

# Modeling and Simulation of a Hybrid Single-Phase/Three-Phase System in Modelica

Marcelo de C. Fernandes  
*Dept. of Electrical Engineering*  
*Federal University of Juiz de Fora*  
Juiz de Fora–MG, Brazil  
marcelo.castro@engenharia.ufjf.br

Janaína G. de Oliveira  
*Dept. of Electrical Engineering*  
*Federal University of Juiz de Fora*  
Juiz de Fora–MG, Brazil

Luigi Vanfretti  
*Dept. of Electrical, Computer,*  
*and Systems Engineering*  
*Rensselaer Polytechnic Institute (RPI)*  
Troy–NY, USA

Maxime Baudette  
*Dept. of Electric Power and Energy Systems*  
*Royal Institute of Technology (KTH)*  
Stockholm, Sweden

Marcelo A. Tomim  
*Dept. of Electrical Engineering*  
*Federal University of Juiz de Fora*  
Juiz de Fora–MG, Brazil

**Abstract**—Power system studies seldom consider the interaction between transmission and distribution systems. This sort of analysis, however, have been gaining importance due to the progressive growth of renewable energy penetration in the distribution networks. In this context, the current study combines a positive-sequence transmission system model with a three-phase distribution system model. The connection between both systems is attained by a hybrid three-phase to single-phase interface element. The system model is written in Modelica language, and simulated using OpenModelica. A test system is built on top of the IEEE14 test system, where two load buses are expanded into three-phase distribution systems. Results of studied system are validated against the power system simulator, Simulink. Results also renders the presently analyzed hybrid model very promising for complimenting modern power systems studies.

**Keywords**– Modelica, Power system simulation, Distribution, Transmission.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, uma importante transição tem sido observada no sistema energético mundial. A preocupação com impacto ambiental proporcionada pelo uso constante de combustíveis fósseis, em conjunto com o interesse de vários países em diversificar suas matrizes energéticas impulsionam investimentos em fontes alternativas de energia. Muitos governos vem propondo diversas políticas para incentivar essas fontes de forma a garantir um futuro sustentável. A mesma tendência de transição é observada no setor de geração de energia elétrica, onde as fontes renováveis têm ganhado destaque. Espera-se que essa participação continue crescendo, já que o rendimento das fontes renováveis cresce, enquanto o custo diminui [1].

Muitas das vezes, as fontes renováveis são conectadas às redes de baixa ou média tensão, na forma de geração distribuída. Esses sistemas, tradicionalmente, não são estudados e simulados em conjunto com redes de alta tensão. Porém, o aumento intenso de energia provinda de fontes distribuídas gera a necessidade de se estudar esses sistemas conectados [2]. Outros fatores, como a necessidade de considerar linhas

de transmissão não transpostas, endossam a necessidade de possuir modelos e ferramentas híbridas que possam realizar a integração entre distribuição e transmissão [2].

Nesse sentido, diversas ferramentas, técnicas e abordagens vêm sendo propostas na literatura [3], [4], [5], [6], [7]. Com o intuito de resolver o problema da integração Distribuição-Transmissão, técnicas de simulação híbrida vêm ganhando destaque [8], [9], [10]. Na essência, elas consistem na modelagem do sistema de transmissão em componentes simétricas, do sistema de distribuição em componentes de fase e na interface desses sistemas sendo realizada por um elemento híbrido. Em [8], [9] a modelagem em componentes simétricas ainda pode ser simplificada se as componentes de sequência zero e negativa possuírem valores desprezíveis. Assim, somente a sequência positiva necessita ser modelada, e o sistema de transmissão pode ser representado pelo seu circuito monofásico equivalente.

Inserido neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo a modelagem e simulação do sistema híbrido proposto em [8] na linguagem Modelica, assim como, a validação de sua implementação. Os resultados apresentados neste trabalho embasam a construção de uma biblioteca em Modelica para estudos de sistemas de potência com modelos monofásicos de sequência positiva e trifásicos, disponibilizada para o público em geral.

O trabalho apresenta uma breve introdução à linguagem Modelica e suas vantagens na [Seção II](#) e a modelagem de alguns componentes trifásicos e híbridos na [Seção III](#). Na [Seção IV](#) o sistema estudado é descrito e na [Seção V](#) os resultados são exibidos e discutidos. Conclusões são apresentadas na [Seção VI](#).

## II. LINGUAGEM MODELICA

Modelica é uma linguagem de programação orientada a objetos, baseada em equações, desenvolvida especialmente para modelar sistemas físicos complexos. A linguagem também foi

desenvolvida para apoiar o desenvolvimento de diversos tipos de bibliotecas e auxiliar o intercâmbio de modelos [11].

Sistemas Elétricos de Potência (SEPs) são cada vez mais complexos e possuem uma vasta gama de fenômenos dinâmicos a eles associados. Devido a isso, diversas abordagens para a modelagem e simulação desses sistemas foram propostas. O grande problema é que modelagem dinâmica é, muitas das vezes, inconsistente entre as plataformas usadas, devido a simplificações e suposições [12]. Esse problema pode ser resolvido com uma linguagem que permita a modelagem de fenômenos dinâmicos de uma maneira que não permita ambiguidades.

Na linguagem Modelica, sistemas são descritos utilizando um conjunto explícito de equações diferenciais e algébricas. Além disso, modelos não-causais podem ser criados, ou seja, modelos nos quais a relação entrada/saída não é definida explicitamente. Essa característica atribui grande flexibilidade aos modelos desenvolvidos nesta linguagem [13].

Outra importante razão que motiva a modelagem de elementos de SEPs na linguagem Modelica é a possibilidade de interface com outras poderosas ferramentas, como Matlab/Simulink e Mathematica, utilizando os padrões FMI (*Functional Mock-up Interface*) [14]. O FMI pode ser utilizado como uma interface entre dois programas, permitindo a co-simulação de sistemas complexos.

Por fim, estudos mostram que a linguagem Modelica é viável para simulações de sistemas elétricos de larga-escala [15] e, por isso, uma crescente utilização da linguagem no desenvolvimento de bibliotecas para simulações de sistemas de potência pode ser observada. Como destaque podemos citar a biblioteca *Open Instance Power System Library (OpenIPSL)* destinada a simulações fasoriais no domínio do tempo [16]. Essa biblioteca contém a modelagem, típica de estabilidade de curto e médio prazo, de diversos componentes elétricos e não-elétricos, necessários para a simulação coerente de SEPs, e será utilizada neste trabalho.

### III. MODELAGEM

Essa seção descreve como os elementos trifásicos e híbridos foram modelados. A modelagem descrita baseia-se em [9], [17], [18], [19]. Nota-se que o equacionamento utiliza o benefício da não-causalidade, evidenciando uma das vantagens da utilização da linguagem Modelica.

#### A. Elemento Híbrido

Este elemento é responsável pela interface entre o sistema modelado em sequência positiva (transmissão) e o sistema modelado em componentes de fase (distribuição). Sua formulação foi proposta em [8], [9] e consiste na utilização de um elemento  $\pi$  passivo em regime permanente, como uma linha de transmissão ou um transformador. A Fig. 1 apresenta um diagrama representando um modelo trifásico de um elemento  $\pi$ .

O equacionamento do diagrama apresentado na Fig. 1 pode ser representado pela equação matricial (1) abaixo.

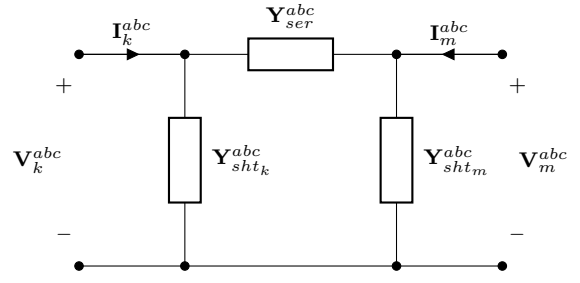


Fig. 1. Representação trifásica de um elemento  $\pi$ .

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_k^{abc} \\ \mathbf{I}_m^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{ser}^{abc} + \mathbf{Y}_{sht_k}^{abc} & -\mathbf{Y}_{sht_k}^{abc} \\ -\mathbf{Y}_{ser}^{abc} & \mathbf{Y}_{ser}^{abc} + \mathbf{Y}_{sht_m}^{abc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k^{abc} \\ \mathbf{V}_m^{abc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Realizando a transformação das matrizes  $\mathbf{I}_k^{abc}$  e  $\mathbf{V}_k^{abc}$  para as componentes de sequência [19] e admitindo que as correntes e tensões de componentes de sequência negativa e zero são desprezíveis, é possível escrever (2).

$$\begin{cases} \mathbf{V}_k^{abc} = \mathbf{T}_1 \bar{\mathbf{V}}_k^+ = \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_k^+ \\ \bar{\mathbf{I}}_k^+ = \mathbf{T}_2 \mathbf{I}_k^{abc} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \mathbf{I}_k^{abc} \end{cases} \quad (2)$$

sendo  $\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}}$ , enquanto  $\bar{\mathbf{V}}_k^+$  e  $\bar{\mathbf{I}}_k^+$  correspondem a fasores de sequência positiva da tensão nodal e corrente injetada no nó  $k$ , respectivamente.

Finalmente, é possível substituir (2) em (1) e obter (3), que representa a equação para o elemento híbrido de modelo aproximado proposto em [8]. Este estudo utilizará apenas a formulação aproximada, já que o sistema estudado não apresenta os dados de sequência negativa e zero, que são fundamentais para a formulação completa.

$$\begin{bmatrix} \bar{\mathbf{I}}_k^+ \\ \mathbf{I}_m^{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{V}}_k^+ \\ \mathbf{V}_m^{abc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

onde,

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_{1 \times 1} &= \mathbf{T}_2 (\mathbf{Y}_{ser}^{abc} + \mathbf{Y}_{sht_k}^{abc}) \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{B}_{1 \times 3} &= \mathbf{T}_2 (-\mathbf{Y}_{ser}^{abc}) \\ \mathbf{C}_{3 \times 1} &= (-\mathbf{Y}_{ser}^{abc}) \mathbf{T}_1 \\ \mathbf{D}_{3 \times 3} &= \mathbf{Y}_{ser}^{abc} + \mathbf{Y}_{sht_m}^{abc} \end{aligned} \quad (4)$$

#### B. Linha de Transmissão

De acordo com [9], a linha de transmissão tem seu modelo baseado num elemento  $\pi$  equivalente como o apresentado na Fig. 1. Neste caso, a matriz de admitância série entre os terminais  $k$  e  $m$ ,  $\mathbf{Y}_{ser}^{abc}$ , é separada em suas partes real e imaginária,  $\mathbf{G}_s$  e  $\mathbf{B}_s$ , respectivamente. Além disso, os elementos em paralelo são considerados apenas como tendo sua parte imaginária  $\mathbf{B}_p$ . Por fim, os elementos das matrizes podem ser

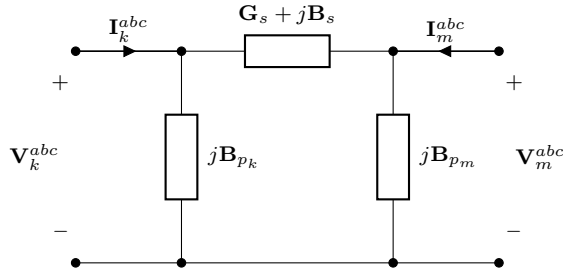


Fig. 2. Diagrama do modelo trifásico  $\pi$  equivalente para a linha de transmissão.

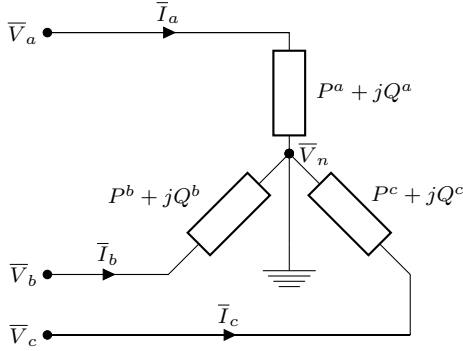


Fig. 3. Representação da carga conectada em Y aterrado.

estabelecido individualmente, permitindo a representação de linhas desbalanceadas e desequilibradas.

Desta forma, analisando o diagrama acima e considerando (5), a equação matricial para a linha de transmissão pode ser escrita como demonstrada em (6) abaixo.

$$\mathbf{Y}_{LT} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_s + j(\mathbf{B}_s + \mathbf{B}_{p_k}) & -\mathbf{G}_s - j\mathbf{B}_s \\ -\mathbf{G}_s - j\mathbf{B}_s & \mathbf{G}_s + j(\mathbf{B}_s + \mathbf{B}_{p_m}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_k^{abc} \\ \mathbf{I}_m^{abc} \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_{LT} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_k^{abc} \\ \mathbf{V}_m^{abc} \end{bmatrix} \quad (6)$$

### C. Carga

As cargas foram equacionadas através do modelo ZIP [9], [17] para que uma abordagem mais genérica pudesse ser obtida. Desta forma, tanto modelos de potência ativa e reativa constantes ou modelos de impedância constante podem ser representados.

Consideremos, então, o diagrama da Fig. 3 para uma carga trifásica conectada em Y aterrado. Para uma carga desse tipo, podemos escrever (7), onde o sobrescrito (\*) refere-se à operação de conjugado complexo.

$$\begin{cases} \bar{S}_a = P_a + jQ_a = \bar{V}_{an} \bar{I}_a^* \\ \bar{S}_b = P_b + jQ_b = \bar{V}_{bn} \bar{I}_b^* \\ \bar{S}_c = P_c + jQ_c = \bar{V}_{cn} \bar{I}_c^* \end{cases} \quad (7)$$

No modelo ZIP as potências ativas e reativas podem ser escritas como funções do módulo da tensão terminal  $V_{xn}$ . Existem dois modelos difundidos para representar essa função: os modelos exponencial e polinomial. Neste estudo, o modelo polinomial será adotado. Assim, para a fase  $x$  podemos escrever (8) abaixo, onde  $P_x^0$  e  $Q_x^0$  representam as potências ativa e reativa consumidas pela carga sob magnitude de tensão terminal  $V_{xn}^0$ . Além disso, os termos  $\alpha_x$  representam as parcelas de constituição da carga, sendo os sobrescritos ( $p$ ), ( $i$ ) e ( $z$ ) referentes às parcelas de potência, corrente e impedância constantes, respectivamente.

$$\begin{cases} P_x(V_{xn}) = P_x^0 \left[ \alpha_x^p + \alpha_x^i \left( \frac{V_{xn}}{V_{xn}^0} \right) + \alpha_x^z \left( \frac{V_{xn}}{V_{xn}^0} \right)^2 \right] \\ Q_x(V_{xn}) = Q_x^0 \left[ \alpha_x^p + \alpha_x^i \left( \frac{V_{xn}}{V_{xn}^0} \right) + \alpha_x^z \left( \frac{V_{xn}}{V_{xn}^0} \right)^2 \right] \\ \alpha_x^p + \alpha_x^i + \alpha_x^z = 1 \end{cases} \quad (8)$$

### IV. SISTEMA TESTE

O sistema estudado consiste no tradicional IEEE 14 barras [20] com algumas modificações, e seu diagrama está apresentado na Fig. 4. Como pode ser observado, a carga conectada à barra 11 foi substituída por um transformador de tape fixo com modelagem híbrida. Este elemento é responsável pela interface entre o sistema modelado em sequência positiva e o sistema com modelagem trifásica, a partir da barra 650. Adicionalmente, uma carga trifásica conectada em Y aterrado foi alocada na barra 632.

O modelo do IEEE 14 barras foi construído utilizando-se a biblioteca *OpenIPSL* [16], desenvolvida em linguagem Modelica, para simulações fasoriais no domínio do tempo. Os modelos híbridos e trifásicos empregados são os mesmos apresentados na Seção III.

Para os geradores e condensadores síncronos foram empregados modelos de 6ª ordem. Para os reguladores automáticos de tensão (AVRs) foi empregado o modelo DC1A, conforme padrão do IEEE [21]. Nenhuma máquina síncrona nesse estudo conta com regulador de velocidade e, assim, o valor de potência mecânica é mantido constante e igual ao valor de potência elétrica da condição operativa inicial. Os parâmetros das máquinas, assim como os parâmetros dos AVRs estão presentes em [22]. Deve-se salientar que todos os modelos empregados já integram a biblioteca *OpenIPSL*.

Os dados do transformador modelado como elemento híbrido de interface, da linha de transmissão trifásica e da carga conectada à barra 632 são dados na sequência. Para o estudo dinâmico em questão, a carga foi considerada como de impedância constante, ou seja  $\alpha^z = 1$  para todas as fases. Além disso, o valor de potência ativa e reativa base deve ser medido sob uma determinada tensão terminal. Os dados

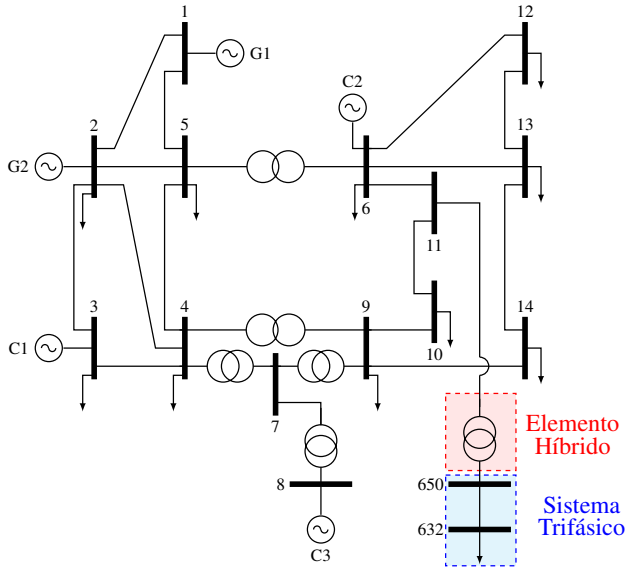


Fig. 4. Modified IEEE 14-bus test feeder diagram.

Tabela I  
PARÂMETROS DA CARGA TRIFÁSICA.

Fase	P [kW]	Q [kVAR]	Tensão $v_{x^n}^0$ [p.u.]
A	1318,05	677,60	0,9678
B	937,61	347,43	1,0245
C	1429,46	677,85	0,9559

utilizados para a carga assim como os parâmetros do elemento híbrido e da linha de transmissão são dados nas Tabelas I e II e, nas matrizes definidas em (9), (10) e (11).

$$\mathbf{G}_s = \begin{bmatrix} 0,1982 & -0,0841 & -0,0460 \\ -0,0841 & 0,1735 & -0,0219 \\ -0,0460 & -0,0219 & 0,1535 \end{bmatrix} \text{ [p.u.]} \quad (9)$$

$$\mathbf{B}_s = \begin{bmatrix} -0,5712 & 0,2112 & 0,1579 \\ 0,2112 & -0,5413 & 0,1206 \\ 0,1579 & 0,1206 & -0,5106 \end{bmatrix} \text{ [p.u.]} \quad (10)$$

$$\mathbf{B}_{sht_k}^{abc} = \mathbf{B}_{sht_m}^{abc} = \mathbf{0} \text{ [p.u.]} \quad (11)$$

Tabela II  
PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR.

Descrição	Valor
Resistência	0,2 [p.u.]
Reatância	1,6 [p.u.]
Conexão (Alta-Baixa)	$\Delta - Y$

Tabela III  
PARÂMETROS DO SISTEMA E DE SIMULAÇÃO.

Parâmetros do Sistema	
Potência Base	100 MVA
Frequência do Sistema	60 Hz
OpenModelica	
Passo	0,005 s
Tolerância	$10^{-4}$
Simulight	
Passo	0,005 s
Tolerância	$10^{-4}$
Parâmetros do Evento	
Tempo Simulado	10 s
Localização do Curto	Barra 4
Reatância do Curto	0,6 p.u.
Instante do Curto	2 s
Duração do Curto	100 ms

Para a validação da modelagem aqui apresentada, o mesmo sistema foi desenvolvido e simulado em dois ambientes: Simulight<sup>®</sup> [23] e OpenModelica [24]. O primeiro *software* já possui a formulação híbrida e é utilizado para a comparação dos resultados obtidos. O segundo é um ambiente de simulação livre capaz de interpretar, compilar e executar as simulações a partir de modelos em linguagem Modelica. O primeiro passo para realização do estudo foi a execução de um fluxo de potência no programa Simulight de forma que as condições iniciais do sistema pudessem ser determinadas. Com o estado inicial definido, foi possível realizar o estudo do comportamento dinâmico do sistema frente a um grande distúrbio. O distúrbio em questão refere-se a um curto trifásico aplicado na barra 4 do sistema de sequência positiva. Os parâmetros para a execução da simulação se encontram detalhados na Tabela III.

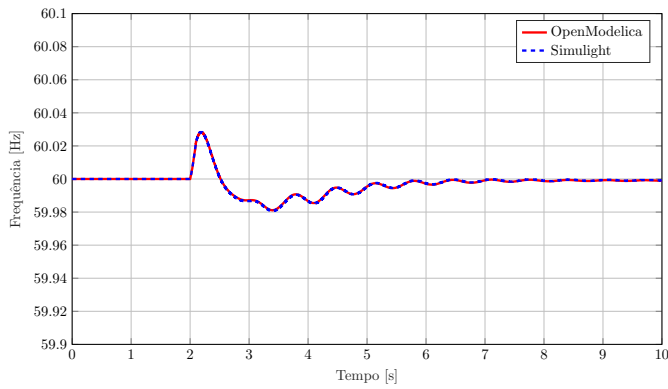
## V. RESULTADOS

Os resultados obtidos das simulações são comparadas nas Figs. 5 a 8, nas quais as curvas em vermelho representam os resultados do OpenModelica, enquanto as curvas tracejadas em azul representam os resultados do Simulight.

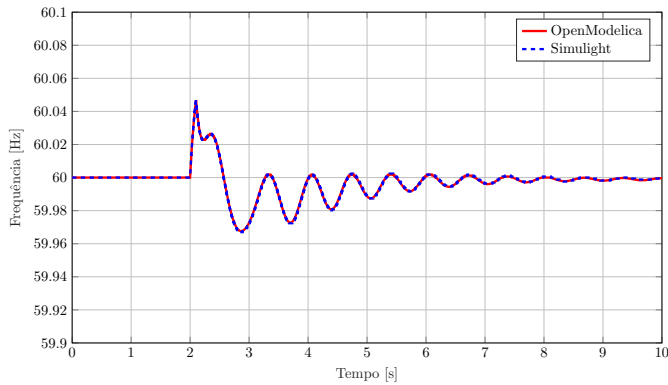
A Fig. 5 apresenta a variação da frequência dos geradores síncronos G1 e G2 e, do condensador síncrono C3. Percebe-se que ambas as simulações, tanto no Simulight como no OpenModelica, apresentam o mesmo comportamento e que as curvas estão praticamente sobrepostas.

A Fig. 6 apresenta os resultados para a variação dos ângulos da barra 6 e 11 em relação ao ângulo da barra 1, utilizada como referência. Os ângulo  $\delta_{6-1}$  e  $\delta_{11-1}$  representam o ângulos das barras em 6 e 11, respectivamente, em relação à barra referência. Nota-se, novamente, que as duas curvas para cada um dos ângulos apresentam o mesmo comportamento.

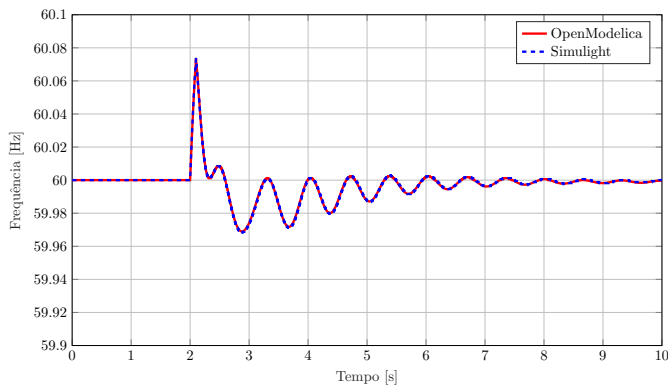
Na Fig. 7 verificam-se os resultados para a variação da magnitude tensão nas barras 1, 2, 4 e 11 do sistema em sequência positiva. Já a Fig. 8 apresenta o resultado para a tensão da barra trifásica 632. Nota-se o intenso desequilíbrio



(a) Frequência da máquina G1.



(b) Frequência da máquina G2.



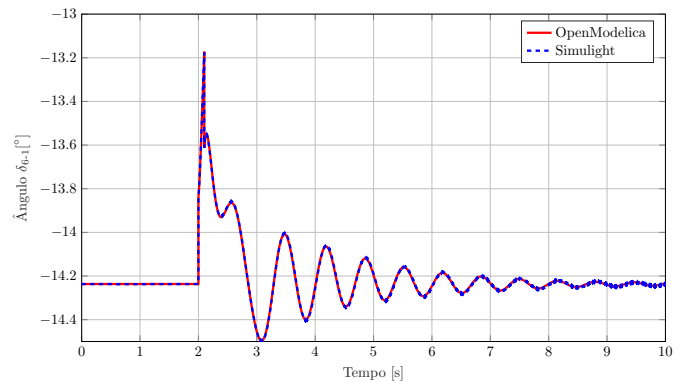
(c) Frequência da máquina C3.

Fig. 5. Comparação da variação de frequência para algumas máquinas síncronas do sistema.

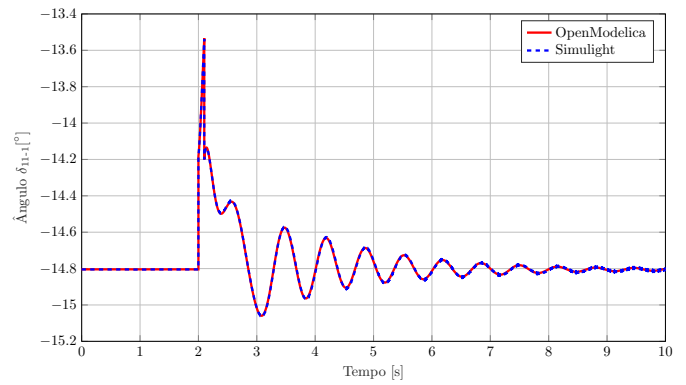
entre as tensões de fase nessa barra, como esperado. Percebe-se, novamente, que ambas as simulações apresentam curvas sobrepostas. Logo, é possível concluir que a modelagem apresentada do componente híbrido através da linguagem Modelica produz resultados equivalentes aos obtidos com o Simulight.

## VI. CONCLUSÃO

O presente estudo desenvolveu modelos para uma biblioteca em linguagem Modelica que possibilita a realização de estudos dinâmicos considerando sistemas híbridos que combinam a modelagem de sequência positiva fasorial com a trifásico em



(a) Ângulo  $\delta_{6-1}$ .



(b) Ângulo  $\delta_{11-1}$ .

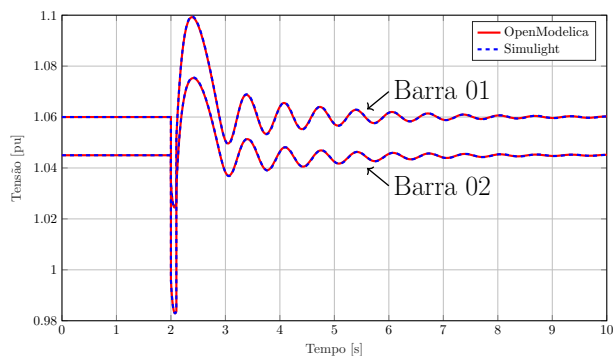
Fig. 6. Comparação da variação angular para algumas barras do sistema.

componentes de fase. Esses modelos integram a biblioteca *OpenIPSL*. A partir dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se averiguar a adequação da linguagem Modelica tanto para a modelagem de sistemas elétricos de distribuição trifásicos como de sistemas de transmissão equilibrados.

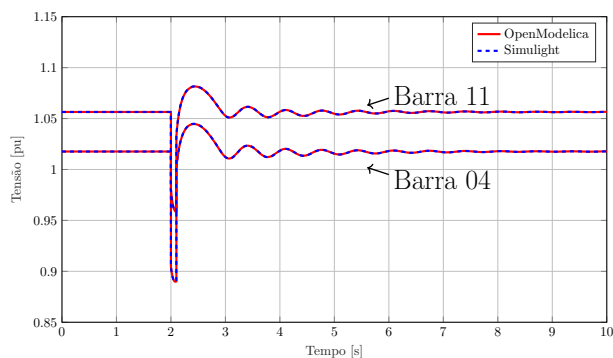
O elemento híbrido que realiza a interface entre um sistema em sequência positiva e um sistema trifásico é apresentado. Resultados de simulações em dois programas distintos, amplamente testados, corroboram a validade da modelagem apresentada assim como sua implementação em linguagem Modelica.

A modelagem híbrida monofásica/trifásica, estudada neste trabalho, é vista pelos autores com uma solução adequada para a simulação integrada de sistemas de transmissão e distribuição. A representação de parte do sistema através de seu monofásico equivalente permite a redução de equações necessárias para as simulações.

Trabalhos futuros incluem a simulação de sistemas mais complexos, que possam incluir modelos para a geração distribuída na área modelada de forma trifásica. Além disso, também são previstos estudos de impactos de faltas simétricas e assimétricas na região do sistema modelada de forma trifásica. Assim, a ferramenta da formulação híbrida pode ter seu real potencial analisado e explorado.



(a) Tensões das barras 1 e 2.



(b) Tensões das barras 4 e 11.

Fig. 7. Tensões em barras com modelagem monofásica equivalente.

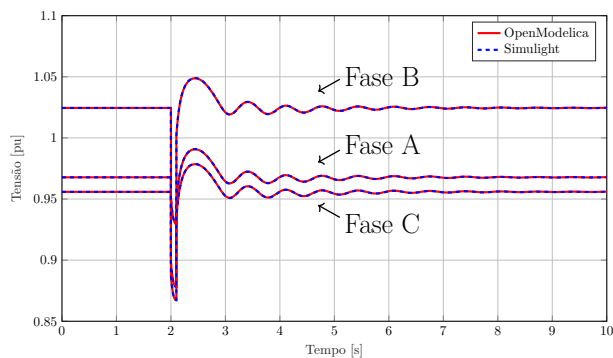


Fig. 8. Tensões na barra trifásica 632.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro que foi de fundamental importância para a realização desse trabalho.

#### REFERÊNCIAS

[1] International Energy Agency (IEA). (14 de nov. de 2017). World Energy Outlook 2017, endereço: <https://www.iea.org/weo2017/> (acesso em 30/11/2017).

[2] H. Jain, K. Rahimi, A. Tbaileh, R. P. Broadwater, A. K. Jain e M. Dilek, “Integrated transmission distribution system modeling and analysis: Need advantages”, em *2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM)*, jul. de 2016, pp. 1–5. DOI: [10.1109/PESGM.2016.7741235](https://doi.org/10.1109/PESGM.2016.7741235).

[3] B. Palmintier, E. Hale, B. M. Hodge, K. Baker e T. M. Hansen, “Experiences integrating transmission and distribution simulations for DERs with the Integrated Grid Modeling System (IGMS)”, em *2016 Power Systems Computation Conference (PSCC)*, jun. de 2016, pp. 1–7. DOI: [10.1109/PSCC.2016.7541029](https://doi.org/10.1109/PSCC.2016.7541029).

[4] Z. Li, J. Wang, H. Sun e Q. Guo, “Transmission Contingency Analysis Based on Integrated Transmission and Distribution Power Flow in Smart Grid”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, n° 6, pp. 3356–3367, nov. de 2015, ISSN: 0885-8950. DOI: [10.1109/TPWRS.2014.2381879](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2381879).

[5] Z. Li, Q. Guo, H. Sun e J. Wang, “Coordinated Transmission and Distribution AC Optimal Power Flow”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, n° 2, pp. 1228–1240, mar. de 2018, ISSN: 1949-3053. DOI: [10.1109/TSG.2016.2582221](https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2582221).

[6] H. Sun, Q. Guo, B. Zhang, Y. Guo, Z. Li e J. Wang, “Master-Slave-Splitting Based Distributed Global Power Flow Method for Integrated Transmission and Distribution Analysis”, *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, n° 3, pp. 1484–1492, maio de 2015, ISSN: 1949-3053. DOI: [10.1109/TSG.2014.2336810](https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2336810).

[7] P. Aristidou e T. V. Cutsem, “Dynamic simulations of combined transmission and distribution systems using parallel processing techniques”, em *2014 Power Systems Computation Conference*, ago. de 2014, pp. 1–7. DOI: [10.1109/PSCC.2014.7038478](https://doi.org/10.1109/PSCC.2014.7038478).

[8] J. M. T. Marinho e G. N. Taranto, “A Hybrid Three-Phase Single-Phase Power Flow Formulation”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, n° 3, pp. 1063–1070, ago. de 2008, ISSN: 0885-8950. DOI: [10.1109/TPWRS.2008.922567](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.922567).

[9] J. M. T. Marinho, “Simulação em sistemas de energia elétrica com modelagem flexível - monofásica e trifásica”, tese de doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, mar. de 2008, p. 221. endereço: [http://www.coep.ufrj.br/~tarang/COE888/Tese\\_Marinho.pdf](http://www.coep.ufrj.br/~tarang/COE888/Tese_Marinho.pdf).

[10] Q. Huang e V. Vittal, “Integrated Transmission and Distribution System Power Flow and Dynamic Simulation Using Mixed Three-Sequence/Three-Phase Modeling”, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, n° 5, pp. 3704–3714, set. de 2017, ISSN: 0885-8950. DOI: [10.1109/TPWRS.2016.2638910](https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2638910).

[11] M. Association, *Modelica® - A Unified Object-Oriented Language for Systems Modeling, Language Specification, Version 3.4*, 2017. endereço: <https://www.modelica.org/documents/ModelicaSpec34.pdf>.

[12] L. Vanfretti, W. Li, T. Bogodorova e P. Panciatici, “Unambiguous power system dynamic modeling and

- simulation using modelica tools”, em *2013 IEEE Power Energy Society General Meeting*, jul. de 2013, pp. 1–5. DOI: [10.1109/PESMG.2013.6672476](https://doi.org/10.1109/PESMG.2013.6672476).
- [13] A. S. Chieh, P. Panciatici e J. Picard, “Power system modeling in Modelica for time-domain simulation”, em *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, jun. de 2011, pp. 1–8. DOI: [10.1109/PTC.2011.6019400](https://doi.org/10.1109/PTC.2011.6019400).
- [14] T. Bogodorova, M. Sabate, G. León, L. Vanfretti, M. Halat, J. B. Heyberger e P. Panciatici, “A modelica power system library for phasor time-domain simulation”, em *IEEE PES ISGT Europe 2013*, out. de 2013, pp. 1–5. DOI: [10.1109/ISGTEurope.2013.6695422](https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2013.6695422).
- [15] F. Casella, A. Bartolini, S. Pasquini e L. Bonuglia, “Object-oriented modelling and simulation of large-scale electrical power systems using Modelica: A first feasibility study”, em *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, out. de 2016, pp. 6298–6304. DOI: [10.1109/IECON.2016.7793558](https://doi.org/10.1109/IECON.2016.7793558).
- [16] L. Vanfretti, T. Rabuzin, M. Baudette e M. Murad, “iTesla Power Systems Library (iPSL): A Modelica library for phasor time-domain simulations”, *SoftwareX*, vol. 5, pp. 84–88, 2016, ISSN: 2352-7110. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2016.05.001>. endereço: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352711016300097>.
- [17] W. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis, Third Edition*. CRC Press, 2012, ISBN: 9781439856222.
- [18] J. Arrillaga, C. Arnold e B. Harker, *Computer modelling of electrical power systems*, sér. A Wiley-Interscience publication. Wiley, 1983, ISBN: 9780471104063.
- [19] C. L. Fortescue, “Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks”, *Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 37, n° 6, pp. 629–716, jun. de 1918, ISSN: 0097-2444. DOI: [10.1109/PAIEE.1918.6594104](https://doi.org/10.1109/PAIEE.1918.6594104).
- [20] (). Power Systems Test Case Archive, 14 Bus Power Flow Test Case, University of Washington, Electrical Engineering, endereço: [http://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg\\_tca14bus.htm](http://www2.ee.washington.edu/research/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm) (acesso em 11/2017).
- [21] “IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies”, *IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005)*, pp. 1–207, ago. de 2016. DOI: [10.1109/IEEESTD.2016.7553421](https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7553421).
- [22] S. K. M. Kodsí e C. A. Cañizares, “Modeling and Simulation of IEEE 14 Bus System with FACTS Controllers”, E&CE, University of Waterloo, rel. téc., mar. de 2003. (acesso em 11/2017).
- [23] C. E. V. Pontes, G. N. Taranto, A. Manzoni e D. M. Falcão. (). Simulight, Simulador para Redes Eléctricas com Geração Distribuída, endereço: <http://www.coep.ufrj.br/~tarang/Simulight/> (acesso em 11/2017).
- [24] The Open Source Modelica Consortium, *The OpenModelica Modeling, Simulation, and Development Environment*, Accessed in 16 de março de 2018 on <https://www.openmodelica.org/>.