



GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

ESTUDO DE COSSIMULAÇÃO MULTI-DOMÍNIO CONFLUINDO AS FERRAMENTAS ATP E ANATEM

VITOR FRANCISCO BASSI DE FRANCHI SIQUEIRA(1);RENZO GROVER FABIÁN ESPINOZA(2);JONAS
ROBERTO PESENTE(3)
UNIOESTE CAMPUS FOZ DO IGUAÇU(1);FPTI BRASIL(2);ITAIPU (3)

RESUMO

Um problema recorrente em estudos de sistemas elétricos de potência está na representação de equipamentos que necessitam da utilização de modelos detalhados, como HVDC e FACTS. Estas tecnologias são melhores representadas através de modelos de transitórios eletromagnéticos quando comparado com os modelos de transitórios eletromecânicos, sendo esses modelos consolidados e amplos da rede. Neste contexto, o presente informe técnico tem por objetivo a avaliação da aplicação do método de cossimulação. Este método é baseado na combinação de duas ou mais ferramentas computacionais para formar um ambiente multi-domínio de simulação digital. Neste trabalho foi desenvolvido um método para incorporar em cossimulação o Anatem e o ATP.

PALAVRAS-CHAVE

Cossimulação, Simulação Híbrida, Transitórios Eletromecânicos, Transitórios Eletromagnéticos

1.0 – INTRODUÇÃO

Um problema recorrente em estudos de Sistema Elétrico de Potência (SEP) está na representação de equipamentos associados à elos de corrente contínua, parques eólicos e dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission System*) em simulações de transitórios eletromecânicos, principalmente por falta de modelos adequados. Sabe-se que os modelos de HVDC (*High Voltage Direct Current*) em simulações de transitórios eletromagnéticos são precisos e fornecidos pelos fabricantes dos equipamentos. Desta forma, unir os modelos precisos para transitórios eletromagnéticos com os modelos consolidados e amplo da rede para transitórios eletromecânicos podem combinar os modelos e produzir resultados que conduzam à operação mais segura e confiável.

O presente informe técnico tem a finalidade de apresentar a aplicação de cossimulação de dois softwares de grande importância no cenário brasileiro para estudos em sistemas de potência, o Anatem (Análise de Transitórios Eletromecânicos), destinado principalmente à análise de estabilidade transitória, e o ATP (*Alternative Transient Program*), utilizado para a simulação digital de fenômenos transitórios de natureza eletromagnética. Este método é baseado na ferramenta de código aberto ATP-ANATEM¹, que é uma interface entre ATP e Anatem programada na linguagem C por meio do *Foreign Models* (1) no ATP.

2.0 – COSSIMULAÇÃO

A cossimulação, também chamada simulação híbrida é um método baseado na combinação de duas ou mais ferramentas computacionais para formar um ambiente multimodal ou multi-domínio de simulação digital, na qual objetiva um compromisso entre o tempo de processamento e a precisão dos resultados. Para tanto o sistema elétrico deve ser dividido em dois subsistemas: Subsistema interno que corresponde a uma pequena parcela do sistema de potência que possui dispositivos que necessitam de representação detalhada e resultados precisos, como dispositivos FACTS e HVDC, e são implementados em ferramentas EMTP (*Electromagnetic Transient Program*), como o ATP, que utilizam grandezas trifásicas na forma de onda; e Subsistema externo que engloba os demais elementos do sistema de potência no qual são representados utilizando modelos fasoriais de sequência positiva na frequência fundamental através da ferramenta TSP (*Transient Stability Program*) (2) como o Anatem.

Esses subsistemas trocam informações através de uma barra de interface na qual está presente em ambos os subsistemas. Haja vista as diferenças naturais entre as grandezas das duas ferramentas computacionais, já que o

¹ Desenvolvido por Renzo Grover Fabián Espinoza e de propriedade intelectual do Centro de Competência em Automação e Simulação de Sistemas Elétricos, pertencente ao Parque Tecnológico Itaipu – Brasil (PTI-BR).

Anatem leva em consideração um sistema monofásico equilibrado e grandezas RMS (*Root Mean Square*) de sequência positiva e o ATP leva em consideração um sistema trifásico com grandezas na forma de onda. Devido a esse fato cada programa requer um circuito equivalente que reflita adequadamente as características do outro subsistema durante cada instante da simulação (3). Também é necessário que as grandezas sejam compatibilizadas, isto é converter as grandezas fasoriais para forma de onda, e vice-versa, para a atualização de cada equivalente. Para a conversão da forma de onda para fasor utilizou-se o método do *curve fitting* como apresentado em (4).

Como as ferramentas possuem diferentes tempos de integração, um protocolo de comunicação é necessário para coordenar a troca de informações para a atualização dos equivalentes (5). Uma representação dos elementos listados bem como as compatibilizações necessárias estão ilustradas na Figura 1.

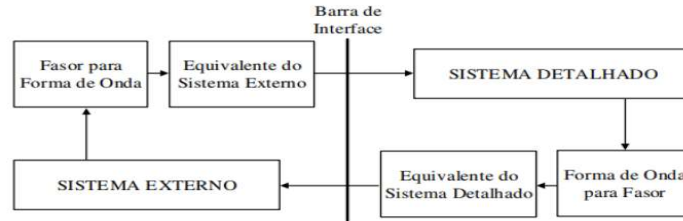


FIGURA 1 – Elementos necessários para a realização da cossimulação. Fonte: (1).

3.0 – PROBLEMA DE ESTABILIDADE NUMÉRICA DA COSSIMULAÇÃO

Como a cossimulação não é um método trivial, deve-se salientar que existem restrições que devem ser levadas em consideração para garantir a estabilidade numérica. A estabilidade numérica da cossimulação pode ser afetada devido as inconsistências advindas do processo de atualização dos subsistemas frente a uma perturbação e a depender desse evento. Em (6) é apresentado um desenvolvimento matemático na qual conclui-se que a condição que garante uma condição que garante a estabilidade numérica da cossimulação é dada por $Z_{ATP} > Z_{Anatem}$. Deve-se salientar que embora satisfazendo a condição imposta não necessariamente os resultados obtidos deixarão de apresentar um comportamento oscilatório durante um período de acomodação. Desse modo essa condição é utilizada como um limite inferior para verificação da estabilidade numérica da cossimulação.

3.1 - Sistemas desequilibrados e faltas assimétricas

A condição apresentada anteriormente para verificar a estabilidade numérica da cossimulação é válida para sistemas equilibrados e/ou sujeitos a faltas simétricas, uma vez que as impedâncias utilizadas são de sequência positiva e para esses casos só há a presença da componente de sequência positiva. Para faltas assimétricas há a presença de componentes de zero, negativa e positiva não permitindo a utilização do mesmo artifício. Desse modo é necessário obter uma impedância equivalente de sequência positiva do ATP que leve em consideração as demais componentes de sequência. Desse modo, é apresentado a seguir um desenvolvimento matemático para a estimação dessa impedância.

A Figura 2 apresenta o sistema teste utilizado para o desenvolvimento matemático, na qual as impedâncias de sequência são iguais. O evento a ser analisado é uma falta monofásica na barra de carga (barra 3). Para esse tipo de falta a corrente de falta de sequências são dadas pela equação (1):

$$I_{fa}^{(1)} = I_{fa}^{(2)} = I_{fa}^{(0)} = \frac{V_f}{Z_{kk}^{(1)} + Z_{kk}^{(2)} + Z_{kk}^{(0)} + 3Z_f} \quad (1)$$

Nesta equação V_f refere-se a tensão pré-falta, Z_{kk} é a impedância equivalente de Thévenin vista pela barra k e Z_f é a impedância de falta.

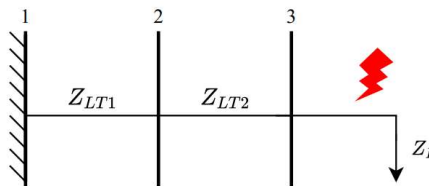


Figura 2 – Sistema teste utilizado para o desenvolvimento matemático.

O arranjo das redes de sequência para falta monofásica na barra 3 é apresentado na Figura 3. Com o intuito de trabalhar com a rede de sequência positiva, foi utilizado a corrente I_X que é uma parcela de $I_{fa}^{(1)}$ visto que $I_{fa}^{(1)} = I_X + I_Y$. I_X pode ser obtido através de um divisor de corrente dado pelas equações (2) e (3):

$$I_X^{(1)} = \frac{Z_L^{(1)}}{Z_L^{(1)} + Z_{LT2}^{(1)}} I_{fa}^{(1)} \quad (2)$$

$$I_X^{(1)} = \frac{V_f Z_L^{(1)}}{Z_L^{(1)}} I_{fa}^{(1)} \quad (3)$$

A impedância equivalente de Thévenin é para esse caso a associação em paralelo entre Z_{LT2} e Z_L . Dessa forma a equação (3) pode ser reescrita pela equação (4):

$$I_X^{(1)} = \frac{Z_L^{(1)} V_f}{(Z_L + Z_{LT2}) 3 \cdot \left[\left(\frac{1}{Z_{LT2}} + \frac{1}{Z_L} \right)^{-1} + Z_f \right]} \quad (4)$$

Encontrada I_X , que seria a corrente de sequência positiva demandada pelo subsistema interno, é possível através da utilização da Lei de Ohm encontrar a impedância equivalente do subsistema interno de sequência positiva vista pelo Anatem. Essa impedância é encontrada através da equação (5):

$$Z_{ATP}^{(1)} = \frac{(Z_L + Z_{LT2}) 3 \cdot \left[\left(\frac{1}{Z_{LT2}} + \frac{1}{Z_L} \right)^{-1} + Z_f \right]}{Z_L} \quad (5)$$

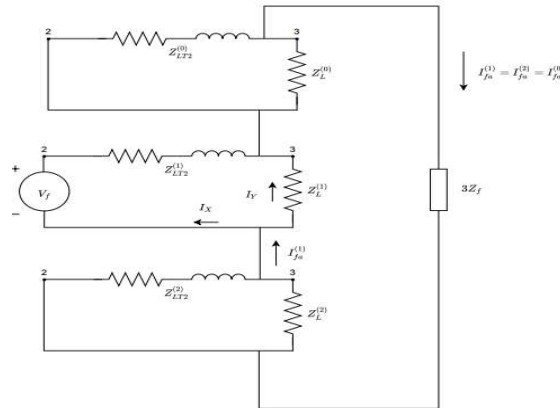


FIGURA 3 – Conexão das redes de sequência para falta monofásica.

4.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Visando validar a metodologia apresentada são utilizados dois sistemas testes, com o intuito de observar o comportamento de grandezas para um estudo apropriado. Em seguida é avaliada a estabilidade numérica da cossimulação para o sistema teste 1 para aplicação de curto-circuito trifásico e curto-circuito monofásico no subsistema interno.

4.1 - Sistema teste 1

Um sistema simples de 3 barras foi escolhido visando uma análise mais transparente dos resultados, uma vez que sistemas maiores ou com elementos de eletrônica de potência seriam complexos para uma abordagem inicial, tornando difícil os diagnósticos de erros. Este sistema é composto por uma carga alimentada por uma barra infinita através de duas linhas de transmissão, como visto na Figura 4 e na qual pode-se verificar as regiões modeladas em cada software. O evento aplicado foi um curto-circuito trifásico na barra de carga (barra 100), utilizando uma impedância de falta de $Z_f = 10 \Omega$ e com uma duração de 150 ms, sendo a aplicação em 200 ms e a remoção em 350 ms.

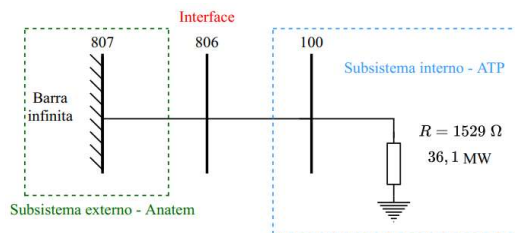


FIGURA 4 – Sistema teste 1.

A barra de interface é um elemento de grande importância no processo da cossimulação, uma vez que é o elemento responsável por transferir o comportamento de um subsistema para o outro. Dessa forma, esse elemento torna-se um ponto crucial para a análise dos resultados do sistema.

A Figura 5a apresenta a tensão na barra de interface para ambas as ferramentas. Percebe-se que os valores de regime apresentam elevada compatibilidade (superior à 99%), e que durante o transitório apresentam diferenças inerentes ao método. Os valores de regime após a acomodação dos transitórios novamente tem elevada compatibilidade. Tais inferências são também extensíveis à Figura 5b para o ângulo do fasor de sequência positiva de tensão.

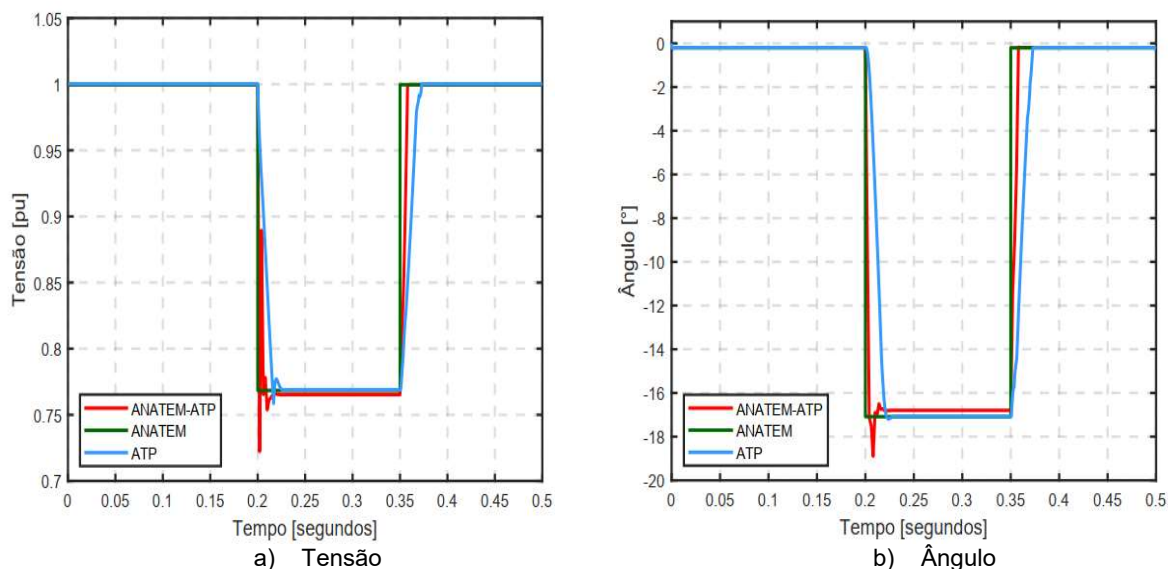


FIGURA 5 – Grandezas da barra de interface para o sistema teste 1.

As diferenças verificadas para ambas as abordagens, durante o evento, devem-se principalmente às diferenças de representação dos modelos de componentes. No Anatem a rede elétrica é algébrica, dessa forma as variações de tensão e potência após a aplicação do curto-circuito são instantâneas, o que não ocorre no ATP que possui a rede elétrica representada por equações diferenciais, resultando em variações não instantâneas, segundo uma constante de tempo (2).

O fluxo de potência ativa e reativa através da barra de interface estão ilustrados nas Figuras 6a e 6b nas quais pode-se observar uma resposta coerente quando comparado aos softwares individualizados. Comparando os resultados obtidos pela cossimulação com os do ATP, a máxima diferença observada durante o evento foi de 1,63% para a potência ativa e de 1,12% para a potência reativa.

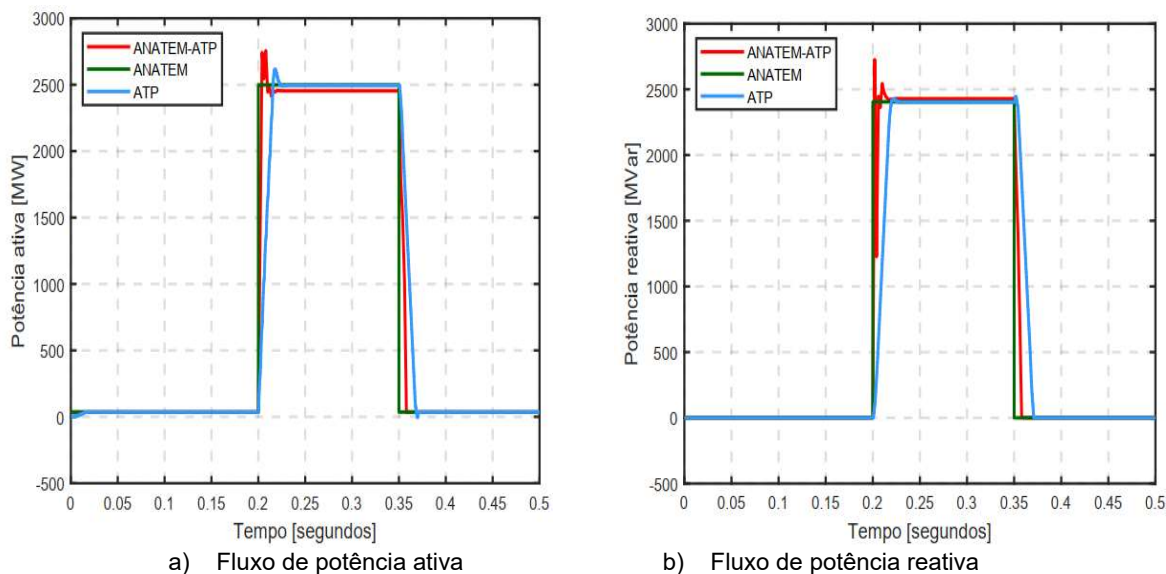


FIGURA 6 – Fluxo de potência através da barra de interface.

Além da verificação das grandezas fasoriais é interessante analisar o comportamento instantâneo das grandezas uma vez que essas tendem a representar mais precisamente o comportamento da grandeza, visto que uma rápida variação dessa poderia não ser representada da maneira mais apropriada no formato fasorial. A Figura 7a apresenta as tensões na barra de interface, pode-se verificar que antes da aplicação do curto-circuito (200 ms) os valores das correntes, ilustradas na Figura 7b e das tensões resultantes da cossimulação apresentaram grande coerência em relação aos resultados obtidos no ATP. Assim como verificado na forma fasorial logo após o evento é visto diferenças entre os valores de referência e os obtidos na cossimulação, devido aos cálculos empregados para a atualização dos subsistemas.

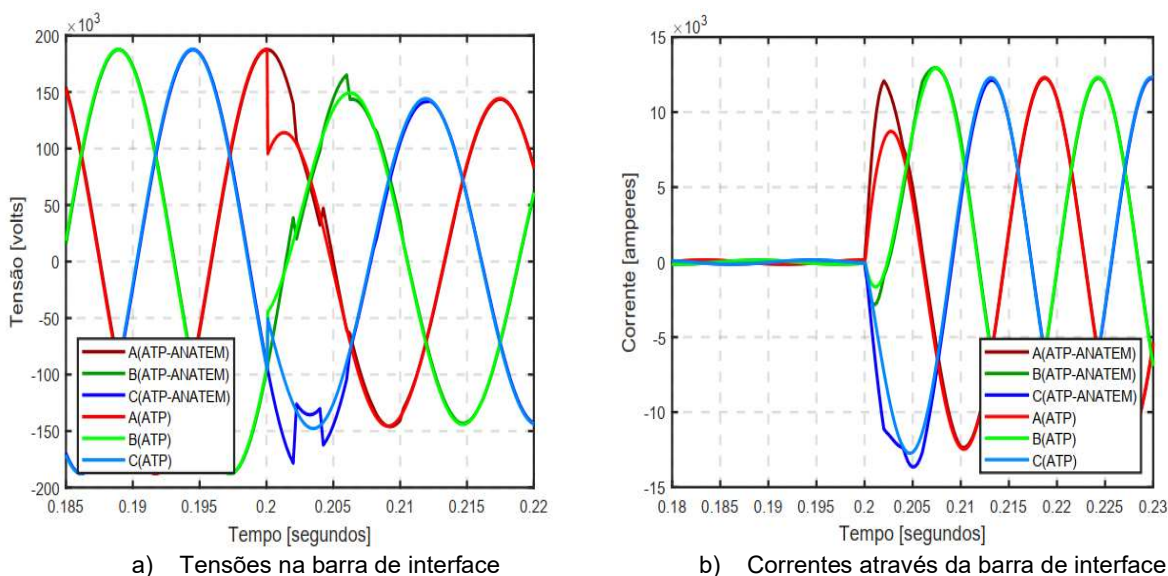


FIGURA 7 – Grandezas na forma de onda.

Uma questão que se deve atentar é o tempo de processamento e esse está relacionado ao protocolo de comunicação, uma vez que a troca de informações entre o ATP e Anatem não é dada de forma direta, mas sim através do uso de arquivos .PLT (arquivo texto para plotagem do Anatem), via função SINARQ, como intermediadores. Esse processo de escrita e leitura desses arquivos eleva o tempo de execução de forma significativa, como é apresentado na Tabela 1.

TABELA 1- Comparativo entre os tempos de processamento das ferramentas.

Ferramenta	Simulação (segundos)	Processamento (segundos)
------------	-------------------------	-----------------------------

Anatem	0,5	0,01
ATP		0,03
ATP-ANATEM		118

4.2 - Sistema teste 2

Semelhante ao sistema teste 1 foi proposto a utilização de um sistema de 3 barras, porém tendo como diferencial uma máquina síncrona em substituição à barra infinita e um transformador ligando a barra do gerador à barra de interface. O modelo de Bergeron foi utilizado na representação da linha de transmissão por levar em conta os parâmetros distribuídos da linha e a influência das ondas viajantes e dessa forma conseguir representar de forma mais fiel os transitórios eletromagnéticos. A topologia do sistema teste 2 é apresentada na Figura 8. O intuito dessa abordagem é de verificar se a dinâmica do gerador se comporta de maneira coerente quando comparada com o ATP e Anatem individualizados.

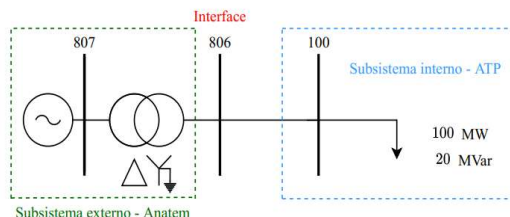


FIGURA 8 – Sistema teste 2.

O evento aplicado consistiu em um curto-circuito trifásico ($Z_f = 10 \Omega$) na barra de carga por um período de 150 ms. A seguir são apresentadas as principais grandezas monitoradas do sistema. Para esse experimento inicialmente pode-se notar que no momento de inicialização das variáveis ocorre uma diferença em relação à referência, a qual pode ser explicada devido a influência das ondas viajantes no sistema teste.

As curvas de tensão obtidas para a barra de interface estão apresentadas na Figura 9a. Assim como para o primeiro sistema analisado, para a simulação em ATP utilizou-se um *models* para a leitura do fasor de tensão e devido ao algoritmo utilizado por esse, foram constatadas pequenas diferenças nos tempos de descida (22,95 ms) e subida (23,3 ms) durante o evento, quando comparado com o Anatem. Com relação ao resultado da cossimulação, mesmo tendo diferenças durante a aplicação do evento, isto não impacta o resultado da cossimulação. Com relação ao ângulo monitorado da barra de interface, apresentado na Figura 9b a diferença ocasionada pelo transitório foi mais evidente do que para o fasor de tensão. Essa grandeza mostrou-se mais sensível no método de cossimulação. Mas novamente, não afetando de forma significativa e gerando um resultado satisfatório.

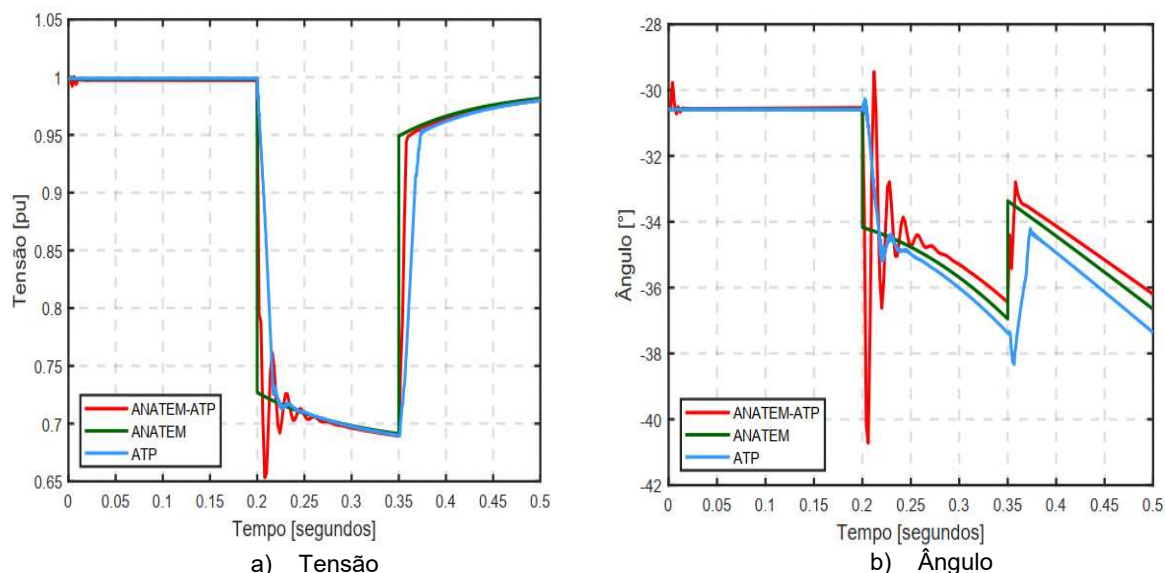


FIGURA 9 – Grandezas da barra de interface.

Além de verificar a tensão e o ângulo da barra de interface é de suma importância analisar o comportamento dinâmico da máquina através da potência ativa e reativa geradas. A Figura 10a apresenta a potência ativa gerada pela máquina. Uma contribuição da cossimulação pode ser verificada logo após a aplicação do evento, na qual é vista

uma oscilação eletromagnética que não é aferida pelo sistema implementado em Anatem, mas verificado no ATP. A outra grandeza a ser analisada é a potência reativa a qual é apresentada na Figura 10b. Pode-se verificar uma aderência da resposta obtida pela cossimulação, verificando assim como para a potência ativa, a presença de uma dinâmica presente no ATP que foi incorporado pelo método.

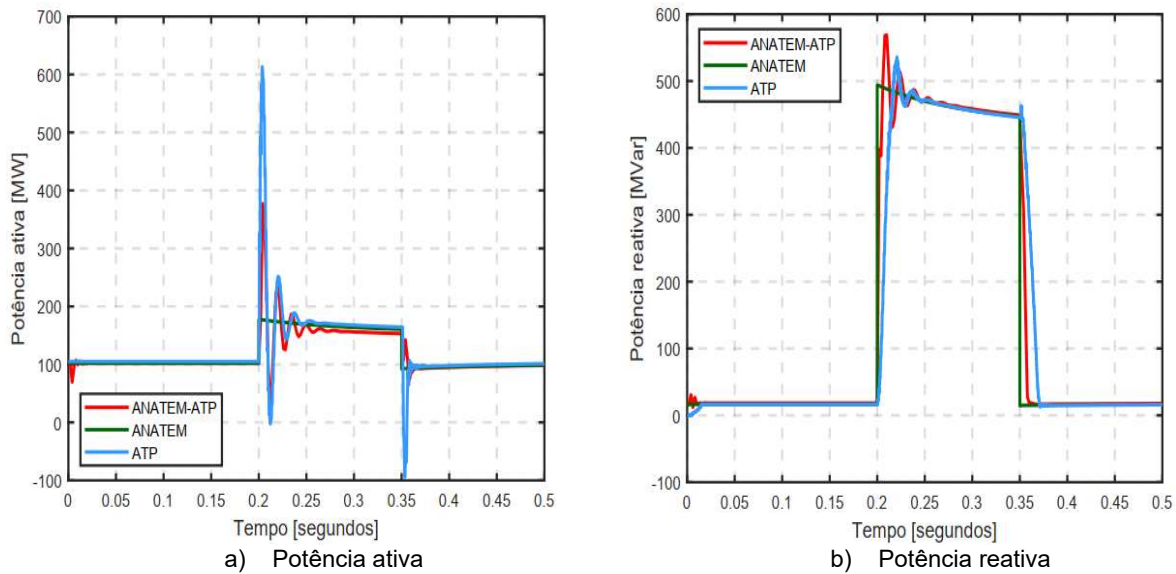


FIGURA 10 – Geração da máquina síncrona.

Feita as análises a respeito das grandezas elétricas na forma fasorial é interessante realizar uma comparação da tensão e da corrente através da barra de interface na forma de onda. As tensões para cada fase da barra de interface são apresentadas na Figura 11a na qual é observado um comportamento coerente entre as simulações. Ainda na Figura 11a é visto que há a presença de transitórios eletromagnéticos com mais intensidade para a simulação em ATP quando comparado com a cossimulação. Isso ocorre, pois as formas de onda advindas da cossimulação são puramente senoidais, uma vez que são geradas por uma fonte de tensão trifásica. A Figura 11b apresenta a corrente na forma de onda através da barra de interface, pode-se observar que após aproximadamente 50 ms da aplicação do evento, os sinais comparados voltam a se condizer.

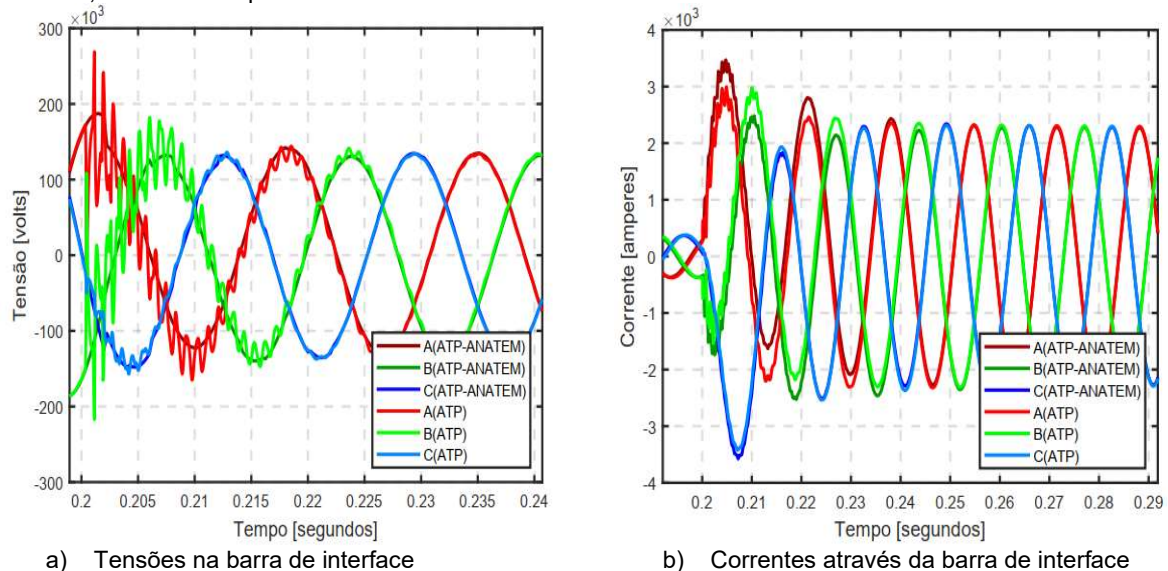


FIGURA 11 – Grandezas na forma de onda.

4.3 - Análise da estabilidade numérica

A análise da coerência dos resultados é crucial para a difusão do uso da cossimulação, assim, além da precisão dos resultados, deve-se garantir a estabilidade do processo, no sentido numérico. Dessa forma, com base nos conceitos

teóricos apresentados anteriormente são feitas análises para dois eventos distintos: curto-circuito trifásico e curto-circuito monofásico. Para ambos os eventos foram utilizados diversos valores de impedância de falta (Z_f) para verificar a questão da estabilidade numérica.

Para o sistema teste 1 temos que a impedância entre as barras 807 e 806 é $Z_{LT1} = 0,1 + j1,0 \%$, a impedância entre a barra 806 e 100 é $Z_{LT2} = 0,1 + j1,0 \%$ e a impedância da carga $Z_L = 276,4 \%$. Assim, inicialmente a impedância equivalente do Anatem é dada unicamente por Z_{LT1} , assim $Z_{Anatem} = 0,1 + j1,0 \%$ e a impedância equivalente do ATP é dada pela soma da impedância Z_{LT2} mais a impedância da carga Z_L , dessa forma $Z_{ATP} = 276,5 + j1,0 \%$ satisfazendo a condição $Z_{ATP} > Z_{Anatem}$. Quando é introduzido um curto-circuito a topologia da rede é alterada, desse modo as impedâncias equivalentes dos subsistemas podem ser alteradas a depender do ponto de aplicação da falta. Para a aplicação de um curto-circuito trifásico na barra de carga com impedância de falta Z_f , a nova impedância de carga Z_L' é dada pelo paralelo entre Z_L e Z_f . Utilizando por exemplo, $Z_f = 0,1 \Omega$ a impedância equivalente do ATP é alterada para $0,1189 + j1,0 \%$, embora essa impedância seja maior que a impedância equivalente do Anatem ocorrem oscilações numéricas nos resultados advindos da cossimulação como ilustra a Figura 12a para a tensão na barra de interface. Sendo assim, é necessário utilizar valores maiores para Z_f e através da Figura 12a pode-se constatar que a utilização de valores a partir de 5Ω são eficazes para garantir a estabilidade numérica.

Como comentando anteriormente, para faltas desequilibradas a impedância equivalente de sequência positiva do ATP não é obtida de forma direta, uma vez que se deve levar em conta as demais componentes de sequência. Essa impedância é obtida através da utilização da equação (5). Utilizando $Z_f = 0,2 \Omega$, $Z_{ATP}^{(1)}$ apresenta um valor de $0,4135 + j3,0004 \%$ o qual é maior que a impedância equivalente do Anatem, porém os resultados obtidos da cossimulação apresentam oscilações não factíveis como se pode observar através da Figura 12b. Assim como para a análise de curto-trifásico, é necessária uma elevação da impedância de falta e agora a utilização de impedância de falta a partir de 3Ω garante a propriedade da estabilidade numérica durante a aplicação do evento.

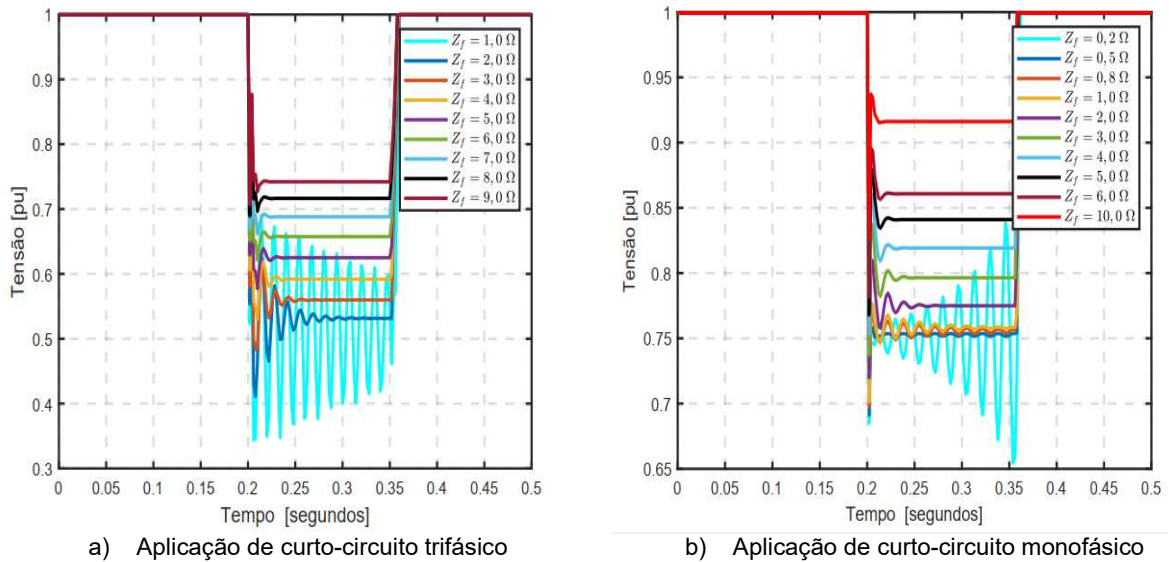


FIGURA 12 – Tensão na barra de interface em função da impedância de falta.

5.0 – CONCLUSÕES

A cossimulação vem para conciliar o Anatem e o ATP, duas ferramentas distintas, como uma tentativa de combinar os benefícios de ambas as ferramentas e produzir resultados que conduzam à operação mais segura e confiável. Neste artigo através da utilização da ferramenta de código aberto ATP-ANATEM, foram avaliados os resultados obtidos em comparação aos softwares individualizados e verificadas condições que propiciem um melhor aproveitamento do método, como a questão da estabilidade numérica da cossimulação.

Com relação ao tempo de simulação, esse mostrou-se como uma desvantagem da cossimulação utilizada. Isso ocorreu, pois a forma como é dada a transferência das variáveis de interface entre o Anatem e o ATP não é feita de forma direta, mas através do uso de arquivos .PLT. E esse procedimento eleva consideravelmente o tempo de execução do método.

Os resultados obtidos demonstraram o potencial da proposta e encorajam a extensão dos estudos para sistemas maiores e complexos, pois embora tenha sido utilizados elementos elementares verificou-se que a dinâmica presente no ATP, sistema detalhado, foi repassada para o Anatem. Verificando desse modo uma contribuição do método.

6.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ESPINOZA, R. G. F., LEÃO, F. B., MANTOVANI, J. R. S. Simulation Environment of Distance Protection with ATP and Foreign Models. IEEE Electrical Power and Energy Conference. p.146-151. ISBN 9781457704048.
- (2) SANTOS, P. H. L. dos. Simulação Híbrida no Domínio do Tempo – Integração entre Ferramentas de Transitórios Eletromagnéticos e Eletromecânicos. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2014.
- (3) THEODORO, T. S. Simulação Híbrida no Domínio do Tempo de Transitórios Eletromecânicos e Eletromagnéticos: Integração de Um Aerogerador de Indução Duplamente Excitado. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF, Juiz de Fora, 2016.
- (4) ESPINOZA, R. G. F. et al. Real-time RMS-EMT co-simulation and its application in HIL testing of protective relays. Electric Power Systems Research, v. 197, n. Abril, 2021. ISSN 03787796.
- (5) JALILI-MARANDI, V. et al. Interfacing techniques for transient stability and electromagnetic transient programs: IEEE task force on interfacing techniques for simulation tools. IEEE Transactions on Power Delivery, v.24, n.4, p. 2385-2395, 2009. ISSN 08858977.
- (6) REN, W., STEURER, M., BALDWIN, T. L. Improve the stability and the accuracy of power hardware-in-the-loop simulation by selecting appropriate interface algorithms. IEEE Transactions on Industry Applications, v.44, n. 4, p. 1286-1294. ISSN 00939994.

DADOS BIOGRÁFICOS



Vitor Francisco Bassi De Franchi Siqueira - Nascido em 20/09/1997 em Umuarama-PR, está finalizando o curso de Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste (previsão de término em setembro de 2021). Atualmente é estagiário da Itaipu Binacional na Divisão de Estudos e Normas (OPSE.DT).

(2) RENZO GROVER FABIÁN ESPINOZA
Possui graduação em Engenharia Elétrica - Universidad Nacional de Ingeniería (2008), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2011) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (2015). Foi pesquisador de pós-doutorado na UFPB e UNICAMP entre 2016 e 2018. Atualmente é pesquisador no Parque Tecnológico Itaipu, atuando no Centro de Competência em Automação e Simulação de Sistemas Elétricos. Suas áreas de interesse são simulação em tempo real de sistemas elétricos, programação em tempo real, assim como proteção e controle de sistemas elétricos.

(3) JONAS ROBERTO PESENTE
Doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina e colaborador de Itaipu Binacional na divisão de estudos elétricos e normas.