

Compatibility Among Electrical Network Component Models of Computational Power System Analysis Programs

S. Varricchio, *Senior Member, IEEE*, and T. Campello, *Student Member, IEEE*

Abstract—This work describes the procedures and developments required to make the transformer and transmission line (TL) models of the HarmZs program (a CEPEL's production grade software for harmonic frequency analysis of electrical power systems) and the Alternative Transients Program – ATP (for time simulation of electromagnetic transients) compatible. For the transformer models, the compatibility is accomplished by manual correction of the short-circuit impedance data in the ATP as a function of the tap positions. In the HarmZs, this correction is automatically carried out. For the compatibility of TL models, it was necessary the theoretical development of the frequency equivalent of the widely used ATP's Bergeron transmission line model. For its implementation in the HarmZs code, it was necessary to determine its nodal admittance matrix. Besides the theoretical development, results are presented regarding a medium-sized transmission system, showing the differences between the Classical and Bergeron transmission line models in the HarmZs and the agreement between the two programs when the models are matched.

Index Terms—Transformer models, Transmission line models, Bergeron model, Compatibility between models, HarmZs, ATP.

I. INTRODUÇÃO

Em estudos elétricos envolvendo mais de um programa computacional, é desejável que os modelos dos componentes da rede elétrica sejam compatíveis ou possam ser compatibilizados.

Essa compatibilização possibilita, entre outras vantagens, que possíveis diferenças entre as redes, modeladas nos arquivos de entrada dos dois programas, sejam mais facilmente detectadas através, por exemplo, de resultados de resposta em frequência fornecidos pelos mesmos.

Uma vez que estes resultados possam ser considerados iguais (dentro de uma tolerância aceitável), modelos mais exatos e sofisticados, que existam em apenas um dos programas, poderão ser utilizados com mais segurança, pois, neste caso, se saberia que a topologia e os valores dos componentes da rede estão corretos, apesar das possíveis diferenças entre os resultados.

Outra vantagem desta compatibilização é aumentar a confiabilidade dos programas, não apenas em relação aos modelos já existentes, mas também em relação à criação de novos modelos.

Assim, mesmo um modelo mais sofisticado, recém-desenvolvido para um dos programas e existente em uma versão mais simplificada no outro, poderá ser mais bem avaliado quanto a sua implementação, pois, como citado anteriormente, as diferenças entre os resultados serão exclusivamente devidas às diferentes versões desse modelo.

Neste trabalho são descritos os procedimentos e desenvolvimentos necessários para compatibilizar os modelos de transformadores e de linhas de transmissão (LTs) do HarmZs [1] (para estudos em frequência do comportamento harmônico de sistemas elétricos de potência) do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL e do Alternative Transients Program - ATP (para simulação no tempo de transitórios eletromagnéticos) [2], ambos programas largamente utilizados no setor elétrico brasileiro e recomendados nos Procedimentos de Rede (PR) do Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS [3].

No caso dos modelos de transformadores, a compatibilização é feita pela correção manual no ATP da impedância de curto circuito em função das posições dos *taps*. No HarmZs, esta correção é automática.

Para a compatibilização dos modelos de LTs, foi necessário o desenvolvimento teórico e a implementação no HarmZs do equivalente em frequência do modelo de Bergeron [4]-[6] existente no ATP. Esse modelo é de grande interesse por ser recomendado pelo ONS nas *Diretrizes para a Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão* [7] e, conseqüentemente, bastante utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos.

O modelo de Bergeron considera a capacitância e a indutância distribuídas ao longo do comprimento, enquanto a resistência é concentrada nas extremidades das duas metades da LT. Todos estes parâmetros são constantes com a frequência.

Esta abordagem facilita bastante a representação de LTs no domínio do tempo [5] no ATP como equivalentes de Norton, que é a representação padrão utilizada para os componentes de redes em programas de simulação de transitórios eletromagnéticos.

Por outro lado, a implementação deste modelo no domínio da frequência no HarmZs é feita por meio de sua matriz de

S. L. Varricchio, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, slv@cepel.br.

T. M. Campello, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil, thomasmcampello@gmail.com.

admitâncias nodais \mathbf{Y}_b .

É importante observar que o HarmZs já possuía quatro diferentes modelos de LTs: parâmetros distribuídos com representação rigorosa de suas variações com a frequência [8], [9], parâmetros distribuídos com representação aproximada da variação da resistência com a frequência [10], parâmetros distribuídos e constantes com a frequência [8] (similar ao de Bergeron e chamado de modelo Clássico neste trabalho) e parâmetros concentrados e constantes com a frequência (sequência de circuitos do tipo pi) [8]. Deve-se observar que o modelo Clássico tende a ser mais preciso do que o de Bergeron, uma vez que as perdas também são distribuídas ao longo da LT, o que é fisicamente mais coerente.

Considerações a respeito das vantagens e desvantagens de cada modelo implementado no HarmZs são também descritas neste trabalho, bem como resultados de respostas em frequência relativos a um sistema de transmissão de médio porte, mostrando a concordância entre os dois programas quando seus modelos estão compatibilizados e as diferenças entre os modelos Clássico e de Bergeron no HarmZs. Essas diferenças são também analisadas no domínio do tempo utilizando o método de Ajuste Vetorial [11] (ou Vector Fitting em inglês).

II. MODELOS DE TRANSFORMADORES

Na Fig. 1 está representado o diagrama elétrico monofásico (sequência positiva) de um transformador de 2 enrolamentos com seus *taps* em posições genéricas [12]. Os símbolos v_{t_1} e v_{t_2} denotam suas tensões de *tap* e z_{t_1} e z_{t_2} denotam as parcelas da impedância de curto-circuito atribuídas aos enrolamentos primário e secundário, respectivamente, para as posições de *tap* em questão.

No programa HarmZs, as parcelas z_{t_1} e z_{t_2} da impedância de curto-circuito do transformador variam com o quadrado das tensões de *tap* em pu [13], [14] ou seja:

$$z_{t_k} = \left(\frac{v_{t_k}}{v_{n_k}} \right)^2 z_{n_k} = a_k^2 z_{n_k}, \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

sendo a_k , v_{n_k} e z_{n_k} , ($k = 1, 2$) a posição de *tap*, a tensão e a impedância de curto-circuito nominais do lado k do transformador.

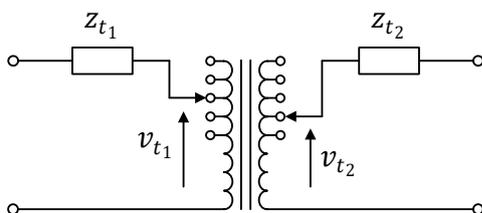


Fig. 1. Transformador de 2 enrolamentos com *taps* em posições genéricas.

Por outro lado, no ATP as parcelas da impedância de curto-circuito são constantes, ou seja, independem das posições dos

taps. Portanto, para compatibilizar os modelos de transformadores dos dois programas, a correção dada por (1) deve ser feita manualmente (ou por meio de planilha ou programa auxiliar) no ATP.

III. MODELOS DE LTs

Após a implementação do modelo de Bergeron, o programa HarmZs passou a dispor de cinco modelos de LTs no domínio da frequência:

1. Parâmetros distribuídos com representação rigorosa de suas variações com a frequência [8], [9];
2. Parâmetros distribuídos com representação aproximada da variação da resistência com a frequência [10];
3. Parâmetros distribuídos e constantes com a frequência (modelo Clássico) [8];
4. Parâmetros concentrados e constantes com a frequência (sequência de circuitos do tipo pi) [8];
5. Bergeron [4]-[6].

O primeiro modelo é o mais preciso, mas também é o que exige mais dados de entrada, como os relacionados com o perfil da torre, com os condutores e com o solo, que geralmente não estão disponíveis. Este modelo utiliza funções modificadas de Bessel [15] para a consideração da variação com a frequência dos parâmetros longitudinais (indutância e resistência por unidade de comprimento) da LT e a distância de penetração complexa [16] para representar o efeito de retorno da corrente pelo solo.

Uma grande vantagem dos demais modelos é que eles utilizam dados de LTs disponíveis em arquivos de fluxo de potência [17] (ou de curto-circuito).

O segundo modelo utiliza uma representação aproximada da variação da resistência R com a frequência f dada por:

$$R(f) = R(f_1) \left[A \left(\frac{f}{f_1} \right)^\alpha + B \left(\frac{f}{f_1} \right)^\beta + C \right] \quad (2)$$

onde $R(f_1)$ denota a resistência na frequência fundamental f_1 , cujo valor é dado em arquivos fluxo de potência. Para LTs de 500 kV, os valores dos parâmetros de (2) estão apresentados na TABELA I. Outras representações aproximadas da variação da resistência com a frequência podem ser encontradas em [18]. Este modelo é particularmente importante por ser o recomendado nos PR do ONS para a realização de estudos de impacto harmônico devido ao acesso de novas instalações à rede básica do Sistema Interligado Nacional [19].

TABELA I
PARÂMETROS PARA CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA DE LTs DE 500 KV

α	β	A	B	C
0.7316	0.7158	-1.243	1.549	0.6

O terceiro modelo (modelo Clássico) apresenta precisão aceitável, sendo mais conservador do que o primeiro e o segundo. Este modelo tende a ser mais preciso do que o de Bergeron, uma vez que as perdas são distribuídas ao longo da

LT, o que é uma representação mais fiel da realidade.

A precisão do quarto modelo depende do número de circuitos pi utilizado, o que não é uma escolha trivial. Além disto, a eficiência computacional deste modelo diminui com o aumento do número de circuitos pi utilizado. Para problemas envolvendo harmônicos, formulados no domínio da frequência, sua maior aplicação é de cunho didático. Por outro lado, para problemas envolvendo simulação de transitórios eletromagnéticos no domínio do tempo, é útil na representação de LTs muito curtas, mantendo sua característica de propagação. Desta forma, o passo de integração utilizado não necessita ser menor do que o tempo de propagação destas LTs, caso fossem modeladas pelo modelo de Bergeron. Isto é particularmente útil em estudos estatísticos de energização de LTs, onde são necessárias diversas simulações [20].

IV. MODELOS DE BERGERON NOS DOMÍNIOS DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Os modelos de Bergeron são obtidos dividindo-se a LT em dois trechos iguais sem perdas. As perdas (R) são consideradas concentrando-as nas extremidades de cada trecho, conforme mostrado na Fig. 2. As correntes injetadas nos nós terminais (i_1 e i_6) e as tensões (v_1, \dots, v_6) em cada um dos nós também estão indicadas na figura.

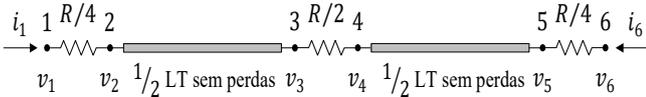


Fig. 2. Representação da LT para obtenção dos modelos de Bergeron.

No domínio do tempo, a representação da Fig. 2 pode ser modelada pelos equivalentes de Norton mostrados na Fig. 3 [5]:

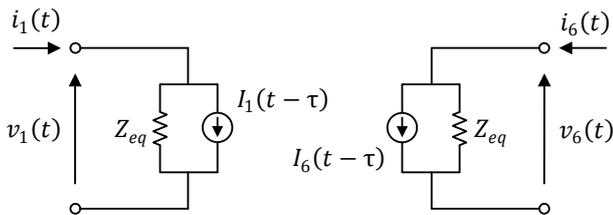


Fig. 3. Equivalentes de Norton do Modelo de Bergeron no domínio do tempo.

De acordo com a Fig. 3, tem-se:

$$i_1(t) = (1/Z_{eq}) v_1(t) + I_1(t - \tau) \tag{3}$$

$$i_6(t) = (1/Z_{eq}) v_6(t) + I_6(t - \tau) \tag{4}$$

onde:

$$Z_{eq} = z_c + \frac{1}{4}R \tag{5}$$

$$I_1(t - \tau) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left(-\frac{1}{Z_{eq}} v_6(t - \tau) - h i_6(t - \tau)\right) + \left(\frac{1-h}{2}\right) \left(-\frac{1}{Z_{eq}} v_1(t - \tau) - h i_1(t - \tau)\right) \tag{6}$$

$$I_6(t - \tau) = \left(\frac{1+h}{2}\right) \left(-\frac{1}{Z_{eq}} v_1(t - \tau) - h i_1(t - \tau)\right) + \left(\frac{1-h}{2}\right) \left(-\frac{1}{Z_{eq}} v_6(t - \tau) - h i_6(t - \tau)\right) \tag{7}$$

$$h = \frac{z_c - \frac{1}{4}R}{z_c + \frac{1}{4}R} \tag{8}$$

Nestas equações z_c e τ denotam, respectivamente, a impedância característica e o tempo de propagação da LT, dados por:

$$z_c = \sqrt{L_l/C_l} \tag{9}$$

$$\tau = l\sqrt{L_l C_l} \tag{10}$$

sendo C_l e L_l a capacitância e a indutância por unidade de comprimento l da LT.

No domínio da frequência complexa s , a representação da Fig. 2 é modelada pela sua matriz de admitâncias nodais \mathbf{Y}_b . Para cada trecho da LT, a matriz de admitâncias nodais ($\mathbf{Y}_{(1/2)}$) é dada por [8]:

$$\mathbf{Y}_{(1/2)} = y_c \begin{bmatrix} \coth\left(\frac{\gamma l}{2}\right) & -\operatorname{csch}\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \\ -\operatorname{csch}\left(\frac{\gamma l}{2}\right) & \coth\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \end{bmatrix} \tag{11}$$

sendo a admitância característica y_c e a constante de propagação γ da LT dadas por:

$$y_c = 1/z_c = \sqrt{C_l/L_l} \tag{12}$$

$$\gamma = s\sqrt{C_l L_l} \tag{13}$$

De acordo com (11), tem-se que matriz de admitâncias nodais $\mathbf{Y}(s)$ do circuito da Fig. 2 é:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 4/R & -4/R & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -4/R & y_{22} & y_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & y_{32} & y_{33} & -2/R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2/R & y_{44} & y_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & y_{54} & y_{55} & -4/R \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4/R & 4/R \end{bmatrix}$$

sendo:

$$y_{22} = y_{55} = a = \frac{4}{R} + y_c \coth\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (15)$$

$$y_{23} = y_{32} = y_{45} = y_{54} = b = -y_c \operatorname{csch}\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (16)$$

$$y_{33} = y_{44} = c = \frac{2}{R} + y_c \coth\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (17)$$

De acordo com (14), a matriz $\mathbf{Y}(s)$ pode ser escrita na forma:

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} 4/R & -(4/R) \mathbf{e}_1^T & 0 \\ -(4/R) \mathbf{e}_1 & \mathbf{M} & -(4/R) \mathbf{e}_4 \\ 0 & -(4/R) \mathbf{e}_4^T & 4/R \end{bmatrix} \quad (18)$$

sendo:

$$\mathbf{e}_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

$$\mathbf{e}_4 = [0 \ 0 \ 0 \ 1]^T$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a & b & 0 & 0 \\ b & c & d & 0 \\ 0 & d & c & b \\ 0 & 0 & b & a \end{bmatrix}$$

onde o sobrescrito T denota transposição de vetor ou matriz, e

$$d = -2/R \quad (22)$$

Tem-se que:

$$\mathbf{Y} \mathbf{v} = \mathbf{i}$$

A Equação (23) pode ser escrita como:

$$\begin{bmatrix} 4/R & -(4/R) \mathbf{e}_1^T & 0 \\ -(4/R) \mathbf{e}_1 & \mathbf{M} & -(4/R) \mathbf{e}_4 \\ 0 & -(4/R) \mathbf{e}_4^T & 4/R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ \mathbf{v}_{\text{int}} \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ \mathbf{0} \\ i_6 \end{bmatrix} \quad (24)$$

onde $\mathbf{0}$ é um vetor nulo com 4 posições que correspondem às injeções nulas de corrente nos nós internos numerados de 2 a 5 e \mathbf{v}_{int} é o vetor de tensões destes nós, ou seja:

$$\mathbf{v}_{\text{int}} = [v_2 \ v_3 \ v_4 \ v_5]^T \quad (25)$$

De (24), tem-se:

$$(4/R) v_1 - (4/R) \mathbf{e}_1^T \mathbf{v}_{\text{int}} = i_1 \quad (26)$$

$$-(4/R) \mathbf{e}_1 v_1 + \mathbf{M} \mathbf{v}_{\text{int}} - (4/R) \mathbf{e}_4 v_6 = \mathbf{0} \quad (27)$$

$$-(4/R) \mathbf{e}_4^T \mathbf{v}_{\text{int}} + (4/R) v_6 = i_6 \quad (28)$$

De (27), tem-se:

$$\mathbf{v}_{\text{int}} = (4/R) \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{e}_1 v_1 + \mathbf{e}_4 v_6) \quad (29)$$

Substituindo (29) em (26), obtém-se:

$$\left(\frac{4}{R}\right)^2 \left(\frac{R}{4} - \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1\right) v_1 - \left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4 v_6 = i_1 \quad (30)$$

(19) Substituindo (29) em (28), obtém-se:

$$-\left(\frac{4}{R}\right)^2 \mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 v_1 + \left(\frac{4}{R}\right)^2 \left(\frac{R}{4} - \mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4\right) v_6 = i_6 \quad (31)$$

(21) Escrevendo (30) e (31) na forma matricial, obtém-se:

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{B}} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_6 \end{bmatrix} \quad (32)$$

onde a matriz de admitâncias nodais reduzida $\mathbf{Y}_{\mathbf{B}}$ do modelo de Bergeron da LT é dada por:

$$\mathbf{Y}_{\mathbf{B}} = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \begin{bmatrix} \left(\frac{R}{4} - \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1\right) & -\mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4 \\ -\mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 & \left(\frac{R}{4} - \mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4\right) \end{bmatrix} \quad (33)$$

A matriz \mathbf{M}^{-1} é dada por:

$$\mathbf{M}^{-1} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \alpha_3 & \alpha_4 \\ \alpha_2 & \alpha_5 & \alpha_6 & \alpha_3 \\ \alpha_3 & \alpha_6 & \alpha_5 & \alpha_2 \\ \alpha_4 & \alpha_3 & \alpha_2 & \alpha_1 \end{bmatrix} \quad (34)$$

onde:

$$\Delta = a^2(c^2 - d^2) - 2 a b^2 c + b^4 \quad (35)$$

$$\alpha_1 = a(c^2 - d^2) - b^2 c \quad (36)$$

$$\alpha_2 = b^3 - a b c \quad (37)$$

$$\alpha_3 = a b d \quad (38)$$

$$\alpha_4 = -b^2 d \quad (39)$$

$$\alpha_5 = a^2 c - a b^2 \quad (40)$$

$$\alpha_6 = -a^2 d \quad (41)$$

Tem-se, portanto, que:

$$\mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 = \alpha_1 / \Delta \quad (42)$$

$$\mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4 = \alpha_4 / \Delta \quad (43)$$

$$\mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 = \alpha_4 / \Delta = \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4 \quad (44)$$

$$\mathbf{e}_4^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_4 = \alpha_1 / \Delta = \mathbf{e}_1^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{e}_1 \quad (45)$$

Substituindo as equações numeradas de (42) a (45) em (33), obtém-se:

$$\mathbf{Y}_B = \begin{bmatrix} y_s & y_m \\ y_m & y_s \end{bmatrix} = \left(\frac{4}{R}\right)^2 \begin{bmatrix} (R/4 - \alpha_1/\Delta) & -\alpha_4/\Delta \\ -\alpha_4/\Delta & (R/4 - \alpha_1/\Delta) \end{bmatrix} \quad (46)$$

Os valores de α_1/Δ e α_4/Δ , presentes em (46), podem ser calculados utilizando as equações (35), (36) e (39) ou, alternativamente, resolvendo o sistema linear:

$$\mathbf{M} \mathbf{x} = \mathbf{e}_1 \quad (47)$$

Note que $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ é igual à primeira coluna de \mathbf{M}^{-1} . Tem-se, portanto, que:

$$\alpha_1/\Delta = x_1 = \mathbf{e}_1^T \mathbf{x} \quad (48)$$

$$\alpha_4/\Delta = x_4 = \mathbf{e}_4^T \mathbf{x} \quad (49)$$

Para valores de frequência muito próximos de zero, onde a matriz de admitâncias do sistema testado é singular, a solução utilizando o vetor \mathbf{x} se mostrou menos sujeita a erros de arredondamento do que a solução analítica dada por (35), (36) e (39). Para os demais valores de frequência, as soluções são equivalentes.

V. SISTEMA TESTE

Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos utilizando o sistema de transmissão mostrado na Fig. 4. Este sistema possui 34 barras, 25 LTs, 12 ramos “shunts” representando bancos de capacitores ou indutores, 16 transformadores, 16 cargas e 10 geradores (fontes ideais de tensão). Os dados dos parâmetros de sequência positiva deste sistema estão apresentados no Apêndice A.

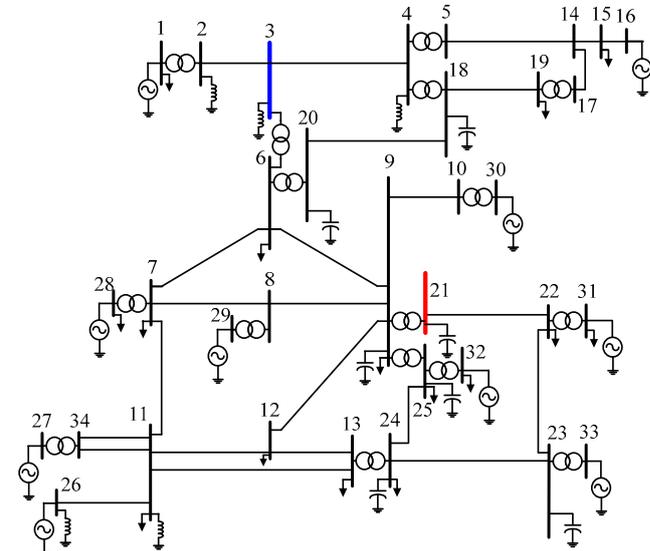


Fig. 4. Sistema de Transmissão.

VI. RESULTADOS

Os resultados dos testes apresentados nas subseções seguintes objetivam validar a compatibilização dos programas, a implementação computacional do desenvolvimento matemático, bem como comparar o comportamento em frequência e no tempo dos modelos de LTs Clássico e de Bergeron.

A. Compatibilização dos Transformadores no HarmZs e ATP

Na Fig. 5 e Fig. 6 estão mostradas as respostas em frequência do módulo e do ângulo da impedância própria da barra 21 (mostrada em vermelho na Fig. 4), com e sem a correção dos valores das parcelas das impedâncias de curto-circuito dos transformadores com as posições de *tap*, obtidas com o ATP. Estas curvas são comparadas com as obtidas pelo HarmZs, que são coincidentes com as do ATP com correção. Neste caso, as LTs foram representadas pelo modelo de Bergeron em ambos os programas.

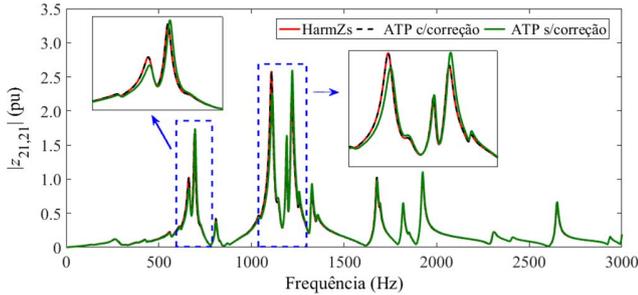


Fig. 5. Módulo da impedância própria da barra 21 com e sem a correção dos valores das impedâncias dos transformadores.

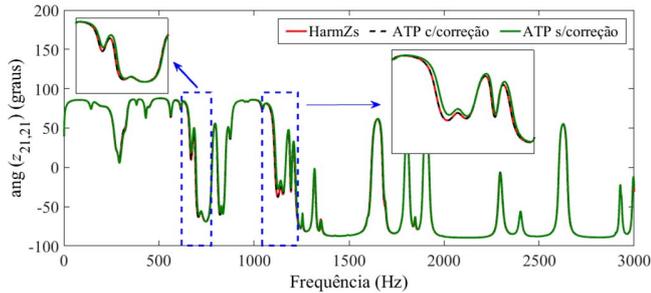


Fig. 6. Ângulo da impedância própria da barra 21 com e sem a correção dos valores das impedâncias dos transformadores.

B. Comparação entre os Modelos Clássico e de Bergeron

Como já citado, o modelo Clássico tende a ser mais preciso que o de Bergeron. No entanto, o modelo de Bergeron é de grande importância prática, pois é bastante utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos [7]. Portanto, julga-se importante ter-se uma ideia de quanto o comportamento destes modelos pode diferir.

Na Fig. 7 e Fig. 8 estão mostrados o módulo e o ângulo, respectivamente, da impedância própria da barra 21, considerando as LTs do sistema de transmissão da Fig. 4 modeladas pelos modelos Clássico e de Bergeron. Como se pode notar, os valores das frequências de ressonância praticamente não variam. No entanto, principalmente na faixa de frequências entre aproximadamente 1000 Hz e 1400 Hz, o modelo Clássico produziu picos mais elevados de magnitude de impedância.

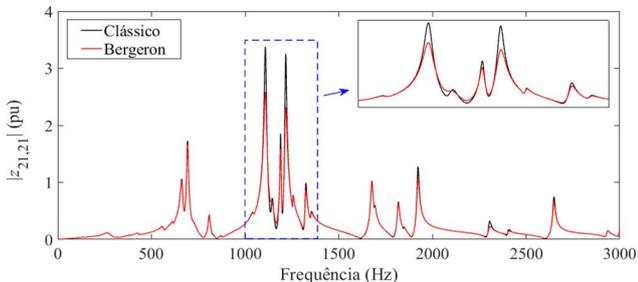


Fig. 7. Módulo da impedância própria da barra 21 considerando os modelos Clássico e de Bergeron.

Na Fig. 9 e Fig. 10 estão mostrados o módulo e o ângulo da impedância própria da barra 3 (mostrada em azul na Fig. 4). Pode-se observar que o módulo da impedância teve um

comportamento contrário ao da barra 21, onde o modelo de Bergeron apresentou picos maiores de magnitude de impedância. Por outro lado, os ângulos produzidos pelos dois modelos não apresentaram diferenças significativas.

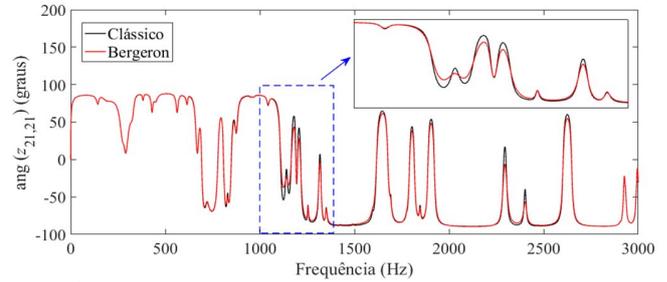


Fig. 8. Ângulo da impedância própria da barra 21 considerando os modelos Clássico e de Bergeron.

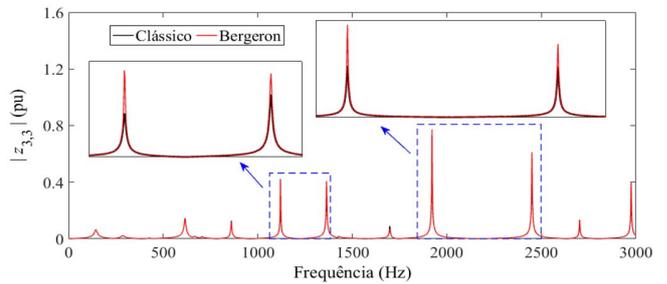


Fig. 9. Módulo da impedância própria da barra 3 considerando os modelos Clássico e de Bergeron.

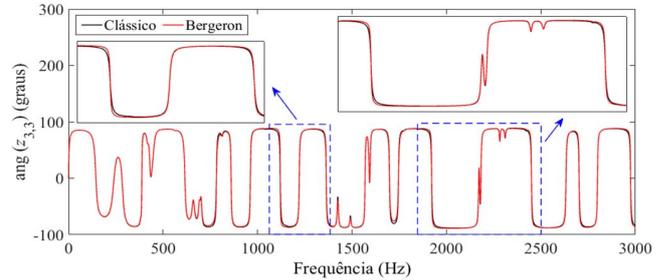


Fig. 10. Ângulo da impedância própria da barra 3 considerando os modelos Clássico e de Bergeron.

Considere, por exemplo, o problema de queima prematura de capacitores [21] no Sistema Teste. Esta queima pode ter diversas causas, entre elas distorções harmônicas [22], [23] e transitórios eletromagnéticos. Portanto, é necessário que a topologia e os valores dos componentes da rede elétrica, considerados nos programas ATP (para estudos de transitórios) e no HarmZs (para estudos de comportamento harmônico), sejam os mesmos para que se produzam resultados coerentes e confiáveis. Observando as respostas em frequência, traçadas nos gráficos da Fig. 5 e Fig. 6 e, principalmente, da Fig. 7 à Fig. 10, é impossível se ter certeza de que as diferenças apresentadas sejam devidas apenas a não compatibilização dos modelos dos programas ou se são devidas também a erros topológicos e/ou de valores de componentes da rede elétrica. A única forma de se ter esta certeza é por meio da compatibilização dos modelos de

componentes dos programas. Uma vez que as respostas em frequência, produzidas por ambos os programas, sejam idênticas, dentro de uma tolerância aceitável, outros modelos de componentes mais apropriados a determinado tipo de estudo podem ser utilizados de forma segura e confiável. Assim, por exemplo, para os estudos de comportamento harmônico, após a compatibilização, poder-se-ia substituir o modelo de Bergeron pelo que considera a variação aproximada da resistência das LTs com a frequência, conforme (2).

Na Fig. 11 são mostradas as respostas no tempo da tensão na barra 21 devidas a um degrau unitário de corrente aplicado na mesma barra. A expressão analítica destas respostas é dada por [12]:

$$v_{21}(t) = \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\lambda_i} (e^{\lambda_i t} - 1) \quad (50)$$

onde $(\lambda_i, R_i) \in \mathbb{C}$ denotam, respectivamente, um dos n polos e seu resíduo associado identificados pelo VF [11] por meio do ajuste das respostas em frequência da impedância própria da barra 21, considerando as LTs representadas pelos modelos Clássico e de Bergeron. Portanto, dois conjuntos de polos e resíduos associados foram obtidos. Para estes ajustes, utilizou-se uma faixa de frequências de 0 a 10 kHz com passo de 1 Hz e $n = 562$.

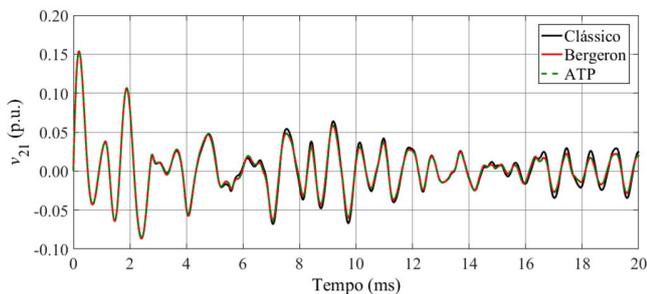


Fig. 11. Resposta no tempo da tensão na barra 21 devido a um degrau unitário de corrente na mesma barra.

Nesta figura também está superposta a curva de tensão produzida pelo ATP. Esta curva é coincidente com a produzida pelo VF considerando o modelo de Bergeron. Este fato é indicativo de que os resultados produzidos pelo VF são precisos para ambos os modelos de LTs.

É interessante observar que as respostas de tensão no domínio do tempo, produzidas pelos modelos Clássico e de Bergeron, apresentam diferenças muito menos significativas do que no domínio da frequência $(z_{21,21})$. Note, também, que as respostas de tensão dos modelos Clássico e de Bergeron nos instantes iniciais, onde geralmente ocorrem as maiores sobretensões transitórias, são praticamente coincidentes.

C. Comparação entre os Resultados dos Programas ATP e HarmZs Compatibilizados

Na Fig. 12 estão mostradas as curvas de resposta em

frequência do módulo e do ângulo da impedância própria da barra 21 obtidas com os programas ATP e HarmZs compatibilizados, ou seja, com ambos utilizando o modelo de Bergeron e considerando a correção dos valores das parcelas das impedâncias de curto-circuito dos transformadores com as posições de *tap*. A curva de erro percentual em função da frequência entre os valores calculados de impedância pelos dois programas também está mostrada nesta figura. Este erro é definido por:

$$\epsilon = \left| \frac{(z_{21,21})_{ATP} - (z_{21,21})_{HZs}}{(z_{21,21})_{ATP}} \right| \times 100\% \quad (51)$$

onde $(z_{21,21})_{ATP}$ e $(z_{21,21})_{HZs}$ são os fasores da impedância própria da barra 21 calculados pelos programas ATP e HarmZs, respectivamente. *O maior erro encontrado em toda a faixa de frequências foi de 1.28 %, ocorrido para o primeiro valor do intervalo (0.01 Hz).* Note que este foi o primeiro valor considerado porque não foi possível calcular a impedância para o valor nulo de frequência, pois a matriz de admitâncias nodais do sistema é singular neste ponto. Portanto, os baixos valores de erro encontrados validam a compatibilização dos programas, que inclui o procedimento de correção das parcelas das impedâncias de curto-circuito dos transformadores no ATP, o desenvolvimento teórico da matriz de admitâncias nodais \mathbf{Y}_B do modelo de Bergeron de LTs e sua implementação computacional no HarmZs.

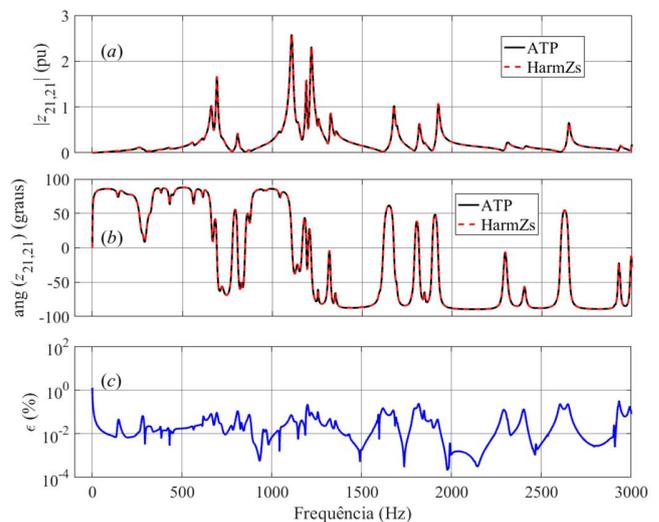


Fig. 12. Curvas de módulo (a) e ângulo (b) de $z_{21,21}$, obtidas pelo ATP e HarmZs, e de erro (c) entre os resultados.

VII. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram descritos os procedimentos e desenvolvimentos necessários para compatibilizar os modelos de transformadores e de linhas de transmissão (LTs) do HarmZs [1] e do ATP [2], ambos programas largamente utilizados no setor elétrico brasileiro e recomendados nos Procedimentos de Rede (PR) do ONS [3]. No caso dos modelos de transformadores, a compatibilização é feita pela

correção das parcelas da impedância de curto circuito em função das posições dos *taps*. Para a compatibilização dos modelos de LTs, foi necessário o desenvolvimento teórico do equivalente em frequência do modelo de Bergeron [4]-[6] existente no ATP, sendo de grande interesse por ser recomendado pelo ONS [7] e, conseqüentemente, bastante utilizado em estudos de transitórios eletromagnéticos. Para sua implementação no HarmZs, foi necessário a determinação de sua matriz de admitâncias Y_B .

Considerações a respeito das vantagens e desvantagens de cada modelo de LT implementado no HarmZs foram também descritas neste trabalho, bem como resultados de respostas em frequência relativos a um sistema de transmissão de médio porte, mostrando a concordância entre os dois programas quando seus modelos estão compatibilizados e as diferenças entre os modelos Clássico e de Bergeron no HarmZs. Essas diferenças foram também analisadas no domínio do tempo utilizando o método de Ajuste Vetorial [11]. Como mostrado, as diferenças entre os resultados dos modelos são mais significativas no domínio da frequência do que no domínio do tempo. A baixa sensibilidade dos resultados no domínio do tempo em relação à concentração das perdas das LTs no modelo de Bergeron já havia sido verificada em [5].

APÊNDICE A

DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Este apêndice descreve os dados básicos do sistema de transmissão mostrado na Fig. 4. Na TABELA II estão mostrados os dados para as tensões nominais (V_N) e de operação (V_{OP}), cargas e equipamentos “shunts”, LTs (incluindo as barras terminais “De” e “Para”) e transformadores. Cada carga é modelada por um ramo resistivo conectado a um indutor ou capacitor. Para o indutor a conexão é em série e para o capacitor a conexão é em paralelo. Os parâmetros totais de cada LT (parâmetros por unidade de comprimento \times comprimento da LT) são a resistência, R , a indutância, L , e a capacitância, C . Deve-se observar que não é necessário se conhecer explicitamente o comprimento de uma LT para realizar a correção hiperbólica do seu circuito pi equivalente [17]. Esta tabela também apresenta as barras e os dados relativos aos transformadores do sistema. Estes dados são a resistência, R , a reatância, X , e o *tap* do transformador. Os valores dos parâmetros R e X estão em porcentagem considerando uma potência base de 100 MVA. A frequência do sistema é de 60 Hz.

REFERÊNCIAS

- [1] *Manual de Utilização do Programa HarmZs Versão 3.0*, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL, 2016.
- [2] *ATP Rule Book*, Leuven EMTP Center (Ed.), 1990.
- [3] *Submódulo 18.2 dos Procedimentos de Rede - Relação dos Sistemas e Modelos Computacionais*, Operador Nacional do Sistema – ONS. [Online]. Disponível em <http://ons.org.br/paginas/sobre-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>, 2017.
- [4] A. R. J. Araújo, R. C. Silva, and S. Kurokawa, “Representation of Transmission Lines: A Comparison between the Models Distributed Parameters and Lumped Parameters”, *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 4, pp. 1047-1052, June 2013.
- [5] H. W. Dommel, “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. pas-88, no. 4, April 1969.
- [6] T. Noda, “Frequency-Dependent Modeling of Transmission Lines Using Bergeron Cells”, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, issue S2, pp. S23-S30, Dec. 2017.
- [7] *Diretrizes para Elaboração de Projetos Básicos para Empreendimentos de Transmissão*, Operador Nacional do Sistema – ONS. [Online]. Disponível em <http://ons.org.br/pt/paginas/conhecimento/acervo-digital/documentos-e-publicacoes?categoria=Notas+T%C3%A9cnicas+de+Transmiss%C3%A3o>, 2013.
- [8] S. L. Varricchio, “Modelagem e Análise de Redes Elétricas e Métodos de Redução da Ordem de Modelos Dinâmicos de Baixa e Alta Frequência”, Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, UnB, Dezembro, 2015.
- [9] S. Gomes Jr., C. Portela, and N. Martins, “Detailed Model of Long Transmission Lines for Modal Analysis of ac Networks”, in *Proceedings of the IPST'01 - International Conference on Power System Transients*, Rio de Janeiro, Brazil, June 2001.
- [10] M. P. D. Carli, L. F. W. Souza, O. J. Rothstein, C. O. Costa e R. P. Dutt-Ross, “Sistema de Transmissão do Rio Madeira: Modelagem da Resistência Harmônica dos Componentes do Sistema Elétrico de Potência para o Projeto de Filtros”, *XXI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Florianópolis, SC, Outubro de 2011.
- [11] B. Gustavsen e A. Semlyen, “Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, n. 3, pp. 1052 - 1061, Julho 1999.
- [12] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr., and R. D. Rangel, “Three Winding Transformer s-Domain Model for Modal Analysis of Electrical Networks”, *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 420-429, 2011.
- [13] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr. e R. D. Rangel, “Modelagem no Domínio da Frequência de Transformadores de Dois e Três Enrolamentos para Estudos de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas”, Relatório Técnico CEPEL, no. DPP/POL 615/02, 2002.
- [14] P. Kundur, *Power system stability and control*, New York, Mc Graw Hill, 1994.
- [15] H. B. Dwight, “Skin Effect in Tubular and Flat Conductors”, *AIEE Transactions*, vol. 37, pt. II, pp. 1379-1403, 1918.
- [16] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, and A. Castanheira, “The Complex Ground Return Plane: A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 8, pp. 3686-3693, 1981.
- [17] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr., F. C. Véliz, I. F. Albuquerque e L. R. Araujo, “Método de Newton-Raphson para Utilização de Dados de Fluxo de Potência na Modelagem de Linhas de Transmissão para Estudos de Comportamento Harmônico de Sistemas de Potência” em *V SBQEE - Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica*, Aracaju, SE, Brasil, 17 a 20 de Agosto, 2003.
- [18] CIGRE JWG C4/B4.38, “Network Modelling for Harmonic Studies”, TB 766, April 2019.
- [19] *Instruções para Realização de Estudos e Medições de QEE Relacionados aos Acessos à Rede Básica ou nos Barramentos de Fronteira com a Rede Básica para Parques Eólicos, Solares, Consumidores Livres e Distribuidoras*, ONS NT 009/2016 – REV.02, 2018.
- [20] A. S. Morched, J. H. Ottevangers and L. Marti, “Multi-Port Frequency Dependent Network Equivalents for the EMTP”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, no. 3, pp. 1402-1412, 1993.
- [21] G. S. G. Oliveira, H. J. A. Martins, J. A. M. Duque, M. C. Atallah, S. L. Varricchio e J. A. P. Rodrigues, “Avaliação dos Bancos de Capacitores da Light”, Relatório Técnico CEPEL, no. DPP/TEC 553/93, 1994.
- [22] S. L. Varricchio, E. S. Delvizio e L. F. Coutinho, “Harmônicos em Sistemas de Potência: Causas, Análises e Solução”, *REUCP – Revista de Engenharia da Universidade Católica de Petrópolis*, vol.7, no. 2, pp. 1-18, Junho, 2012.
- [23] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, Professional Engineering, 2004.

TABELA II
DADOS DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

Barra	Tensão (kV)		Carga			Shunt		De	Linha de Transmissão			
	V_N	V_{OP}	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)	L (mH)	C (μ F)		Para	R (Ω)	L (mH)	C (μ F)
1	20	20.36	26.071	-	-	-	-	2	3	1.4372	55.237	11.789
2	750	743.83	-	-	-	1507.1	-	3	4	2.556	79.916	13.912
3	750	761.13	-	-	-	2260.7	-	5	14	1.0325	34.484	0.67906
4	750	733.28	-	-	-	1507.1	-	6	7	3.85	128.65	2.5143
5	500	536.38	-	-	-	-	-	8	7	1.4	46.221	0.90979
6	500	517.18	89129.2	-	-	-	-	8	9	1.3	43.370	0.85406
7	500	514.27	853.14	-	1.6649	-	-	9	6	3.975	133.42	2.6077
8	500	511.64	-	-	-	-	-	9	12	4.05	135.81	2.6544
9	500	513.33	108.92	199.92	-	-	10.886	10	9	0.125	4.1447	0.32502
10	500	513.70	-	-	-	-	-	11	7	4.3	143.90	2.8134
11	500	509.66	89538.3	-	-	2210.5	-	12	11	2.55	84.087	1.6471
12	500	512.19	876.08	503.78	-	-	-	12	13	5.625	201.13	4.0474
13	500	489.95	55826.2	-	0.00884	-	-	13	11	7.05	255.44	5.2383
14	500	536.17	-	-	-	-	-	14	15	0.355	11.671	0.22982
15	500	538.81	40.972	42.420	-	-	-	14	17	0.5575	18.568	0.15345
16	500	545.50	-	-	-	-	-	15	16	0.0875	2.9178	0.05744
17	500	533.33	-	-	-	-	-	18	19	0.2416	6.3145	0.67393
18	345	360.41	-	-	-	-	22.286	18	20	16.068	183.12	5.9058
19	345	353.77	42.277	34.890	-	-	-	21	22	8.0461	110.35	2.7184
20	345	353.32	-	-	-	-	0.89144	23	22	12.196	166.63	4.1305
21	230	241.99	-	-	-	-	1.2536	23	24	12.617	171.15	4.3096
22	230	242.68	130.47	85.400	-	-	-	25	24	23.059	315.71	2.5562
23	230	237.17	-	-	-	-	1.2536	26	11	8.2125	289.70	5.1861
24	230	234.90	28.910	15.245	-	-	6.8195	34	11	-	3.3157	0.03011
25	230	239.08	97.478	28.566	-	-	6.4534	34	11	-	3.3157	0.03011
26	500	521.5	-	-	-	6631.5	-	Transformador				
27	20	20	-	-	-	-	-	De	Para	R (%)	X (%)	Tap
28	20	19.64	226.50	-	-	-	-	2	1	0.00126	0.49753	0.9752
29	20	19.58	-	-	-	-	-	5	4	-	0.324	1.097
30	20	19.78	66.302	-	-	-	-	6	3	0.00050	0.3717	1.006
31	20	20.74	267.17	-	-	-	-	7	28	0.02733	1.612	1.024
32	20	19.92	10.110	13.408	-	-	-	8	29	-	1.4	1.024
33	20	20	-	-	-	-	-	9	25	2.2507	13.642	1
34	500	509.58	-	-	-	-	-	10	30	-	1.0883	1.048
								17	19	-	0.72	1.023
								18	4	-	0.3	1.064
								20	6	-	0.899	0.9704
								21	9	0.03100	1.207	1.038
								22	31	0.01673	1.1333	1.025
								23	33	0.10	4.614	1.025
								24	13	0.00873	0.3296	1.05
								25	32	0.05100	1.531	1.05
								34	27	-	4.362	1



Sergio Luis Varricchio (M'00-SM'06) possui graduação (1987), mestrado (1994) e doutorado (2015) em Engenharia Elétrica pela Universidade Católica de Petrópolis (UCP), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade de Brasília (UnB), respectivamente. De 1987 a 1989 trabalhou na consultora Fluxo Engenharia, desenvolvendo

programas computacionais e sistemas de aterramento para subestações. De 1988 a 1989 e de 1998 a 1999 foi docente em Teoria Eletromagnética na UCP. Desde 1989 trabalha no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) como pesquisador e gerente de projetos, tendo sido o idealizador do programa computacional HarmZs para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas, largamente utilizado no setor elétrico brasileiro. Suas áreas de interesse incluem qualidade de energia, transitórios eletromagnéticos e redução da ordem de modelos. É Senior Member do IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e Membro do CIGRÉ (International Council on Large Electric Systems). De 2008 a 2009 foi presidente do Capítulo de Potência do IEEE Power & Energy, Seção Rio de Janeiro. Recebeu Menção Honrosa do Prêmio Capes de Tese 2016 da área de ENGENHARIAS IV e o Prêmio UnB de Dissertação e Tese 2016.



Thomas Moreira Campello (S'13) possui graduação (2016) e mestrado (2018) em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), respectivamente. Atualmente cursando doutorado em

Sistemas de Potência pela COPPE/UFRJ. É bolsista de doutorado no Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL), onde atua na equipe de desenvolvimento do programa HarmZs para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas, largamente utilizado no setor elétrico brasileiro. Seus interesses incluem Computação Científica, Qualidade de Energia, Transitórios Eletromagnéticos e Redução da Ordem de Modelos.