



## GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

### CONSTRUÇÃO DE MODELOS RACIONAIS NO PROGRAMA HARMZS UTILIZANDO AJUSTE VETORIAL DE RESPOSTAS EM FREQUÊNCIA

**THOMAS MOREIRA CAMPELLO (1); CRISTIANO DE OLIVEIRA COSTA (2); SERGIO LUIS VARRICCHIO (2)  
COPPE/UFRJ (1); CENTRO DE PESQUISAS DE ENERGIA ELETRICA CEPEL (2)**

#### RESUMO

Atualmente, o HarmZs permite que equivalentes de redes dependentes da frequência (FDNEs) sejam construídos como modelos racionais (MRs), ou seja, modelos baseados nos polos e resíduos das funções de transferência (FTs) de interesse, obtidos ajustando suas respostas frequência com o método de Ajuste Vetorial ou Vector Fitting (VF). Estes FDNEs já podem ser utilizados em estudos de comportamento harmônico. No entanto, no domínio do tempo, em estudos de transitórios eletromagnéticos, é necessário garantir que sejam passivos, o que será feito futuramente. O programa também permite que equipamentos possam ser representados mais precisamente por MRs. Neste trabalho, são apresentadas as ferramentas relativas aos MRs recentemente implementadas.

**PALAVRAS-CHAVE:** HarmZs; Harmônicos; Transitórios Eletromagnéticos; Equivalentes de Redes Dependentes da Frequência; Modelo Racional

#### 1.0 INTRODUÇÃO

O programa HarmZs [1] é uma ferramenta desenvolvida e fornecida pelo CEPEL para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas de grande porte, que tem como objetivo principal a identificação e proposição de soluções de problemas relacionados a harmônicos. Como exemplo de suas aplicações, pode-se citar os estudos de impacto harmônico devido ao acesso de novas instalações com conteúdo harmônico significativo à rede básica do Sistema Interligado Nacional (SIN) como complexos eólicos, solares, usinas siderúrgicas, mineradoras etc. e de equipamentos como compensadores estáticos e conversoras de corrente contínua, bem como o projeto de filtros para a mitigação das distorções harmônicas de tensão. O HarmZs possui um conjunto de ferramentas e interfaces gráficas (IG) que automatiza grande parte da execução destes estudos.

Além dos estudos de harmônicos, pretende-se que, futuramente, o HarmZs se torne uma ferramenta complementar importante aos estudos de transitórios eletromagnéticos (ETEMs) a ser utilizada em conjunto com programas como ATP, EMTP e PSCAD. Recentes implementações permitem a separação automática de uma rede completa em uma Área de Estudos (AEST) e uma Área Externa (AE). A AE é representada por equivalentes de redes elétricas que podem ser Equivalentes de Frequência Fundamental (EFFs) ou dependentes da frequência (FDNEs, Frequency Dependent Network Equivalent). Estes equivalentes já podem ser utilizados em análises harmônicas. No entanto, no domínio do tempo, em ETEMs, é necessário garantir que sejam passivos, o que será feito futuramente.

Os equivalentes comumente utilizados nos ETEMs são formados pelas impedâncias nodais próprias e de transferência vistas das barras de fronteira (barras que conectam as áreas externa e de estudo), calculadas apenas para a frequência fundamental do sistema (impedâncias de curto-circuito). Desta forma, as características da AE em frequências diferentes da fundamental são perdidas, o que pode implicar em erros graves em análises posteriores.

Os FDNEs possuem fidelidade (qualidade) maior do que os EFFs, pois preservam as características da AE para uma ampla faixa de frequências. Portanto, o uso de FDNEs tem importância fundamental para a realização dos ETEMs de forma precisa e confiável. Existem diversas abordagens para a construção destes equivalentes. Dentre as opções, os modelos racionais (MRs), ou seja, modelos baseados nos polos dominantes e resíduos associados das funções de transferência de interesse (normalmente as admitâncias próprias e de transferência vistas das barras de fronteira) têm sido amplamente utilizados para este propósito. Neste caso, o método mais utilizado para adquirir estes MRs é o Ajuste Vetorial, ou Vector Fitting (VF) [2, 3], que se mostrou bastante rápido, preciso e simples de ser utilizado e que tem sido amplamente empregado em diferentes tipos de aplicação, além da construção de FDNEs.

Portanto, devida a sua importância na construção de FDNEs, o VF foi implementado no programa HarmZs utilizando a linguagem C++. Pretende-se que, futuramente, o HarmZs possa ser utilizado para gerar automaticamente FDNEs e exportá-los para programas de transitórios eletromagnéticos. Assim, o usuário só necessitará modelar

trifásicamente em detalhes uma pequena parte da rede elétrica (AEST) para efetuar os ETEMs, sendo o restante do sistema substituído pelo FDNE. Deve-se observar que estes FDNEs podem ser construídos a partir de dados de redes disponíveis em arquivos de curto-circuito e de fluxo de potência.

A implementação do VF, cujo objetivo principal era utilizá-lo na construção de FDNEs, acabou tendo uma segunda aplicação: a representação mais precisa de equipamentos elétricos. Desta forma, é possível modelar transformadores considerando a impedância de curto-circuito variável na frequência e efeitos capacitivos [4, 5], linhas de transmissão com perfis de torre não convencionais [6, 7], aerogeradores (AEROs) de parques eólicos [8], etc., a partir de suas respostas em frequências. Estas respostas, que podem ser obtidas por meio de medições ou cálculos externos ao HarmZs, são ajustadas utilizando o VF para obtenção de um MR capaz de representar com precisão o equipamento elétrico em questão dentro de uma rede elétrica que se deseja estudar.

Portanto, o objetivo deste informe técnico (IT) é apresentar as ferramentas implementadas no programa HarmZs para a criação de FDNEs e para a modelagem precisa de equipamentos, utilizando suas respostas em frequência medidas ou calculadas. Será apresentada a criação de um FDNE a partir de um sistema real de grande porte e serão feitas comparações com o EFF. Para a modelagem mais precisa de um equipamento, será utilizado, como exemplo, a modelagem da impedância de um aerogerador de um parque eólico.

## 2.0 CONTEXTUALIZAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Conceito de Separação de Redes

Ao se realizar ETEMs, não é viável modelar detalhadamente todos os elementos de uma rede (sistema) de grande porte. Deste modo, é necessário modelar em detalhes apenas uma pequena parte da rede para que se tenha boa precisão na análise dos fenômenos na área em que se deseja estudar, substituindo o restante por um equivalente. A necessidade de equivalentes se dá, primeiramente, pela inacessibilidade ou inexistência de bases completas de dados de transitórios eletromagnéticos de sistemas de grande porte, como o SIN. Aliado a isso, os programas que fazem este tipo de estudos normalmente não suportam a modelagem de sistemas de grande porte em suas versões padrões. Por esses motivos, a separação da rede de grande porte em duas áreas, com a maior delas sendo representada por um equivalente, é fundamental para a viabilização dos ETEMs.

Na Figura 1 - (a) está mostrada uma rede dividida em duas áreas. A AEST, de pequena dimensão, deve ser modelada em detalhes nos programas de simulação de transitórios eletromagnéticos, como o ATP e PSCAD. A AE, compreendendo o restante do sistema, deve ser modelada por um equivalente. As barras que conectam essas duas áreas são chamadas de barras de fronteira.

Atualmente, o equivalente de rede mais utilizado para representar a AE é o EFF, que pode ser facilmente obtido com auxílio de programas de curto-circuito e fluxo de potência como, por exemplo, ANAFAS [9] e ANAREDE [10]. Porém, este EFF representa com precisão o comportamento da AE apenas na frequência fundamental do sistema, perdendo suas características para as demais frequências. Para contornar este problema, usualmente é feita uma expansão da área modelada em detalhes em algumas vizinhanças elétricas [11, 12]. Essa nova AEST expandida é chamada de Área Interna (AI), enquanto a nova AE (reduzida em função da expansão da AEST) é denominada de Área Externa Reduzida (AER), como mostra a Figura 1 - (b).

Deve-se ressaltar que a definição da AI é um problema prático de solução trabalhosa quando se utiliza EFFs. A Figura 1 - (b) apresenta, para facilitar a compreensão, a AI expandida em apenas uma vizinhança elétrica. Os procedimentos de redes (PR), definidos pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), recomendam a expansão em pelo menos 3 vizinhanças [13]. Entretanto, na prática, o número de vizinhanças expandidas deve ser muito maior, como evidenciado no Item 4.1.1 e 4.1.2 e em [12, 14]. Quando se utiliza FDNEs, não é necessário se definir uma AI, uma vez que este tipo de equivalente consegue representar com alta precisão a AE.

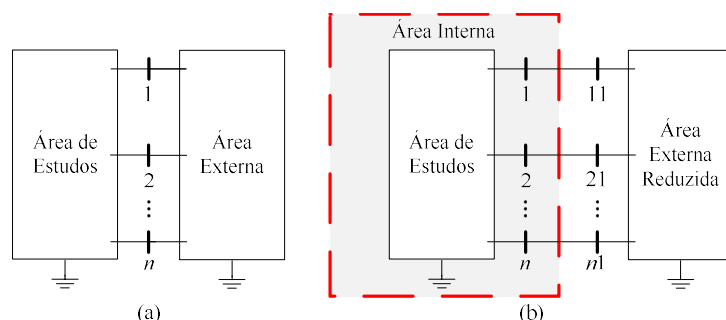


Figura 1 – Sistema completo dividido em: (a) área de estudos e área externa; (b) área interna, que engloba a área de estudos, e área externa reduzida.

Foi implementado no programa HarmZs uma lógica de separação de redes, baseada em um critério de vizinhanças elétricas [12], que auxilia o usuário, através de uma IG, nesta tarefa. Esta separação é realizada a partir da entrada dos dados do sistema completo e das definições da(s) barra(s) de interesse e de até qual vizinhança, a partir desta(s) barra(s), se deseja expandir a AEST. Esse processo será detalhado no Item 4.1.1.

## 2.2 Determinação das Funções de Transferência de Interesse para Equivalentes de Redes

Ao construir um equivalente de uma AE, que está conectada a uma AEST por  $n$  barras de fronteira, o MR que representa a parte passiva deste equivalente é obtido a partir de uma série de etapas. Primeiro, deve-se considerar a AE isolada da AEST e inativa, ou seja, com todas suas fontes internas de tensão e corrente anuladas (fontes de tensão curto-circuitadas e fontes de corrente em circuito aberto) [15].

A seguir, uma entrada  $u_m(s)$ , onde  $s$  denota a frequência complexa, é aplicada simultaneamente em cada barra de fronteira  $m$  ( $m = 1, \dots, n$ ) e é feita a medição da saída  $y_k(s)$  na barra  $k$  ( $k = 1, \dots, n$ ), considerando  $u_m(s) = 0$  em todas as barras, exceto na barra  $j$ , onde  $u_j(s) \neq 0$ . Dessa forma, pode-se definir a função de transferência (FT)  $H_{kj}(s)$ , como mostrado em (1). Cada uma destas FTs SISO (Single-Input Single-Output), ou escalares, compõe uma FT MIMO (Multi-Input Multi-Output), ou matricial  $\mathbf{H}(s) \in \mathbb{C}^{n \times n}$ , como mostrado em (2).

$$H_{kj}(s) = \left. \frac{y_k(s)}{u_j(s)} \right|_{u_m(s)=0, m \neq j} \quad (1) \quad \mathbf{H}(s) = \begin{bmatrix} H_{11}(s) & H_{12}(s) & \cdots & H_{1n}(s) \\ H_{21}(s) & H_{22}(s) & \cdots & H_{2n}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ H_{n1}(s) & H_{n2}(s) & \cdots & H_{nn}(s) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Deve se observar que  $\mathbf{H}(s)$  é uma matriz simétrica que possui  $N_{FT} = 0.5n(n+1)$  elementos diferentes.

Estas entradas  $u_j$  e saídas  $y_k$  genéricas podem ser tensão ou corrente. Para a obtenção de MRs de admitância, as entradas são fontes ideais de tensão ( $u_m = v_m$ ) e as saídas as correntes geradas por elas ( $y_k = i_k$ ), como mostrado na Figura 2 - (a). Para MRs de impedância, as entradas são fontes ideais de corrente ( $u_m = i_m$ ) e as saídas as tensões resultantes em cada uma das barras de fronteira ( $y_k = v_k$ ), como mostrado na Figura 2 - (b).

Desta forma, a FT MIMO  $\mathbf{H}(s)$  pode representar uma matriz de admitâncias  $\mathbf{Y}(s)$  ou de impedâncias  $\mathbf{Z}(s)$ , sendo  $\mathbf{Z}(s) = \mathbf{Y}(s)^{-1}$ .

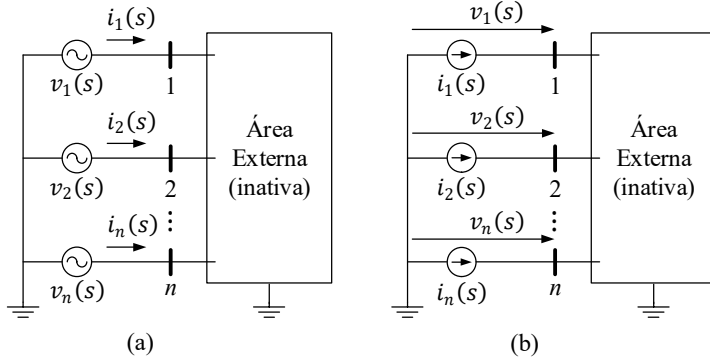


Figura 2 – Área externa inativa com fontes ideais e medições em todas as barras de fronteira: (a) fontes de tensão e medições de corrente; (b) fontes de corrente e medições de tensão.

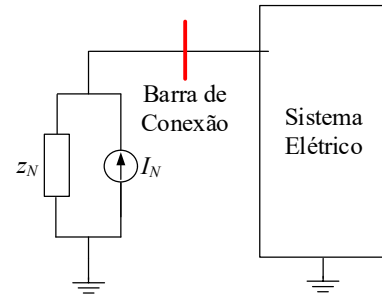


Figura 3 – Representação de equipamentos ou cargas não lineares em estudos harmônicos.

Cabe observar que os elementos destas matrizes representam admitâncias ou impedâncias nodais próprias das barras de fronteira da AE e de transferência entre elas. As respostas em frequência (RFs) destas admitâncias ou impedâncias podem ser facilmente obtidas através do programa HarmZs. Além disso, as IGs de criação de equivalentes de redes já informam ao usuário quais são as FTs necessárias para criação do equivalente a partir da determinação automática do conjunto de barras de fronteira. Este conjunto é apresentado após se realizar a separação da rede, quando se está trabalhando com redes completas, ou através de sua definição, por parte do usuário, quando é a AE que está carregada no programa.

## 2.3 Modelagem Precisa de Equipamentos

Muitas vezes não se conhece a modelagem de um equipamento através de seus parâmetros físicos (resistências, indutâncias e capacitâncias). Isto se deve ao fato de, muitas vezes, os fabricantes não a possuírem ou não a disponibilizarem. É possível, também, que a modelagem tenha sido feita para outro programa que não seja compatível com o que está sendo utilizado para realizar as análises.

Uma forma convencional de modelagem de um equipamento é através de seu equivalente de Norton, como mostrado na Figura 3 [16], onde  $I_N$  representa suas injeções de correntes harmônicas e  $z_N$  sua impedância equivalente, geralmente, variável na frequência. Por esse motivo, a construção do MR desta impedância, utilizando sua RF, é uma ferramenta bastante poderosa para a modelagem precisa de um equipamento. Estas curvas de RF podem ser obtidas através de medições nos terminais dos equipamentos, ou por meio de cálculos. Elas podem ser curvas de impedâncias ou de admitâncias primitivas, diferentemente das que são utilizadas na construção dos equivalentes de redes, que são nodais.

A matriz  $\bar{\mathbf{H}}(s) \in \mathbb{C}^{t \times t}$  das grandezas primitivas vistas dos terminais do equipamento é apresentada em (3), sendo  $t$  o número de terminais do equipamento e  $h_{i0}(s)$ ,  $h_{ij}(s)$  suas impedâncias ou admitâncias primitivas que conectam o terminal  $i$  a terra e ao terminal  $j$ , respectivamente.

$$\bar{\mathbf{H}}(s) = \begin{bmatrix} h_{10}(s) & h_{12}(s) & \cdots & h_{1t}(s) \\ h_{21}(s) & h_{20}(s) & \cdots & h_{2t}(s) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{t1}(s) & h_{t2}(s) & \cdots & h_{t0}(s) \end{bmatrix} \quad (3)$$

#### 2.4 Utilização do Vector Fitting

O VF, apresentado em [2, 3], é um método iterativo utilizado para aproximar (ajustar) uma função matricial genérica de  $s$ , como  $\mathbf{H}(s)$  ou  $\bar{\mathbf{H}}(s)$ , por um MR  $\tilde{\mathbf{H}}(s)$ , utilizando um conjunto de  $N_s$  pontos de ajuste ( $s_1, s_2, \dots, s_{N_s}$ ) pertencentes a uma faixa de frequências de interesse finita. Esta aproximação é dada por (4), onde  $N_o$ ,  $\mathbf{R}_m$ ,  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{E}$  denotam o número de polos  $\lambda_m$  do MR (ordem), a matriz-resíduo associada e as matrizes de termos diretos e impróprios, respectivamente.

Cada elemento  $H_{ij}(s)$  de  $\mathbf{H}(s)$  (ou  $h_{ij}(s)$  de  $\bar{\mathbf{H}}(s)$ ) é aproximado por (5), onde  $R_{m(ij)}$ ,  $d_{ij}$  e  $e_{ij}$  são os elementos  $(i, j)$  das matrizes  $\mathbf{R}_m$ ,  $\mathbf{D}$  e  $\mathbf{E}$ , respectivamente. O erro RMS deste ajuste é calculado por (6), sendo  $\varepsilon_{ij}$  dado por (7).

$$\mathbf{H}(s) \cong \tilde{\mathbf{H}}(s) = \sum_{m=1}^{N_o} \frac{\mathbf{R}_m}{s - \lambda_m} + \mathbf{D} + s\mathbf{E} \quad (4)$$

$$H_{ij}(s) \cong \tilde{H}_{ij}(s) = \sum_{m=1}^{N_o} \frac{R_{m(ij)}}{s - \lambda_m} + d_{ij} + se_{ij} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{N_s} |\varepsilon_{ij}(s_k)|^2}{N_{FT} N_s}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_{ij}(s_k) = H_{ij}(s_k) - \tilde{H}_{ij}(s_k) \quad (7)$$

Nas IGs de criação de MRs implementadas no programa HarmZs, o método VF é utilizado de forma automática, sem a necessidade de iterações por parte do usuário. Entretanto, caso seja de interesse, é possível se abrir um menu de opções avançadas, dando acesso a diversos parâmetros, como tolerância, número máximo de iterações do VF, etc.

Cabe ressaltar também que, além do VF padrão, foram implementadas diversas melhorias no método, como: critério de parada a partir do erro calculado em (6) [17], VF “rápido” [18] e “relaxado” [19], definição automática do número de polos do MR [20], definição automática do conjunto inicial de polos [20], incremento automático da ordem do MR para obter maiores precisões do ajuste [20] e, por fim, decremento automático da ordem para casos que possuam mais polos do que o necessário para obter o ajuste com a precisão desejada [20].

### 3.0 SISTEMA TESTE

Para apresentar a utilização das IGs implementadas no HarmZs, foi utilizado um caso do Plano Decenal de Expansão de Energia publicado em 2019 (PDE 2019), cujo cenário é de carga média, Norte úmido e ano de 2029. O sistema completo possui 9682 barras. O diagrama da Figura 4 apresenta a região no entorno da subestação de João Câmara III (barra 523), no estado do Rio Grande do Norte, que está destacada em vermelho.

Foi escolhido como AEST um ramal da rede de transmissão que conecta alguns parques eólicos da região, tendo, então, a barra da subestação de João Câmara III como Ponto de Acoplamento Comum (PAC) destes parques. Esta área é destacada em azul no diagrama da Figura 4. Além da AEST, estão destacadas as barras e componentes elétricos da primeira (em verde), segunda (em lilás) e da terceira vizinhança (em marrom) da barra do PAC (em vermelho).

As gerações conectadas as barras 56653, 56668 e 56669, dentro da AEST, representam parques eólicos. Cada um deles deve ser modelado como uma fonte de corrente harmônica em paralelo com uma impedância para a terra em estudos de análise harmônica [16]. Essas barras, que originalmente são modeladas como barras do tipo PV (são especificados os valores de potência ativa injetada e de tensão) no programa ANAREDE, são automaticamente

convertidas para fontes de tensão ideais quando carregadas no HarmZs. Dessa forma, é necessário que o usuário faça a substituição das fontes que representam os AEROs que estão dentro da AEST por equivalentes de Norton adequados, fornecidos pelas fabricantes dos equipamentos. Neste IT, para facilitar a explicação no Item 4.2, a impedância dos três AERO serão representados por um circuito RLC série com a resistência igual a 4.515 pu, reatância indutiva igual a 1.4 pu e susceptância capacitiva igual a 0.06 pu.

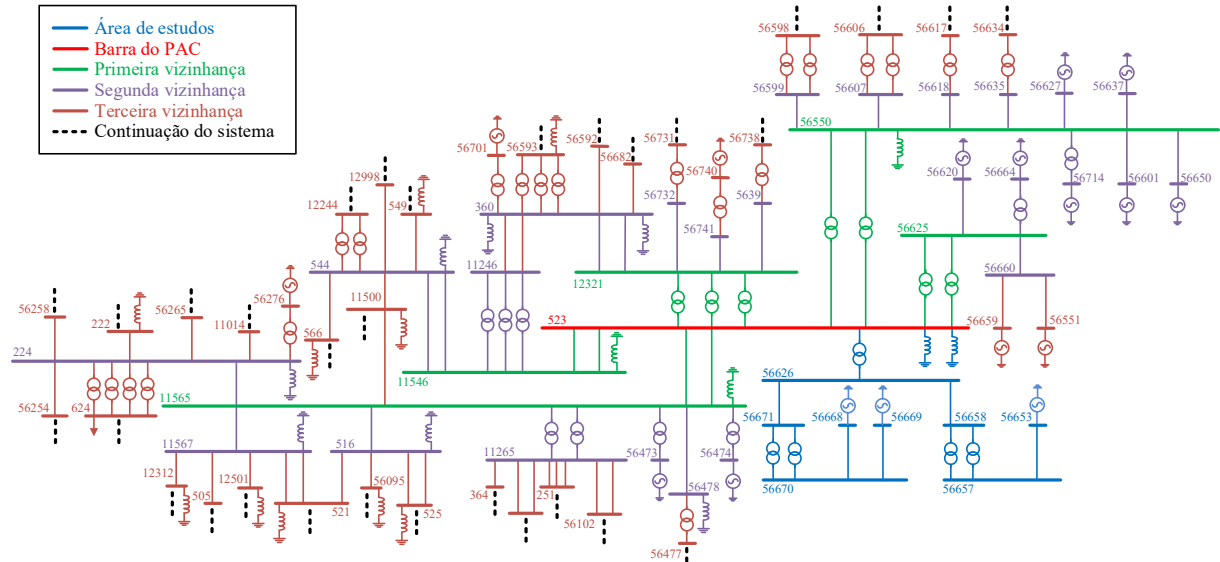


Figura 4 – Diagrama Unifilar até a terceira vizinhança da barra da SE de João Câmara III - RN 500 kV (barra 523).

## 4.0 INTERFACES GRÁFICAS E EXEMPLOS DE UTILIZAÇÃO

### 4.1 Equivalentes de Redes

Para o auxílio na criação de equivalentes de redes foram desenvolvidas duas IGS, mostradas na Figura 5. A Figura 5 - (a) mostra a interface criada para auxiliar na separação da rede completa e na obtenção tanto dos EFFs quanto dos FDNEs. A Figura 5 - (b) apresenta a interface criada para a obtenção apenas de FDNEs.

A primeira interface é recomendada quando se possui um arquivo único com o sistema completo e se deseja um fazer a separação da rede. O usuário informa quais as barras piloto, ou de interesse, e quantas vizinhanças a partir destas barras ele deseja incluir na AI. Como o usuário fornece o sistema completo, o programa permite o cálculo do EFF para diversas vizinhanças de forma automática e, assim, possibilitar a análise de qual delas seria a melhor escolha, dentro de um erro aceitável, para ser utilizada com este tipo de equivalente.

A segunda interface é utilizada quando a separação de redes já foi realizada, de forma manual ou pela primeira interface, e o usuário já conhece quais são as barras de fronteira entre a AI (ou AEST) e a AE.

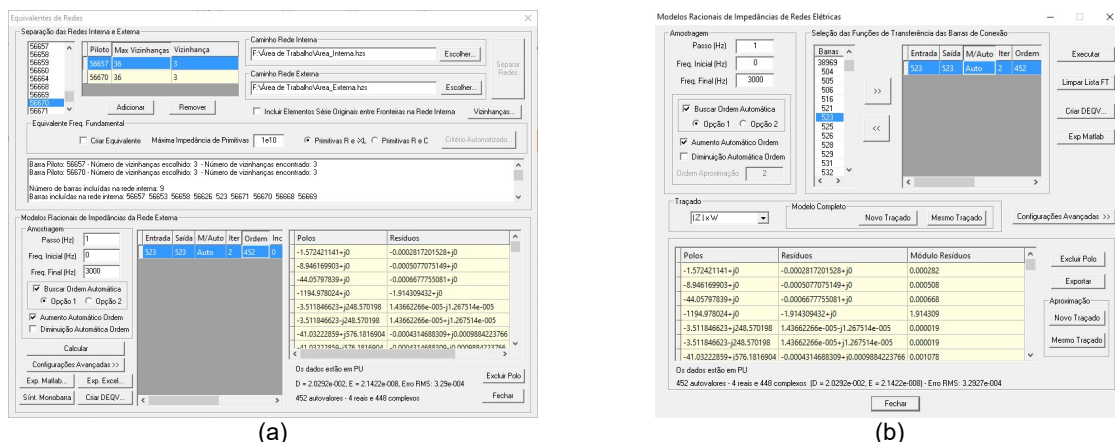


Figura 5 – Interfaces gráficas para auxílio na criação de equivalentes de redes.

#### 4.1.1 Separação de Redes

Como já citado, para o exemplo neste IT, foi selecionada uma AEST que se conecta à barra 523 do SIN, que representa a barra do PAC. A separação das redes pode ser feita de forma manual pelo usuário e, então, utilizar a interface mostrada na Figura 5 - (b) para a criação do FDNE. Porém, a interface exposta na Figura 5 - (a) permite que o usuário faça de forma automática este processo.

A seleção das barras piloto, ou de interesse, no topo da primeira interface permite a criação da AI a partir delas. Outra opção, quando já se tem uma AEST previamente definida, é informá-la ao programa selecionando algumas das barras de interesse e fazendo a expansão através delas. Para que a separação das redes deste exemplo fosse realizada, foram selecionadas 2 barras de interesse (56657 e 56670) e solicitado ao programa que fossem consideradas 3 vizinhanças a partir dessas barras, resultando na área em azul mostrada na Figura 4.

Vale ressaltar que estas vizinhanças, utilizadas para compor a AEST, são diferentes das vizinhanças mostradas na Figura 4, que são contabilizadas a partir da barra do PAC e considerando apenas a AE.

#### 4.1.2 Equivalentes de Redes de Frequência Fundamental

Uma vez selecionadas as barras piloto, o usuário pode escolher se o EFF será ou não calculado. Para este tipo de equivalente, são calculadas as impedâncias próprias e de transferência que representam a AE, vistas das barras de fronteira, e incluídas na AEST, ou AI, através do código de equipamentos elétricos (DEQP) do HarmZs. Note que no EFF é comum que apareçam resistências e reatâncias negativas, por mais que esses valores possam parecer contrintuitivos.

Ao se utilizar os EFFs, para que se tenha uma boa precisão dos resultados dentro da AEST, normalmente é necessário se definir a AI que, como já citado, é uma área maior do que a AEST representada em detalhes. Deste modo, foi implementada uma ferramenta (nomeada na interface da Figura 5 – (a) de “Critério Automatizado”) que permite ao usuário calcular o EFF desde uma vizinhança mínima até uma vizinhança máxima. Esta ferramenta faz a separação da rede para todas as vizinhanças escolhidas, o cálculo dos EFFs e ainda escreve um arquivo “batch” [21] para que seja possível calcular e traçar as RFs das barras de fronteira pertencentes a uma destas vizinhanças de forma automática para cada AI conectada ao EFF (sistema reduzido) e, posteriormente, analisar qual vizinhança é mais apropriada para o tipo de estudo que se quer realizar. Neste exemplo, solicitou-se ao programa que fizesse este cálculo por 12 vizinhanças, a partir da barra 523. Na Figura 4 a primeira, segunda e terceira vizinhança são representadas por diferentes cores, mostrando os limites de separação feita pelo programa.

A Figura 6 mostra a evolução do número de barras da AI e o respectivo erro RMS relativo ao valor RMS da impedância própria da barra 523. A Figura 7 mostra a comparação entre as RFs dos sistemas completo e reduzido, para diversos tamanhos da AI. Em especial, nas Figura 7 - (e) e (f), foi incluída a curva de erro entre as RFs para auxiliar na comparação entre os resultados.

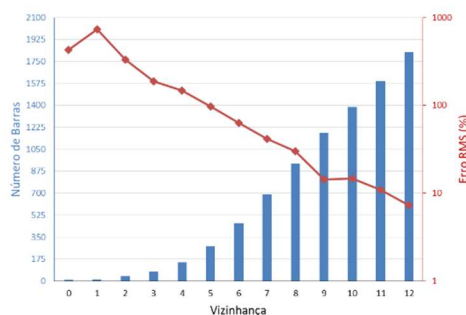


Figura 6 – Evolução do número de barras da área interna e do respectivo erro RMS.

Note que vizinhança 0 na Figura 6 significa que a AI é igual a AEST. Nesta figura, ainda é possível ver que o erro RMS da AI até a primeira vizinhança é maior do que o da AEST. Isso se dá pelo fato de que o erro RMS penaliza as maiores diferenças entre as duas curvas e, como pode ser observado na Figura 7 - (a) e Figura 7 - (b), o sistema reduzido com a AI até a primeira vizinhança possui mais picos e com valores absolutos maiores do que o sistema reduzido com a AEST.

Além disso, cabe observar que com a AI expandida até a terceira vizinhança, que é o mínimo sugerido pelos PRs [13], ainda não é suficiente para que se alcance uma boa precisão. Seria necessário a expansão até, pelo menos, a décima segunda vizinhança para se obter um erro menor que 10 %, considerando uma faixa de frequências de interesse até 3000 Hz, que é a utilizada em estudos de comportamento harmônico. Consequentemente, seria necessário que a AI fosse composta de 1824 barras, das 9682 que o sistema completo possui. Caso o usuário



desejasse levar este equivalente para um programa de simulações de transitórios eletromagnéticos (como ATP e PSCAD), uma AI desta dimensão poderia inviabilizar o estudo.

#### 4.1.3 Equivalentes de Redes Dependentes da Frequência

Uma vez separada a rede, como indicado no Item 4.1.1, as IGs indicam quais as FTs de interesse a serem ajustadas pelo VF. Para esse exemplo, foram utilizados valores padrões dos parâmetros do VF fornecidos pelo HarmZs. Assim, ao apertar no botão “Calcular” na interface mostrada na Figura 5 - (a), o ajuste das FTs é realizado e uma tabela com os polos e resíduos obtidos pode ser visualizada para cada uma das FTs, além do erro RMS, dado em (6), e da apresentação dos gráficos das FTs ajustadas na tela do programa para análise do usuário.

Neste exemplo, o programa definiu uma ordem de 452 para o MR e, em 2 iterações, obteve um erro RMS de  $3.2927 \times 10^{-4}$ , sendo que a tolerância padrão do ajuste é de  $10^{-3}$ . Essa tolerância padrão poderia ser reduzida, caso o usuário desejasse uma maior precisão no ajuste, porém isso provavelmente geraria um MR de ordem maior, além de um consumo mais elevado de tempo para o VF realizar o ajuste.

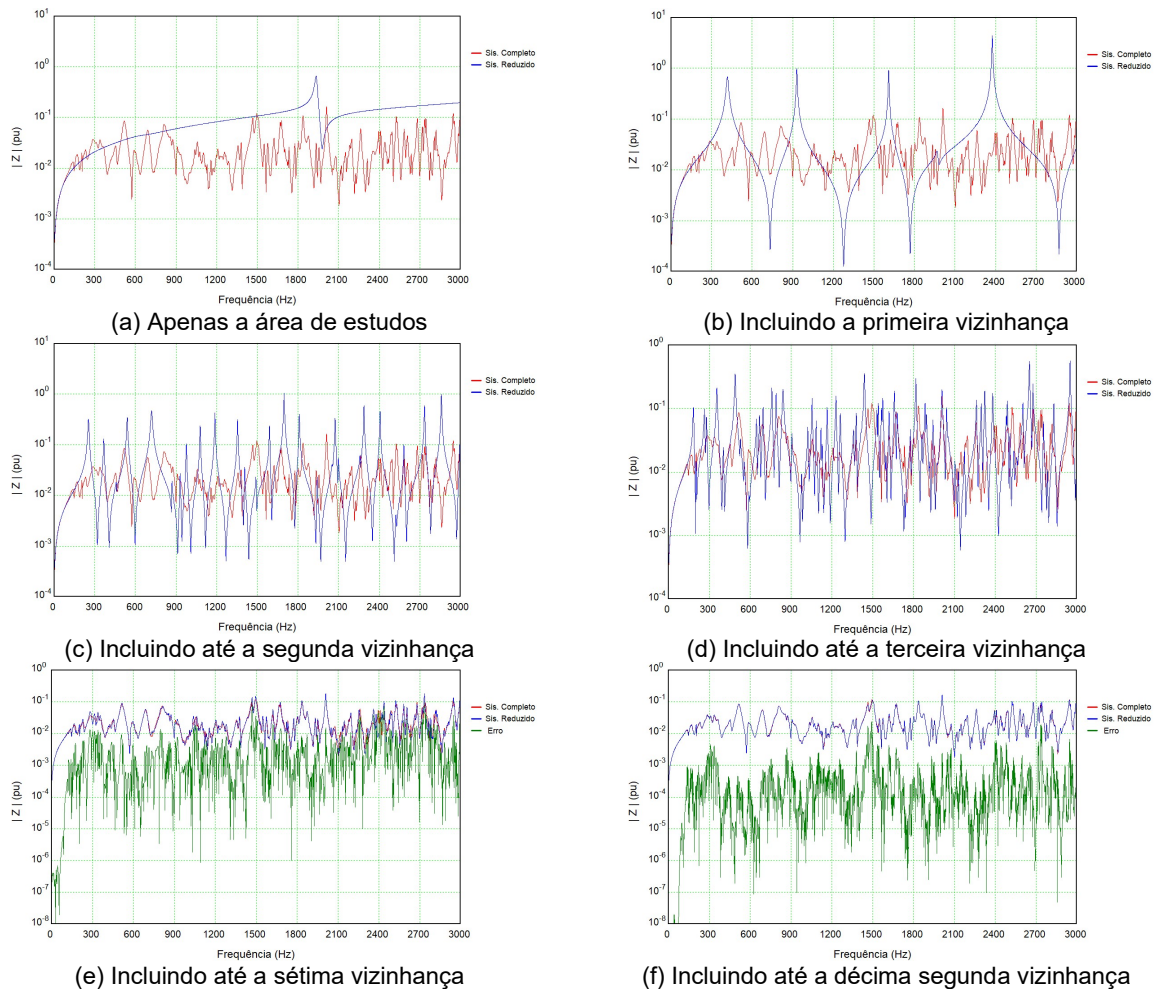


Figura 7 – Comparação entre as respostas em frequência dos sistemas completo e reduzido com diversos tamanhos de área interna.

Uma vez que o usuário esteja satisfeito com o ajuste, ele pode exportar o MR no formato do código DEQV (dados de equivalentes) para que seja utilizado no arquivo de entrada, representando a rede externa que se conecta à AEST. Na Figura 8 é apresentada a parte inicial do código. Note que o código DEQV aceita MRs tanto de impedância quanto de admitância. Atualmente, no entanto, as 2 interfaces apresentadas na Figura 5 geram apenas MRs de impedância.

A Figura 9 mostra a comparação entre as RFs dos sistemas completo e reduzido com o FDNE até 4000 Hz. Como o ajuste é feito, por padrão, utilizando a faixa de frequências de 0 a 3000 Hz, é necessário observar que o ajuste só é válido para a faixa de frequências selecionada. O erro RMS da RF do sistema reduzido mostrada na Figura 9, dentro da faixa de interesse, é de  $3.2312 \times 10^{-4}$ , ou 0.96 % de erro RMS relativo.

```

%
DEQV
% Dados informados em PU
% Tipo Z ou Y
Z
%
De Para
523 523
Termo_D 0.02829222871338368900+j0.00000000000000000000
Termo_E 0.00000002142267928712+j0.00000000000000000000
%
Polos
-1.57242114865384860000+j0.00000000000000000000
-8.94616998311680380000+j0.00000000000000000000
-44.05737839263768100000+j0.00000000000000000000
-1194.578023932713380000+j0.00000000000000000000
-3.51184662329262660000+j248.57019802682370000000
-41.83222859189679600000+j576.18169838277450000000
-51.82654483168791900000+j625.88373402985946000000
-35.98950292965554000000+j805.64532744655742000000
+3.18414689502945400000+j847.81702691887267000000
+30.12843834568758000000+j926.18142585857600000000
-3.39970252889917300000+j968.11755887152338000000
+44.41998981487544000000+j981.91481837466779000000
+109.41232631325862000000+j1061.95495981773900000000
-15.98408007955639000000+j1089.02856171391080000000
-11.25275649065091000000+j1120.14015349126600000000
-15.85242426311520400000+j1181.39944898572210000000
-3.52758188728661300000+j1294.40849311859000000000
Resíduos
-0.00028172015283889541+j0.00000000000000000000
-0.00050770751493776391+j0.00000000000000000000
-0.00066777558806783875+j0.00000000000000000000
-1.91438943225252700000+j0.00000000000000000000
0.00001436622659742473-j0.00001267513999816323
-0.00043146883889657123+j0.00098842237657793168
0.0015076646225890438-j0.00397912811943862410
0.00213413858103899000+j0.0123419823434686100
0.00014170873534916239+j0.0003849282966484970
-0.0096891487487351360-j0.23519670895458731080
-0.00387451129938880638-j0.00150021701741483470
-0.01818958122649962400-j0.22883841978081766000
1.78563898337046438000+j0.67634905210210872000
0.02583639182654380000+j0.02634837786335632000
0.01471806174546134000+j0.01588556675765663200
0.00386346840267453300-j0.00668948940115444440
0.0410592993866826500-j0.03649980282526477800

```

Figura 8 – Parte inicial do código DEQV exportado e incluído no arquivo de entrada de dados da área de estudos.

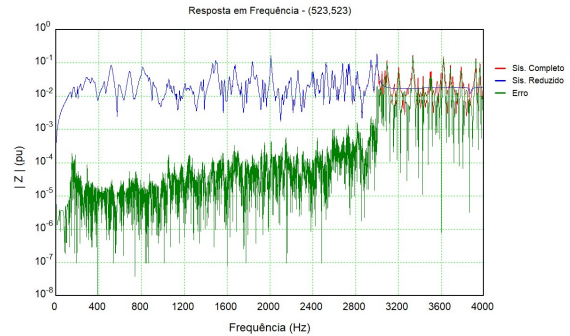


Figura 9 – Comparação entre as respostas em frequência dos sistemas completo e reduzido utilizando o FDNE.

## 4.2 Modelagem de Aerogeradores para Estudos Harmônicos

Por fim, a Figura 10 mostra a IG para a modelagem precisa de equipamentos. Neste IT, será utilizada para a construção do MR das impedâncias dos AEROs. Para estudos de comportamento harmônico, estes equipamentos devem ser representados por seus equivalentes de Norton, como mostra a Figura 3 [16]. Nesta modelagem, tanto as correntes harmônicas ( $I_N$ ) injetadas quanto a impedância ( $z_N$ ) são fornecidas pelo fabricante do equipamento. Para facilitar a demonstração, a impedância dos três AERO serão consideradas iguais e representadas por um circuito RLC série com a resistência igual a 4.515 pu, reatância indutiva igual a 1.4 pu e susceptância capacitiva igual a 0.06 pu.

Como dado de entrada desta IG, deve-se fornecer apenas a RF da impedância (ou admitância) primitiva do equipamento de interesse. Uma vez que se entra com esses dados, é possível utilizar o VF para fazer o ajuste desta resposta, obter o MR e, após isso, exportá-lo no formato do código DMODAL (dados de impedâncias ou admitâncias primitivas) para a inclusão no arquivo do sistema. Este código possui um formato semelhante ao do código DEQV, mostrado na Figura 8.

A RF da impedância dos AEROs foi ajustada por um MR com 4 polos e um erro RMS de  $1.786 \times 10^{-6}$ . Este MR foi, então, exportado e incluído como código DMODAL para cada um dos AEROS, substituindo os seus respectivos circuitos RLC. A Figura 11 mostra a comparação entre as RFs vista da barra de um dos AEROS (FT 56668-56668) com as impedâncias representadas pelo circuito RLC (em vermelho), negligenciada (em azul) e pelo MR definido no código DMODAL (em preto tracejado). Note que a curva preta está sobreposta à curva vermelha, demonstrando a precisão desse tipo de modelagem. Ressalta-se, também que, para uma melhor visualização, foi utilizada a opção oferecida pelo HarmZs de exportar a figura para o Matlab, para que pudesse ser feita com maiores detalhes.

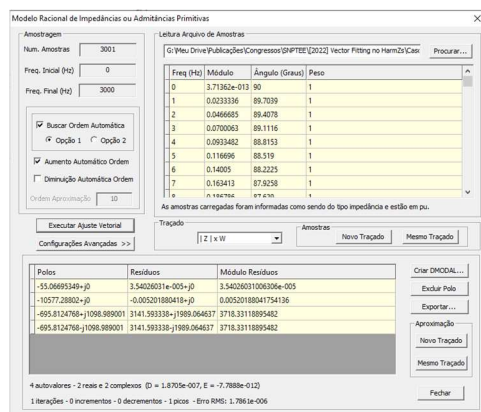


Figura 10 – Interface gráfica para modelagem precisa de equipamentos elétricos.

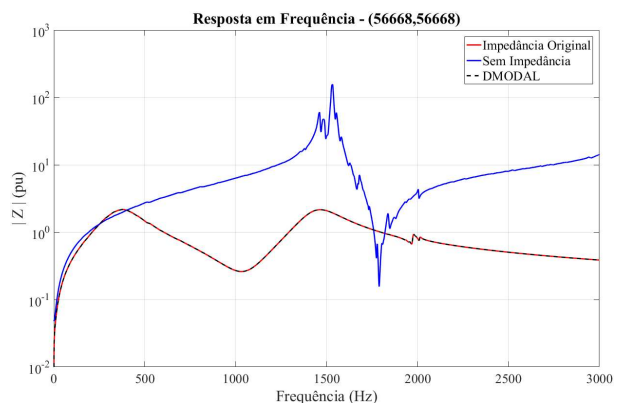


Figura 11 – Comparação entre as respostas em frequência considerando os AEROS da AEST com suas impedâncias modeladas pelo circuito RLC original, negligenciadas e pelo MR obtido pelo VF.

## 5.0 CONCLUSÃO

Neste IT foram apresentadas 3 novas IGs implementadas no HarmZs, programa desenvolvido e fornecido pelo CEPEL para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas de grande porte. Para a demonstração da utilização das IGs, foi utilizado o SIN para a separação da rede elétrica em AE, AEST e AI. Ainda,



as IGs foram utilizadas para construção de EFFs e FDNEs, mostrando a diferença de precisão entre estes dois tipos de equivalentes. Por último, foi apresentada uma IG que tem por objetivo a modelagem precisa das impedâncias ou admitâncias de equipamentos que não possuam modelos ou que não sejam disponibilizados. Para isto, é necessário apenas suas RFs, que podem ser obtidas a partir de medições ou cálculos.

## 6.0 AGRADECIMENTO

O primeiro autor deste IT agradece o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do CEPEL para a realização deste trabalho.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, "Manual de Utilização do Programa HarmZs - Versão 3.0," CEPEL, Rio de Janeiro, 2016.
- [2] B. Gustavsen e A. Semlyen, "Rational Approximation of Frequency Domain Responses by Vector Fitting," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, nº 3, pp. 1052 - 1061, Julho 1999.
- [3] B. Gustavsen e A. Semlyen, "A Robust Approach for System Identification in the Frequency Domain," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, nº 3, pp. 1167 - 1173, 2004.
- [4] L. C. Zanetta Jr., C. E. M. Pereira, R. M. Soares e A. A. C. Arruda, "Desenvolvimento de Ferramenta Computacional para Estudos Transitórios de Alta-Frequência em Transformadores," em *II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (CITENEL)*, Salvador, 2003.
- [5] B. Gustavsen, "Application of Vector Fitting to High Frequency Transformer Modeling," em *International Conference on Power Systems Transients - IPST 2003*, New Orleans, USA, 2003.
- [6] A. C. Lima, R. A. Moura, B. Gustavsen e M. A. Schroeder, "Modelling of non-uniform lines using rational approximation and mode revealing transformation," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, nº 8, pp. 2050-2055, 2017.
- [7] B. Gustavsen e A. Semlyen, "Simulation of Transmission Line Transients Using Vector Fitting and Modal Decomposition," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, nº 2, pp. 605-614, 1998.
- [8] D. N. M. M. Hussein, "A Wide-Band Dynamic Equivalent Model of Wind Power Plants for the Analysis of Electromagnetic Transients in Power Systems," Tese de doutorado pela Universidade de Toronto, Toronto, Canada, 2014.
- [9] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, "Programa de Análise de Faltas (ANAFAS) Versão 7.1.0 - Manual do Usuário," CEPEL, Rio de Janeiro, 2017.
- [10] CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, "Programa de Análise de Rede Versão 10.2.3 - Manual do Usuário," CEPEL, Rio de Janeiro.
- [11] L. C. Zanetta Jr., C. E. M. Pereira e A. A. C. Arruda, "Equivalentes de Redes Elétricas para Cálculos de Transitórios Eletromagnéticos," 2004.
- [12] 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.
- [13] Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), "Submódulo 23.3: Diretrizes e critérios para estudos elétricos," Rio de Janeiro, 2018.
- [14] 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.
- [15] C. M. Close, *The Analysis of Linear Circuits*, Hardcourt Brace Jovanovich, Inc, 1966.
- [16] N. Shore e et all, "AC Side Harmonics and Appropriate Harmonic Limits for VSC HVDC," Cigre, Paris, 2019.
- [17] T. M. Campello, S. L. Varricchio, G. N. Taranto e A. Ramirez, "Enhancements in Vector Fitting Implementation by Using Stopping Criterion, Frequency Partitioning and Model Order Reduction," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 120, p. 105905, 2020.
- [18] D. Deschrijver, M. Mrozowski, T. Dhaene e D. De Zutter, "Macromodeling of Multiport Systems Using a Fast Implementation of the Vector Fitting Method," *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, vol. 18, nº 6, pp. 383-385, 2008.
- [19] B. Gustavsen, "Improving the Pole Relocating Properties of Vector Fitting," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, nº 3, pp. 1587-1592, 2006.
- [20] C. O. Costa, "Equivalentes de Redes Utilizando Vizinhanças Elétricas com Possíveis Aplicações em Estudos de Harmônicos e Transitórios Eletromagnéticos," Dissertação de Mestrado pela COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2013.
- [21] C. O. Costa, S. L. Varricchio e F. C. Veliz, "Automatização Computacional de Estudos de Comportamento Harmônico," em *XI Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão - XI SEPOPE*, Belém, 2009.

## DADOS BIOGRÁFICOS



**THOMAS MOREIRA CAMPELLO** 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.



**CRISTIANO DE OLIVEIRA COSTA** recebeu o grau de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2002. Em 2013 obteve o seu mestrado pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalha no CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica desde 2002, onde atua como pesquisador na equipe de desenvolvimento do programa HarmZs, para estudos de comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas. Suas áreas de interesse são qualidade de energia e transitórios eletromagnéticos.



**SERGIO LUIS VARRICCHIO** 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, projetando sistemas de aterramento. De 1988 a 1989 e de 1998 a 1999 foi docente em Teoria Eletromagnética na UCP. Desde 1989 trabalha no CEPEL como pesquisador e gerente de projetos, tendo sido o idealizador do programa HarmZs, largamente utilizado no setor elétrico. Seus interesses incluem qualidade de energia, transitórios eletromagnéticos e redução da ordem de modelos.