

Simulação Dinâmica Combinada com Transição Automática via Produtos Escalares

Renan P. Fernandes Tatiana M. L. Assis Glauco N. Taranto Djalma M. Falcão
Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE
21941-972 – Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Resumo—A análise dinâmica de sistemas de energia elétrica envolve os vários aspectos da estabilidade associados aos diversos horizontes de estudo. Nas avaliações de curto-prazo, o foco está na estabilidade transitória, enquanto que nos estudos de médio e longo prazos, o interesse está na estabilidade de tensão e de frequência. Vários métodos já foram propostos para estudar o desempenho dinâmico dos sistemas de potência, destacando-se a simulação completa no domínio do tempo para estudos de estabilidade transitória e a simulação rápida (quase estática), para a análise da estabilidade de tensão de médio e longo prazo. Este artigo propõe o uso combinado da simulação completa e da simulação rápida visando uma análise integrada do comportamento dinâmico do sistema. A transição da simulação completa para a simulação rápida é realizada com o auxílio de produtos escalares que têm como objetivo avaliar a estabilidade eletromecânica do sistema, promovendo o chaveamento automático do método de simulação. O trabalho mostra os resultados preliminares alcançados com o método proposto, implementado em um simulador desenvolvido em C++.

Palavras-Chave: Estabilidade de Sistemas de Potência, Simulação Combinada, Produtos Escalares.

I. INTRODUÇÃO

A demanda de energia elétrica cresce rapidamente, acompanhando o desenvolvimento industrial e tecnológico das cidades. Com esse aumento, cresce também a necessidade de transmitir energia elétrica de um ponto a outro de um Sistema de Energia Elétrica (SEE). Os componentes dos atuais SEE tendem a operar cada vez mais próximos de seus limites, exigindo uma análise mais detalhada por parte dos operadores do sistema, além da necessidade de planejamento da expansão da rede elétrica. Em ambas as etapas, devem ser realizadas uma série de estudos sobre o sistema a ser implantado, expandido ou operado, desde análises estáticas até análises dinâmicas.

A análise dinâmica dos SEE não é uma tarefa simples, uma vez que com o aumento do número de componentes do sistema, crescem também a quantidade de equações a serem solucionadas. Tradicionalmente, a avaliação do comportamento dinâmico dos SEE é realizada através da solução passo a passo no domínio do tempo. Entretanto, com o objetivo de reduzir o esforço computacional, métodos diretos e métodos híbridos foram propostos [1]. Alguns desses métodos possuem mecanismos para acelerar a solução do

sistema, permitindo uma análise mais rápida e simplificada do problema.

Com o aumento no interesse em estudos de médio e longo prazo para avaliar problemas de estabilidade de tensão, foi desenvolvida a técnica de simulação rápida (quase estática), na qual as dinâmicas de curto prazo são consideradas estáveis e instantâneas [2].

A combinação das técnicas de simulação completa e simulação rápida foi proposta em [3], considerando o chaveamento dos métodos de simulação. Neste trabalho é proposta a realização da simulação combinada, considerando a transição automática entre os métodos com base em produtos escalares [4], que utilizam conceitos de funções de energia para avaliar a estabilidade eletromecânica.

O artigo está dividido da seguinte forma: na Seção II é apresentada uma breve revisão dos métodos de avaliação do comportamento dinâmico de SEE, apresentando o equacionamento básico utilizado. Na Seção III, o método dos produtos escalares é descrito e sua aplicação na simulação combinada é proposta na Seção IV. Os resultados obtidos são descritos na Seção V.

II. AVALIAÇÃO DINÂMICA DE SEE

Os SEE são compostos por uma variedade de equipamentos, tais como geradores, transformadores (incluindo OLTCs – *On Load Tap Changers*), reatores, linhas de transmissão e outros. Para uma correta avaliação do desempenho do sistema elétrico, todos esses equipamentos precisam ser modelados matematicamente.

Dessa forma, é comum representar os sistemas elétricos por um conjunto de equações algébrico-diferencial não linear, como apresentado em (1) [5-6].

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, z_{(k)}) \\ 0 = g(x, y, z_{(k)}) \\ z_{(k+1)} = h(x, y, z_{(k)}) \end{cases} \quad (1)$$

Sendo:

x – Vetor de variáveis de estado;

y – Vetor das tensões complexas nodais;

z – Vetor das variáveis de ação discreta;

f – Equações diferenciais do sistema;

g – Equações algébricas do sistema;

h – Funções de controles discretos.

As equações diferenciais incluem os modelos matemáticos dos geradores e seus controles, as equações algébricas são compostas pelas equações do fluxo de potência, e as equações de controles discretos regem o comportamento de equipamentos como os OLTCs. A solução desse conjunto de equações será abordada na próxima seção.

A. Simulação Completa e Simulação Rápida

O sistema de equações (1) pode ser resolvido através de Métodos de Solução no Domínio do Tempo, Métodos Diretos ou Métodos Híbridos.

Os Métodos de Solução no Domínio do Tempo consistem na solução passo a passo, possuindo algum tipo de discretização das equações diferenciais do sistema, a partir de métodos de integração, sendo o mais usado deles o Trapezoidal. Após essa discretização, o sistema é resolvido numericamente [3,5].

Na Simulação Completa, as dinâmicas de curto, médio e longo prazo do sistema são mantidas e todas as equações discretizadas são solucionadas, de modo Alternado ou Simultâneo à solução das equações algébricas [3]. Esse método é o que apresenta a solução mais completa, sendo geralmente usado como referência para comparações com outros métodos. A Simulação Completa tem como inconveniente o esforço computacional exigido, especialmente em sistemas de grande porte.

Nos casos em que o foco não está no curto prazo, pode-se fazer uso da Simulação Rápida, ou Quase-Estática [2], onde as dinâmicas transitórias são consideradas estáveis e instantâneas, de modo que o sistema de equações (1) assume a nova forma apresentada em (2):

$$\begin{cases} 0 = f(x, y, z_{(k)}) \\ 0 = g(x, y, z_{(k)}) \\ z_{(k+1)} = h(x, y, z_{(k)}) \end{cases} \quad (2)$$

Nesse método, a solução é calculada através de uma sucessão de pontos de equilíbrio, calculados usando o método de Newton a partir da simplificação da modelagem. A Simulação Rápida apresenta uma eficiência computacional elevada, permitindo soluções mais rápidas que a Simulação Completa. Isso é conseguido com o uso de passos de simulação da ordem de segundos ou até minutos.

A Simulação Rápida Modificada (SRM), proposta por Manzoni et al. [7], é uma evolução da Simulação Rápida, onde, além de se considerar as dinâmicas de curto prazo estáveis e instantâneas, usa-se um equacionamento derivado do modelo original, preservando informações importantes da trajetória do sistema ao longo do tempo.

B. Métodos Diretos

Os Métodos Diretos são usados como alternativa à Simulação Completa e consistem na aplicação dos conceitos dos Teoremas de Lyapunov [8], de modo que seja possível

caracterizar o sistema sem a necessidade de resolver o sistema (1). Dentre esses métodos, podem-se citar aqueles baseados no Critério das Áreas Iguais ou nas Funções de Energia [1,8-9]. Os Métodos Diretos apresentam um ganho de tempo e simplicidade de implementação elevados, porém limitações na modelagem do sistema são requeridas. Atualmente existem Métodos Diretos que permitem uma modelagem mais detalhada, onde são usados os conceitos de função de energia numérica, conforme apresentado em [10].

III. MÉTODO DOS PRODUTOS ESCALARES

Existe ainda os chamados Métodos Híbridos, em que usam-se ao mesmo tempo conceitos dos Métodos Diretos, como funções de energia, e solução no tempo de (1).

O Método dos Produtos Escalares (MPE) é um exemplo de método Híbrido que utiliza conceitos de funções de energia associados à solução do domínio do tempo [4,11].

O MPE utiliza os produtos (3,4), onde o sobrescrito “ cl ” define o instante de eliminação da falta (*clearing*, em inglês) e o parâmetro $Nger$ representa o total de geradores do sistema. Ht representa a inércia total do sistema, enquanto o termo H_i é a constante de inércia da i -ésima máquina. O subscrito COI indica o Centro de Inércia do sistema (*Center of Inertia*, em inglês) [4,11].

$$dot2 = \sum_{i=1}^{Nger} Pace_i \cdot (\theta_i - \theta_{COI}) \quad (3)$$

$$dot3 = \sum_{i=1}^{Nger} (\omega_i - \omega_{COI}) \cdot (\theta_i - \theta_{COI} - \theta_i^{cl}) \quad (4)$$

Sendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} Pace_i = Pm_i - Pe_i - \frac{H_i}{Ht} P_{COI} \\ \theta_{COI} = \left(\sum_i^{Nger} H_i \theta_i \right) / Ht \\ \omega_{COI} = \left(\sum_i^{Nger} H_i \omega_i \right) / Ht \\ P_{COI} = \sum_i^{Nger} Pm_i - Pe_i \\ Ht = \sum_i^{Nger} H_i \end{array} \right. \quad (5)$$

A função $Pace$ representa a potência acelerante de cada máquina com relação ao centro de massa do sistema.

As funções (3,4) avaliam a evolução temporal do sistema no período pós-falta e são calculadas em cada passo de simulação a partir do instante de remoção da falta. Conforme apresentado por Ejebe et al. em [4], mudanças de sinal em (3) indicam que a trajetória do sistema está cruzando a sua Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) [9]. Enquanto mudanças de sinal em (4) indicam que as máquinas estão mudando a sua direção de oscilação. Portanto, é possível

definir um esquema de determinação qualitativa da estabilidade de um sistema, de acordo com essas mudanças de sinal, conforme detalhado em [4]:

- I) Caso a função *dot2* mude de sinal antes da função *dot3*, então o sistema é considerado invariavelmente instável;
- II) Caso a função *dot3* mude de sinal antes da função *dot2*, então o sistema é considerado estável.

Essa avaliação de estabilidade é possível de ser feita rapidamente, após alguns passos de integração da eliminação da falta. Isso permite que a simulação seja antecipadamente interrompida, conferindo um ganho considerável de tempo [4].

IV. SIMULAÇÃO COMBINADA

O uso de uma formulação comum para a Simulação Completa (curto prazo) e a Simulação Rápida Modificada (médio e longo prazo) permite a combinação das duas técnicas visando a obtenção de uma análise ampla e integrada da dinâmica do SEE, conforme proposto em [3]. A transição ou chaveamento entre uma técnica e outra se dá de forma suave, mantendo-se a mesma formulação do conjunto de equações que modelam o SEE. Neste trabalho, propõe-se que o chaveamento da simulação completa para a simulação rápida seja feito utilizando o MPE, descrito na Seção III.

A avaliação qualitativa de estabilidade pelo MPE permite que essa mudança seja feita automaticamente. A Figura 1 apresenta um fluxograma do funcionamento da Simulação Combinada, com chaveamento automático fornecido pelos produtos escalares.

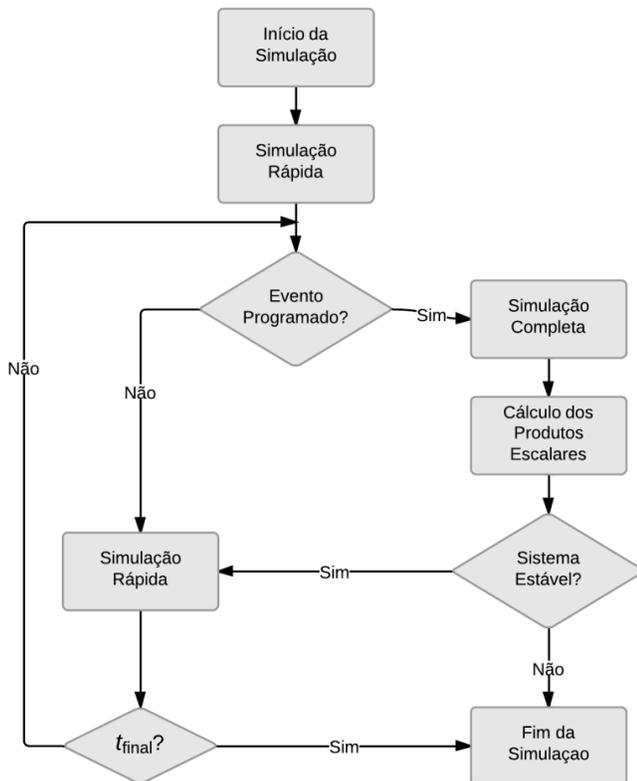


Figura 1. Fluxograma da Simulação Combinada, usando os produtos escalares.

Inicialmente, o programa é executado com a Simulação Rápida, até que seja detectado algum evento programado, como a aplicação de um curto-circuito ou abertura de uma linha. Nesse caso, ocorre o chaveamento para a Simulação Completa e dá-se início aos cálculos dos produtos escalares. Se o sistema for identificado como estável, ocorre a mudança para a Simulação Rápida novamente e a simulação contínua. A simulação só é finalizada quando o tempo final de simulação é atingido (t_{final}) ou se a instabilidade for detectada.

Conforme explicado anteriormente, essa detecção de estabilidade ocorre alguns passos de integração após a eliminação da falta, o que permite que a SRM seja acionada rapidamente, ganhando uma maior eficiência computacional. A seção a seguir apresentará os resultados obtidos com esse mecanismo.

V. RESULTADOS

A Simulação Combinada com transição automática via MPE foi implementada no programa Simulight, desenvolvido em C⁺⁺. O Simulight é uma ferramenta de análise de sistemas de potência que integra em uma mesma plataforma computacional diferentes aplicativos [3,12-13].

Para os testes preliminares do método proposto, foi usado o sistema de 9 barras apresentado na Figura 2. Esse sistema é uma versão modificada do sistema apresentado em [14]. Na Figura 2 também há um resumo dos casos avaliados e que serão descritos nas próximas seções.

O sistema contém três geradores modelados por suas máquinas síncronas e respectivos controles de tensão e velocidade. O gerador ligado à Barra 2 apresenta a maior geração, enquanto que o gerador ligado à Barra 3 apresenta a maior inércia.

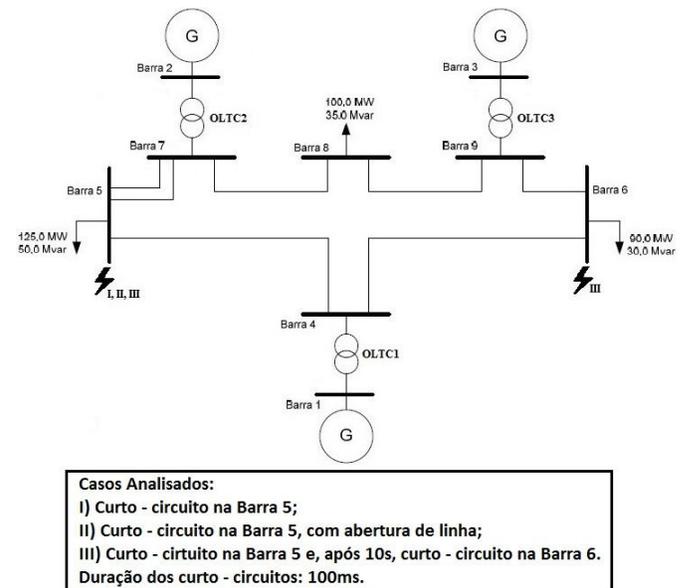


Figura 2. Sistema de 9 Barras usado para testes.

A. Caso I – Curto-Circuito na Barra 5

O primeiro caso estudado é a aplicação de um curto-circuito trifásico franco na Barra 5, após 1 segundo do início da simulação, e com duração de 100ms. As Figuras 3a e 4a apresentam a evolução temporal completa do ângulo do Gerador 2 e do Gerador 3, com detalhe (Figura 3b e 4b) para o instante de mudança entre as Simulações Completa e Rápida. Já a Figura 5 apresenta o gráfico dos Produtos Escalares para esse caso. O Gerador 1 foi utilizado como referência.

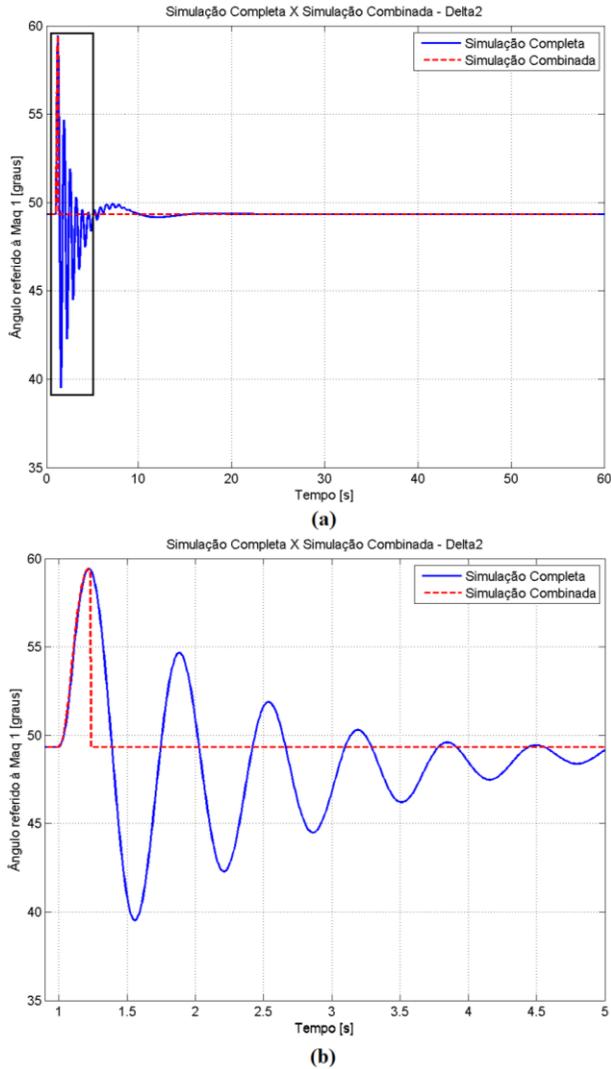


Figura 3. Comparação entre as Simulações Completa e Combinada. (a) Ângulo do Gerador 2 e (b) Detalhe para o instante de chaveamento.

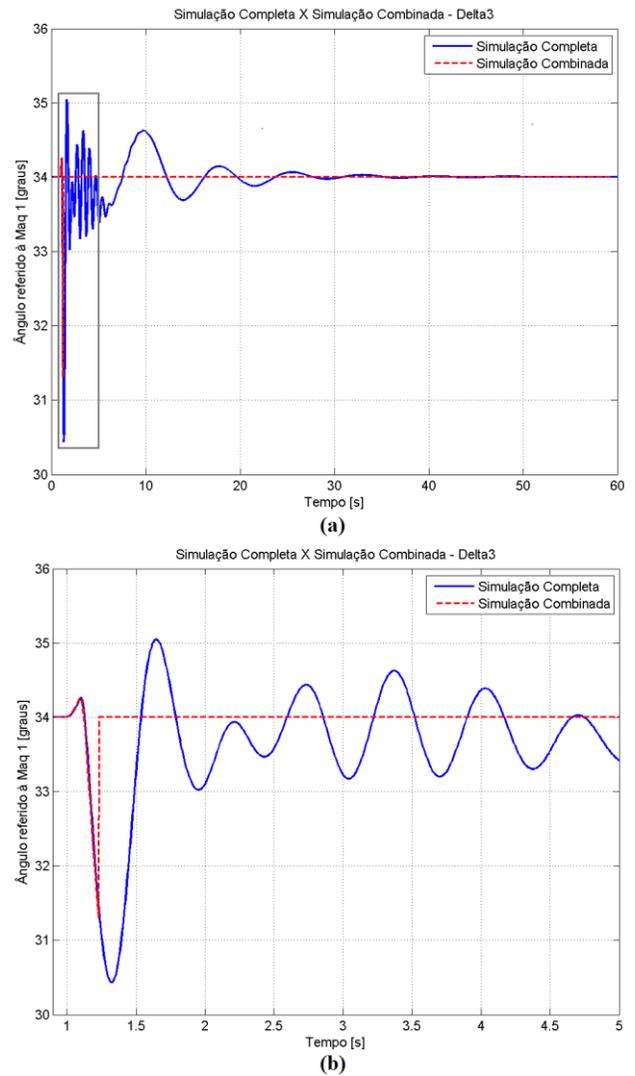


Figura 4. Comparação entre as Simulações Completa e Combinada. (a) Ângulo do Gerador 3 e (b) Detalhe para o instante de chaveamento.

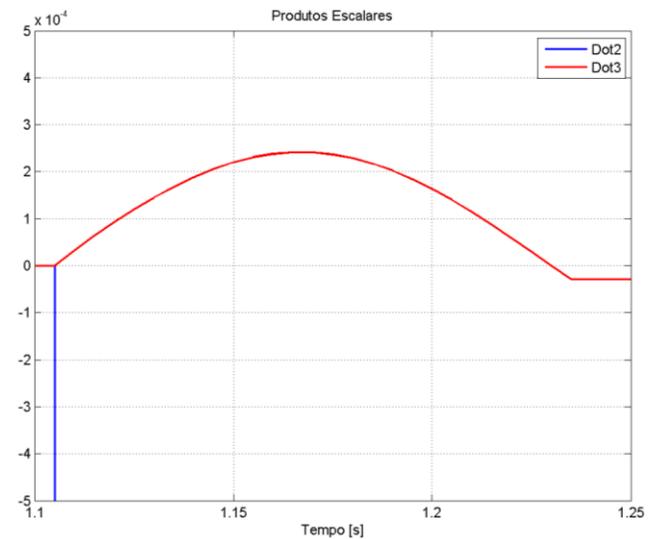


Figura 5. Evolução temporal dos Produtos Escalares no instante de eliminação da falta.

É possível observar que a Simulação Combinada apresenta um bom desempenho em relação à Completa. A Figura 5 permite observar o funcionamento da lógica do MPE, uma vez que o produto escalar *dot3* muda de sinal antes do *dot2*, o que classifica o sistema como estável. Assim, o MPE percebe a estabilidade transitória do sistema com 1,235 s de simulação, ou seja, 135ms após a eliminação da falta. Neste instante, ocorre a mudança do método de solução e é possível observar que a SRM é capaz de calcular o ponto de equilíbrio estável do sistema.

B. Caso II – Curto-Circuito na Barra 5 com abertura de linha

O segundo caso estudado é a aplicação de um curto-circuito trifásico franco na Barra 5, após 1 segundo de simulação, e com duração de 100ms. No mesmo instante de eliminação da falta, um dos circuitos que ligam as Barras 5 e 7 é desligado. As Figuras 6a e 7a apresentam a evolução temporal completa do ângulo do Gerador 2 e do Gerador 3, com detalhe (Figura 6b e 7b) para o instante de mudança entre as Simulações Completa e Rápida.

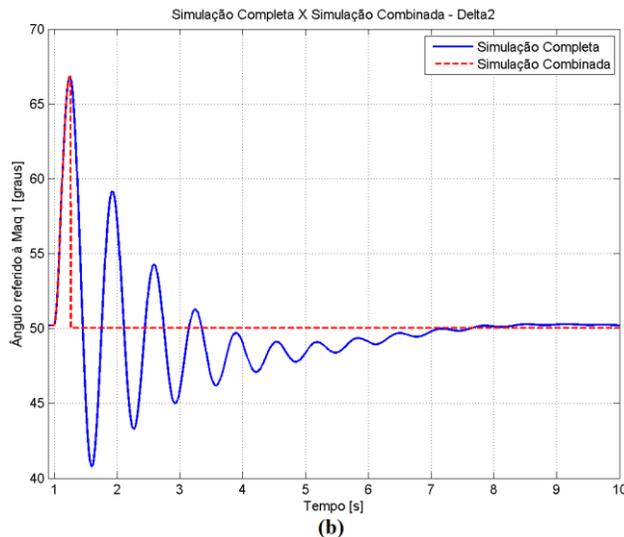
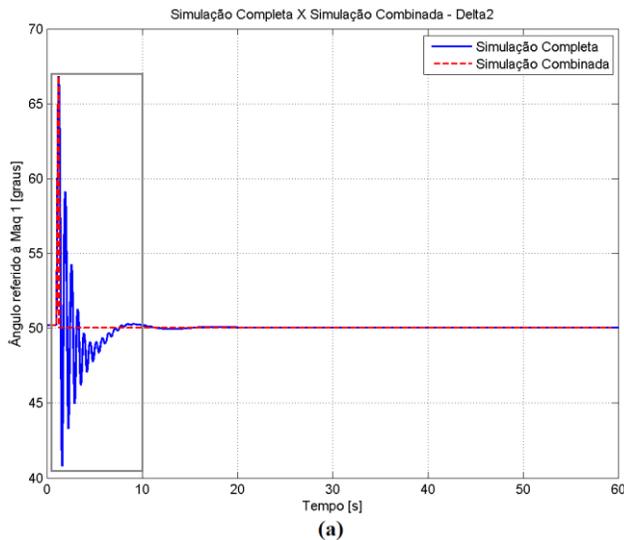


Figura 6. Comparação entre as Simulações Completa e Combinada. (a) Ângulo do Gerador 2 e (b) Detalhe para o instante de chaveamento.

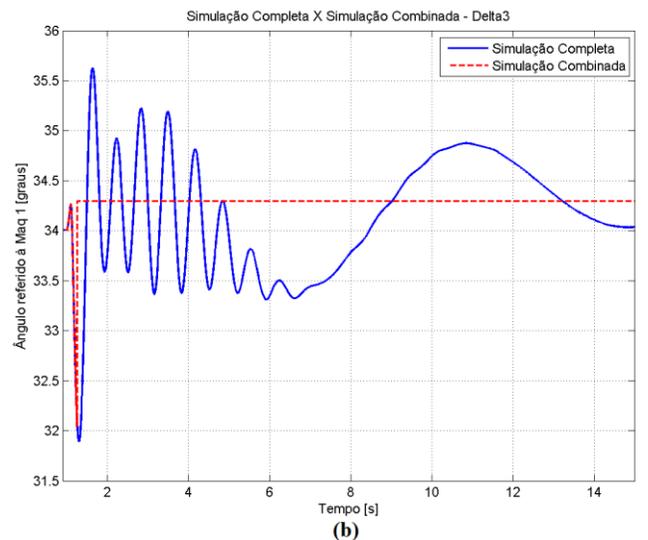
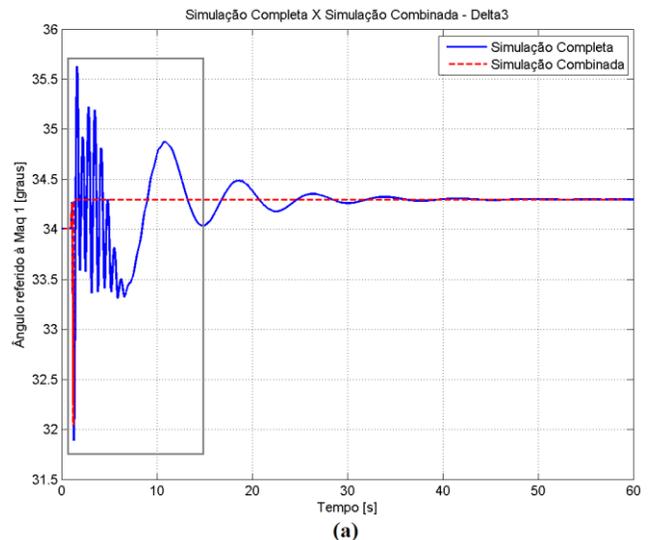


Figura 7. Comparação entre as Simulações Completa e Combinada. (a) Ângulo do Gerador 32 e (b) Detalhe para o instante de chaveamento.

A análise das figuras permite observar que mesmo com a abertura do circuito sob falta, o Método dos Produtos Escalares é capaz de detectar a estabilidade e acionar o chaveamento para a SRM. Nesse caso, o Método dos Produtos Escalares detecta a estabilidade do sistema com 1,255 s de simulação, ou seja, 155ms após a eliminação da falta.

C. Caso III – Curto-Circuito nas Barras 5 e 6

O terceiro caso foi a aplicação de um curto-circuito na Barra 5, em $t = 1s$, e um curto-circuito Barra 6, em $t = 40s$, ambos com 100ms de duração. A Figura 8 apresenta os resultados para os Geradores 2 e 3 (por uma questão de espaço o detalhe para os instantes de chaveamento foi omitido). O Gerador 1 foi utilizado como referência.

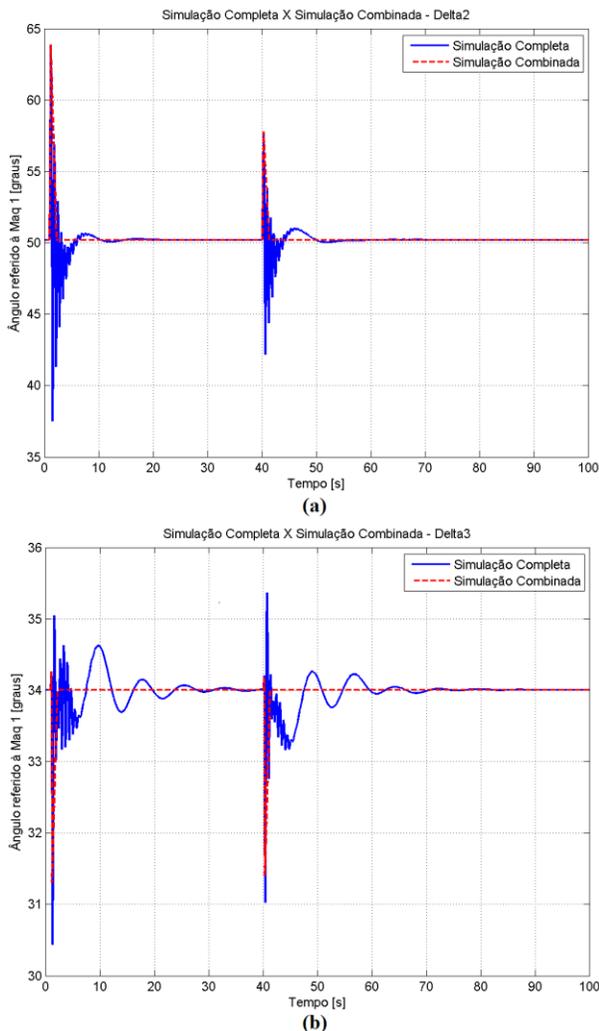


Figura 8. Comparação entre as Simulações Completa e Combinada. (a) Ângulo do Gerador 2 e (b) Ângulo do Gerador 3.

Nesse caso, é interessante observar o fato de que a Simulação Combinada permite a alteração a qualquer momento entre as Simulações Completa e SRM. Em ambos os eventos, o Método dos Produtos Escalares rapidamente detecta a estabilidade e modifica o método de solução, fornecendo maior eficiência computacional.

Esse aumento na eficiência computacional pode ser observado na Tabela 1, onde são apresentados os tempos de processamento necessários para as Simulações Completa e Combinada, além do fator de redução de tempo.

Tabela 1. Tempos de Processamento dos casos estudados.

		Caso I	Caso II	Caso III
Tempo de Processamento (s)	Simulação Completa	5,66	5,55	9,55
	Simulação Combinada	0,42	0,49	0,78
Fator de Redução		13,47	11,33	12,24

É possível observar que a Simulação Combinada apresentou um ganho de processamento cerca de 12 vezes em relação à Simulação Completa. Esse ganho pode ser ainda maior em sistemas de grande porte, como o Sistema Interligado Nacional, garantindo uma análise mais rápida, sem perda de informações relevantes.

VI. CONCLUSÕES

Esse trabalho teve com objetivo a apresentação da Simulação Combinada com chaveamento automático definido pelo Método dos Produtos Escalares. É possível observar pelos resultados apresentados que o uso dos produtos escalares garante um chaveamento adequado entre a Simulação Completa e a Rápida Modificada, garantindo uma maior eficiência computacional. Por essas razões, a Simulação Combinada apresenta-se como uma forte candidata para uso em simulações de sistemas elétricos onde se queira avaliar simultaneamente diferentes horizontes de tempo e diferentes tipos de fenômenos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a David Rodrigues Parrini pela ajuda na implementação dos métodos proposto no programa Simulight.

REFERÊNCIAS

- [1] Mateus, J. P. C. “Métodos de análise de estabilidade transitória de sistemas de energia eléctrica”. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2010.
- [2] Van Cutsem, T. *et al.*. “A Comprehensive Analysis of Mid-Term Voltage Stability”, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, pp. 1173-1182, 1995.
- [3] Manzonni, A. “Desenvolvimento de um Sistema Computacional orientado a Objetos para Sistemas Elétricos de Potência: Aplicação a Simulação Rápida e Análise da Estabilidade de Tensão”. 2005. 165 f. Tese (Doutorado) - Programa de Engenharia Elétrica, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- [4] Ejebe, G. *et al.*. “Security monitor for on-line dynamic security assessment”, Power System Control and Management, Conference Publication No.421, 1996.
- [5] Stott, B. “Power system dynamic response calculations”, *Proceedings of the IEE*, Vol. 67, No. 2, 1979.
- [6] Cutsem, T. V., Vournas, C. “Voltage Stability of Electrical Power Systems”. 1 ed. Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [7] Manzonni, A.; Taranto, G.; Falcão, D. “A comparison of Power Flow, Full and Fast Dynamic Simulations”, 14th PSCC, Session 38, Paper 2, 2002
- [8] Pai, M.A. “Energy function analysis for power system stability”. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1989.
- [9] Fouad, A.; Vittal, V. “Power system transient stability analysis using the Transient Energy Function Method”. Prentice Hall, 1992.
- [10] [A] Chiang, H.-D., Direct Methods for Stability Analysis of Electrical Power Systems: Theoretical Foundations, BCU Methodologies and Applications, NY, USA, Wiley, 2011.
- [11] Lerch, E.; Ruhle, O.; Kerin, U. “DSA – Visualisation monitoring and ranking of system dynamic behavior”. In: Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control, 2008.
- [12] Taranto, G. N. *et al.*. “Simulador de Redes de Distribuição Ativas com Modelagem Monofásica/Trifásica”. Disponível em (acessado em 20/09/2013 às 18:11): http://www.coep.ufrj.br/~tarang/Simulight/SEPOPE_2012.pdf
- [13] Assis, T. M. L., Taranto, G. N., Falcão, D. M. “Long and Short-Term Dynamic Simulations in Distribution Networks with the Presence of Distributed Generation”. IEEE PES GM 2006.
- [14] Anderson, P. M., Fouad, A. A. *Power System Control and Stability*. The Iowa State University Press, 1977.