



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

BR/GAT/15
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

SIMULAÇÃO NO TEMPO HÍBRIDA – FORMA DE ONDA E FASORIAL

Jorge Jardim(*)

HPPA

**Alex de Castro, Carlos Neto, Henílido Medeiros,
Karen Salim, Marcelos Groetaers, Pedro Santos,
Roberto Fontoura**

ONS

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um método de simulação híbrida no tempo com representação fasorial de sequência positiva e forma de onda trifásica. Esta técnica de simulação torna possível a análise de fenômenos dinâmicos complexos, nos quais análises separadas não sejam capazes de representar todos os aspectos do problema. O desenvolvimento utilizou o programa PSCAD/EMTDC para a simulação de fenômenos eletromagnéticos e o programa Organon para simulação fasorial. As principais contribuições são a representação fasorial com passo variável e a análise detalhada do acoplamento entre as duas ferramentas de forma a preservar os modos de oscilação.

PALAVRAS-CHAVE

Simulação híbrida, estabilidade transitória, transitórios eletromagnéticos.

1.0 INTRODUÇÃO

Na análise e projeto de sistemas elétricos de potência, utilizam-se ferramentas de simulação no domínio do tempo específicas para o intervalo de observação necessário à análise do fenômeno de interesse. Os programas de transitórios eletromagnéticos, TEM, são utilizados para a especificação das características elétricas e dos requisitos de proteção, projeto de conversores com eletrônica de potência, entre outros estudos. O espectro de frequências de interesse nestes tipos de estudo é relativamente alto, com limite superior variando entre 2KHz a 100kHz o que implica em passos de integração da ordem de microssegundos.

Os programas de estabilidade transitória, ET, são adequados para os estudos dos fenômenos eletromecânicos os quais se manifestam em um espectro de frequência bem inferior ao dos fenômenos eletromagnéticos. Os passos de integração necessários para este tipo de simulação são tipicamente de milissegundos.

Programas de TEM são muito mais custosos sob o ponto de vista computacional devido principalmente aos pequenos passos de integração. Portanto, a fim de manter o tempo de computação em valores aceitáveis, a extensão das redes simuladas deve ser limitada em relação às representadas em programas de ET.

Este tipo de separação de acordo com o tipo de fenômeno estudado funciona bem na grande maioria dos casos. Porém, há estudos elétricos que abrangem um espectro de frequências estendido, como no caso de falhas de comutação em conversores. Nestes casos, tanto a representação dinâmica da rede, como em um programa de ET, quanto a simulação da forma de onda nos terminais dos conversores são necessárias para se estudar adequadamente o problema. Mais especificamente, sem a forma de onda trifásica não há como modelar adequadamente o problema de falha de comutação. Por outro lado, esta forma de onda pode ser influenciada diretamente pela dinâmica da rede e pela interação entre diversos controles.

(*) Rua Carlos Frias, nº 100 – CEP 22.753-170 Rio de Janeiro, RJ, – Brasil
Tel: (+55 21) 9653-7238 – Email: jorge.jardim@hppa.com.br

Há algum tempo que tem sido proposta a simulação híbrida como solução para este problema [1,2]. A ideia principal é a de se acoplar um programa de TEM com um programa de ET de tal forma que este contenha a maior parte da rede de CA e aquele represente uma pequena parte da rede CA e os elos de CC.

Com os recentes desenvolvimentos da rede de transmissão do Sistema Interligado Nacional, que terá em breve, em sua Rede Básica, múltiplos elos de CC de elevada potência partindo de diferentes pontos da região Norte e chegando a pontos eletricamente próximos da região Sudeste, a preocupação com o desempenho dinâmico do sistema e os efeitos de interação entre controles aumentam significativamente o interesse em ferramentas computacionais que possam representar com a maior fidelidade possível os fenômenos em questão.

1.1 Conceitos Gerais

As seguintes definições são adotadas [2]:

Sistema Detalhado: Corresponde a uma ou mais partes do sistema de potência com componentes que precisam ser modelados com maior nível de detalhamento, como, por exemplo, a representação trifásica da rede. Esse sistema é modelado em um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos (TEM).

Sistema Externo: A outra parte do sistema de potência que inclui os demais elementos da rede que são modelados somente pela sequência positiva a frequência fundamental por um programa de estabilidade transitória (ET).

Barras de Interface: Barras através das quais os sistemas detalhado e externo interagem e trocam informações. Uma barra de interface é representada tanto no sistema detalhado quanto no sistema externo.

Protocolo de Interação: Ações sequenciais predefinidas que coordenam a troca de dados entre os programas ET e TEM. Existem duas categorias principais de interação: serial e paralela. No protocolo serial a cada instante de tempo somente um dos simuladores está processando enquanto o outro está em estado de espera. No protocolo paralelo os dois simuladores rodam em paralelo.

Modelos Equivalentes: Na simulação híbrida, os programas de TEM e ET processam, separadamente, os sistemas detalhado e externo, respectivamente. Cada programa requer uma imagem acurada da outra zona. Esta imagem é referida como modelo equivalente. A validade do simulador híbrido depende diretamente da acurácia dos modelos equivalentes.

A Figura 1 mostra a representação geral em ambos os programas. O programa ET provê informação para atualizar o sistema detalhado enquanto o programa TEM provê informação para atualizar o sistema externo. Como o programa TE é baseado no modelo fasorial de sequência positiva a frequência fundamental, e o programa TEM é baseado na forma de onda trifásica instantânea, a interface entre estes dois programas requer conversão de dados para o acoplamento.

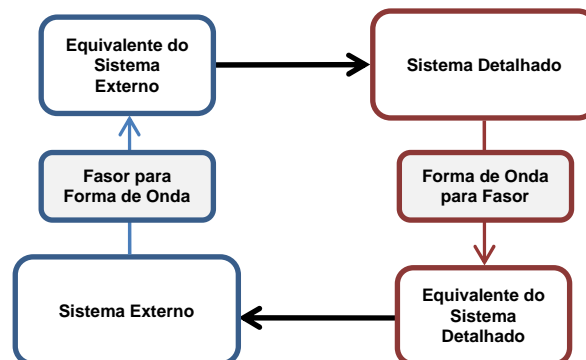


FIGURA 1 – Interface entre os sistemas detalhado e externo

2.0 IMPLEMENTAÇÃO

A implementação da simulação híbrida Organon-PSCAD/EMTDC foi desenvolvida em sua quase totalidade, a partir da inserção de novas rotinas no código do programa Organon por questões de conveniência. Os principais componentes desta implementação são descritos a seguir. Do lado do PSCAD é necessário modelar uma fonte de corrente para o equivalente Norton ou de tensão para o equivalente Thévenin, que irá receber os valores calculados pelo Organon para a forma de onda trifásica da fonte e para o valor da impedância para cada instante de tempo da simulação.

2.1 Equivalente do Sistema Detalhado

Baseado nas referências [1-7], a representação de um sistema detalhado no programa ET é feita usualmente através de um equivalente Norton. O valor da admitância Norton é arbitrário e usado principalmente para se evitar oscilações numéricas. Essa admitância não foi usada nesta implementação, de tal forma que o equivalente foi reduzido à uma injeção de corrente. Em [8], se questiona que as correntes trifásicas podem conter um offset CC significativo durante transitórios desbalanceados.

Assim, após converter as formas de onda das tensões e correntes trifásicas em fasores, a potência complexa do sistema detalhado na barra de interface é computada. A corrente do equivalente é calculada considerando essa potência e a tensão na barra de interface no lado do sistema externo.

2.2 Equivalente do Sistema Externo

O equivalente do sistema externo pode ser um equivalente Thevenin, como recomendado em [1], ou um equivalente Norton. As duas representações são recíprocas e, portanto, indiferentes do ponto de vista teórico. Entretanto, observou-se que numericamente o equivalente Thevenin se comportou melhor na implementação do PSCAD/EMTDC.

A impedância de Thevenin vista da barra de interface é computada no Organon a partir da matriz de impedância Y_{barra} contendo as impedâncias das fontes controladas (geradores, compensadores estáticos, etc.). Ou seja,

$$Y.V = I \rightarrow V = Y^{-1}I \rightarrow V = Z.I \quad (2.1)$$

Onde I é o vetor de injeção de correntes complexas tendo $1+j0$ na barra de interface e 0 nas demais barras; Y é a matriz de admitâncias de barra do sistema externo contendo as impedâncias das fontes, cargas, etc., e V é o vetor resultante de tensões. Para este vetor de corrente, os valores do vetor de tensão correspondem às impedâncias de transferência da barra de interface para as demais barras do sistema externo. Então, a tensão da fonte de Thevenin é obtida de forma trivial pela seguinte equação.

$$\bar{E}1 = \bar{I}1.z1 + \bar{V} \quad (2.2)$$

2.3 Transformação Fasor para Forma de Onda

A transformação de fasor para forma de onda também é trivial, como segue.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{base} |\bar{E}1| \sin(\omega t + \delta_E) \\ V_b &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{base} |\bar{E}1| \sin(\omega t + \delta_E - 120) \\ V_c &= \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{base} |\bar{E}1| \sin(\omega t + \delta_E + 120) \end{aligned}$$

Onde V_{base} é a tensão base de linha (fase-fase) da barra de interface, e δ_E é o ângulo da barra da fonte de tensão do equivalente Thevenin.

2.4 Transformação Forma de Onda para Fasor

A transformação de forma de onda para fasor é feita em três estágios. Primeiro, se extrai o fasor a frequência fundamental das tensões e correntes trifásicas utilizando-se o método de mínimos quadrados [1]. Depois, as componentes de sequência positiva são calculadas com

$$\begin{aligned} \bar{V}_{ps} &= \frac{\sqrt{3}}{3\sqrt{2} V_{base}} (\bar{V}_a + \bar{a} \cdot \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c) \\ \bar{I}_{ps} &= \frac{1}{\sqrt{2} I_{base}} (\bar{I}_a + \bar{a} \cdot \bar{I}_b + \bar{a}^2 \bar{I}_c) \\ I_{base} &= \frac{S_{base}}{\sqrt{3} V_{base}} \\ \bar{a} &= 1/120^\circ \end{aligned}$$

Finalmente a potência na interface é dada por

$$\bar{S}_{ps} = \bar{V}_{ps} \bar{I}_{ps}^*$$

2.5 Protocolo de Comunicação

O protocolo paralelo, onde os programas rodam simultaneamente até um instante de tempo determinado, foi implementado neste trabalho por ser intrinsecamente mais eficiente do ponto de vista computacional. A troca de informação entre os dois programas é feita a cada passo do programa ET (Organon). Consequentemente, a sincronização requer que um dos dois programas terá que esperar pelo outro para troca de dados antes de seguir adiante. Tal escolha dependerá da carga de trabalho de cada um e do tamanho do passo de integração do Organon.

Todas as referências consultadas implementaram simulação híbrida com programas de ET de passo fixo, tipicamente na faixa de 8 a 20 ms. A implementação Organon-PSCAD/EMTDC é única neste aspecto porque o Organon adota método de integração com passo variável. Portanto, o protocolo de comunicação teve que ser adaptado de acordo. A expectativa é que o passo variável seja uma vantagem para este tipo de simulação porque caso necessário, a comunicação poderá ocorrer em intervalos de tempo menores durante transitórios mais rápidos (ex. intervalo inferior a 1ms). Adicionalmente, o programa pode tirar vantagem de transitórios lentos ou condições de quase regime para aumentar significativamente o passo de integração.

A Figura 2 mostra o esquema do protocolo utilizado, que podemos definir da seguinte forma:

- No tempo T1, o programa ET atualiza o equivalente do sistema externo e o envia ao programa TEM. O programa TEM roda por um passo, Δt (tipicamente 25×10^{-6}), e envia as variáveis trifásicas instantâneas de interface para o ET. Ambos programas continuam o processamento de forma paralela (seta vermelha) até o tempo T2. Entretanto, a cada passo de integração do programa TEM, este envia as variáveis trifásicas de interface para o programa ET que as armazena. O tempo de sincronização é estabelecido pelo programa ET, baseado no próximo passo de integração, $h1$.
- No tempo T2, o passo (a) é repetido, mas o próximo tempo de sincronização é estabelecido pelo programa ET em $T3 = T2 + h2$, onde $h2$ é o próximo passo de integração.
- No tempo T3, um evento ocorre no programa ET, se ocorrerem mudanças topológicas na rede, o programa ET computa um novo equivalente e os envia ao programa TEM. Este roda por um ciclo enquanto o programa ET está em estado de espera. Após este ciclo, o programa TEM entra em estado de espera e o programa ET reprocessa as variáveis de interface do sistema detalhado (V, I e S) via transformação de forma de onda para fasor, e roda até o tempo de sincronização $T4 = T3 + Tc$, onde Tc corresponde a um ciclo da frequência fundamental. Assim, de T3 a T4, os programas TEM e ET rodam sequencialmente (seta verde). O programa ET pode requerer um ou mais passos de integração para alcançar T4. Como o Organon automaticamente coloca o passo de integração em um valor muito reduzido após um evento, é provável que requeira vários passos para alcançar o tempo T4.
- No tempo T4, o programa ET atualiza o equivalente do sistema externo e o envia ao programa TEM, e ambos rodam em paralelo para alcançar o tempo $T5 = T4 + h6$. O processo continua até que o tempo de simulação seja alcançado.

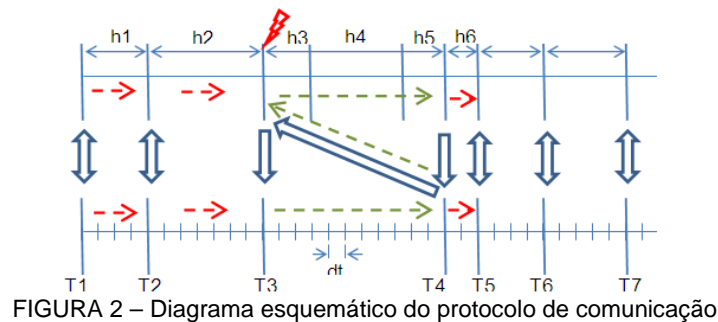


FIGURA 2 – Diagrama esquemático do protocolo de comunicação

Após um evento, tal como em T3 na Figura 2, o programa ET computa o estado imediato pós-evento (T3+) de forma a atualizar o equivalente de sistema externo e enviá-lo ao programa TEM. Após um ciclo da simulação do TEM, a injeção de corrente no sistema externo é atualizada e a condição imediata pós-evento (T3+) no programa ET é reavaliada.

A forma utilizada para implementação computacional do protocolo paralelo foi criar uma *thread* (conjunto de instruções) no programa ET para efetuar a comunicação entre os dois programas. Esta *thread* está diretamente conectada com o programa ET e indiretamente com o programa TEM. Esta conexão indireta explora as características de um *pipe* no qual uma chamada para receber dados bloqueia a comunicação, ou seja, a execução do programa espera até que o dado a ser recebido esteja disponível no *pipe*.

3..0 RESULTADOS DE TESTES

Até o momento foram utilizados três sistemas testes, mas devido a limitação de espaço, só estão mostrados os resultados com dois sistemas teste simples. Os sistemas foram modelados independentemente em ambas as ferramentas para uma compatibilização inicial e para uma posterior comparação com a simulação híbrida.

3.1 Sistema Teste #1

O primeiro sistema consiste em um gerador alimentando uma carga através de um sistema radial. O gerador foi representado com modelo de máquina síncrona de pólo lisos, regulador de tensão e regulador de velocidade, de acordo com a Figura 3.

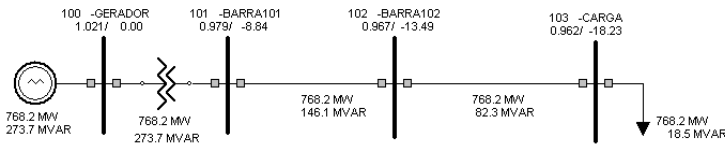


FIGURA 3 – Sistema Teste #1 representado no Organon.

O mesmo sistema foi modelado no PSCAD de forma a se comparar as respostas das simulações individuais com a resposta da simulação híbrida. Foram utilizados os modelos dinâmicos da biblioteca do PSCAD compatíveis com os modelos utilizados no Organon.

Para a simulação híbrida optou-se pela barra 102 como barra de interface, mantendo o gerador no Organon e a carga no PSCAD. A Figura 4 mostra o sistema híbrido representado no PSCAD.

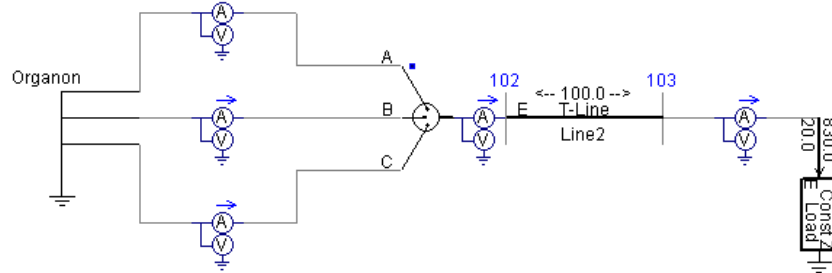


FIGURA 4 – Sistema Teste #1 representação híbrida no PSCAD.

Foi aplicado uma falta trifásica na barra 101 com duração de 100 ms. As comparações dos resultados da simulação híbrida com as simulações utilizando somente o Organon, mostradas na Figura 5, foram muito boas.

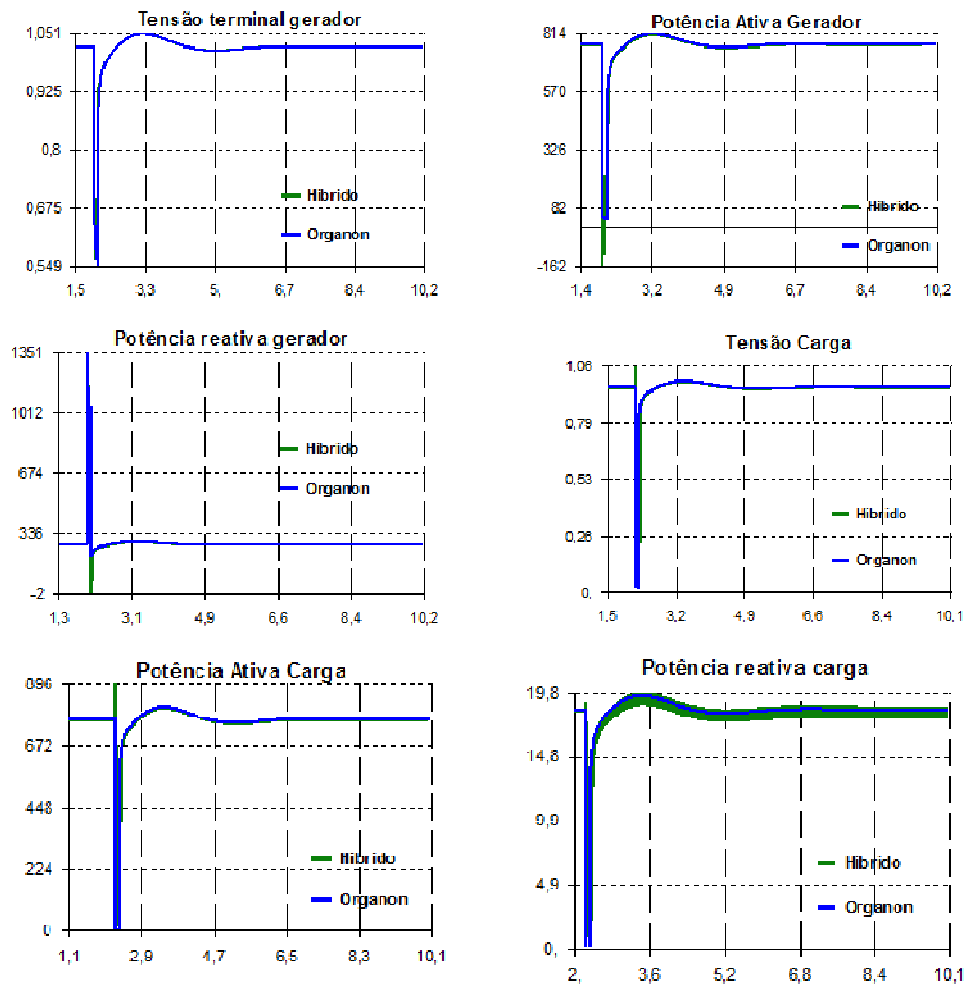


FIGURA 5 – Comparação da simulação híbrida com a simulação do Organon.

3.2 Sistema Teste #2

O segundo sistema utilizado é composto por dois geradores alimentando uma carga. Acrescentou-se mais um gerador ao sistema de forma a permitir a representação da sua dinâmica em ambas as ferramentas durante a simulação híbrida. O sistema teste #2 encontra-se na Figura 6.

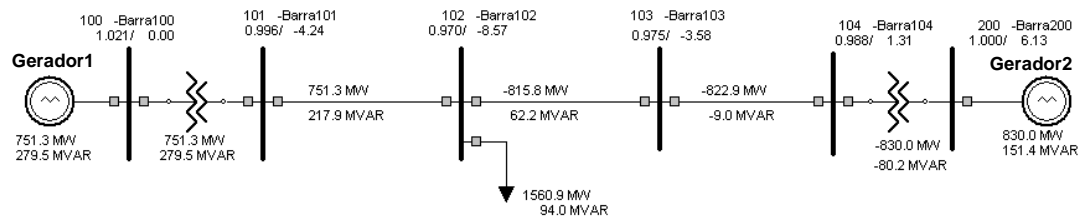


FIGURA 6 – Sistema Teste #2 representado no Organon

Para este caso optou-se pela Barra 103 como barra de interface, mantendo o Gerador1 representado no sistema detalhado e o Gerador2 representado no sistema externo, de acordo com a Figura 7.

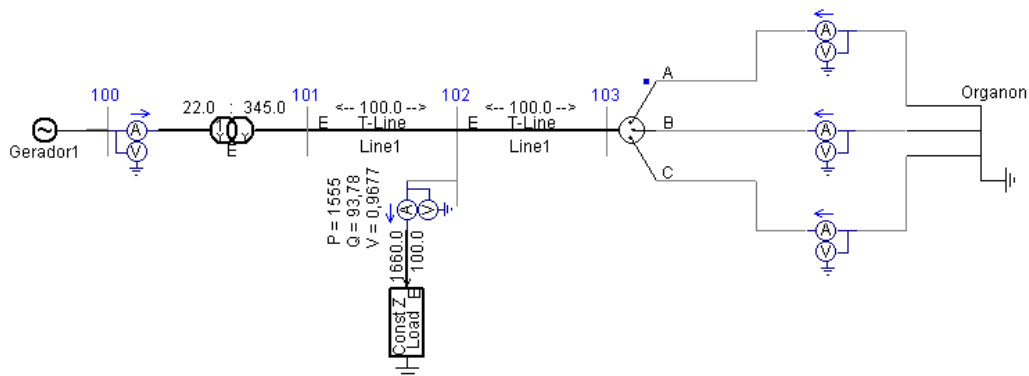
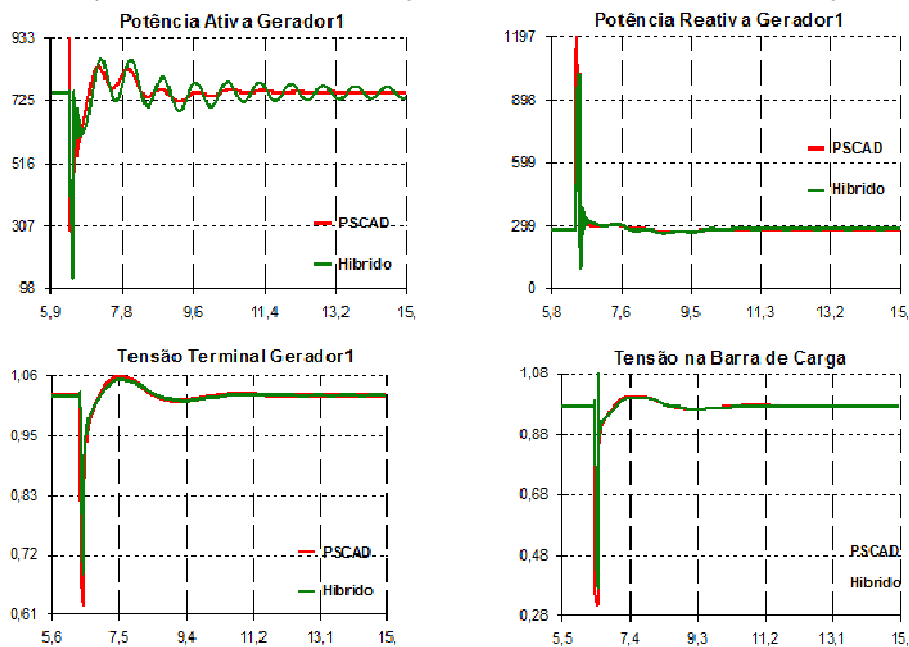


FIGURA 7 – Sistema Teste #2 representação híbrida no PSCAD

Foi aplicado uma falta trifásica na barra 104 com duração de 100 ms. As comparações dos resultados da simulação híbrida com as simulações utilizando somente o Organon e PSCAD podem ser vistas na Figura 8.



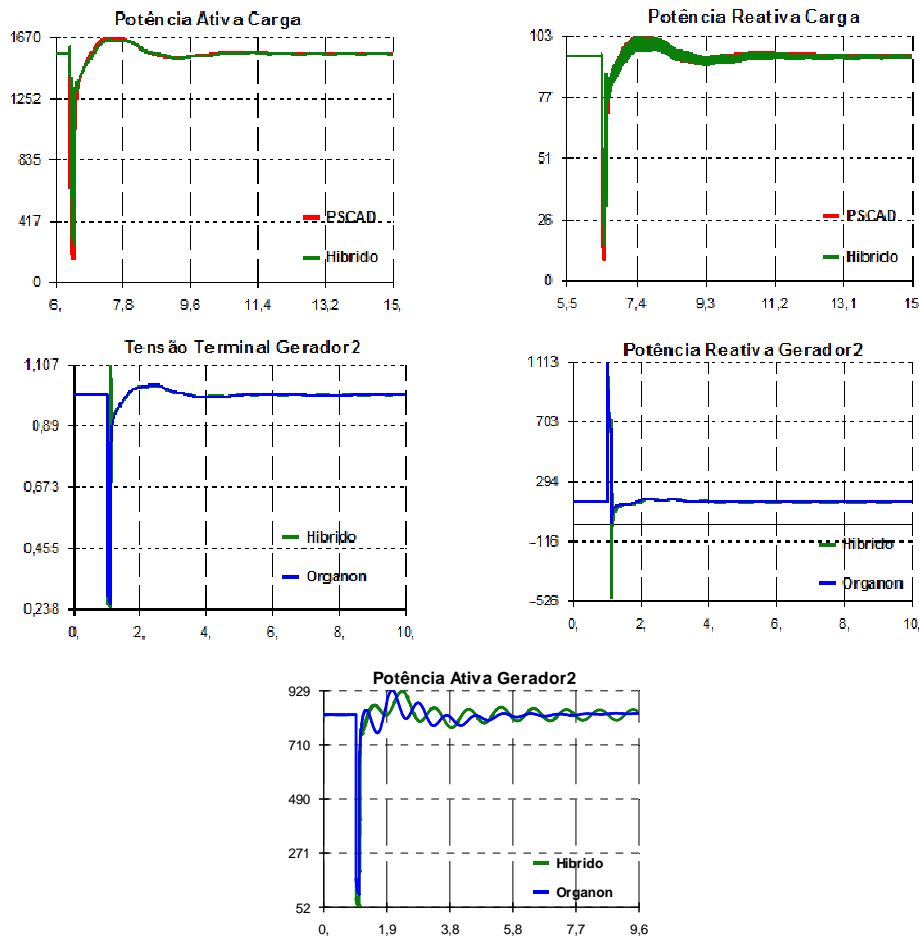


FIGURA 8 – Sistema Teste #1 representação híbrida no PSCAD

É possível observar que os resultados são relativamente próximos, apesar de existir uma diferença de amortecimento entre as simulações híbrida e fasorial pura. Cabe notar que o defeito foi aplicado relativamente próximo da barra de interface, o que é uma situação mais difícil. Observou-se em testes com um sistema de maior porte (39 barras) que a medida que o defeito se afasta da barra de interface, tais diferenças diminuem ou desaparecem. Entretanto, espera-se relatar tais experiências em trabalhos futuros.

4.0 CONCLUSÕES

O acoplamento dos programas Organon e PSCAD/EMTDC foi implementado com sucesso e está operacional. As diferenças observadas, especialmente no amortecimento de algumas oscilações, estão sendo investigadas e espera-se poder contorná-las com algumas evoluções, tais como aperfeiçoamento dos equivalentes utilizados em ambos os lados. É importante ressaltar que esta tecnologia, embora proposta também em outros trabalhos, não encontra-se totalmente madura. Neste trabalho foram feitos alguns avanços, como por exemplo, a utilização de passo variável na simulação fasorial, de caráter inovador e que possivelmente melhora a estabilidade numérica da simulação híbrida. Outras melhorias e soluções para lacunas na literatura foram desenvolvidas.

5.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] N. Watson and J. Arrillaga, "Power system electromagnetic transients simulation," Institute of Elect. Eng., London, UK, 2003.
- [2] V.J. Marandi, V. Dinavahi, K. Strunz, J. A. Martinez, and A. Ramirez, "Interfacing Techniques for transient stability and electromagnetic transient programs," IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 24, no. 4, Oct. 2009.

- [3] M.D. Heffernan, K. S. Turner, J. Arrillaga, and C.P. Arnold, "Computation of A.C-D.C. system disturbances: Part I, II, and III," IEEE Trans. On PAS, vol. PAS-100, no 11, pp 4341-4363, Nov 1981.
- [4] G.W. Anderson, N.R. Watson, C.P. Arnold, and J. Arrillaga, "A new hybrid algorithm for analysis of HVDC and FACTS systems," in Proc. IEEE Int. Conf. Energy Management and Power Delivery, Nov. 1995, vol. 2, pp. 462-467.
- [5] J. Reeve and R. Adapa, "A new approach to dynamic analysis of ac networks incorporating detailed modeling of dc systems. Part I and II," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 3, no. 4, pp. 2005-2019, Oct. 1988.
- [6] M. Sultan, J.Reeve, and R. Adapa, "Combined transient and dynamic analysis of HVDC and FACTS systems," IEEE Trans. Power Del., vol 13, no.4, pp. 1271-1277, Oct. 1998.
- [7] X. Wang, P. Wilson, and D. Woodford, "Interfacing transient stability program to EMTDC program," in Proc. IEEE Int. Conf. Power Syst. Technology, Oct., 2002, vol. 2, pp. 1264-1269.
- [8] H.T. Su, K. W. Chan, and L. A. Snider, "Parallel interaction protocol for electromagnetic and electromechanical hybrid simulation," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 152, no. 3, pp. 406-414, May 2005.
- [9] H.T. Su, K.W. Chan, L.A. Snider, T.S. Chung and D.Z. Fang, "Recent advancements in electromagnetic and electromechanical hybrid simulation," in Proc. Int. Conf. Power System Technology, Singapore, Nov. 2004, pp. 1479-1484.
- [10] B. Kasztenny and M. Kezunovic, "A method for linking different modeling techniques for accurate and efficient simulation," IEEE Trans Power Syst., vol. 15, no. 1, pp. 65-72, Feb 2000.

6..0 DADOS BIOGRÁFICOS

Jardim, J. L. - Engenheiro pelo UFF, MSc pela PUC-RJ e PhD pelo Imperial College – Reino Unido. Tem 30 anos de experiência em análise de sistemas de potência e desenvolvimento de aplicativos para estas análises. Trabalhou em Furnas C.E., ONS, BC Hydro – Canadá, e Nexant – EUA. Atualmente está na HPPA como principal consultor.

Santos, M. G. - Possui graduação em Engenharia Elétrica - Eletrotécnica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (1982), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá (1995) e doutorado em Computação pela Universidade Federal Fluminense (2009). Atualmente é gerente - Operador Nacional do Sistema Elétrico. Tem experiência na área de Planejamento e Programação da Operação, com ênfase em Engenharias, atuando principalmente nos seguintes temas: estabilidade, autovalores, pequenas perturbações, oscilações subsíncronas, controle de sistemas de potência, confiabilidade e risco.

Neto, C. A. S.: Nascido em Olinda-PE em 1962 possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1984 e Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação pela COPPE/UFRJ em 1999 Doutorado em computação pela UFF em 2012. Trabalhou na empresa de consultoria Themag Engenharia Ltda., no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, em Furnas Centrais Elétricas e na BC Hydro (Canadá). Atualmente, exerce a função de especialista no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Suas áreas de interesse são análise estática e dinâmica de sistemas de potência e otimização. Tem experiência em estudos elétricos e no desenvolvimento de aplicativos.

Barros, H. M. - Graduiu e obteve o título de MSc pela UFRJ. Tem 25 anos de experiência em engenharia elétrica. Trabalhou no CEPEL e desde 2002 está no ONS como Engenheiro Especialista. Seus interesses e especialização são em especificação de equipamentos de alta tensão e representação de sistemas de potência em simuladores offline e em escala real de tempo.

SANTOS, P. H. L. - Nascido em Resende-RJ em 1984 possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 2010 e Mestrado em Engenharia Elétrica em curso na COPPE/UFRJ. Trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS desde 2010. Suas áreas de interesse são análise estática, dinâmica e controle de sistemas de potência e simulação híbrida. Tem experiência em estudos elétricos e modelos de componentes para simulações no domínio do tempo.

Salim, K.C. de O. - possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

(2008), mestrado pela Universidade de São Paulo (2009) e doutorado pela Universidade de São Paulo (2012). Atualmente, trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Proteção de Sistemas Elétricos de Potência e Estabilidade de Sistemas Elétricos de Potência, atuando principalmente em: localização de faltas, detecção de faltas, sistemas de distribuição, ondas viajantes e redes neurais artificiais, estabilidade de tensão, bifurcações, e colapso de tensão.

Castro, A. - Nascido em Niterói-RJ em 1965 possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1994. Trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS desde 2010. Trabalhou no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e atualmente exerce a função de engenheiro senior no Operador Nacional do Sistema - ONS. Suas áreas de interesse são transiente eletromagnético, HVDC e simulação em tempo real. Tem experiência em modelos de componentes para simulações no domínio do tempo.

Fontoura Filho, R. N. – Graduado em engenharia elétrica pelo Instituto Militar de Engenharia (IME) em 1979, com Mestrado e Doutorado pela COPPE/UFRJ, respectivamente em 1984 e 1994. Trabalhou na Promon Engenharia e Eletrobrás, e está no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) desde 2000, onde atualmente é Gerente Executivo e Coordenador do Comitê de Desenvolvimento Tecnológico. É Professor Adjunto da UERJ.