

**C4 – Desempenho de Sistemas Elétricos****CÁLCULO DE EQUIVALENTES DE REDE DEPENDENTES DA FREQUÊNCIA PARA PSCAD/EMTDC UTILIZANDO O PROGRAMA HARMZS****LOAN SILVA\*****ONS****Brasil**

loan.silva@ons.org.br

**THOMAS CAMPELLO****COPPE/UFRJ****Brasil**

thomasmcampello@gmail.com

**ROBSON DIAS****COPPE/UFRJ****Brasil**

dias@dee.ufrj.br

**SERGIO VARRICCHIO****CEPEL****Brasil**

slv@cepel.br

**GLAUCO TARANTO****COPPE/UFRJ****Brasil**

glaucotaranto@coppe.ufrj.br

**Resumo** – O trabalho apresenta um procedimento eficiente para a síntese de equivalentes de rede multiportas dependentes da frequência para PSCAD/EMTDC utilizando o programa HarmZs. O PSCAD/EMTDC possui um componente integrado que permite a criação destes FDNEs a partir das respostas em frequência dos barramentos de fronteira da área representada pelo equivalente. A síntese destes equivalentes e o cálculo das repostas em frequência são, de um modo geral, etapas laboriosas em estudos envolvendo sistemas elétricos de grande porte. Deste modo, este trabalho traz como principal contribuição os procedimentos para realizar a conversão das respostas em frequência da rede de sequência positiva e zero, computadas através da ferramenta HarmZs, para o formato padrão do cartão de entrada do modelo integrado do equivalente dependente da frequência da plataforma PSCAD/EMTDC.

**Palavras-chave:** FDNE – Transitórios eletromagnéticos – HarmZs – PSCAD/EMTDC

## 1 INTRODUÇÃO

Usualmente, nos estudos de transitórios eletromagnéticos (EMT - do inglês, *Electromagnetic Transients*) envolvendo redes elétricas de grande porte, tal como o Sistema Interligado Nacional (SIN), em face da disponibilidade dos bancos de dados para os programas de curto-circuito e fluxo de potência, realiza-se a síntese de modelos equivalentes de rede a partir das impedâncias de curto-circuito na frequência fundamental. Contudo, tais equivalentes podem ser muito imprecisos dependendo do número de vizinhanças elétricas retidas na área de interesse que será estudada e modelada detalhadamente [1, 2]. Estes equivalentes de curto-circuito, ou de frequência fundamental, como são chamados, podem suprimir efeitos/comportamentos transitórios de rápida duração resultando em análises inconsistentes nos estudos realizados. Ou, então, ser necessárias algumas vizinhanças elétricas a partir do ponto de interesse e, assim, tornar o equivalente muito extenso e complexo.

Diante do acima exposto, o conceito de equivalentes de rede multiportas dependentes da frequência (FDNEs), sintetizados para uma ampla faixa de frequência, coloca-se como uma alternativa importante para modelar a região que não é de interesse no estudo. Modelos FDNEs são mais precisos, uma vez que são capazes de reproduzir características de frequências mais elevadas da área equivalentada.

O PSCAD/EMTDC possui um componente integrado, recentemente implementado, que permite a criação de FDNEs de forma automática, superando uma das grandes dificuldades para a utilização destes equivalentes, que consiste na síntese propriamente dita de um modelo FDNE trifásico. Além disso, o modelo integrado busca assegurar a característica de passividade do equivalente. Como parâmetro de entrada, o modelo FDNE integrado requer que o usuário forneça as respostas em frequência (RFs) dos barramentos de fronteira em formatações padrão pré-estabelecidas. Neste trabalho, optou-se pelas RFs das impedâncias próprias e de transferência em coordenadas de fase *abc*. Deve-se salientar que a obtenção destas RFs é uma tarefa que

também requer um grande esforço. Atualmente, no âmbito de estudos EMT em sistemas elétricos de grande porte, são utilizados os próprios ambientes das ferramentas tradicionais, tais como, o ATP, PSCAD/EMTDC e EMTP, para realizar a varredura em frequência da região a ser equivalentada.

A alternativa acima mencionada possui algumas limitações de ordem prática. A primeira reside no fato de que, no âmbito do SIN, não existe uma base de dados consolidada para realização de estudos EMT, tal como àquela dos estudos de fluxo de potência e curto-circuito convencionais. Contudo, quando existentes, os parâmetros precisam ser tratados ou são insuficientes para modelar a rede com o detalhamento necessário. Além disso, a depender do tamanho e complexidade da área a ser equivalentada, modelar todos os elementos que compõe esta região pode ser uma tarefa inexecutável.

Dentro deste contexto, o programa HarmZs, desenvolvido pelo CEPEL para estudos de comportamento harmônico e análise modal de sistemas elétricos, através de suas funcionalidades para o cálculo de RFs de redes elétricas de grande porte, coloca-se como uma alternativa relevante para viabilizar a síntese de FDNEs de forma expedita e precisa. Empregando-se o HarmZs, uma vez que este é compatível com a base de dados para fluxo de potência, a RF da rede de sequência positiva do SIN é diretamente computada. Além disso, num horizonte futuro, a base de dados de curto-circuito também será integrada à ferramenta. Neste caso, do mesmo modo, o cálculo da RF da rede de sequência zero poderá também ser rapidamente levantada. Neste trabalho, contudo, o cartão de entrada da ferramenta HarmZs é ajustado manualmente para acomodar os parâmetros e a topologia da rede de sequência zero. Deste modo, as principais contribuições do trabalho podem ser sumarizadas como mostrado a seguir.

- i. Síntese do equivalente de rede em ampla faixa de frequência utilizando o modelo FDNE integrado do PSCAD/EMTDC;
- ii. Cálculo das RFs da parcela da rede equivalentada através da ferramenta HarmZs;
- iii. Algoritmo para conversão das RFs da rede em componentes de sequência 012 para coordenadas de fase *abc*.

O trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a metodologia da ferramenta HarmZs. Por sua vez, a Seção 3 apresenta o procedimento utilizado na conversão e adequação das RFs, das redes de sequência positiva e zero, para o formato adotado como padrão no bloco FDNE integrado do PSCAD/EMTDC. Os resultados obtidos são discutidos na Seção 4 e, finalmente, a Seção 5 apresenta as conclusões finais.

## **2 METODOS E MODELOS DA FERRAMENTA HARMZS**

Como já comentado anteriormente, o HarmZs é o programa desenvolvido pelo CEPEL para identificar e propor soluções em estudos de comportamento harmônico e análise modal de sistemas elétricos de grande porte. Esse programa possui um conjunto de ferramentas e interfaces gráficas que automatizam a execução destes estudos. Além de ser um programa para estudos de comportamento harmônico de sistemas de potência, existe um esforço para ampliar as aplicações do HarmZs, tornando-o, também, uma ferramenta complementar aos estudos de EMT, utilizando-o em conjunto com programas como ATP, EMTP e PSCAD.

### **2.1 MODELOS DE COMPONENTES ELÉTRICOS**

Para a representação de sistemas de potência de grande porte, o HarmZs contém diversos tipos de modelos de equipamentos elétricos. No caso de Linhas de Transmissão (LTs) o programa dispõe de 5 modelos no domínio da frequência:

1. Parâmetros distribuídos com representação rigorosa de suas variações com a frequência [3, 4];
2. Parâmetros distribuídos com representação aproximada da variação da resistência com a frequência [5];
3. Parâmetros distribuídos e constantes com a frequência (modelo Clássico) [3];
4. Parâmetros concentrados e constantes com a frequência (cascata de circuitos do tipo RLC-PI) [3];
5. Bergeron [6, 7, 8].

Em [8], é feita uma breve descrição de cada um dos modelos, explicando a diferença entre eles. O programa permite a representação de transformadores de dois e três enrolamentos com qualquer valor de defasagem angular devido às conexões destes enrolamentos [9]. As cargas e demais equipamentos podem ser modeladas de forma detalhada como circuitos RLCs série ou paralelo [10]. No caso das cargas é possível, ainda,

representá-las por circuitos RLC mistos [11] ou por ramais de distribuição típicos [12]. O programa também permite a modelagem de motores de indução [11] e máquinas síncronas, representadas como fontes de tensão em série com impedâncias [12]. Por fim, as não linearidades do sistema são representadas como fontes de correntes [11, 12].

## 2.2 FORMULAÇÕES MATEMÁTICAS PARA A REPRESENTAÇÃO DA REDE ELÉTRICA

O HarmZs permite que o usuário modele os sistemas de potência utilizando duas formulações matemáticas diferentes. A primeira é a modelagem no domínio do tempo por Sistemas Descritores (SDs) [3, 15], onde o comportamento dinâmico da rede elétrica é descrito pelas equações diferenciais e algébricas de cada componente do sistema, junto com as equações produzidas pela aplicação da lei de correntes de Kirchoff à cada nó do circuito. A segunda é a modelagem pela matriz de admitâncias nodais  $\mathbf{Y}(s)$  expandida, montada no domínio da frequência complexa  $s$  [3, 16]. A matriz de admitâncias nodais  $\mathbf{Y}(s)$  é construída como a matriz  $\mathbf{Y}(j\omega)$ , utilizada na frequência fundamental  $\omega$ , para cálculos de fluxo de potência, curto-circuito etc., com equações extras para a consideração das fontes de tensão do sistema.

Um exemplo claro da diferença entre as duas formulações ocorre na representação de LTs, onde a natureza distribuída e variável com a frequência de seus parâmetros pode ser modelada de forma fácil e precisa no domínio  $s$  através de funções transcendentais. Na formulação por SDs, as LTs são representadas aproximadamente por circuitos RLC-PI em cascata. Em geral, quanto maior a faixa de frequência de interesse, maior o número de circuitos RLC-PI necessários para reproduzir adequadamente o comportamento da LT. Uma desvantagem da formulação  $\mathbf{Y}(s)$  é não permitir a utilização de uma ampla gama de algoritmos e métodos bem estabelecidos para a análise modal de redes elétricas, como, por exemplo, a decomposição QZ para cálculo de polos, zeros e resíduos e o subespaço de Krylov para redução da ordem de modelos, que são possíveis de serem utilizados na abordagem por SDs.

## 3 EQUIVALENTE DEPENDENTE DA FREQUÊNCIA EM AMBIENTE PSCAD/EMTDC

Para sintetizar o modelo FDNE em ambiente PSCAD/EMTDC são necessárias três etapas de pré-processamento. A primeira delas consiste em realizar o tratamento dos dados da rede de sequência zero, para adequá-los ao formato do cartão de entrada do programa ANAREDE. Como o ANAREDE é um programa de sequência positiva, esse passo só é válido quando o circuito de sequência zero de um determinado componente tem a mesma topologia do circuito de sequência positiva, de forma que é válido para transformadores conectados em Y-Y, mas não é válido para os que tem um dos enrolamentos conectados em  $\Delta$ . O segundo passo compreende o levantamento das repostas em frequência propriamente ditas da rede de sequência positiva e zero, externa a região de interesse. A última etapa corresponde ao tratamento dado às repostas em frequência, onde as impedâncias amostradas em componentes de sequência zero, positiva e negativa e (ou 012) são calculadas no sistema de coordenadas de fase  $abc$ . A Fig. 1 ilustra o diagrama esquemático do processo de tratamento dos dados para síntese do modelo equivalente. A seguir cada uma das etapas será descrita detalhadamente.

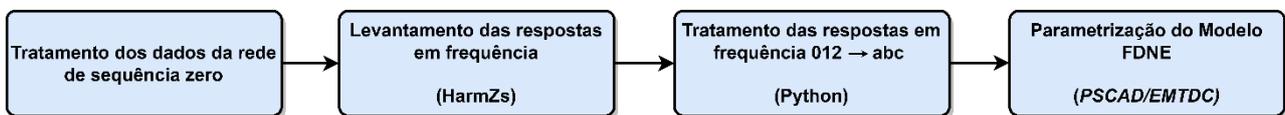


Fig. 1. Diagrama esquemático de pré-processamento dos dados

### 3.1 Tratamento dos dados da rede de sequência zero

A resposta em frequência da rede elétrica, utilizada para sintetizar o modelo equivalente multiportas, é obtida através da ferramenta HarmZs. As repostas em frequência são computadas em componentes de sequência 012. Para as componentes de sequência positiva, pode-se utilizar diretamente a base de dados para fluxo de potência convencional, tal como àquela do programa ANAREDE, desenvolvido pelo CEPEL. O cálculo da resposta em frequência das componentes de sequência zero é realizado de modo análogo a sequência positiva. Para tanto, neste trabalho, os parâmetros do cartão de entrada em formato ANAREDE são ajustados para caracterizar os equipamentos do sistema em sua representação na rede de sequência zero, embora essa

abordagem só seja válida para componentes em que os circuitos de sequência positiva e zero tenham a mesma topologia. No futuro, o HarmZs será dotado da opção de leitura das bases de dados do ANAFAS e terá implementado todos os modelos de sequência zero de todos os componentes básicos presentes no SIN, evitando estas limitações.

### 3.2 Cálculo da resposta em frequência → HarmZs

Uma vez consolidados, os dados das redes de sequência positiva e zero da região equivalentada são carregados individualmente na ferramenta HarmZs. Através da funcionalidade para o cálculo das RFs, levantam-se as impedâncias próprias e de transferência nos barramentos de fronteira. Como parâmetros para o cálculo, são informadas a faixa de frequência e discretização desejadas. Ainda, em função da frequência, as impedâncias são computadas em suas parcelas reais e imaginárias,  $\text{Re}\{Z_{012}(\omega)\}$  e  $\text{Im}\{Z_{012}(\omega)\}$ , respectivamente. O levantamento pode ser feito tanto através da interface gráfica da ferramenta ou através de um arquivo de configuração *batch*.

Tratamento das respostas em frequência → Python

Levantadas as RFs das impedâncias próprias e de transferência em componentes de sequência ( $Z_{012}(\omega)$ ), se faz necessário realizar a conversão das impedâncias para coordenadas de fase ( $Z_{abc}(\omega)$ ). Além disso, é realizada a tradução dos dados para o formato padrão requerido pelo modelo FNDE integrado do PSCAD/EMTDC. Conforme mencionado anteriormente, optou-se por utilizar o formato matriz de impedâncias como parâmetro de entrada. A conversão é realizada através de um código em linguagem de programação Python. Os parâmetros que devem ser fornecidos são resumidos a seguir.

- i. Número total de portas do modelo;
- ii. Número de amostras de frequências dentro da faixa de frequências de interesse;
- iii. Para cada amostra, as parcelas reais e imaginárias das impedâncias próprias e de transferência entre cada uma das portas do modelo.

Novamente, para cada amostra, as impedâncias em componentes de fase são calculadas como indicado em (1), onde  $\mathbf{T}$  e  $\mathbf{T}^{-1}$  são as matrizes de transformação *abc* para **012** direta e inversa, respectivamente [17].

$$\mathbf{Z}_{abc}(\omega) = \mathbf{T} \mathbf{Z}_{012}(\omega) \mathbf{T}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Na equação acima, os elementos da diagonal principal são as impedâncias próprias e as demais são as impedâncias de transferência entre fases de um mesmo barramento. Para uma rede retida com  $n$  barramentos de fronteira trifásicos, o modelo equivalente terá  $3n$  portas. A matriz de impedâncias que correlaciona todas as portas do modelo tem dimensão  $3n \times 3n$ , conforme indicado em (2), uma vez que se associa a cada barramento de fronteira submatrizes com dimensão  $3 \times 3$ .

$$\mathbf{Z}(\omega) = \begin{bmatrix} [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{11} & [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{12} & \dots & [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{1n} \\ [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{21} & [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{22} & \dots & [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{n1} & [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{n2} & \dots & [\mathbf{Z}_{abc}(\omega)]_{nn} \end{bmatrix}_{3n \times 3n} \quad (2)$$

Por sua vez, na equação (2), os blocos diagonais da matriz  $\mathbf{Z}(\omega)$  representam as impedâncias próprias de cada barramento. Os demais conjuntos caracterizam as impedâncias de transferência entre si. Em linhas gerais, o algoritmo desenvolvido consiste em dispor, para toda amostra de frequência, cada linha da matriz concatenada em uma única coluna. Para exemplificar a montagem da matriz  $\mathbf{Z}(\omega)$ , considere uma rede retida com três barramentos de fronteira trifásicos. O modelo equivalente sintetizado, neste caso, apresenta nove portas e a matriz  $\mathbf{Z}(\omega)$ , por sua vez, possui dimensão  $9 \times 9$ . Desse modo, o elemento  $[\mathbf{Z}(\omega)]_{11}$  corresponde

à impedância própria da fase  $a$  na barra 1 enquanto o elemento  $[Z(\omega)]_{13}$  representa a impedância transferência entre as fases  $a$  e  $c$  das barras 1 e 3.

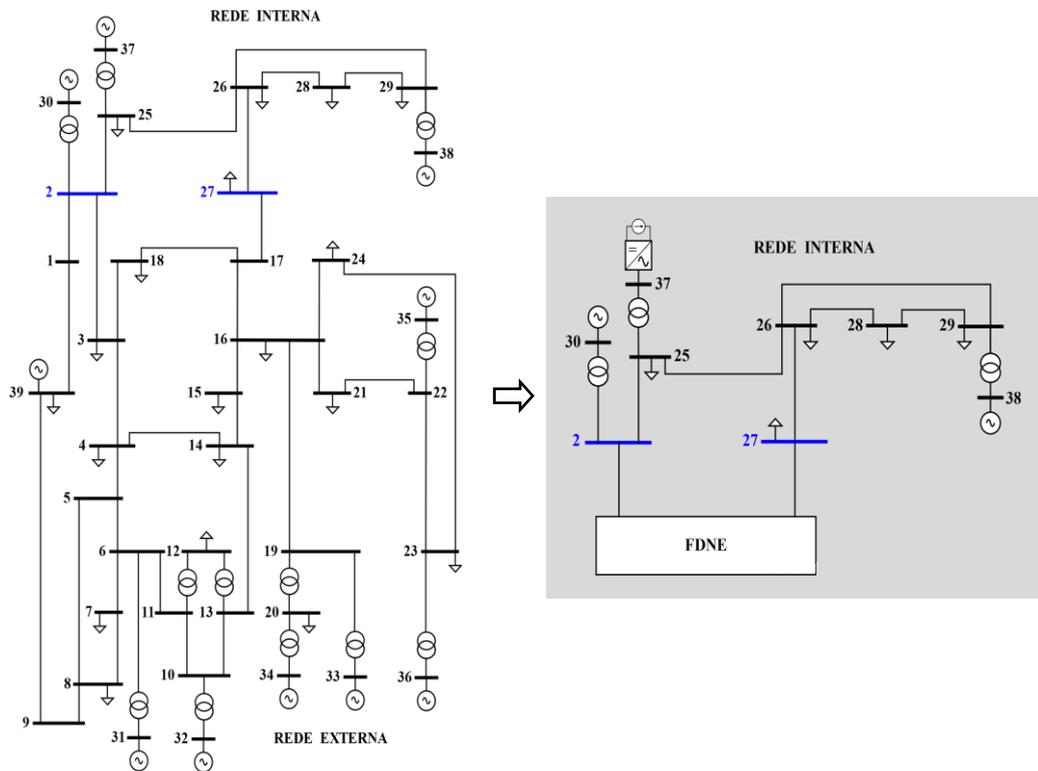


Fig. 2. Sistema elétrico IEEE 39 barras.

### 3.3 Modelo integrado FDNE multiportas → PSCAD/EMTDC

Uma vez sintetizado o cartão de entrada do modelo FNDE, realiza-se a parametrização do equivalente no ambiente PSCAD/EMTDC. O modelo FDNE está disponível na biblioteca de elementos passivos da ferramenta. Na janela de configuração, são informados o número total de portas do modelo e o local onde o cartão de entrada, em formato *.out*, está armazenado. Na sequência, na janela de opções do ajuste, é escolhida a técnica de ajuste desejada, o número de polos usados e o erro percentual máximo permitido. Na aba denominada injeção de potência, informa-se a parcela ativa da rede equivalentada. Tipicamente, a parcela ativa refere-se a corrente de curto-circuito trifásica nas barras de fronteira da rede externa [15].

Contudo, a partir da versão 5.0.0 do PSCAD/EMTDC, pode-se informar o estado operativo, em regime permanente, das barras fronteira da rede externa. Através de um segundo cartão de entrada, em formato *.txt*, define-se para cada fase as tensões eficazes, ângulos de barra e as injeções de potência, ativa e reativa, realizadas pelo equivalente na rede interna. Desse modo, o modelo FDNE integrado calcula a injeção de corrente correspondente. Os estados operativos das barras de fronteira podem ser obtidos diretamente a partir do resultado de um fluxo potência convergido na ferramenta ANAREDE. Maiores detalhes sobre os formatos dos cartões de entrada estão disponíveis em [14].

## 4 APLICAÇÕES E RESULTADOS

A metodologia proposta para síntese de equivalentes de rede multiportas dependentes da frequência em ambiente PSCAD/EMTDC, a partir das RFs obtidas através do HarmZs, foi aplicada no sistema elétrico IEEE 39 barras, também conhecido como sistema “New England”. Conforme ilustrado no diagrama esquemático da Fig. 2, as fronteiras entre as redes externa e interna foram definidas nas barras 2 e 27, destacadas em azul. O modelo PSCAD/EMTDC do sistema IEEE 39 barras, bem como os parâmetros elétricos da rede, estão disponíveis em [15]. A partir dos dados coletados, foram redigidos os cartões do ANAREDE das redes de sequência positiva e zero, para fins de levantamento das RFs da rede externa.

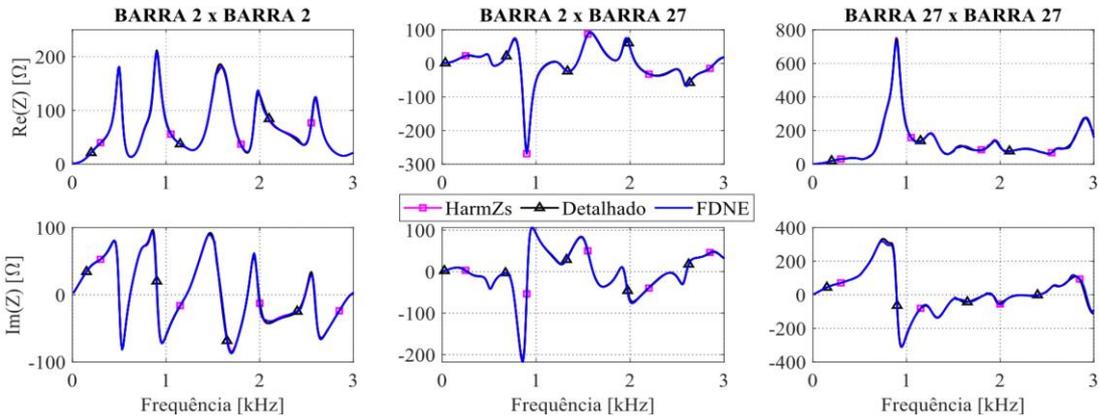


Fig. 4. Respostas em frequência de sequência positiva, próprias e de transferência, nos barramentos de fronteira.

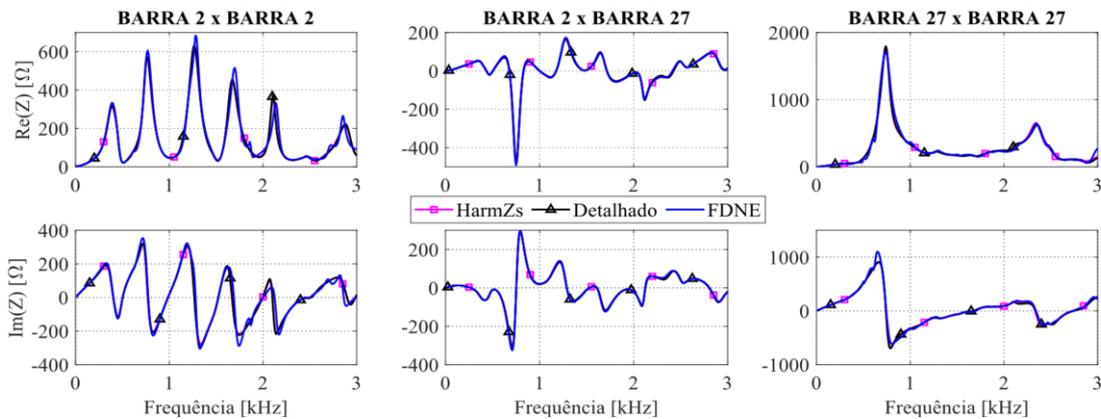


Fig. 4. Respostas em frequência de sequência zero, próprias e de transferência, nos barramentos de fronteira.

Para ressaltar a importância da utilização de modelos FDNEs em estudos de EMT, a geração conectada a barra 37, com uma potência especificada de 540 MW, foi substituída por uma fonte conectada via inversor de frequência. Tal fonte poderia ser, na prática, um parque eólico ou solar fotovoltaico. O modelo FDNE, sintetizado em ambiente PSCAD/EMTDC, é ajustado para uma faixa de frequência até 3 kHz, faixa que se mostrou suficiente para capturar os fenômenos eletromagnéticos decorrentes de faltas elétricas ou manobras de equipamentos. Foram utilizados 85 polos para o ajuste, o que resultou em um erro absoluto máximo igual 0,89%. A Fig. 3 ilustra as respostas em frequência das impedâncias de sequência positiva, próprias e de transferência, nos barramentos 2 e 27 de fronteira da rede externa. As curvas em magenta representam as respostas computas via HarmZs enquanto aquelas em preto representam as RFs do sistema completo modelado detalhadamente no PSCAD/EMTDC. As curvas em azul descrevem as impedâncias sintetizadas pelo modelo FDNE. De modo semelhante, a Fig. 4 descreve as respostas em frequência de sequência zero. Nota-se, portanto, um elevado grau de similaridade entre as curvas, assegurando que o modelo equivalente em frequência reproduz adequadamente o comportamento da rede externa ao estudo.

De modo a avaliar o comportamento transitório do modelo FDNE sintetizado, uma falta monofásica é aplicada na fase *a* da barra 2 em  $t = 0,5 s$  e removida após  $50 ms$ . A Fig. 5 ilustra a corrente que flui no ramo entre a barra 2 e a rede externa. Por sua vez, a Fig. 6 ilustra a tensão na barra 2. As curvas em azul ilustram as grandezas para o sistema completo (zona de estudo e rede externa modelados em detalhe), as curvas em magenta representam o sistema reduzido (zona de estudo modelada em detalhe e rede externa substituída pelo modelo FDNE). A título de comparação, as curvas em vermelho reproduzem as tensões e correntes para o modelo equivalente de curto-circuito ou de 60 Hz.

As Fig. 5 e 6 mostram a excelente conformidade entre os modelos completo e reduzido utilizando o FDNE, bem como os desvios significativos do equivalente de 60 Hz. Deve-se ressaltar que, dependendo do sistema e do evento elétrico, esses desvios podem ser ainda mais significativos. Para este caso em específico, a corrente de falta no modelo equivalente de 60 Hz leva a uma interpretação menos conservadora dos

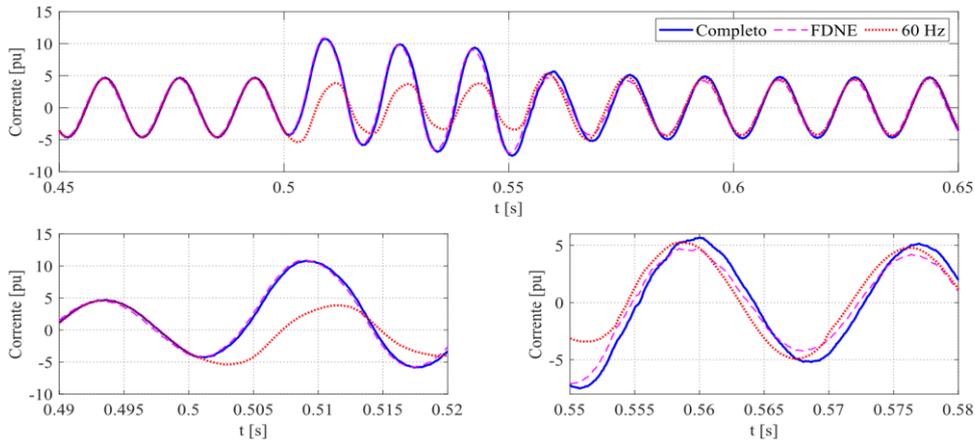


Fig. 5. Corrente na fase *b* da barra 2 para uma falta monofásica na fase *a*.

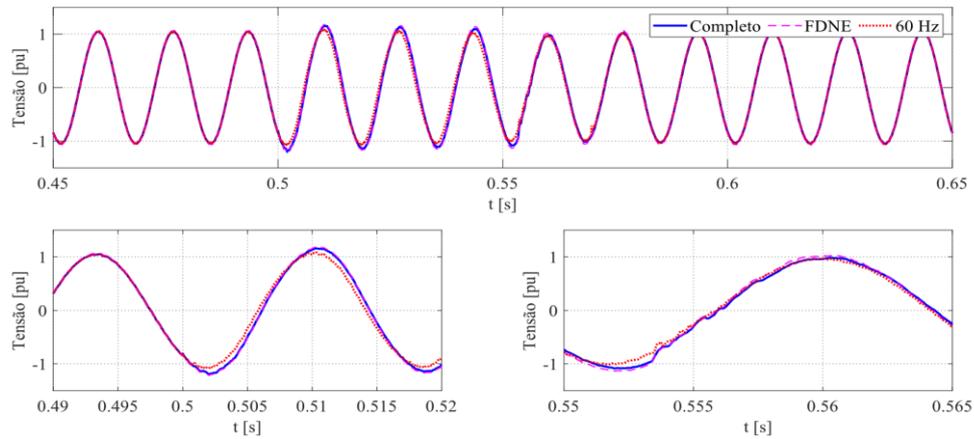


Fig. 6. Tensão na fase *b* da barra 2 para uma falta monofásica na fase *a*.

resultados. Por sua vez, como esperado, o modelo FDNE coloca-se como uma alternativa mais precisa para reproduzir a dinâmica da rede externa em estudos de EMT, sem a necessidade do aumento do número de vizinhanças elétricas tal como para um modelo equivalente de curto-circuito.

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho abordou a síntese de modelos FDNEs em ambiente PSCAD/EMTDC, a partir das RFs computadas via HarmZs. Para validar a metodologia proposta, foi realizada a síntese do modelo equivalente de uma parcela da rede do sistema IEEE 39 barras. Nos estudos realizados, tanto a rede de sequência positiva com a de sequência zero foram consideradas, fundamentais nas análises dos defeitos de maior ocorrência no sistema elétrico, as faltas monofásicas.

Os resultados obtidos indicam que a metodologia proposta se coloca como uma alternativa robusta para a síntese de modelos equivalentes FDNE em ferramentas do tipo EMT, dado a forma expedita e precisa em que a ferramenta HarmZs realiza o cálculo do comportamento em frequência das impedâncias equivalentes. Uma vez que a base de dados para fluxo de potência (ANAREDE) é compatível e, num futuro próximo, com a inclusão da base de dados de curto-circuito (ANAFAS), o programa HarmZs se tornará uma poderosa ferramenta para o setor. Com o crescente aumento da inserção de fontes conectas via inversor na rede, representar o comportamento em frequência do Sistema Interligado Nacional – SIN se tornará imprescindível, tanto para os agentes quanto para o Operador Nacional do Sistema (ONS), devido às interações características em frequências mais elevadas destes equipamentos.

Por fim, o modelo integrado FDNE em ambiente PSCAD/EMTDC também viabiliza a utilização deste tipo de equivalente em estudos do tipo EMT, em virtude da criação dos FDNEs de forma automática. Neste caso, apenas as RFs da rede equivalentada, no formato que melhor convir, e os parâmetros do ajuste são necessários. Esta característica supera uma das grandes dificuldades para a utilização destes equivalentes,

que consiste na síntese propriamente dita do modelo FDNE trifásico. Além disso, para alguns casos, o modelo integrado assegura a característica de passividade do equivalente, imprescindível para garantir a estabilidade do FDNE durante a simulação computacional.

## 6 REFERÊNCIAS

- [1] C. O. Costa, F. C. Véliz, S. L. Varricchio, S. Gomes Jr e G. N. Taranto, “Análises de Resposta em Frequência e de Vizinhanças Elétricas para Determinação de Modelos Reduzidos de Redes para Estudos de Transitórios Eletromagnéticos,” em *XIII Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - XIII SEPOPE*, Foz do Iguaçu, 2014.
- [2] T. M. Campello, C. O. Costa e S. L. Varricchio, “Construção de Modelos Racionais no Programa HarmZs Utilizando Ajuste Vetorial de Respostas em Frequência,” em *XXVI SNTPEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro, 2022.
- [3] 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 pela UNB, Brasília, Dezembro, 2015.
- [4] S. Gomes Jr., C. Portela e N. Martins, “Detailed Model of Long Transmission Lines for Modal Analysis of ac Networks,” em *IPST’01 - International Conference on Power System Transients*, Rio de Janeiro, Brasil, 2001.
- [5] 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,” em *XXI SNTPEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Florianópolis, SC, 2011.
- [6] T. Noda, “Frequency-Dependent Modeling of Transmission Lines Using Bergeron Cells,” *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, vol. 12, n° S2, pp. S23-S30, 2017.
- [7] A. R. J. Araújo, R. C. Silva e S. Kurokawa, “Representation of Transmission Lines: A Comparison between the Models Distributed Parameters and Lumped Parameters,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, n° 4, pp. 1047-1052, 2013.
- [8] S. L. Varricchio e T. M. Campello, “Compatibility among Electrical Network Component Models of Computational Power System Analysis Programs,” *IEEE Latin America Transactions*, vol. 17, n° 5, pp. 833-842, 2019.
- [9] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr. e R. D. Rangel, “Three Winding Transformer S-Domain Model for Modal Analysis of Electrical Networks,” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, pp. 420-429, 2011.
- [10] S. L. Varricchio, F. C. Véliz, C. O. Costa, R. P. D. Ross e J. R. Medeiros, “Determinação das Cargas Lineares Críticas para Estudos de Comportamento Harmônico do Sistema Interligado Nacional,” em *XIX SNTPEE - Seminário Nacional De Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- [11] J. C. Das, *Power System Analysis: Short-Circuit, Load Flow and Harmonics*, Boca Raton, EUA: CRC Press, 2012.
- [12] N. Watson e J. Arrillaga, *Power Systems Electromagnetic Transients Simulation*, The Institution of Engineering and Technology (IET) Power and Energy Series, 2007.
- [13] T. M. Campello, S. L. Varricchio e G. N. Taranto, “Three-Phase Frequency-Dependent Network Equivalents in the ATP for Lumped Parameter Systems Using Descriptor Formulation, Rational Models, and Symmetrical Component Data,” *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 32, pp. 1690-1703, 2021.
- [14] “Modelo FNDE,” [Online]. Available: [https://www.pscad.com/webhelp-v5-01/Master\\_Library\\_Models/Passive/FDNE/Input\\_Data\\_File\\_Format2.htm](https://www.pscad.com/webhelp-v5-01/Master_Library_Models/Passive/FDNE/Input_Data_File_Format2.htm).
- [15] “New England,” [Online]. Available: <https://www.pscad.com/knowledge-base/article/28>.