



**XXI SNPTTE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0  
23 a 26 de Outubro de 2011  
Florianópolis - SC

**GRUPO - GAT**

**GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIAS - GAT**

**SIMULAÇÃO PARALELA DE TRANSITÓRIOS ELETROMECÂNICOS EM SISTEMAS DE POTÊNCIA  
DE GRANDE PORTE ATRAVÉS DE EQUIVALENTES DE THÉVENIN MULTI-ÁREA**

**Marcelo A. Tomim(\*)**  
Universidade Federal de  
Juiz de Fora  
UFJF

**José R. Martí**  
University of British  
Columbia  
UBC

**Paulo A. N. Garcia**  
Universidade Federal de  
Juiz de Fora  
UFJF

**José L. R. Pereira**  
Universidade Federal de  
Juiz de Fora  
UFJF

**RESUMO**

Este artigo descreve uma nova plataforma para a simulação paralela de transitórios eletromecânicos. Esta plataforma é um produto da combinação do método alternado de solução dos sistemas algébrico-diferenciais associados ao problema de estabilidade angular e o método de solução paralela de redes elétricas através de equivalentes de Thévenin multi-área. Uma implementação desta plataforma é discutida, assim como resultados obtidos a partir de simulações de um equivalente do Sistema Interligado Nacional de 1916 barras. A partir dos resultados aqui apresentados, aliados a resultados publicados anteriormente, pode-se inferir que a paralelização da simulação de transitórios para sistemas de maior porte pode acelerar as simulações de forma marcante a um custo de implementação moderado.

**PALAVRAS-CHAVE**

Estabilidade, processamento paralelo, transitórios eletromecânicos, equivalentes de Thévenin multi-área.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Muitas abordagens já foram tratadas na literatura visando a paralelização de simulações destinadas a análise da estabilidade transitória de sistemas elétricos de potência [1,2]. Algumas destas metodologias, no entanto, tornaram-se viáveis, técnica e economicamente, apenas recentemente com a disseminação generalizada da tecnologia das arquiteturas paralelas de computação.

Avaliação dinâmica da segurança de sistemas de potência, também conhecida através do termo inglês *Dynamic Security Assessment*, por exemplo, requer a simulação e análise de inúmeras contingências para que uma região operativa segura possa ser encontrada. De forma a acelerar este processo, alguns programas industriais de estabilidade transitória oferecem a possibilidade de execução das simulações de contingências de forma paralela. No entanto, ambientes de computação paralela com centenas, ou até milhares, de unidades processadoras passam a ser subutilizados caso o número de contingências de interesse seja muito menor que o número de unidades processadoras. Nestes casos, apenas a paralelização de cada simulação pode melhorar ainda mais os tempos de execução de um ciclo de DSA.

Outra aplicação que já utiliza processamento paralelo é a simulação de redes elétricas em tempo real. Estes simuladores se baseiam na separação temporal proporcionada pelas linhas de transmissão modeladas com parâmetros distribuídos (modelo de Bergeron) [3]. Neste caso, subsistemas, separados temporalmente por linhas de transmissão, são resolvidos de forma independente. Por outro lado, o tamanho dos sistemas que podem ser efetivamente simulados em plataformas de tempo real é severamente limitado tanto pelo equipamento como os passos de integração (normalmente, entre 2 to 50 $\mu$ s) necessários. De forma a minimizar tais limitações, equivalentes dinâmicos são comumente utilizados em tais aplicações.

Por último, aparecem as simulações de transitórios eletromecânicos, fundamentais também para projeto, planejamento da expansão e operação de sistemas de potência, que são normalmente executadas off-line. Durante algumas fases de estudos específicos, tais como otimização de parâmetros de controladores ou cálculos de margens de estabilidade, dezenas a centenas de simulações, executadas sequencialmente, podem ser necessárias. Aproveitando-se, então, do fato de que a maioria dos computadores pessoais disponíveis no mercado são equipados com múltiplas unidades processadoras, acelerar as simulações de estabilidade transitória através de técnicas de paralelização pode aumentar significativamente a eficiência dos próprios engenheiros de sistemas.

Neste contexto, analisa-se uma implementação paralela da simulação de transitórios eletromecânicos baseada no método alternado, descrito em [4], para a solução das equações diferenciais associadas, dentro da estrutura da solução paralela de redes elétricas através do algoritmo MATE (do termo inglês Multi-Area Thévenin Equivalents) [5–8]. Esta implementação visa demonstrar que programas industriais de transitórios eletromecânicos apresentam grande potencial para serem paralelizados segundo os moldes discutidos neste artigo. Uma das principais vantagens deste método é a possibilidade de reaproveitamento de código extensivamente testado, minimizando, conseqüentemente, os custos e o tempo de programação.

Resultados de simulações apresentados neste artigo são validados contra os resultados obtidos através do programa de transitórios eletromecânicos desenvolvido pelo CEPEL, o ANATEM. Os sistemas adotados para os testes são todos baseados no Sistema Interligado Nacional, disponibilizado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS). Como parte das análises feitas, as paralelizações tanto do cálculo das equações diferenciais associadas ao problema de estabilidade eletromecânica, como da solução das redes são analisadas individualmente, de forma a evidenciar as vantagens e eficiência do método proposto.

## 2.0 - SOLUÇÃO DE REDES ELÉTRICAS ATRAVÉS DE EQUIVALENTES DE THÉVENIN MULTI-ÁREA

O algoritmo de solução de redes elétricas através de equivalentes de Thévenin multi-área (MATE) foi originalmente proposto por [5], que utilizou de um ponto de vista matricial para desenvolver o método. No entanto, uma descrição sucinta do método é apresentada na sequência, seguindo a perspectiva adotada em [8]. Esta reinterpretação do algoritmo MATE utiliza de relações entre barras de fronteira e elos de interligação entre subsistemas, as quais possibilitam a redução dos cálculos e comunicação entre processos, quando comparados com a formulação puramente matricial do método.

Em geral, o algoritmo MATE é aplicável a sistemas que possam ser divididos em subsistemas menores, que são conectados por um número limitado de elos (por exemplo, linhas de transmissão). Este método resolve os subsistemas menores independentemente e, subsequentemente, combina e modifica as soluções dos subsistemas de forma a gerar a solução do sistema original [5]. O algoritmo MATE tem como objetivo promover a solução paralela de sistemas do tipo apresentado em (1), onde  $\mathbf{Y}$  representa a matriz de admitância da rede em questão,  $\mathbf{v}$  são tensões nodais e  $\mathbf{i}$  suas respectivas injeções de corrente.

$$\mathbf{Y}\mathbf{v} = \mathbf{i} \quad (1)$$

Antes de prosseguir, algumas definições se tornam necessárias. Seja o sistema  $\mathcal{S}$ , ilustrado na FIGURA 1, subdividido em  $p = 3$  subsistemas,  $\mathcal{S}_1$ ,  $\mathcal{S}_2$  and  $\mathcal{S}_3$ , que permanecem conectados apenas pelo conjunto de elos globais  $\mathbb{L} = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l\}$ , com  $l = 4$  elementos. Os nós de fronteira são aqueles entre os subsistemas  $\mathcal{S}_k$ , com  $k = 1, \dots, p$ , e o sistema de elos de interconexão  $\mathbb{L}$  e formam o conjunto  $\mathbb{B}_k$  com  $b_k$  nós. Finalmente, os elos conectados ao dado subsistema  $\mathcal{S}_k$  são chamados de elos locais e formam o conjunto  $\mathbb{L}_k$  com  $l_k$  nós. Adicionalmente, o conjunto dos  $n_k$  nós no subsistema  $\mathcal{S}_k$  é definido como  $\mathbb{N}_k$ . De forma resumida, o método pode ser dividido em três passos distintos: cálculo dos equivalentes, cálculo de correntes nos elos e atualização dos subsistemas.

### 2.1 Cálculo dos Equivalentes dos Subsistemas

Dados o conjunto de subsistemas  $\mathcal{S}_k$  e os elos globais  $\mathbb{L}$ , os equivalentes de Thévenin podem ser calculados como mostrado em (2). Estes equivalentes são calculados com relação aos nós de fronteira  $\mathbb{B}_k$  e são compostos de uma matriz quadrada de impedâncias  $\mathbf{Z}_k^b$  e um vetor de tensões internas  $\mathbf{e}_k^b$ , cuja dimensão é  $b_k$ . Note que  $\mathbf{Z}_k^b$  depende puramente da natureza e topologia da rede modelada por  $\mathbf{Y}_k$ , enquanto que  $\mathbf{e}_k^b$  depende da rede e das injeções de corrente locais, dadas por  $\mathbf{i}_k$ .

$$\mathbf{Z}_k^b = \mathbf{Q}_k(\mathbf{Y}_k)^{-1}(\mathbf{Q}_k)^T \quad (2a)$$

$$\mathbf{e}_k^b = \mathbf{Q}_k(\mathbf{Y}_k)^{-1}\mathbf{i}_k \quad (2b)$$

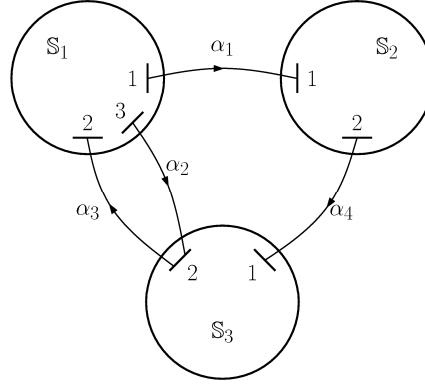


Figura 1 – Tempos de simulação e fatores de aceleração para o simulador paralelo de transitórios eletromecânicos

A matriz  $\mathbf{Q}_k$  refere-se ao mapeamento de variáveis do conjunto  $\mathbb{N}_k$  sobre  $\mathbb{B}_k$ , definido em (3). Desta forma,  $\mathbf{Q}_k$  é praticamente vazio, exceto por  $b_k$  1's, que indicam que o nó local  $j$  (relacionado às colunas de  $\mathbf{Q}_k$ ) corresponde ao nó de fronteira  $i$  (relacionado às linhas de  $\mathbf{Q}_k$ ).

$$\mathbf{Q}_k(i, j) = \begin{cases} 0, & \text{se } \mathbb{B}_k(i) \neq \mathbb{N}_k(j) \\ 1, & \text{se } \mathbb{B}_k(i) = \mathbb{N}_k(j) \end{cases} \quad (3)$$

## 2.2 Cálculo das Correntes no Elos

Depois de calculados todos os equivalentes associados aos subsistemas  $\mathbb{S}_k \in \mathbb{S}$ , estes devem ser interconectados adequadamente através do sistema de elos, de forma que as correntes dos elos possam ser obtidas. Este procedimento resulta em um equivalente do sistema original com relação aos elos globais, como mostrado em (4a) e (4b).

$$\mathbf{Z}^l = \mathbf{Z}_0^l + \sum_{\forall k} \mathbf{Z}_k^l \quad (4a)$$

$$\mathbf{e}^l = \sum_{\forall k} \mathbf{e}_k^l \quad (4b)$$

As matrizes  $\mathbf{Z}_k^l$  e  $\mathbf{e}_k^l$ , dadas em (5a) e (5b), descrevem como os equivalentes dos subsistemas,  $\mathbf{Z}_k^b$  and  $\mathbf{e}_k^b$ , com relação aos nós de fronteira  $\mathbb{B}_k$ , relacionam-se com os elos globais  $\mathbb{L}$ . Nestas relações, a matriz  $\mathbf{R}_k$  representa um outro mapeamento, só que agora do conjunto  $\mathbb{L}$  para os nós de fronteira  $\mathbb{B}_k$ , que relacionam correntes injetadas nos nós de fronteira  $\mathbb{B}_k$  as correntes fluindo pelos elos  $\mathbf{e}^l$ . De forma geral, o mapeamento  $\mathbf{R}_k$  é dado em (6).

$$\mathbf{Z}_k^l = (\mathbf{R}_k)^T \mathbf{Z}_k^b \mathbf{R}_k \quad (5a)$$

$$\mathbf{e}_k^l = (\mathbf{R}_k)^T \mathbf{e}_k^b \quad (5b)$$

$$\mathbf{R}_k(i, j) = \begin{cases} 1, & \mathbb{L}(j) \text{ injeta corrente em } \mathbb{B}_k(i) \\ -1, & \mathbb{L}(j) \text{ extrai corrente de } \mathbb{B}_k(i) \\ 0, & \mathbb{L}(j) \text{ não conectado a } \mathbb{B}_k(i) \end{cases} \quad (6)$$

Finalmente, resolvendo o sistema linear dado por (7a), as correntes nos elos  $\mathbf{i}^l$  são obtidas. Consequentemente, cada subsistema  $\mathbb{S}_k$  pode obter as correntes injetadas nos seus nós de fronteira  $\mathbf{i}_k^b$  a partir de  $\mathbf{i}^l$ , de acordo com (7b).

$$\mathbf{Z}^l \mathbf{i}^l = \mathbf{e}^l \quad (7a)$$

$$\mathbf{i}_k^b = \mathbf{R}_k \mathbf{i}^l \quad (7b)$$

## 2.2 Atualização dos Subsistemas

Após o cálculo das correntes fluindo pelos elos  $\mathbf{e}^l$ , as injeções de corrente  $\mathbf{i}_k^b$  feitas nos nós de fronteiras, junto com as injeções locais de corrente,  $\mathbf{i}_k$ , possibilitam a solução do sistemas linear (8) para as tensões  $\mathbf{v}_k$  de cada subsistema  $\mathbb{S}_k$ . Note que a matriz  $(\mathbf{Q}_k)^T$  refere-se ao mapeamento das correntes em  $\mathbb{B}_k$  para os nós locais  $\mathbb{N}_k$ . O conjunto de todas as tensões nodais de todos os subsistemas, ou seja,  $\mathbf{v} = \bigcup_{\forall k} \mathbf{v}_k$  resulta na solução final do sistema original.

$$\mathbf{Y}_k \mathbf{v}_k = \mathbf{i}_k + (\mathbf{Q}_k)^T \mathbf{i}_k^b \quad (8)$$

### 3.0 - SIMULAÇÃO PARALELA DE TRANSITÓRIOS SEGUNDO O MÉTODO ALTERNADO E EQUIVALENTES DE THÉVENIN MULTI-ÁREA

De acordo com a literatura especializada [4, 9, 10], o problema de estabilidade transitória ou angular pode ser descrito genericamente através do conjunto de equações algébrico-diferenciais não-lineares como dado em (9). Nesta representação  $\mathbf{x}$  representa o vetor com as variáveis dinâmicas ou de estado, cujas primeiras derivadas, dispostas no vetor  $\dot{\mathbf{x}}$ , relacionam-se a  $\mathbf{x}$  e as tensões nodais do sistema  $\mathbf{v}$  através de uma função vetorial  $\mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v})$ . A função vetorial  $\mathbf{i}$ , por sua vez, caracteriza as injeções de corrente ao sistema, as quais dependem de  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{v}$ . Finalmente,  $\mathbf{Y}$  representa a matriz de admitância nodal do sistema.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (9a)$$

$$\mathbf{Y}\mathbf{v} = \mathbf{i}(\mathbf{x}, \mathbf{v}) \quad (9b)$$

Uma técnica de solução do problema descrito em (9) utilizada por vários programas industriais de simulação de transientes eletromecânicos é o método alternado [4]. Neste método, as equações diferenciais (9a) são integradas com relação às variáveis de estado  $\mathbf{x}$ , separadamente das equações algébricas (9b), que, na sequência, são resolvidas para  $\mathbf{v}$ . Este processo alternado de solução de (9a) e (9b) se repete até que a convergência seja verificada.

Assumindo que o sistema em questão pode ser visualizado como um conjunto de subsistemas interconectados por intermédio de um conjunto de elos, como mostrado na FIGURA 1, as equações dinâmicas denotadas em (9a) podem ser separadas por subsistema e integradas independentemente. Esta separação e integração, via regra trapezoidal [4], resulta em (10).

$$\mathbf{x}_k^m = \frac{\Delta t}{2} \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k^m, \mathbf{v}_k^m) + \mathbf{x}_{hk} \quad (10a)$$

$$\mathbf{Y}\mathbf{v}^{m+1} = \mathbf{i}(\mathbf{x}_1^m, \mathbf{v}_1^m, \dots, \mathbf{x}_p^m, \mathbf{v}_p^m) \quad (10b)$$

$$\mathbf{x}_{hk}(t) = \mathbf{x}_k(t - \Delta t) + \frac{\Delta t}{2} \mathbf{f}_k(\mathbf{x}_k^m(t - \Delta t), \mathbf{v}_k^m(t - \Delta t)) \quad (10c)$$

Em (10),  $k$  representa o índice do subsistema,  $p$  o número de subsistemas no qual o sistema original é dividido,  $m$  o índice da iteração,  $\mathbf{x}_{hk}(t)$  o termo histórico das variáveis de estado. Tomando que as tensões nodais  $\mathbf{v}_k^m$  possam ser extrapoladas num primeiro instante, em todos os subsistemas, os vetores de variáveis de estado  $\mathbf{x}_k^m$ , associados a subsistemas distintos, podem ser calculados simultaneamente. Este aspecto sozinho representa um grande potencial para acelerar os cálculos das equações diferenciais utilizando-se arquiteturas de processamento paralelo, já que simuladores de transientes eletromecânicos profissionais gastam entre 60 a 80% do tempo de simulação integrando modelos dinâmicos [2].

Se por parte das equações diferenciais a paralelização é evidente, o mesmo não acontece com as equações algébricas do sistema, dadas matricialmente em (10b). Isto se deve ao fato das redes elétricas possuírem padrões de interconexão irregulares e dependentes do sistema em questão. Por isto, o algoritmo MATE, aqui abordado, é utilizado de forma a empregar as arquiteturas de processamento paralelo disponíveis até mesmo em computadores pessoais. Assim, o sistema (10b) que deve ser resolvido para as tensões nodais  $\mathbf{v}^{m+1}$  do sistema a cada iteração do método alternado de solução é solucionado nos moldes apresentados na Seção 2.

É importante observar que os cálculos necessários para a simulação paralela discutida acima já estão disponíveis nos simuladores de transientes eletromecânicos, com exceção do cálculo dos equivalentes. Estes equivalentes, no entanto, podem ser facilmente obtidos utilizando-se de rotinas de solução de sistemas lineares esparsos, já utilizados para o cálculo da rede em programas sequenciais. Assim, o desenvolvimento necessário se concentra na partição dos sistemas, sincronização das tarefas e comunicação entre processos.

### 4.0 - APLICAÇÃO

De forma a avaliar a eficiência da metodologia descrita para a simulação de transientes eletromecânicos em arquiteturas de processamento paralelo, foi desenvolvida uma plataforma computacional, em linguagem C/C++, que implementa o algoritmo proposto. Para este desenvolvimento foram utilizadas ferramentas de suporte, tais como solução de sistemas esparsos [11], para a solução dos subsistemas, e sistemas densos [12, 13], para a solução dos elos de interconexão, além de ferramentas de comunicação entre processos, definidas pelo padrão MPI (*Message Passing Interface*) [14, 15]. Maiores detalhes acerca da implementação e ferramentas utilizadas, vide [6–8].

Como sistema teste, uma versão reduzida do Sistema Interligado Nacional (SIN), composta pelas regiões Sul e Sudeste, foi utilizada. Este sistema é dotado de 1916 barras, 78 geradores e 2788 linhas de transmissão. Para os

Tabela 1 – Estatísticas de partição da rede via algoritmo de biseção multi-estágio.

$p$	$l$	$\mu(l_k)$	$\sigma(l_k)$	$\bar{l}_k$	$\underline{l}_k$	$\mu(n_k)$	$\sigma(n_k)$	$\mu(n_k)$	$\sigma(n_k)$	$\bar{g}_k$	$\underline{g}_k$
2	20	20.0	0.0	20	20	958.0	0.0	39.0	7.1	34	44
3	23	15.3	5.1	21	11	638.7	0.6	26.0	3.5	24	30
4	44	22.0	10.4	32	13	479.0	1.6	19.5	4.7	13	24
5	47	18.8	7.4	27	8	383.2	0.4	15.6	4.3	12	22
6	56	18.7	8.5	28	9	319.3	0.8	13.0	4.8	8	22
7	64	18.3	8.2	29	8	273.7	1.0	11.1	6.1	5	19

$\mu(x_k)$  = média de  $x_k$ ;  $\sigma(x_k)$  = desvio padrão de  $x_k$ ;  $\underline{x}_k$  = mínimo de  $x_k$ ;  $\bar{x}_k$  = máximo de  $x_k$ ;  $p = n^\circ$  de subsistemas;  $l$  = número de elos;  $n_k$ ,  $\bar{l}_k$ ,  $\underline{g}_k$  = número de barras, elos locais e geradores, respectivamente, do subsistema  $k$ .

controladores de tensão foi adotado o modelo IEEE DC1A [16], que inclui a excitatriz rotativa para ajuste da tensão campo dos geradores. Estabilizadores de tensão e reguladores de velocidade não foram modelados.

Preliminarmente à simulação do sistema teste dentro do contexto de simulação exposto nas seções anteriores, a rede deve ser particionada de forma que os grupos de geradores, barras e linhas de transmissão associados a cada subsistema sejam definidos, assim como o sistema de elos de interligação. Este procedimento é descrito na próxima seção, seguida da análise de desempenho do simulador paralelo em relação ao seu análogo sequencial e, finalmente, da comparação dos resultados com os de um simulador de nível industrial.

#### 4.1 Partição da Rede

Como já exposto, o desempenho do algoritmo MATE depende fortemente da qualidade do particionamento das redes. O subsistemas devem ser computacionalmente balanceados, ou seja, devem requerer esforços computacionais similares. Adicionalmente, os subsistemas devem ser escolhidos de forma a serem superiores aos sistemas de elos no tocante ao esforço computacional. Caso contrário, a solução do sistema de elos, dado em (7), torna-se tão dispendiosa quanto à solução dos sistemas esparsos associados aos subsistemas, dados em (2) e (8).

Nesta situação, todo ganho computacional obtido pela partição do sistema seria perdido na solução dos elos de interconexão.

Desta forma, utilizou-se do método da biseção multi-estágio de partição de grafos, descrita em [17], para a obtenção dos subsistemas assim como o sistema de elos de interconexão. Uma implementação deste método é disponibilizada como parte da biblioteca de código aberto METIS [18]. Em linhas gerais, esta ferramenta divide o grafo associado à rede sob estudo recursivamente, objetivando sempre minimizar o número de interconexões entre os subgrafos resultantes.

A TABELA 1 resume algumas estatísticas referentes aos subsistemas obtidos através do método da biseção multiestágio para diversos número de subsistemas  $p$ . Por exemplo, quando o sistema teste de 1916 barras foi dividido em 4 subsistemas, a média de barras nos subsistemas é 479 com um desvio padrão de 1,6. O número de elos globais de interconexão foi 44, enquanto que o subsistema com maior número de interconexões apresentou 32 elos locais, ao passo que o sistema menos interconectado, apresentou 13 elos locais. Esta partições foram utilizadas para a análise de desempenho, apresentada na Seção 4.2.

#### 4.2 Análise de Desempenho

A análise de desempenho do simulador paralelo de transitório eletromecânicos, baseado na metodologia descrita nas seções anteriores, foi avaliada num servidor com 16 GB de memória RAM e 8 núcleos de processamento disponibilizados pelos dois processadores Intel Xeon® E5540 (2,53 GHz, 8 MB de memória cache). O sistema operacional do servidor é o Ubuntu 9.10 com núcleo Linux 2.6.31-22-generic. Como a linguagem de programação escolhida para o desenvolvimento foi a C/C++, o compilador GCC 4.4.1 foi utilizado para a geração dos executáveis.

A medida de desempenho utilizada foi o fator de aceleração  $S_p$  definido em (11), onde  $T_s$  representa o tempo gasto pelo programa sequencial, executado por um único processador, e  $T_p$  o tempo gasto pelo programa paralelo [19].

$$S_p = \frac{T_p}{T_s} \quad (11)$$

Numa situação ideal de paralelização, a divisão de trabalho entre  $p$  processadores é perfeita, ou seja,  $T_s/p$ . Portanto, em condições ideais o fator de aceleração se iguala a  $p$ , ou seja, cresce linearmente com o número de processadores.

Para a avaliação do desempenho, os tempos de computação foram divididos em três tarefas básicas: solução dos modelos dinâmicos (DYN), solução da rede elétrica (NET) e verificação de aplicação de contingência e

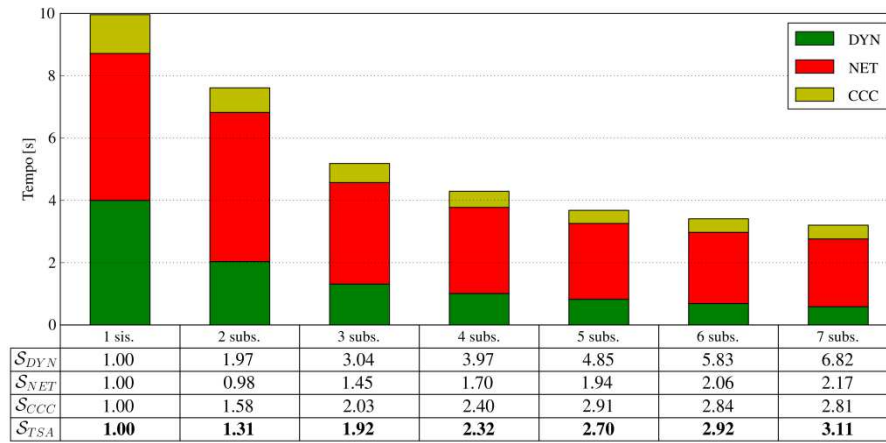


Figura 2 – Tempos de simulação e fatores de aceleração para o simulador paralelo de transientes eletromecânicos

convergência (CCC). Os tempos requeridos para a verificação de contingência e convergência são explicitados por estarem associados a tarefas que exigem a comunicação entre todos os processos participando das computações.

Os tempos observados para as simulações, assim como os fatores de aceleração por tarefa, são dados na FIGURA 2. Na medida em que o número de subsistemas, no qual o sistema original é dividido, aumenta, há um decréscimo no tempo de simulação total. A taxa de decréscimo, no entanto, diminui na medida em que o número de subsistemas aumenta. Este comportamento caracteriza a saturação da paralelização da simulação em questão. Através dos fatores de aceleração individuais, pode-se analisar o nível de escalonamento de cada tarefa. A paralelização da solução dos modelos dinâmicos é de longe a mais eficiente, como diversos outros autores já confirmaram [1], tendo em vista que  $S_{DYN}$  cresce praticamente de forma linear com o número de subsistemas  $p$ .

Com relação à solução da rede, observa-se que  $S_{NET}$  aproxima-se de  $p/2$  até 3 subsistemas. Este fator de aceleração representa o limite teórico para o algoritmo MATE modelado nos moldes aqui apresentados [6, 7]. A partir de 4 subsistemas, no entanto, saturação é observada devido ao aumento em demasia do sistema de elos em comparação com os subsistemas. Como a computação dos subsistemas é dominada pela solução triangular de sistemas esparsos, a ordem das computações segue a ordem de complexidade  $\mathcal{O}(n^{1+\alpha})$ , onde  $0 < \alpha < 1$  e  $n$  a ordem do sistema [20]. Por outro lado, para os elos de interconexão, a solução de sistemas triangulares densos dominam as computações que são de ordem  $\mathcal{O}(l^2)$ . Observa-se a partir da TABELA 1 que o número de elos aumenta ao passo que tamanho dos subsistemas diminui. E como a taxa de crescimento das computações dos elos cresce quadraticamente, enquanto a dos subsistemas reduz quase que linearmente, a saturação devido à computação dos elos é observada.

O resultados discutidos acima mostram claramente que a solução da rede elétrica, mesmo que paralela, ainda se caracterizou como o fator limitante da aceleração da simulação. No entanto, para sistemas maiores, como o de aproximadamente 15.000 barras apresentado em [7], esta saturação é observada para um número de subsistemas próximo a 15, ou seja, muito superior a 4, observado para o presente sistema exemplo. Portanto, é de se esperar, que para sistemas maiores, a solução paralela das redes elétricas através do algoritmo MATE contribua com fatores de aceleração próximos ao limite teórico  $p/2$ , melhorando consideravelmente a eficiência desta plataforma de simulação como um todo.

#### 4.3 Comparação de Resultados

Antes de analisar o desempenho da simulação paralela de transientes eletromecânicos, faz-se necessário verificar a veracidade dos resultados da simulações realizadas. Para tal, os resultados foram comparados com os obtidos através da ferramenta de simulação de transientes padrão do Sistema Elétrico Brasileiro: o ANATEM, desenvolvido pelo Centro de Pesquisas Elétricas (CEPEL).

Para as comparações, foi considerada a simulação de uma falta trifásica franca na barra de 765 kV próxima a Itaipu Binacional, com duração de 80 ms, seguida de abertura de uma de suas linhas adjacentes. O tempo de simulação foi de 20 s e passo de integração 4 ms. Adicionalmente, foram consideradas cargas de potência e impedância constantes distribuídas pelo sistema. Algumas curvas de tensão e ângulo selecionadas são apresentadas na FIGURA 3. Verifica-se pelas figuras que as discrepâncias entre os resultados obtidos pelo ANATEM e a metodologia proposta (referenciado como TSA-MATE nas figuras) são mínimas. Esta característica serve para validar os resultados obtidos.

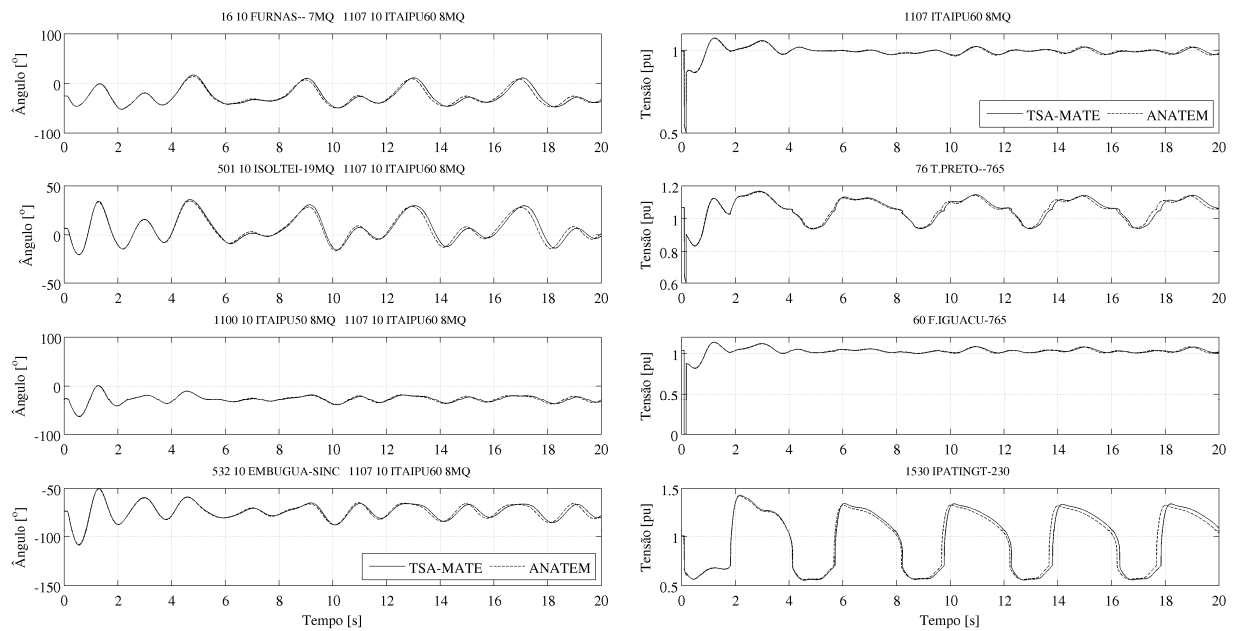


Figura 3 – Tempos de simulação e fatores de aceleração para o simulador paralelo de transitórios eletromecânicos

## 5.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo, descreve-se uma plataforma de simulação paralela de transitórios eletromecânicos baseada no método alternado para a solução das equações algébrico-diferenciais associadas ao problema de estabilidade angular dos sistemas elétricos de potência, aliado à solução paralela de redes elétricas através do algoritmo de equivalentes de Thévenin multi-área (MATE). Nesta plataforma de simulação, a paralelização das soluções ocorre devido à subdivisão topológica de um dado sistema em vários subsistemas menores. Assim, as equações associadas aos elementos dinâmicos de cada subsistema são integradas independentemente, ao passo que as equações algébricas de rede são solucionadas, de forma paralela, através no algoritmo MATE.

Foi mostrado através de uma aplicação numérica que esta plataforma de solução atingiu um fator de aceleração de 3,11 quando um sistema de 1916 barras e 78 geradores foi particionado em 7 subsistemas e simulado num servidor com 8 núcleos computacionais. Observou-se também que o fator limitante na aceleração das computações ainda foi a solução das redes elétricas, mesmo que executada de forma paralela. No entanto, resultados prévios associados a solução paralela de um sistema de aproximadamente 15.000 barras, mostram a capacidade do algoritmo MATE operar com fatores de aceleração próximos ao seu limite teórico de  $p/2$ , onde  $p$  representa o número de divisões aplicadas ao sistema em questão. Nestas situações, pode-se esperar eficiências ainda maiores para a plataforma de simulação proposta.

Em desenvolvimentos futuros, espera-se testar a plataforma de simulação de transitórios eletromecânicos para o Sistema Interconectado Nacional, cujas dimensões são aproximadamente 4600 barras, 6600 ramos, entre linhas de transmissão e transformadores, além das mais de 700 barras geradoras com seus respectivos controladores, elos de corrente contínua e cargas dinâmicas.

## 6.0 - AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Juiz de Fora e à Fundação de Coordenação e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) do Ministério da Educação por possibilitarem a continuação do presente desenvolvimento no âmbito do Programa Nacional de Pós-Doutoramento (PNPD). Adicionalmente, os autores agradecem ao Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), pelo uso do ANATEM em parcela das simulações.

## 7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CHAI, J.; BOSE, A. Bottlenecks in parallel algorithms for power system stability analysis. *IEEE Trans. Power Syst.*, v. 8, n. 1, p. 9–15, Feb. 1993.

- [2] WU, J. Q. et al. Parallel implementation of power system transient stability analysis. *IEEE Trans. Power Syst.*, v. 10, n. 3, p. 1226–1233, 1995. ISSN 0885-8950.
- [3] HOLLMAN, J.; MARTÍ, J. Real time network simulation with pc-cluster. *IEEE Trans. Power Syst.*, v. 18, n. 2, p.563–569, 2003. ISSN 0885-8950.
- [4] DOMMEL, H.; SATO, N. Fast transient stability solutions. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-91, p. 1643–1650, 1972. ISSN 0018-9510.
- [5] MARTÍ, J. R. et al. OVNI: Integrated software/hardware solution for real-time simulation of large power systems. In: *Conference Proceedings of the 14th Power Systems Computation Conference, PSCC02, Sevilla, Spain*. [S.l.: s.n.], 2002.
- [6] TOMIM, M. A.; MARTÍ, J. R.; WANG, L. Parallel computation of large power system network solutions using the Multi-Area Thévenin Equivalents (MATE) algorithm. In: *16th Power Systems Computation Conference, PSCC2008*. Glasgow, Scotland: [s.n.], 2008.
- [7] TOMIM, M. A.; MARTÍ, J. R.; WANG, L. Parallel solution of large power system networks using the Multi-Area Thévenin Equivalents (MATE) algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 31, n. 9, p. 497–503, 2009. ISSN 0142-0615.
- [8] TOMIM, M. A. *Parallel Computation of Large Power System Networks Using the Multi-Area Thévenin Equivalents*. Tese (Doutorado) — The University of British Columbia, Canada, August 2009.
- [9] STOTT, B. Power system dynamic response calculations. *Proc. IEEE*, v. 67, n. 2, p. 219–241, 1979. ISSN 0018-9219.
- [10] KUNDUR, P. *Power System Stability and Control*. New York: McGraw-Hill, 1994. 1176 p. ISBN 007035958X (hbk.).
- [11] LI, X. S.; DEMMEL, J. W.; GILBERT, J. R. *SuperLU Users' Guide*. [S.l.], October 2003. Retrieved in October, 2006. Disponível em: <<http://crd.lbl.gov/xiaoye/SuperLU>>.
- [12] ANDERSON, E. et al. *LAPACK Users' Guide*. Third. Philadelphia, PA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999. ISBN 0-89871-447-8 (paperback).
- [13] GOTO, K. Optimized GotoBLAS Libraries. April 2006. Disponível em: <<http://www.tacc.utexas.edu/resources/software/software.php>>.
- [14] MPI Standard. *A Message-Passing Interface Standard*. June 2008. Disponível em: <<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/>>.
- [15] MPICH2, an implementation of the Message-Passing Interface (MPI). 2007. Disponível em: <<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich2/>>.
- [16] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5-1992*, p. 57, 1992.
- [17] KARYPIS, G.; KUMAR, V. A fast and high quality multilevel scheme for partitioning irregular graphs. *SIAM J. Sci. Comput.*, v. 20, p. 359–392, 1998. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=305248>>.
- [18] KARYPIS, G.; KUMAR, V. *METIS: A Software Package for Partitioning Unstructured Graphs, Partitioning Meshes, and Computing Fill-Reducing Orderings of Sparse Matrices Version 4.0*. [S.l.], September 1998. Disponível em: <<http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/metis/download>>.
- [19] GRAMA, A. et al. *Introduction to Parallel Computing*. [S.l.: s.n.], 2003. 636 p. ISBN 0201648652, 9780201648652.
- [20] ALVARADO, F. Parallel solution of transient problems by trapezoidal integration. *IEEE Trans. Power App. Syst.*, PAS-98, n. 3, p. 1080–1090, 1979. ISSN 0018-9510.

## 8.0 - BIOGRAFIAS

**Marcelo A. Tomim:** Nascido em São Paulo, SP, em 3 de Outubro de 1978, graduou-se em 2001 na Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI) no curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência. Em 2004, obteve o mestrado pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Em 2009, obteve o título de doutor pela Universidade de British Columbia (UBC), Vancouver, Canada. Em 2010, ingressou na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Minas Gerais, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como pós-doutor, onde assumiu o cargo de professor adjunto, junto ao Departamento de Energia Elétrica. Seus principais interesses são modelamento e dinâmica de sistemas elétricos de potência, simulações de fenômenos eletromagnéticos e eletromecânicos e computação paralela de alto desempenho aplicada a sistemas de potência.

**José R. Martí:** Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Central da Venezuela em 1971, mestrado em Engenharia com ênfase em Sistemas de Potência pelo Instituto Politécnico Rensselaer, Troy, NY, em 1974 e



doutorado pela Universidade de British Columbia (UBC) em 1981. Atualmente, ele é professor de engenharia elétrica e computação na UBC, Fellow do Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), e Engenheiro registrado na província de British Columbia, Canadá. Suas área de interess incluem modelagem e solução de transitórios eletromagnéticos e simulação em tempo real de sistemas elétricos de potência.

**Paulo A. N. Garcia:** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1994), mestrado (1998) e doutorado (2001) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Em 2008 foi professor visitante no Departamento de Engenharia Elétrica e Computação da Universidade de British Columbia, Canadá. Atualmente é professor adjunto no Departamento de Circuitos Elétricos da Universidade Federal de Juiz de Fora . Seus projetos de P,D&I são na área de Análise e Otimização de Sistemas de Elétricos de Potência.

**José L. R. Pereira:** Possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (1975), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1978) e Ph.D. em Engenharia Elétrica, University of Manchester (1988). Atualmente é pesquisador 1B do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e professor titular da Universidade Federal de Juiz de Fora. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de energia Elétrica, atuando em desenvolvimento de métodos numéricos aplicados à análise de sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica.