

# Co-simulation of a Doubly Fed Induction Generator Connected to a Power Network: The use of DSOGI for Phasor Extraction

T. Theodoro, M. Tomim, P. Barbosa, *Senior, IEEE*, A. Lima, *Senior, IEEE*, and M. Correia, *Life Fellow, IEEE*

**Abstract**—This work presents a hybrid simulation tool that combines fast analysis of transient stability programs with accurate results of electromagnetic transients ones to evaluate the dynamic behavior of transmission power systems with high penetration of power electronic-based devices. The interaction between the two programs is performed by controllable current and voltage sources, which are used to interface external and detailed systems. The double second order generalized integrator is used to extract the positive-sequence phasor to transfer information between the environments. A local network server controls the data communication between the two simulation environments by means of the TCP/IP protocol. In the present paper, the proposed tool is used to simulate the integration of a aggregate wind power plant, based on a doubly-fed induction generator, into a 29-bus electrical network. Results and computational timings are then compared with the ones obtained with an electromagnetic transients program, demonstrating the accuracy and speed of the proposed strategy.

**Index Terms**—Hybrid simulation, Co-simulation, Electromagnetic transients, Transient stability, Power Electronic Penetration.

## I. INTRODUÇÃO

OS PROGRAMAS de estabilidade transitória (do inglês, *Transient Stability*) (TS) são ferramentas tradicionalmente utilizadas em estudos de estabilidade angular, sintonia de controladores, regulação de tensão, suporte de potência reativa, gerenciamento de serviços auxiliares, entre outros. De uma forma geral, tais programas incorporam equações que consideram as dinâmicas dos eixos das máquinas elétricas, seus reguladores de tensão e velocidade, bem como das cargas conectadas à rede elétrica. Nestes estudos, os fenômenos elétricos mais rápidos, envolvendo os circuitos elétricos da rede e dos estatores das máquinas não são considerados [1], e no caso de sistemas tradicionalmente equilibrados, como os de transmissão, as redes são representadas por circuitos equivalentes monofásicos de sequência positiva no domínio da frequência. Exemplos de programas de TS são o ANATEM e o PSS/E [2]. Não obstante, nos estudos de sistemas com alta penetração de geração distribuída e elevados índices de desequilíbrio, como é o caso das redes de distribuição, deve-se modelar todas as fases do sistema para caracterizar com precisão seu comportamento. O Simulight [3] e o InterPSS [4]

são exemplos de ferramentas computacionais com capacidade de realizar tais simulações.

Do outro lado, existem estudos que demandam análises detalhadas de fenômenos elétricos rápidos, de natureza eletromagnética, como no caso dos sistemas de proteção, coordenação de isolamento, operações de comutação, entre outros. Nesses casos, os programas de transitórios eletromagnéticos (do inglês, *Electromagnetic Transients*) (EMT) devem ser utilizados. Os programas EMT resolvem, no domínio do tempo, um conjunto de equações algébricas e diferenciais que consideram: desequilíbrios de rede, modelagem detalhada de componentes, comutação de conversores eletrônicos de potência e elementos não-lineares como, por exemplo, reatores e transformadores saturáveis. Esse tipo de abordagem produz resultados mais precisos em detrimento de um maior esforço computacional e um tempo de processamento mais longo [5]. Essas características acabam limitando o tamanho do sistema elétrico capaz de ser modelado e simulado.

Com a intenção de combinar as vantagens das duas técnicas de simulação mencionadas anteriormente, a co-simulação ou simulação híbrida (do inglês, *Hybrid Simulation*) (HS) surge como uma alternativa. Esta técnica consiste da junção de duas ou mais ferramentas computacionais formando um único ambiente de simulação multi-modelo, capaz de realizar diferentes tipos de estudos com precisão numérica satisfatória e tempos reduzidos de processamento [6, 7].

A primeira abordagem de simulação híbrida foi proposta por Heffernan et al. em 1981 [6]. Neste trabalho foi analisado um sistema composto por geradores síncronos convencionais interligados por um elo de transmissão em corrente contínua em alta tensão (do inglês, *High Voltage Direct Current Transmission System*) (HVDC). Avanços mais recentes introduziram técnicas de relaxamento [8] e abordagens em tempo real [9] com foco na avaliação do desempenho em sistemas elétricos maiores e mais complexos. Uma visão geral das técnicas e ferramentas de simulação híbrida pode ser encontrada em [10].

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta uma metodologia de interface entre ferramentas de simulação de EMT e TS destinada a auxiliar no estudo redes elétricas com elevada penetração de dispositivos baseados em eletrônica de potência. Embora a plataforma computacional utilizada neste trabalho tenha sido o MATLAB/Simulink, a metodologia proposta pode ser aplicada para conectar outras plataformas comerciais, como o PSCAD/EMTDC, ou de domínio público, como ATP. A efetividade da metodologia proposta será avaliada usando um sistema equivalente de transmissão (765kV) de

T.S. Theodoro, M.A. Tomim e P.G. Barbosa, Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais, Brasil, thainan.theodoro@engenharia.ufjf.br.

A.C.S. Lima, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

M.T. Correia de Barros, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal.

29 barras com a conexão de um parque eólico. A maior parte da rede é modelada no programa de TS (somente sequência positiva), enquanto o parque eólico é condensado em um único aerogerador de indução duplamente alimentado (do inglês, Doubly-Fed Induction Generator) (DFIG) e modelado com maior detalhe no programa de EMT. O modelo do DFIG inclui os conversores estáticos em conexão *back-to-back*, os controladores de tensão, corrente e moduladores PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*). A precisão da metodologia é avaliada quando o sistema é submetido a uma falha trifásica. Os resultados obtidos com a co-simulação são comparados com aqueles obtidos simulando toda a rede no programa EMT.

Paralelamente são apresentadas duas contribuições à técnica de co-simulação. Primeiro é utilizado um integrador generalizado de segunda ordem (do inglês, *Second Order Generalized Integrator*) (SOGI) para extrair o fasor de sequência positiva das formas de onda geradas no EMT. A segunda contribuição é um algoritmo de comunicação de baixo custo baseado no protocolo TCP/IP, chamado aqui de *Servidor*. Esta rotina, gerencia a troca de dados entre os programas TS e EMT, conferindo boa escalabilidade na conexão de diferentes plataformas de simulação.

Assim sendo, além da introdução apresentada na section I, este artigo foi organizado da seguinte forma: a section II apresenta os princípios básicos da co-simulação, incluindo os conceitos dos circuitos equivalentes, protocolo de comunicação e o algoritmo de extração fasorial. Na section III são apresentadas as principais características do sistema teste utilizado e os dados do *hardware* envolvido. A section IV discute os resultados de simulação, comparando a metodologia proposta com a abordagem completa no EMT. Finalmente, a section V apresenta conclusões do trabalho.

## II. DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA HÍBRIDA DE CO-SIMULAÇÃO

Antes de realizar a co-simulação de um sistema elétrico, é necessário dividir a rede em estudo em subsistemas: (i) externo e (ii) detalhado. A maior parte da rede é representada no *subsistema externo* e simulada no programa de TS com um passo de simulação grande. Do outro lado, uma pequena parte da rede é modelada no *subsistema detalhado* e simulada no programa de EMT com um passo de simulação pequeno. Os programas são executados simultaneamente, com a troca de dados durante a simulação por meio das barras de interface. Adicionalmente, os subsistemas externo e detalhado podem ser simulados em diferentes computadores, dividindo assim o esforço computacional.

Como os subsistemas são solucionados com passos de integração distintos, eventualmente erros numéricos não amortecidos, inerentes dos métodos de integração, podem causar divergência dos resultados. Para minimizar tais problemas, algumas abordagens são propostas na literatura, como por exemplo: (i) a atualização dos circuitos equivalentes dos subsistemas detalhado e externo durante o processo de simulação, (ii) utilização de um protocolo de comunicação, responsável pela sequência de troca de dados e (iii) escolha das variáveis de interface utilizadas na atualização. Nesta seção, são apresentadas as alternativas aplicadas na metodologia proposta,

assim como as suposições adotadas para justificar tais escolhas nesse trabalho.

### A. Circuitos Equivalentes de Interface

Diferentes enfoques são propostos e usados na literatura para representar as características de cada subsistema durante a co-simulação. O sistema externo, por exemplo, já foi representado por fontes de tensão controladas, circuitos equivalentes Thévenin/Norton [11] e circuitos equivalentes dependentes da frequência (do inglês, *Frequency Dependent Network Equivalents*) (FDNE) [12]. Por outro lado, o sistema detalhado tem sido representado por fontes de corrente controladas [11], impedâncias equivalentes e cargas PV ou PQ [13].

Neste trabalho, uma *fonte de tensão controlada* é usada para representar o sistema externo no lado-EMT, enquanto a parte detalhada da rede é modelada no lado-TS como uma *fonte de corrente controlada*. A Fig. 1 mostra a representação dos circuitos equivalentes do ponto de vista dos programas EMT e TS.

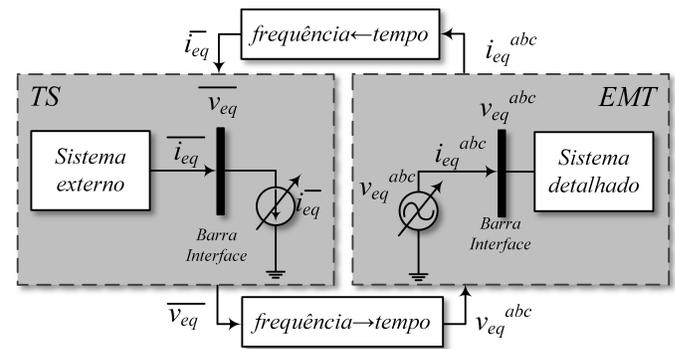


Fig. 1. Representação das características dos subsistemas externo (TS) e detalhado (EMT) através de circuitos equivalentes.

Os circuitos equivalentes são atualizados a cada *passo de comunicação* de acordo com as soluções dos programas de EMT e TS. Normalmente, tensão, corrente e potência na frequência fundamental (na maioria dos casos de sequência positiva) são as variáveis escolhidas [7, 10]. Uma vez que o lado-EMT lida com formas de onda no tempo e o lado-TS processa grandezas fasoriais próximas da frequência fundamental, dois métodos devem ser usados para converter as variáveis elétricas entre os domínios do *tempo* e *frequência*, e vice-versa. Essas rotinas devem ser implementadas na área detalhada do sistema, no caso o lado-EMT.

A fonte de tensão, que representa o lado-TS no lado-EMT, tem amplitude e fase controladas a partir do fasor de tensão da barra de interface, os quais são facilmente convertidos em formas de onda através de:

$$a(t) = \Re \left\{ \sqrt{2} \bar{A} e^{j\omega t} \right\} \quad (1)$$

onde  $\bar{A}$  é um fasor genérico na frequência  $\omega$  e  $a(t)$  é o sinal correspondente no domínio do tempo e  $\Re \{ \cdot \}$  é o operador real.

Já a representação das grandezas instantâneas no *sistema externo* requer o uso de técnicas de processamento de sinais para converter a forma de onda no domínio do tempo em

um fasor na frequência fundamental. Diferentes algoritmos são propostos na literatura para realizar esta tarefa, como por exemplo, o *Curve Fitting* e a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Neste trabalho será usado o SOGI.

### B. Conversão de Grandezas Entre os Domínios do Tempo e Frequência

A Fig. 2 mostra o diagrama de blocos do integrador generalizado de segunda ordem. Este circuito é um gerador de sinais em quadratura (do inglês, *Quadrature Signal Generator*) (QSG) [14] cujas tensões  $v'$  e  $qv'$  são sinais defasados de  $\pi/2$  rad entre si.

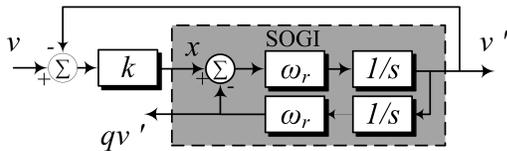


Fig. 2. Diagrama de blocos do integrador generalizado de segunda ordem (SOGI).

Da figura anterior pode-se escrever a seguinte relação no domínio- $s$  para os sinais temporais  $v'$  e  $x$ :

$$\frac{V'(s)}{X(s)} = \frac{\omega_r s}{s^2 + \omega_r^2}, \quad (2)$$

onde  $\omega_r$  é a frequência de ressonância do SOGI.

De (2), e tendo em mente do diagrama de blocos da Fig. 2, pode-se derivar as seguintes funções de transferência de malha fechada:

$$\frac{V'(s)}{V(s)} = \frac{k\omega_r s}{s^2 + k\omega_r s + \omega_r^2}, \quad (3)$$

e,

$$\frac{qV'(s)}{V(s)} = \frac{k\omega_r^2}{s^2 + k\omega_r s + \omega_r^2}. \quad (4)$$

onde  $V'(s)$  e  $qV'(s)$  são as transformadas de Laplace dos sinais  $v'$  e  $qv'$ , respectivamente.

As Fig. 3 e Fig. 4 ilustram as respostas em frequência de (3) e (4), para  $\omega_r = 377$  rad/s e diferentes valores do ganho  $k$ , respectivamente. Da Fig. 3 tem-se que o SOGI apresenta uma característica de filtro passa-banda (do inglês, *Band-Pass Filter*) (BPF). Note que quanto menor for o valor da constante  $k$ , mais seletiva será a resposta do SOGI-BPF. Por outro lado, a Fig. 4 mostra que a defasagem entre as componentes fundamentais das tensões  $v'$  e  $qv'$  dependerá diretamente da frequência de ressonância  $\omega_r$ .

Desse modo, se  $k$  e  $\omega_r$  forem escolhidos adequadamente, o sinal  $v'$  será senoidal e igual a componente fundamental da tensão  $v$ . Já  $qv'$  será a versão em quadratura (atrasado de  $90^\circ$ ) do sinal  $v'$ . Uma resposta criticamente amortecida pode ser obtida fazendo  $k = \sqrt{2}$ . Este valor de ganho resulta em uma escolha interessante em termos do tempo de estabilização e limitação do sobressinal de  $v'$  e  $qv'$ . Já a frequência de ressonância pode ser continuamente ajustada por um circuito de sincronismo (do inglês, *Phase-locked Loop*)

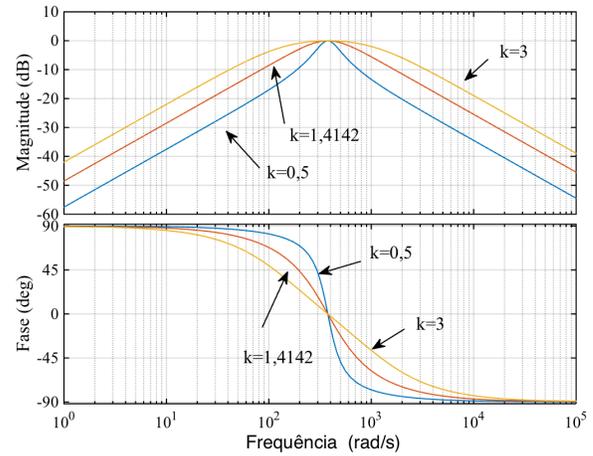


Fig. 3. Resposta em frequência da função de transferência de malha fechada  $V'(s)/V(s)$ .

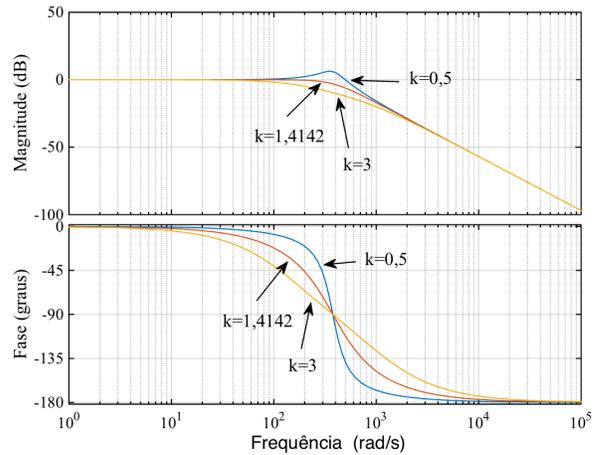


Fig. 4. Resposta em frequência da função de transferência de malha fechada  $qV'(s)/V(s)$ .

(PLL), tornando assim o SOGI-BPF adaptativo em frequência [14].

Aplicando a transformada de Clarke aos valores instantâneos das tensões trifásicas  $\mathbf{v}_{abc}$ , obtêm-se as componentes de seqüência positiva de um sinal trifásico distorcido e desbalanceado  $\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+$ ,

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+ = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} \mathbf{v}_{\alpha\beta}, \quad (5)$$

onde  $\mathbf{v}_{\alpha\beta}^+ = [v_\alpha^+ \ v_\beta^+]^T$  e  $\mathbf{v}_{\alpha\beta} = [v_\alpha \ v_\beta]^T$  são vetores nas coordenadas  $\alpha\beta$  com as componentes de seqüência positiva e as tensões trifásicas instantâneas, respectivamente;  $T$  é um índice usado para indicar o vetor transposto e  $q = e^{-j(\pi/2)}$  é o operador deslocamento no tempo de  $90^\circ$ .

A Fig. 5 ilustra um diagrama de blocos no qual dois SOGI-BPF são combinados para formar um DSOGI (do inglês, *Double Second Order Generalized Integrator*). Conforme mostrado

anteriormente, além das tensões filtradas  $v'_{\alpha\beta}$ , o DSOGI gera suas cópias em quadratura  $qv'_{\alpha\beta}$ . Rodriguez et al. [15] usaram o DSOGI para reproduzir (5) e extrair “instantaneamente” as tensões de sequência positiva e negativa em redes trifásicas desbalanceadas com o objetivo de sincronizar e controlar conversores eletrônicos de potência conectados à rede elétrica.

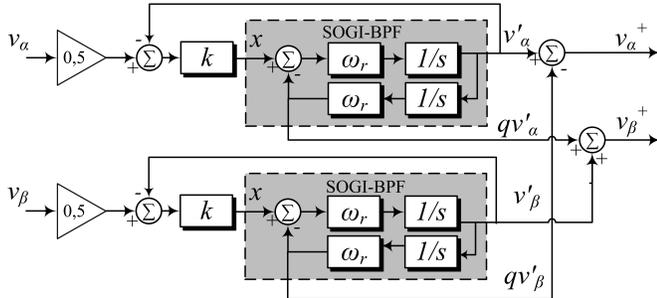


Fig. 5. Diagrama de blocos do DSOGI com dois SOGI-BPF.

A Fig. 6 mostra o diagrama de blocos do algoritmo utilizado neste trabalho para converter as tensões e correntes instantâneas na barra de interface para o domínio da frequência. Dois circuitos DSOGI, semelhantes aos mostrados na Fig. 5, são usados para extrair as componentes de sequência positiva instantânea da tensão e da corrente, respectivamente.

O DSOGI superior é alimentado pelas tensões trifásicas do barramento de interface. As saídas do DSOGI são as componentes da tensão instantânea de sequência positiva que alimentam o circuito PLL. O ângulo de saída do PLL,  $\rho$ , é usado para sincronizar o bloco da Transformação de Park ( $[T_{qd}]$ ), na parte inferior da Fig. 6. As saídas do bloco  $[T_{qd}]$  são usadas para calcular a magnitude e a fase da corrente. O PLL também retroalimenta o sinal da frequência de ressonância  $\omega_r$  do DSOGI, garantindo uma característica adaptativa em frequência.

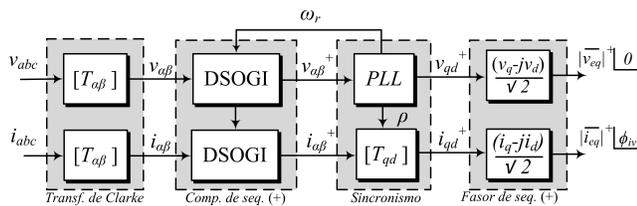


Fig. 6. Extração do fasor de sequência positiva usando a estrutura do DSOGI.

É importante mencionar que, como algoritmo DSOGI extrai a componente fundamental de sequência positiva das tensões e correntes trifásicas da barra de interface, essa abordagem apenas é válida para simular sistemas elétricos modelados em programas de TS.

Contudo, nada impede que a metodologia de co-simulação seja também usada em sistemas de distribuição. Como esses sistemas apresentam elevados índices de desequilíbrio, ao invés de extrair as componentes de sequência positiva, deve-se usar o SOGI somente filtrar os sinais das tensões e correntes nas barras de interface antes de simular a três fases aplicando a

metodologia anterior de maneira semelhante. Maiores detalhes desse tipo abordagem são apresentados em [16].

### C. O Protocolo de Comunicação

O *protocolo de comunicação* define as regras da troca de dados e sincroniza a comunicação entre os subsistemas externo e detalhado durante a co-simulação. Este protocolo pode ser implementado por hardware, software ou uma combinação destes, podendo ser classificado como sequencial ou paralelo [17, 18].

A medida que a simulação é executada, as grandezas elétricas na barra de interface são trocadas entre os dois subsistemas. Neste trabalho, o *passo de comunicação* foi definido empiricamente igual ao passo de integração do programa de TS. A Fig. 7 ilustra os passos da comunicação paralela entre os programas TS e EMT implementado neste trabalho.

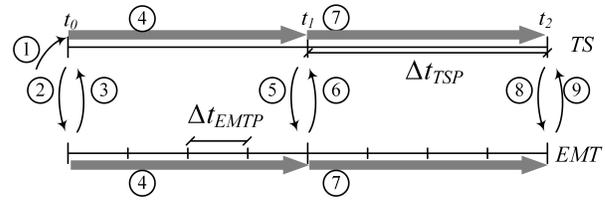


Fig. 7. Representação temporal do protocolo de comunicação.

A linha superior da Fig. 7 representa o tempo de simulação do sistema externo, enquanto a linha inferior representa o tempo de simulação do sistema detalhado. As setas grossas indicam as execuções dos programas, enquanto as setas finas representam a troca de dados entre as duas plataformas. Os números dentro dos círculos indicam a sequência das operações descrita a seguir,

- ① No início, o TS recebe a corrente de interface  $I_0^{in}$ , resultado do fluxo de potência, e atualiza a tensão na barra de interface,  $V_0(I_0^{in})$ ;
- ② O TS envia a tensão na barra de interface,  $V_0$ , para o EMT, que atualiza seu circuito equivalente de interface calculando a corrente inicial  $I_0(V_0)$ ;
- ③ O EMT, então, envia a corrente de interface ao TS, que atualiza novamente seu circuito de interface, como um passo de verificação;
- ④ Ambos programas são executados até  $t_1$ . Para o TS, é calculada a tensão  $V_1(I_0)$ , atrasada de um passo de comunicação, e para o EMT, é calculada a corrente  $I_1(V_1)$ , sem atraso.

Os passos ② e ③ correspondem aos passos ⑤ e ⑥ no instante  $t_1$ , enquanto o passo ⑦ indica o movimento da simulação para o ponto da próxima sincronização. Essas etapas são repetidas até o final da simulação.

### D. Implementação da Comunicação

Para facilitar a integração de ferramentas escritas com linguagens de programação diferentes, foi implementado um algoritmo, externo aos programas de simulação, chamado *Servidor*. Na Fig. 8, é ilustrado como os  $N$  Clientes (e.g.

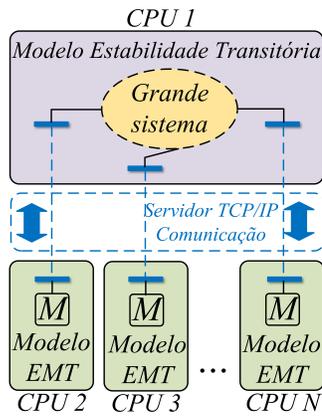


Fig. 8. Rede de comunicação para  $N - 1$  barras de interface.

programas EMT e TS) se conectam ao *Servidor* através de um protocolo TCP/IP.

Os dados das  $(N - 1)$  barras de interface são transmitidas ao *Servidor* que, em seguida, são re-transmitidos para os *Cientes*. Apesar de escrito em Matlab, este algoritmo poderia também ter sido reescrito em qualquer linguagem com suporte TCP/IP, como o Python ou Javascript.

A Fig. 9 ilustra o fluxograma de funcionamento do *Servidor*. Inicialmente, são definidos os endereços de IP, o tamanho dos *buffers*, etc. No segundo estágio é estabelecida a comunicação e a abertura dos canais TCP/IP. No laço principal, duas etapas são realizadas até o fim da simulação: (i) os dados são enviados de forma serial aos programas de TS e EMT e, (ii) os dados são recebidos, também de forma serial, pelo *Servidor*. Entre esses dois estágios, os programas de TS e EMT são executados paralelamente. Na rotina serial, o TS tem prioridade de receber os dados antes do EMT, dado que seu tempo de espera é menor. A rotina serial foi escolhida para contornar as limitações da plataforma de simulação e simplificar o código do *Servidor*, com pouco impacto no tempo computacional.

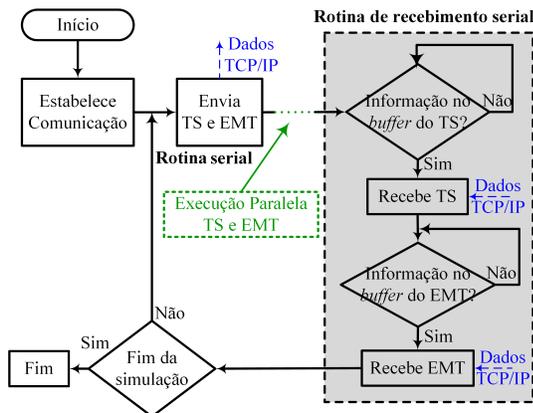


Fig. 9. Fluxograma de funcionamento do *Servidor*.

O uso do TCP/IP incorpora uma série de vantagens no processo de implementação da co-simulação, conforme elencado a seguir,

- Permite um rápido desenvolvimento de comunicação

entre processos, devido ampla utilização do protocolo TCP/IP;

- Permite o uso de uma vasta gama de computadores convencionais, facilitando o possível aumento de escala dos simuladores;
- Possui infraestrutura de rede de baixo custo, sem a necessidade de hardware especializado.

A perda de dados durante a comunicação não afeta a precisão da co-simulação, já que o protocolo TCP/IP possui algoritmos internos de detecção de falha da transmissão de dados e a retransmissão dos pacotes. Além disso, o *protocolo de comunicação* suspende a execução das simulações nos programas TS e EMT até que a troca de dados sejam completamente executada.

Não foi determinado o número máximo de *Cientes* TCP/IP compatível com metodologia proposta. Porém, fatores como precisão e convergência são mais preponderantes, tendo em vista que servidores TCP/IP sustentam facilmente milhares de conexões simultâneas.

### E. Convergência da Co-Simulação

Os problemas de estabilidade envolvendo a co-simulação de sistemas equações algébrico-diferenciais (do inglês, *Differential-Algebraic Equations*) (DAE), com constantes de tempo distintas, são semelhantes aqueles observados quando métodos de integração semi-implícitos são aplicados na solução clássica dessas equações [19]. Contudo, na co-simulação essas dificuldades são ainda maiores, uma vez que os diferentes sistemas são resolvidos com métodos integração e programas distintos. Nestes casos, o acoplamento das DAEs é chamado de *weak-coupling* e, a co-simulação desses sistemas só pode ser realizada caso as variáveis de interface tenham constantes de tempos compatíveis com o protocolo de comunicação.

Os erros introduzidos pela diferença de passos de simulação são amenizados utilizando técnicas que se baseiam em troca de dados. Neste trabalho, destacam-se os circuitos de interface e o protocolo de comunicação. Quanto maior for a variação das grandezas na barra de interface, maior será o erro e menos preciso será o circuito equivalente, devendo este ser reavaliado assim como o protocolo de comunicação. Além disso, o número de sistemas detalhados conectados pode também influenciar na convergência do sistema.

No presente estágio de desenvolvimento, os autores não prepararam nenhum estudo sobre índices ou limites mínimos para que uma barra possa ser escolhida como de interface. Como sugestão, pode-se usar a relação de curto-circuito (do inglês, *Short-circuit ratio*) (SCR) resultante da razão entre a potência de curto-circuito da barra de interface e a potência nominal do dispositivo ou parte da rede modelada no sistema detalhado. Contudo, esses pontos ainda estão abertos e necessitam de maiores investigações.

### F. Comparação Quantitativa da Precisão

O erro absoluto integral normalizado (do inglês, *Normalized Integral Absolute Error*) (NIAE) foi usado para comparar os resultados obtidos com a co-simulação com aqueles resultantes

da simulação de todo o sistema no programa de EMT. Esse índice é uma variação do erro absoluto integral (do inglês, *Integral Absolute-error*), porém, normalizado pela curva de referência, conforme mostrado a seguir:

$$NIAE = 1 - \frac{\int_0^t |x^* - x| dt}{\int_0^t x^* dt}, \quad (6)$$

onde  $x^*$  é o sinal de referência e  $x$  o sinal comparado.

Pereira et al. [20] afirmam que um  $NIAE \geq 0,95$  permite considerar o modelo “adequado”.

### III. MODELAGEM DO SISTEMA TESTE

#### A. Aerogerador DFIG

A Fig. 10 mostra o diagrama esquemático do aerogerador DFIG usado como equivalente do parque eólico neste trabalho. Dois conversores fonte de tensão (VSC) em conexão *back-to-back* interligam o rotor da máquina à rede, enquanto o estator é ligado diretamente no ponto de conexão do sistema.

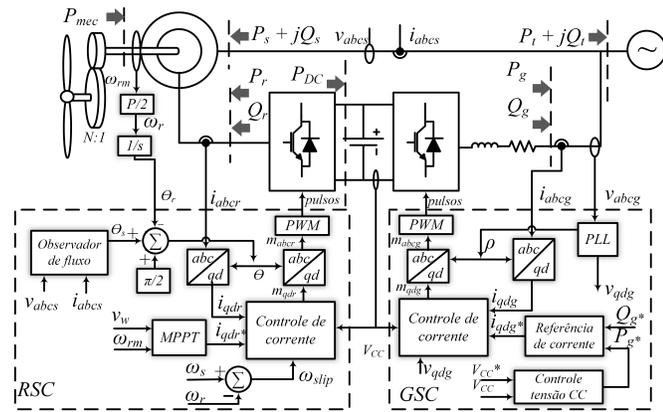


Fig. 10. Diagrama esquemático simplificado do aerogerador DFIG e seus controladores.

O controle do aerogerador é dividido em duas partes: (i) o controlador do lado da rede (do inglês, *Grid Side Controller*) (GSC) e, (ii) o controlador do lado do rotor (do inglês, *Rotor Side Controller*) (RSC). O GSC lida com o controle de tensão do barramento CC e o suporte de energia reativa à rede, usando controle vetorial enquanto o RSC controla o torque e mantém o nível de fluxo da máquina, usando o controle de orientação de campo (FOC) [21].

#### B. Sistema Elétrico de Potência

A Fig. 11 mostra o diagrama unifilar do sistema teste usado neste trabalho. O sistema elétrico de 735 kV e 29 barras é baseado no sistema Canadense da Hydro-Quebec disponível em [22]. Este sistema é composto por seis usinas hidrelétricas, incluindo seus reguladores de tensão, controladores de excitação e sistemas estabilizadores de potência (PSS), totalizando 26,2 GW. O parque eólico da Fig. 10 é conectado na barra 29 do sistema e tem potência nominal de 10 MW.

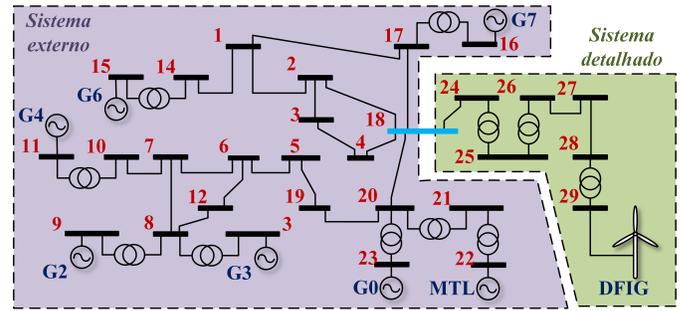


Fig. 11. Diagrama unifilar do sistema de teste.

#### C. Sistemas Detalhado e Externo

A barra 18 foi escolhida empiricamente como barra de interface da co-simulação. A *toolbox SimPowerSystems* do MATLAB é empregada tanto para a simulação eletromagnética quanto para eletromecânica. O aerogerador DFIG, juntamente com algumas linhas e três transformadores, estão em uma instância do EMT, enquanto o restante da rede elétrica fica em outra instância do TS. As instâncias podem estar em computadores diferentes ou não, no entanto para o primeiro caso, o esforço computacional tem a vantagem de ser compartilhado. Todo o sistema foi também simulado no EMT para efeito de comparação de resultados e verificação da precisão.

A solução EMT do sistema equivalente DFIG exige um passo de simulação, pelo menos, 10 a 100 vezes menor do que o período de amostragem do controlador para manter a precisão. Para uma frequência de comutação de 2 kHz, o passo de simulação do lado-EMT foi escolhido para ser 50  $\mu$ s, enquanto o lado-TS foi resolvido com um passo de 4 ms. O EMT completo também exigiu um tempo de 50  $\mu$ s.

Nas simulações foram empregados dois computadores portáteis (*laptops*): (i) DELL Inspiron 15, com processador i7-5500U, 2.40 GHz, 8 GB RAM, e (ii) Samsung X23, com processador i5-5200U, 2.2 GHz, 8 GB RAM. É importante enfatizar que os tempos de simulação não são absolutos devido sua dependência com o hardware empregado e a velocidade do canal de comunicação.

### IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para testar o desempenho da simulação híbrida, em  $t = 0,2$  s, foi aplicada uma falha trifásica, de 100 ms de duração, na barra 20 do sistema teste da Fig. 11. As Figuras 12 (a), (b) e (c) mostram as formas de ondas da tensão, corrente e potência ativa no barramento de interface. A diferença observada nas formas de onda das correntes (Figura 12 (b)) nos instantes próximos as discontinuidades são devidas aos: (i) método de integração adotado e (ii) protocolo de comunicação, ambos de passo fixo. O uso do passo fixo de 4 ms no TS e no protocolo de comunicação introduzem um atraso na atualização das correntes nos instantes posteriores às discontinuidades. Os efeitos provocados por esse atraso no decorrer da simulação necessitam de maiores investigações e não foram objeto deste trabalho. Contudo, as formas de onda obtidas permitem afirmar que a co-simulação apresenta um comportamento semelhante ao apresentado pelo programa de EMT.

Na Tabela I, são mostrados os valores de NIAE para a tensão, corrente e potência ativa utilizando o EMT como referência. A análise dos erros computados demonstra uma boa precisão da co-simulação, uma vez que os valores de NIAE permanecem acima de 0,95 [20].

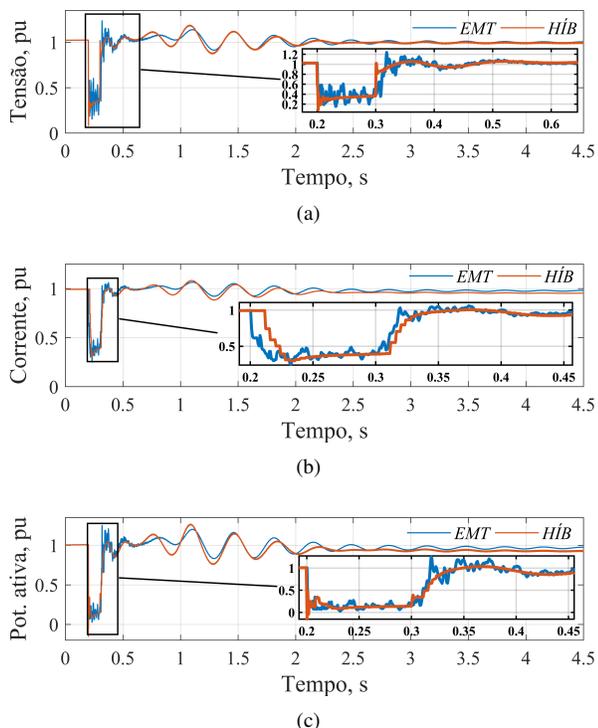


Fig. 12. Grandezas na barra de interface durante a falta trifásica: (a) tensão, (b) corrente e (c) potência ativa.

TABELA I

MÉTRICA PARA AS GRANDEZAS NA INTERFACE DURANTE A FALHA

	Tensão	Corrente	Potência ativa
NIAE	0,9817	0,9767	0,9593

Na Fig. 13 (a), é mostrado o comportamento da velocidade mecânica do DFIG para ambos os simuladores. Pode-se observar que a oscilação de velocidade para a co-simulação apresenta boa precisão comparada com a curva do EMT. Nas Figuras 13 (b) e (c), são mostradas as formas de onda das correntes nas coordenadas síncronas ( $dq$ ) para o conversor RSC. Apesar da distorção relativa à comutação, os resultados para a co-simulação e o EMT apresentam comportamentos semelhantes. Finalmente, na Fig. 13 (d), é ilustrada a tensão do barramento CC do conversor *back-to-back*. Note que essa tensão apresenta uma oscilação durante a falha que é rapidamente amortecida após o fim do defeito. Este comportamento demonstra a importância do detalhamento dos controladores e conversores eletrônicos, facilmente modelado na co-simulação.

Na Tabela II, são mostrados os tempos de processamento totais registrados para ambas as ferramentas de simulação. A co-simulação apresentou um tempo de processamento aproximadamente 3 vezes menor que o EMT. Esta característica é

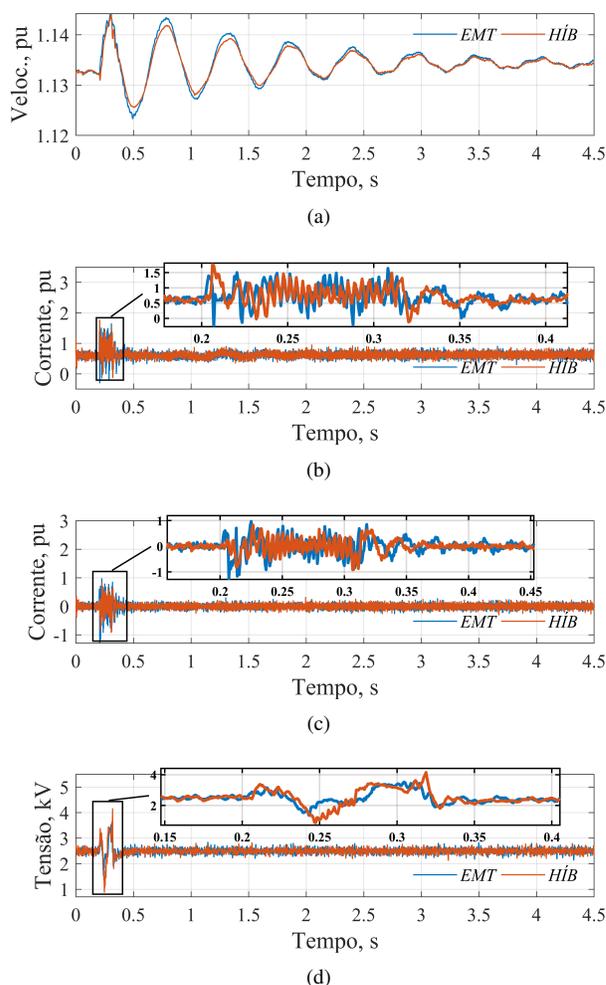


Fig. 13. Grandezas no DFIG durante a falha trifásica: (a) velocidade, (b) corrente em quadratura no RSC, (c) corrente direta no RSC e (d) tensão no barramento CC.

especialmente importante quando o tamanho da rede elétrica cresce e mais sistemas detalhados são adicionados.

TABELA II  
TEMPOS TOTAIS DE SIMULAÇÃO

Ferramenta de simulação	Passo de simulação	Tempo de processamento
EMT completo	50 $\mu$ s	39,28 min
Co-simulação	4 ms / (50 $\mu$ s)	15,24 min

Adicionalmente, a Tabela III detalha os tempos de processamento de cada etapa da co-simulação do ponto de vista do *Servidor*. Conforme mostra o fluxograma da Fig. 9, mesmo que as simulações ocorram paralelas, os simuladores devem aguardar até que ambos tenham recebido as informações para prosseguir no laço principal. O sistema detalhado é mais lento consumindo cerca de 91 % do tempo, tanto na espera (80,17%) quanto na comunicação (11,49 %), isso ocorre devido ao elevado número de operações envolvidas e à quantidade de memória necessária, o que acaba prejudicando a comunicação. Por outro lado, o sistema externo é extremamente rápido, ocu-

pando 4,17% do tempo total, sendo 0,98% para comunicação e 3,21% para a espera de informações.

Finalmente, tais resultados rápidos e precisos não podem ser obtidos usando apenas um programa de estabilidade transitória ou apenas um programa de transitórios eletromagnéticos devido a restrições inerentes de cada ferramenta.

TABELA III  
DETALHES DO TEMPO DE PROCESSAMENTO DA CO-SIMULAÇÃO

Etapa		Tempo (min)	%
Sistema detalhado (EMT)	Envio de dados	1,75	11,50
	Espera	12,23	80,23
Sistema externo (TS)	Envio de dados	0,15	0,98
	Espera	0,49	3,21
Servidor	Abertura conexão	0,58	3,80
	Outros	0,04	0,28
Total		15,24	100

#### A. Desempenho do Algoritmo de Extração das Componentes Fasoriais

Conforme mencionado anteriormente, a troca das grandezas elétricas entre os programas TS e EMT é um processo crítico da co-simulação. Na section II-B foi proposto a utilização do circuito DSOGI para converter os sinais do domínio do tempo para o domínio da frequência.

Na Fig. 14 (a), são ilustradas as formas de onda das tensões trifásicas na barra de interface e da magnitude do fasor de tensão extraído pelo algoritmo proposto, multiplicado pelo fator  $\sqrt{2}$ . A observação das formas de onda das tensões permite verificar a capacidade do algoritmo baseado no DSOGI em extrair a magnitude dos sinais instantâneos, mesmo durante a falha. O mesmo ocorre com as correntes de interface e sua magnitude, conforme mostrado na Fig. 14 (b).

Por fim, na Fig. 14(c), são mostradas as fases da tensão e da corrente durante todo o período da simulação. A observação dos resultados permite afirmar que as formas de onda da co-simulação apresentam resultados qualitativamente precisos, exceto nos instantes de descontinuidade (início e fim da falha). É importante mencionar neste ponto que, a medição dos ângulos de fase depois do defeito podem não trazer significado físico real, no entanto, ele é intrínseco do procedimento de extração.

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia para co-simulação de sistemas elétricos baseado em programas de estabilidade transitória e de transitórios eletromagnéticos. Duas contribuições se destacam no trabalho, primeiro, foi apresentado um método de extração fasorial de formas de onda trifásicas baseado no DSOGI. O algoritmo mostrou boa precisão na magnitude mesmo durante as falhas. Outra contribuição está relacionada à utilização da plataforma TCP/IP para fazer a comunicação entre as ferramentas de simulação. O emprego do TCP/IP torna a integração rápida, já que linguagens de programação diferentes são facilmente

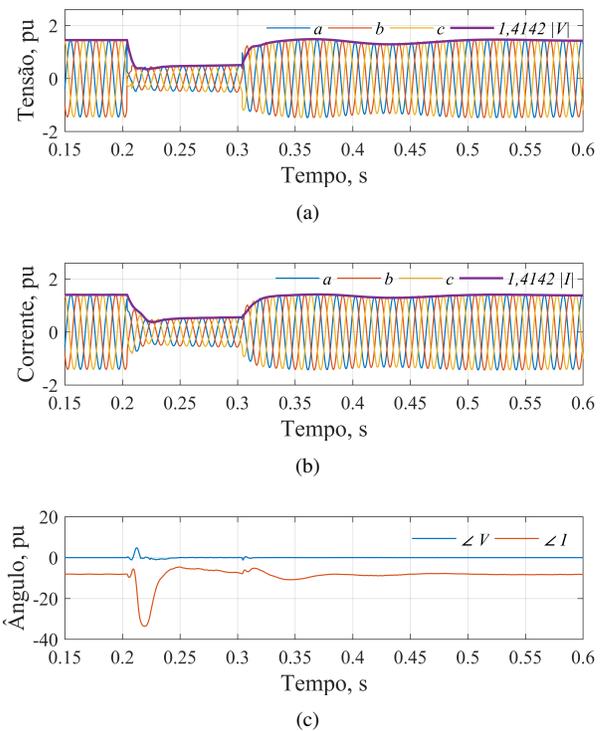


Fig. 14. Extração dos fasores com o DSOGI: (a) tensões trifásicas e a magnitude do fasor associado, (b) correntes trifásicas e a magnitude do fasor associado e (c) ângulos dos fasores de tensão e corrente.

acopladas, além disso, são evitados problemas com licenças de *software* e propriedade intelectual de modelos.

O desempenho da ferramenta proposta foi testado usando a *toolbox* SimPowerSystems do MATLAB, na qual um parque eólico condensado em um aerogerador DFIG é conectado à um sistema elétrico de transmissão de 735kV e 29 barras. Os resultados foram avaliados tendo como base o modelo EMT-completo desenvolvido na mesma plataforma. A comparação quantitativa dos resultados da simulação mostrou boa precisão no exemplo em questão. Além disso, a ferramenta proposta apresentou tempos computacionais muito menores do que a simulação de EMT-completa, principalmente porque apenas parte da rede é representada em detalhes no EMT, enquanto o restante da rede é considerado em estado *quasi*-estacionário no lado-TS.

Tendo em conta estes aspectos, a metodologia de co-simulação apresenta um alto potencial para avaliar com precisão e rapidez a penetração de dispositivos baseados em eletrônica de potência em um sistema elétrico de transmissão. Alguns exemplos de possíveis testes realizados na ferramenta são: teste de algoritmos de controle, análises de falhas, estudos de qualidade de energia e regulação de tensão, estudos de impacto de alta penetração de energia renovável em grandes sistemas, entre outros.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar seu agradecimento as seguintes agências de fomento e instituição pelo suporte financeiro e bolsas para realização deste trabalho: FAPEMIG,

CNPq, INERGE (Instituto Nacional de Energia Elétrica), UFJF e UFRJ.

#### REFERÊNCIAS

- [1] P. Kundur, N. J. Balu, and M. G. Lauby, *Power system stability and control*. McGraw-hill New York, 1994, vol. 7.
- [2] S. Hay and A. Ferguson, “A review of power system modelling platforms and capabilities,” *The Institute of Engineering and Technology*, 2015.
- [3] G. Taranto, J. Marinho, D. Falcão, T. Assis, S. Escalante, J. Rodriguez, and C. Pontes, “Simulador de redes de distribuição ativas com modelagem monofásica/trifásica,” in *Anais do XII Simpósio de Especialistas Em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)*, 2012.
- [4] M. Zhou and S. Zhou, “Internet, open-source and power system simulation,” in *Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE*. IEEE, 2007, pp. 1–5.
- [5] J. A. Martinez-Velasco, *Transient Analysis of Power Systems: Solution Techniques, Tools and Applications*. John Wiley & Sons, 2014.
- [6] M. Heffernan, K. Tunner, J. Arrillaga, and C. Arnold, “Computation of AC-DC system disturbances, parts I, II e III: interactive coordination of generator and converter transient models,” *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, pp. 4341–4348, 1981.
- [7] N. Watson and J. Arrillaga, *Power systems electromagnetic transients simulation*. Iet, 2003, no. 39.
- [8] F. Plumier, P. Aristidou, C. Geuzaine, and T. Van Cutsem, “A relaxation scheme to combine phasor-mode and electromagnetic transients simulations,” in *Proceedings of the 18th Power System Computation Conference*, 2014.
- [9] Y. Liang, “An improved wide-band system equivalent technique for real time digital simulators,” Ph.D. dissertation, University of Manitoba, 2011.
- [10] V. Jalili-Marandi, V. Dinavahi, K. Strunz, J. Martinez, and A. Ramirez, “Interfacing techniques for transient stability and electromagnetic transient programs iee task force on interfacing techniques for simulation tools,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 4, pp. 2385–2395, 2009.
- [11] F. Plumier, C. Geuzaine, and T. Van Cutsem, “A multirate approach to combine electromagnetic transients and fundamental-frequency simulations,” in *Proc. 10th International Conference on Power System Transients*, 2013.
- [12] A. A. van der Meer, M. Gibescu, M. A. van der Meijden, W. L. Kling, and J. A. Ferreira, “Advanced hybrid transient stability and emt simulation for vsc-hvdc systems,” *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 3, pp. 1057–1066, 2015.
- [13] J. Reeve and R. Adapa, “A new approach to dynamic analysis of AC networks incorporating detailed modeling of DC systems. I. Principles and implementation,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, no. 4, pp. 2005–2011, 1988. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/194011/>
- [14] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. John Wiley & Sons, 2011, vol. 29.
- [15] P. Rodriguez, R. Teodorescu, I. Candela, A. V. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, “New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions,” in *Power Electronics Specialists Conference, 2006*, pp. 1–7.
- [16] T. S. Theodoro, P. G. Barbosa, M. A. Tomim, A. C. S. Lima, and M. T. Correia de Barros, “MatLab-OpenDSS co-simulation environment: An alternative tool to investigate dsg connection,” in *2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*. IEEE, 2018, pp. 1–7.
- [17] G. W. J. Anderson, “Hybrid simulation of ac-dc power systems,” Ph.D. in Electrical and Computer Engineering, University of Canterbury, 1995.
- [18] Y. Zhang, W. Wu, B. Zhang, and A. M. Gole, “A decoupled interface method for electromagnetic and electromechanical simulation,” in *Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2011 IEEE*. IEEE, 2011, pp. 187–191.
- [19] M. Arnold, “Stability of sequential modular time integration methods for coupled multibody system models,” *Journal of computational and nonlinear dynamics*, vol. 5, no. 3, p. 031003, 2010.
- [20] H. A. Pereira, A. F. Cupertino, R. Teodorescu, and S. R. Silva, “High performance reduced order models for wind turbines with full-scale converters applied on grid interconnection studies,” *Energies*, vol. 7, no. 11, pp. 7694–7716, 2014.
- [21] T. S. Theodoro, “Simulação híbrida no domínio do tempo de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos: integração de um aerogerador de indução duplamente excitado,” Master’s thesis, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), 2016.
- [22] G. Sybille. (2013) Initializing a 29-bus, 7-power network with load flow tool powergui. [Online]. Available: <http://www.mathworks.com/help/phymod/sps/examples/initializing-a-29-bus-7-power-plant-network-with-the-load-flow-tool-of-powergui.html>



**Thainan Santos Theodoro** recebeu os títulos de Engenheiro e Mestre, ambos em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2014 e 2016, respectivamente. Atualmente ele está cursando o doutorado na mesma instituição. Em 2018 ele realizou um doutorado sanduíche no Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, Portugal. Suas áreas de interesse envolvem dinâmica de máquinas elétricas, simulação de transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos em sistemas elétricos de potência e eletrônica de potência.



**Marcelo Aroca Tomim** recebeu os títulos Engenheiro Eletricista e de mestre pela Universidade Federal de Itajubá, em 2001 e 2004, respectivamente, e o título de doutor (Ph.D.) pela Universidade de British Columbia (UBC), Canadá, em 2009. Atualmente é Professor Adjunto da Universidade Federal de Juiz de Fora. Suas áreas envolvem modelagem e dinâmica de sistemas elétricos de potência, simulações de fenômenos eletromagnéticos e eletromecânicos em sistemas de potência e computação paralela de alto desempenho.



**Pedro Gomes Barbosa** (S'95, M'00, SM'11) recebeu os títulos de mestre e doutor, em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1994 e 2000, respectivamente. Atualmente é Professor Titular da Universidade Federal de Juiz de Fora. Suas áreas de interesse envolvem: Modelagem, Simulação e Controle de Conversores Eletrônicos e Aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Energia Elétrica.



**Antonio Carlos Siqueira de Lima** possui graduação, mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1995, 1997 e 1999, respectivamente. Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Tem experiência na Transmissão da Energia Elétrica e Modelagem de Equipamentos Elétricos, transitórios eletromagnéticos em sistemas de energia, modelagem de linhas de transmissão e cabos subterrâneos/submarinos, métodos de solução de redes elétricas.



**Maria Teresa Correia de Barros** (F00) recebeu o grau de doutor em 1985 e a habilitação em 1995, ambos da Universidade Técnica de Lisboa. Atualmente é professora do IST e, de 2001 a 2009 trabalhou na EDP -Energias de Portugal, como membro do Executive Board da Labelec. Seus principais interesses de pesquisa incluem estudos em alta tensão, transitórios eletromagnéticos e qualidade de energia elétrica.