tornando imprescindível a utilização de modelos que, quando reduzidos, possam representar apropriadamente as parcelas de outros subsistemas. Logo, considerar em detalhes somente o subsistema Norte e representar as parcelas externas dos subsistemas restantes do SIN por equivalentes dinâmicos pode representar uma considerável redução do esforço computacional e do armazenamento de dados do sistema. Os equivalentes dinâmicos auxiliam na redução de partes do sistema elétrico interconectado, propiciando a sua utilização na avaliação da segurança dinâmica de sistemas elétricos de potência, sem perdas relevantes de precisão [1].

A utilização de equivalentes dinâmicos tem se mostrado importante, nos estudos de estabilidade transitória [2], na avaliação da estabilidade a pequenas perturbações [3] e nos projetos de controladores para os sistemas elétricos de potência [4]. Além destas utilizações, novas motivações surgem para a utilização de equivalentes dinâmicos na avaliação da segurança dinâmica de sistemas elétricos de potência, como na implementação de eficiências estratégicas de controle corretivo [5], fortalecimento da segurança de sistemas elétricos de potência em situações de ilhamento [6] e estabelecimento de índice de confiabilidade e qualidade de um sistema interligado [7]. O equivalente dinâmico pode ser usado para analisar a estabilidade de sistemas elétricos de potência de grande porte de forma eficiente e precisa, sendo também usado para projeto de PSS, do inglês "Power System Stabilizers" [4] e na determinação dos limites de transferência de potência entre áreas diferentes [8] [9].

Diversos métodos para determinação de equivalentes dinâmicos estão disponíveis na literatura, dando atenção especial aos métodos baseados na coerência dos geradores, por sua simplicidade e confiabilidade na determinação de grupos coerentes de geradores [10]. Em [11] é apresentada uma metodologia para determinação de equivalentes dinâmicos utilizando algoritmos genéticos para sistemas de pequeno porte, entretanto, não são tratados sistemas elétricos de grande porte. Dentro deste contexto, este artigo apresenta uma metodologia baseada em métodos evolutivos, utilizando algoritmos genéticos, para determinação de equivalentes dinâmicos, composto por geradores equivalentes, capazes de representar parte de um sistema elétrico. O equivalente tem por finalidade substituir uma área do sistema, composto por linhas de transmissão, barras de cargas e geradores de tal forma que o comportamento dinâmico da rede seja preservado o mais próximo possível do comportamento do sistema completo.

Para validação da metodologia desenvolvida, dois sistemas elétricos (um de pequeno e outro de grande porte) são avaliados em situações de diferentes tempos de curto-circuito. O sistema de pequeno porte é conhecido como sistema duas áreas do IEEE. O segundo, de grande porte, é o SIN, onde será realizada a avaliação da segurança dinâmica do subsistema Norte do SIN, do ponto de vista da estabilidade transitória, considerando a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá, utilizando para tanto, uma metodologia para obtenção de equivalentes dinâmicos capazes de substituir os subsistemas Sudeste/Centro-Oeste/Sul e Nordeste por dois geradores equivalentes. A identificação dos parâmetros foi realizada por meio dos algoritmos genéticos, comparando a resposta no tempo de uma perturbação no SIN completo e no subsistema Norte com equivalentes. Foram utilizados na avaliação proposta os modelos do SIN contemplados na base de dados do ONS, as ferramentas computacionais ANAREDE, ANATEM e o MATLAB.

## 2.0 - METODOLOGIA

Com a finalidade de descrever a metodologia proposta de identificação dos parâmetros de equivalentes dinâmicos usando algoritmos genéticos, um fluxograma do procedimento iterativo é apresentado na Figura 1. Em primeiro lugar, define-se a parcela do sistema que deve ser reduzida, cujos geradores podem ser coerentes (fortemente acoplados) e outros não coerentes (fracamente acoplados). Além do mais, cada uma das áreas do sistema pode apresentar particularidades, como delimitações geográficas e áreas pertencentes a uma ou mais empresa. A função objetivo deste trabalho é baseada em grandezas monitoradas nas barras de fronteira, de tal forma que os valores observados para o modelo do sistema completo sejam iguais aos obtidos para o sistema equivalente. A formulação considera os desvios de potência, sendo  $\hat{P}_{ij}$  e  $\hat{Q}_{ij}$  os fluxos de potências ativa e reativa, respectivamente, da barra  $i$  para a barra  $j$  no instante  $k$ , resultante do modelo adotado.  $N_p$  é o número de amostras da simulação.

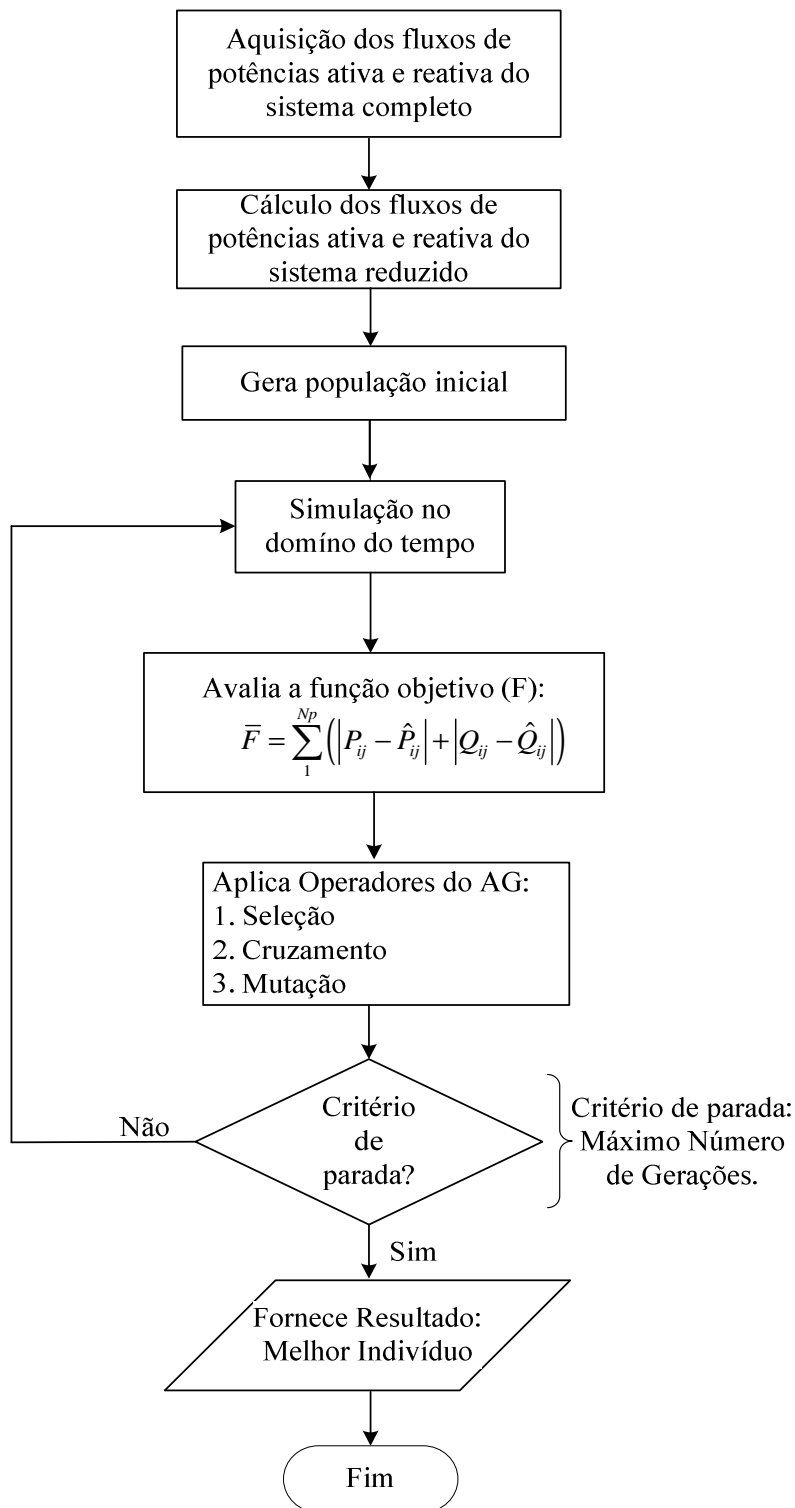


Figura 1 – Fluxograma da metodologia proposta

### 3.0 – TESTES E RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos testes relativos à metodologia para determinação dos equivalentes dinâmicos. Inicialmente, foram realizados testes para determinação dos equivalentes estáticos através do método de injeção de potência constante utilizando o ANAREDE. Em seguida, foram realizados testes para verificação da agregação dos geradores e determinação dos seus parâmetros equivalentes. Nos ajustes dos parâmetros da parte dinâmica do equivalente, foi utilizada a metodologia baseada em métodos evolutivos, utilizando algoritmos genéticos.

### 3.1 – SISTEMA PEQUENO PORTE

O sistema de pequeno porte considerado tem 11 barras, 4 geradores, 10 linhas e 4 transformadores, sendo o mesmo conhecido como duas áreas do IEEE [12]. A figura 2 ilustra o diagrama unifilar do sistema completo. Neste sistema, a área 1 foi delimitada, conforme o diagrama unifilar.

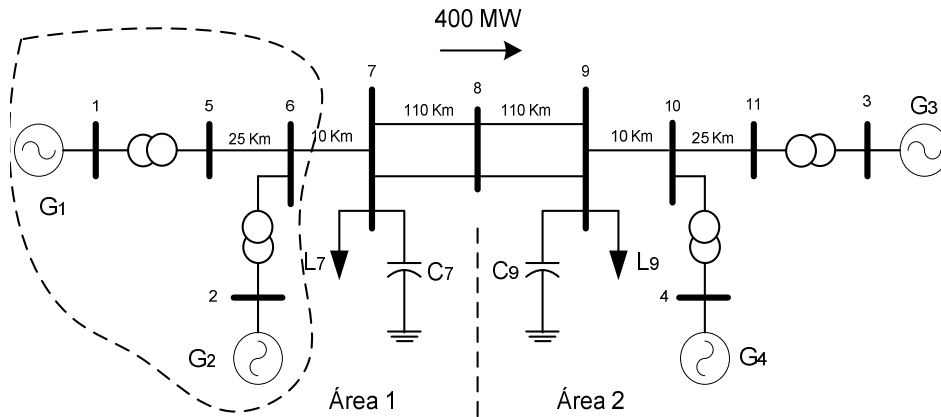


Figura 2 – Diagrama unifilar do sistema Duas Áreas completo.

A área delimitada foi reduzida à barra 7 através do método de injeção de potência constante sem comprometer os valores do fluxo de carga. Como os fluxos de potência fluem da área 1 para a área 2, foi conectado um gerador equivalente na barra 7. Esta barra foi modificada para modo PV, mantendo-se o valor da tensão e substituindo os valores das potências ativa e reativa da injeção de potência para o valor injetado pelo gerador equivalente. Na determinação do equivalente estático, foi mantida a carga na barra 7, como ilustra a figura 3.

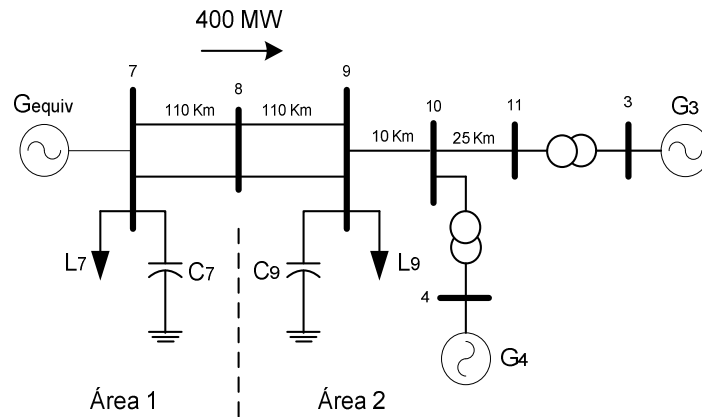


Figura 3 – Diagrama unifilar do sistema Duas Áreas equivalente.

Para estimar os parâmetros do gerador equivalente foi utilizado o modelo de gerador síncrono de pólos salientes ou modelo 4 do Arrillaga [13]. Os parâmetros foram determinados com base na metodologia apresentada na seção 2. Os dados obtidos encontram-se na tabela 1.

TABELA 1 – Parâmetros do gerador equivalente na barra 7 do sistema duas áreas

Ld	Lq	L'd	L''d	LI	T'd	T''d	T''q	Ra	H
211.7	211.7	34.21	18.27	11.62	5.188	0.037	0.025	0.222	7.913

Para estimar os parâmetros, através dos algoritmos genéticos, foi aplicado um curto-circuito de 100 ms na barra 8, para um tempo de 30s de simulação, obtendo-se os ângulos  $\delta_{4-3}$ , como ilustra a figura 4, para o sistema completo e para o sistema reduzido após aplicação da perturbação.

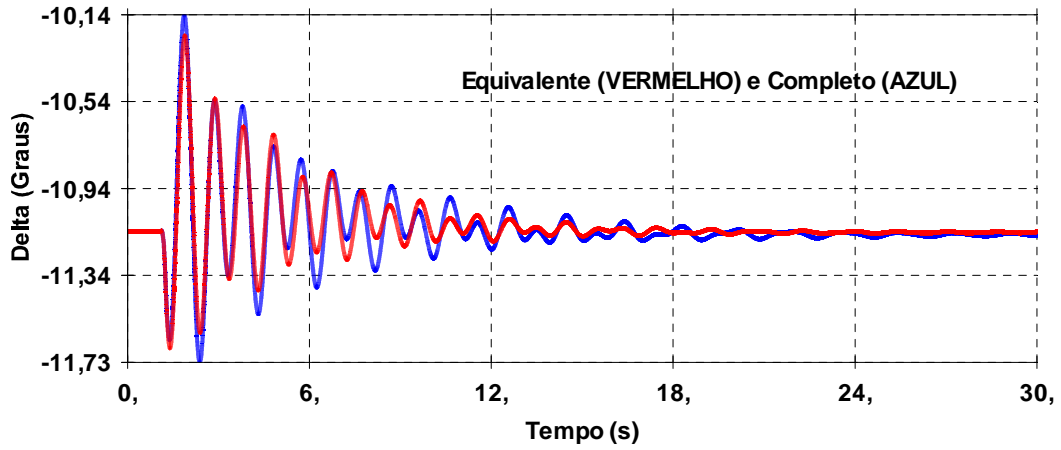


Figura 4 – Ângulo  $\delta_{4-3}$  do gerador 4 em relação ao gerador 3

As curvas  $\Delta P_{7-8}$ ,  $\Delta Q_{7-8}$  e  $\delta_{4-3}$  são exportadas para o MATLAB. Uma vez no MATLAB, estes dados são processados pelos algoritmos genéticos, que ajustam somente os parâmetros do gerador equivalente. Todos os valores pré-definidos do gerador são reajustados de acordo com a função objetivo definida nas equações 1, 2 e 3:

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta P_{7-8} - \hat{\Delta P}_{7-8} \right] \right\| \quad (1)$$

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta Q_{7-8} - \hat{\Delta Q}_{7-8} \right] \right\| \quad (2)$$

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta \delta_{4-3}(k) - \hat{\Delta \delta}_{4-3}(k) \right] \right\| \quad (3)$$

As restrições para o modelo devem atendidas, bem como seus requisitos em 4:

$$\begin{aligned} L_q &> L_d, L_q = L_d \\ L''_d &> L'_d, L''_d = L'_d \end{aligned} \quad (4)$$

Para validação da metodologia evolutiva, foi aplicado um curto-circuito de 150 ms na barra 8, para um tempo de 30s de simulação, obtendo-se, na figura 5, os ângulos  $\delta_{4-3}$  para o sistema completo e para o sistema reduzido após o transitório.

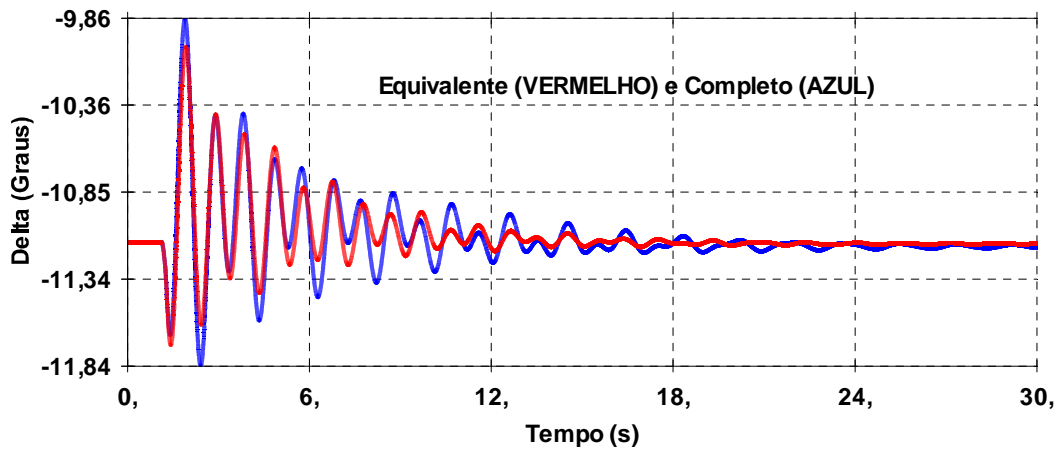


Figura 5 – Ângulo  $\delta_{4-3}$  do gerador 4 em relação ao gerador 3

Percebe-se nas figuras 4 e 5 que as curvas de oscilações do ângulo do gerador 4 relativo ao gerador 3 obtidas pela simulação com o equivalente dinâmico calculado pelo método proposto (em vermelho) são similares às obtidas com a simulação do sistema completo (em azul), para curto-circuitos de 100 ms e 150 ms, respectivamente. O equivalente dinâmico da barra 7, com os parâmetros determinados mostrados na tabela 7 e representado pela agregação dinâmica dos geradores das barras 1 e 2 da área 1, proporcionou o mesmo comportamento dinâmico do sistema original completo para diferentes tempos de curto-circuito, mantendo a coerência dos geradores.

### 3.2 – SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL COM AS INTERLIGAÇÕES TUCURUÍ-MACAPÁ-MANAUS

O sistema interligado nacional com as interligações Tucuruí-Manaus-Macapá passou a apresentar um total 4803 barras, 722 geradores, 6845 linhas e 2483 transformadores. Todas as informações estáticas e dinâmicas, para realização destes estudos, foram obtidas a partir da base de dados do ONS [14]. A figura 6 ilustra o mapa da configuração do SIN com as interligações.

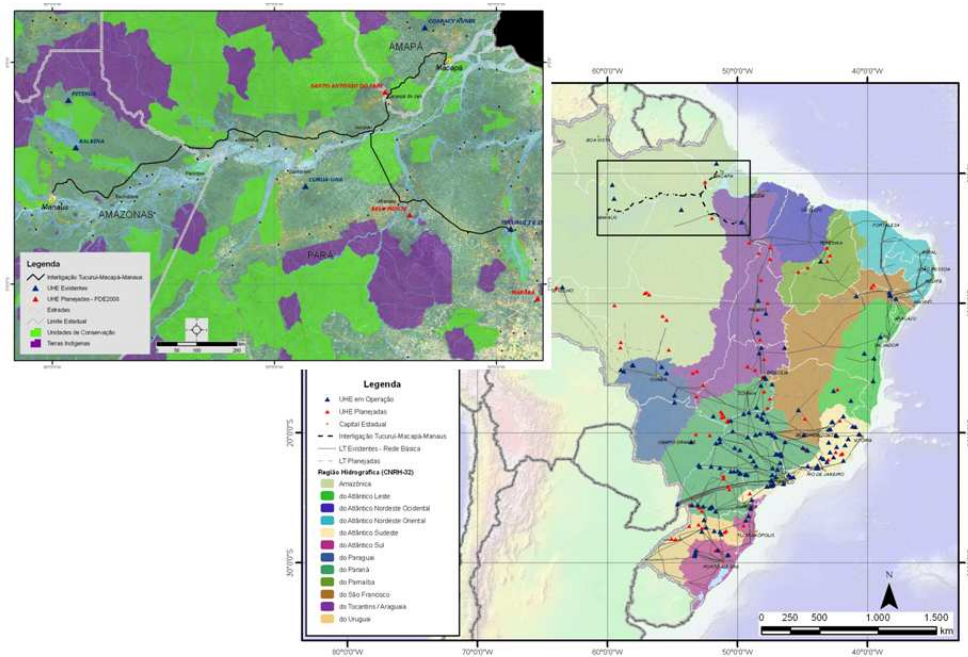


Figura 6 – Mapa do sistema interligado nacional com as interligações Tucuruí-Macapá-Manaus

Este sistema foi reduzido às barras 7200 de Miracema e 5525 de C. Neto, que passam a representar os trechos que interligam o subsistema norte do País, as regiões Sudeste/centro-oeste/Sul e Nordeste, respectivamente, a partir do método de injeção de potência constante, sem comprometer os valores do fluxo de carga do sistema completo. Como os fluxos de potência fluem em direção ao subsistema norte, foram conectados geradores equivalentes nas barras 7200 e 5525. Estas barras foram alteradas para modo de controle PV, mantendo-se os valores de tensão e substituindo os valores das potências ativa e reativa da injeção de potência para os valores injetados pelos geradores equivalentes.

Para a determinação dos parâmetros dos geradores equivalentes de Miracema e de C. Neto, adotou-se o modelo de gerador síncrono de pólos salientes, sendo estes estimados a partir da metodologia evolutiva. Os dados obtidos encontram-se na tabela 2 e tabela 3.

TABELA 2 – Parâmetros do gerador equivalente na barra 7200 de Miracema

Ld	Lq	L'd	L''d	Ll	T'd	T''d	T''q	Ra	H
162.7	116.9	37.03	23.61	12.97	3.761	0.029	0.038	0.221	16.72

TABELA 3 – Parâmetros do gerador equivalente na barra 5525 de C. Neto

Ld	Lq	L'd	L''d	Ll	T'd	T''d	T''q	Ra	H
226.7	177.9	27.26	19.72	15.33	7.750	0.029	0.042	0.469	9.302

Para os ajustes dos parâmetros, através dos algoritmos genéticos, foi aplicado um curto-circuito de 50 ms na barra 6430 de Tucuruí, com um tempo de 10s de simulação, obtendo-se, na figura 7, o ângulo  $\delta_{6420-6419}$  de Tucuruí para o sistema completo e para o sistema reduzido após aplicação da perturbação.

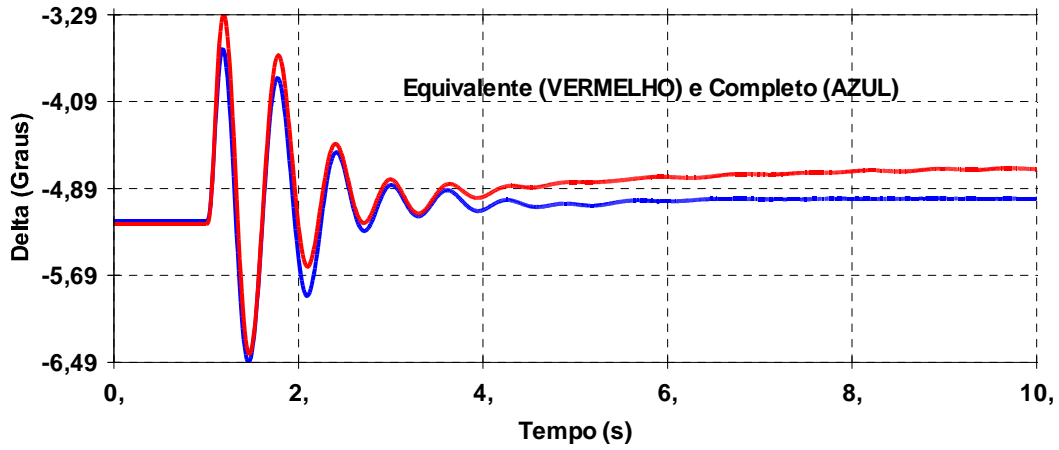


Figura 7 – Ângulo  $\delta_{6420-6419}$  de TUCURUI-6420 em relação a referência TUCURUI-6419

As curvas dos fluxos de potência ativa e reativa das linhas,  $L_{7200-7301}$  e  $L_{5525-5528}$ , são exportadas para o MATLAB. Uma vez no MATLAB, estes dados são processados pelos algoritmos genéticos, que ajustam somente os parâmetros dos geradores equivalentes. Todos os valores pré-definidos dos geradores são reajustados de acordo com a função objetivo definida a partir das equações 5, 6, 7 e 8:

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta P_{7200-7301} - \hat{\Delta P}_{7200-7301} \right] \right\| \quad (5)$$

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta Q_{7200-7301} - \hat{\Delta Q}_{7200-7301} \right] \right\| \quad (6)$$

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta P_{5525-5528} - \hat{\Delta P}_{5525-5528} \right] \right\| \quad (7)$$

$$\text{Min} \left\| \left[ \Delta Q_{5525-5528} - \hat{\Delta Q}_{5525-5528} \right] \right\| \quad (8)$$

Para validação da metodologia evolutiva, foi aplicado um curto-circuito de 100 ms na barra 6430, para um tempo de 10s de simulação, obtendo-se os seguintes resultados. Nas figuras 8, 9 e 10 os ângulos  $\delta_{6420-6419}$ ,  $\delta_{8595-6419}$ ,  $\delta_{8597-6419}$ , para o sistema completo e para o sistema reduzido após o transitório.

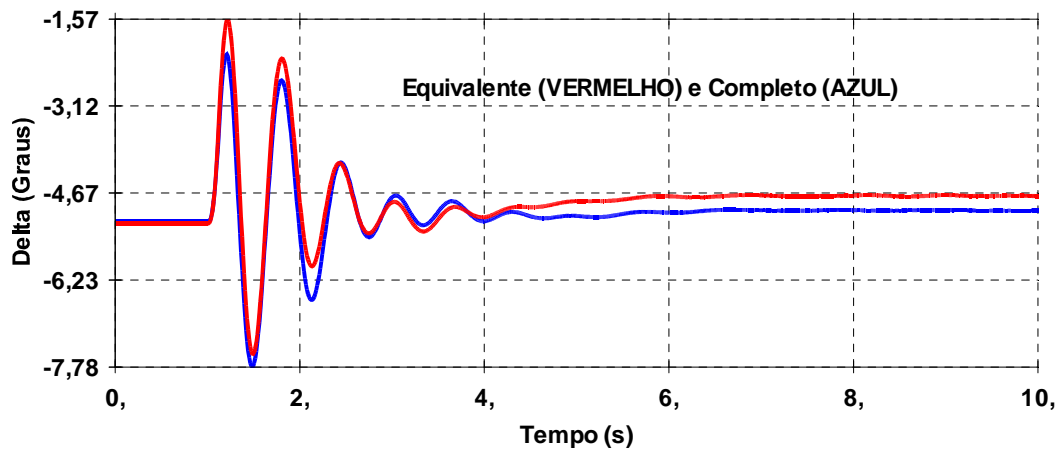


Figura 8 – Ângulo  $\delta_{6420-6419}$  TUCURUI-6420 em relação à referência TUCURUI-6419

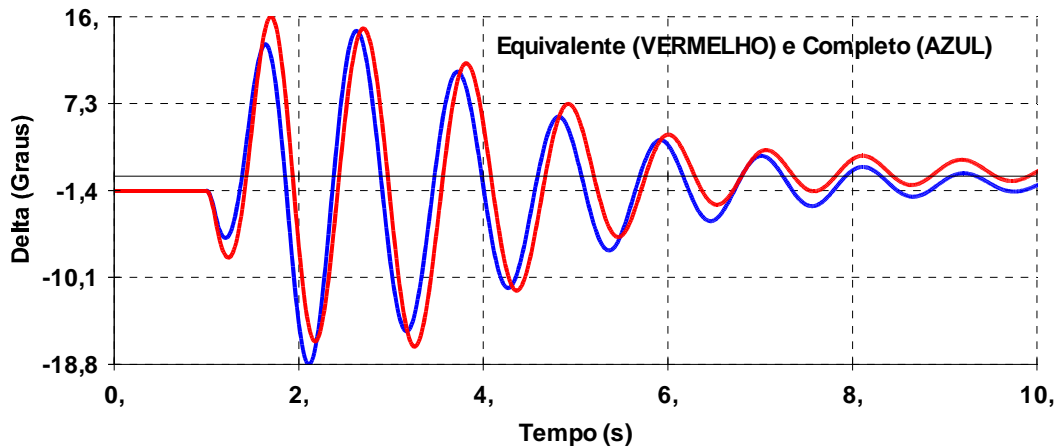


Figura 9 – Ângulo  $\delta_{8595-6419}$  de MAUA-8595 em relação à referência TUCURUI-6419

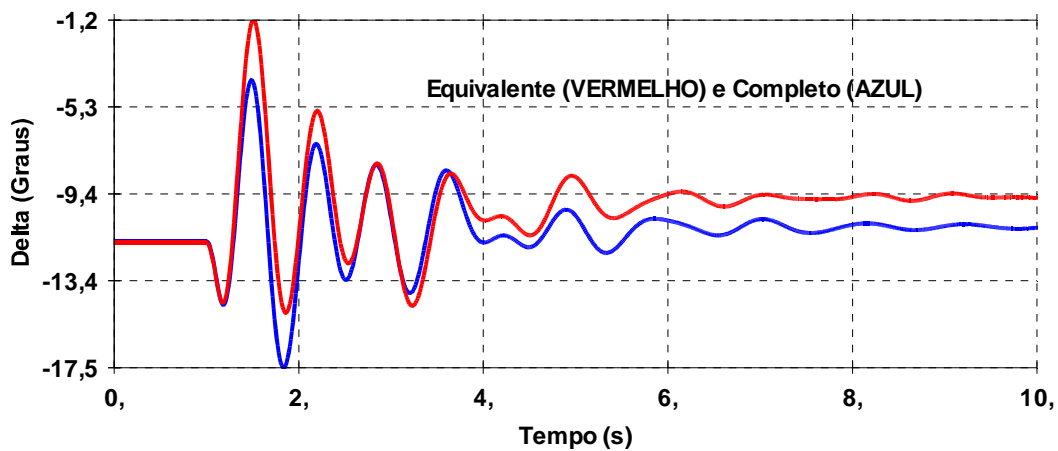


Figura 10 – Ângulo  $\delta_{8597-6419}$  de BALBINA-8597 em relação à referência TUCURUI-6419

Pelos resultados obtidos e mostrados nas figuras 6, 7, 8 e 9, verificou-se que os erros absolutos entre as potências ativa e reativa do gerador equivalente dinâmico e o sistema original completo são medidas adequadas para a identificação dos parâmetros de equivalentes dinâmicos. Os resultados mostraram que a metodologia de determinação dos parâmetros do equivalente dinâmico são promissoras e mostram a eficácia do método proposto para reproduzir a influência do sistema externo ao sistema interno para diferentes tempos de curto-circuito. A tabela 4 mostra a redução significativa do custo computacional a partir do uso do sistema equivalente em relação ao sistema completo.

TABELA 4 – Comparação dos Tempos de Simulação entre o Sistema Equivalente e o Completo

Sistema	Completo	Equivalente
Tempo de simulação	6 minutos	12 segundos

#### 4.0 – CONCLUSÃO

Para avaliar o comportamento dinâmico do subsistema norte do SIN considerando a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá, uma metodologia para determinação de parâmetros de equivalentes dinâmicos foi proposta usando algoritmos genéticos para minimizar os erros absolutos das potências ativa e reativa entre o modelo completo e o modelo reduzido. O modelo proposto foi testado no sistema de duas áreas e no SIN com a interligação Tucuruí-Manaus-Macapá. Os resultados mostraram que o método proposto é adequado para representar um sistema externo por equivalentes dinâmicos, apresentando similaridade com relação à coerência dos geradores, além de reduzir significativamente o tempo computacional de simulação no programa ANATEM.



## 5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S.C. Savulescu. Equivalents for security analysis of power systems. IEEE transactions on Power Apparatus and Systems, PAS-100(5):2672-2682, May 1981.
- [2] X. Lei, D. Povh, and O. Ruhle. Industrial approaches for dynamic equivalents of large power systems. Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. 2:1036 - 10042, 2002.
- [3] M. B. Duric, Z. M a, Radojevic, and E. D. Turkovic. A reduced order multimachine power system model suitable for small signal stability analysis. Electrical Power & Energy Systems, 20(5):369-374, 1998.
- [4] L.F.J. Fernandes. Identificação de sinais ruidosos em sistemas de potência e representações na forma de pólos e resíduos. Engenharia elétrica, Universidade de Brasília, Brasília - DF, Dezembro 2007. Tese de Doutorado.
- [5] J.E.O. Pessanha, O. R. Saavedra, J.C.R. Buzar, A.A. Paz, and C.P. Poma. Power system stability reinforcement based on network expansion: A practical case. Electrical power and energy systems, 29:208U216, 2007.
- [6] E. De Tuglie, S. M. Iannone, and F. Torelli. A coherency recognition based on structural decomposition procedure. IEEE Transaction on Power Systems, 23(2):555-563, Maio 2008.
- [7] M.A.El-Kady, B.A. Alaskar, A.M. Shaalan, and B.M. Al-shammri. Composite reliability and quality assessment and mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 26(1): 7-21, 2007.
- [8] A.F. Francis Snyder. Inter-area oscillation damping with power system stabilizers and synchronized phasor measurements. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Paris, France, February 1997.
- [9] L. Min and Abur. Rei-equivalent based decomposition method for multi-area ttc computation. Proceedings of IEEE 2005 Transmission and Distribution, pages 1-5, October 2005.
- [10] Brito, G.L.R. (2009). Equivalentes dinâmicos de sistemas de potência com estruturas de modelos de geradores e seus controladores. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD - 045/09, Departamento de Engenharia Elétrica, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 133p.
- [11] R. Gueddouche & M. Boudour. Nonlinear Estimation of external Power System Dynamic Equivalent Parameters. Global Journal Of Researches In Engineering Electrical And Electronics Engineering. Volume 12 Issue 7 Version 1.0 July 012.
- [12] P. Kundur. Power System Stability and Control. EPRI Power System Engineering Series. McGraw-Hill, 1994.
- [13] ARRILLAGA, J.; ARNOLD, C. P.; 1984. *Computer Modeling of Electrical Power Systems*. John Wiley & Sons Ltd., p.419.
- [14] Site do ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Link para acesso: [www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)