



GRUPO - 10

GRUPO DE ESTUDO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

**ESTRATÉGIA PARA O USO EFICIENTE DO MÉTODO DE AJUSTE VETORIAL PARA A OBTENÇÃO DE
MODELOS REDUZIDOS DE REDES ELÉTRICAS**

Thomas M. Campello (*)
CEPEL/COPPE

Sergio L. Varricchio
CEPEL

Cristiano D. O. Costa
CEPEL

Glauco N. Taranto
COPPE/UFRJ

RESUMO

O Ajuste Vetorial ou *Vector Fitting* (VF) é atualmente o método mais popular para a aproximação de respostas em frequência de funções de transferência (FTs) de interesse por frações parciais (funções racionais) de baixa ordem. Observa-se que estas funções racionais podem ser utilizadas eficientemente para a construção de equivalentes dinâmicos de redes elétricas para estudos de transitórios eletromagnéticos. Neste artigo é proposta uma estratégia para a utilização mais eficiente e automatizada do VF, diminuindo seu esforço computacional (menor tempo de CPU) e eliminando a dependência que o algoritmo tem com o usuário para a definição de alguns parâmetros de entrada.

PALAVRAS-CHAVE

Transitórios Eletromagnéticos, Vector Fitting, Estimativa Automática da Ordem de Modelos Reduzidos, HarmZs

1.0 - INTRODUÇÃO

Um dos grandes problemas ao se realizar estudos de transitórios eletromagnéticos é a necessidade de determinado rigor ao se modelar o Sistema Elétrico de Potência onde, por exemplo, é de fundamental importância se considerar a natureza distribuída e variável com a frequência dos parâmetros das linhas de transmissão (LTs) [1], [2]. Note que, em geral, nas análises de regime permanente, estes parâmetros de LTs podem ser considerados concentrados e constantes com a frequência, o que resulta em modelos matemáticos mais simples.

Desta forma, considerando a complexidade de um sistema de transmissão de grande porte, representar todos os seus equipamentos torna-se uma tarefa inviável, tanto no que tange ao esforço empenhado pelo analista em preparar os dados de toda a rede com detalhes, quanto ao esforço computacional (tempo de processamento) despendido para se realizar os estudos de transitórios eletromagnéticos. Nesse sentido, faz-se necessário modelar de forma detalhada a área de interesse, onde se queira investigar o comportamento diante de fenômenos transitórios eletromagnéticos, e utilizar modelos equivalentes, calculados para uma faixa de frequência definida, para modelar a região que não é de interesse no estudo.

Em geral, devido à dificuldade de implementação de equivalentes dinâmicos, além do fato dos bancos de dados das redes de grande porte estarem modelados, na sua maioria, para programas de curto-circuito ou fluxo de potência, os equivalentes empregados em estudos de transitórios eletromagnéticos são calculados a partir da impedância de curto-circuito na frequência fundamental, o que pode ser muito impreciso dependendo da rede a ser representada pelo equivalente e da extensão da área onde será representado seu modelo completo.

Para a construção de tais equivalentes dinâmicos, uma das abordagens computacionais mais eficientes é a aproximação das respostas em frequência de interesse por funções racionais de baixa ordem. Muitos métodos foram criados para esta aproximação racional ao longo dos anos, porém, em 1999, foi proposto o Método de Ajuste

(*) Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, Avenida Horácio Macedo, 354 - Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro, RJ, Brasil – CEP 21.941-911 – sala C-25
Tel: (+55 21) 2598-6198 – Email: thomasmcampello@gmail.com.br

Vetorial ou, em inglês, *Vector Fitting* (VF) [3], que se mostrou bastante rápido, preciso e robusto e por isso tem sido amplamente empregado em diferentes tipos de aplicação, além da construção de equivalentes de redes elétricas [4], como, por exemplo, modelagem de LTs e transformadores para cálculo de transitórios eletromagnéticos [5] [6], modelagem do sistema térmico de baterias de veículos elétricos [7], análises de blindagem para compatibilidade eletromagnética, modelagem de sistemas eletrônicos de micro e mili-ondas e análises de ondas viajantes.

Para a utilização do método VF são necessários alguns parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário que são: valores previamente medidos ou calculados das funções a serem ajustadas, a faixa de frequência de interesse, tolerância do erro do ajuste vetorial e uma estimativa inicial dos polos. Note que a ordem da função racional é igual ao número de polos utilizados no ajuste. Observe que estes parâmetros podem influenciar no tempo computacional de simulação e precisão do Modelo Reduzido (MR) obtido, uma vez que se a ordem informada for muito pequena a função aproximada tende a não ter a precisão desejada, pois pode não conseguir encontrar os polos mais dominantes da função de interesse [8] ou, se for muito grande, poderá ter um custo computacional maior para a confecção dos estudos desejados. Ainda, em relação ao conjunto inicial de polos, deve-se tomar cuidado, pois este deve ser estimado de forma que seja o mais próximo possível dos polos reais, para que precise de menos iterações para sua convergência, e que seja bem condicionado, fazendo com que os polos sejam complexos conjugados e com suas partes reais suficientemente pequenas [3]. Existe ainda a possibilidade de o usuário dar pesos para cada ponto da função, porém essa possibilidade não será tratada neste Informe Técnico.

Na literatura é possível encontrar alguns trabalhos onde são propostos métodos para melhorar a estimativa dos polos iniciais, como em [8] que procura utilizar os vales da função de interesse para determinar os polos iniciais ou em [9] que busca utilizar o método de interpolação racional combinado com o VF para tal escolha. Porém nenhum deles é completamente automático, no sentido que ainda é necessário que o usuário informe a ordem do modelo e que esta se mantem fixa por todo o processo, conseguindo ou não a precisão estipulada. Em [4] é proposto um método que utiliza os picos da função a ser aproximada para determinar a ordem do sistema e os polos iniciais e, caso o modelo não esteja conforme desejado após uma quantidade máxima de iterações, a ordem é aumentada em uma quantia previamente estipulada pelo usuário e o processo se repete até que seja obtida a função aproximada desejada. Este método permite que a ordem para o ajuste seja estipulada de forma autônoma pelo programa, porém não é completamente automática, uma vez que o usuário precisa fornecer a quantidade que a ordem irá aumentar. Note que esta escolha pode acabar levando a uma determinação de ordem maior do que o necessário, caso o aumento seja muito grande, ou fazendo o método demorar mais para convergir caso o aumento seja muito pequeno.

Por isso, a estratégia proposta neste trabalho consiste no desenvolvimento de metodologias para aprimorar e automatizar a utilização do VF. Um método é utilizado para proporcionar a estimação eficiente dos polos iniciais. O outro um critério de parada utilizado para definir quando é necessário o incremento da ordem. A eficiência computacional dos métodos (tempo de CPU e precisão) é comprovada por meio da aplicação do VF na redução da ordem de modelos de redes elétricas possuindo LTs modeladas por parâmetros distribuídos. Futuramente estes métodos, juntamente com o VF, serão implementados no programa HarmZs (para estudo do comportamento harmônico e análise modal de redes elétricas) do CEPEL. Desta forma, pretende-se expandir as aplicações do programa HarmZs, tornando-o, também, uma ferramenta complementar importante para estudos de transitórios eletromagnéticos.

2.0 - BREVE DESCRIÇÃO DO MÉTODO DE AJUSTE VETORIAL

O método *Vector Fitting*, apresentado em [3], consiste em aproximar uma função $f(s) \in \mathbb{C}$ por uma função racional $\hat{f}(s) \in \mathbb{C}$ em uma faixa de frequência finita, utilizando um conjunto de N_s pontos de ajuste $(s_1, s_2, \dots, s_{N_s})$ dentro da faixa escolhida.

A função $f(s)$ representa, normalmente, uma resposta em frequência de uma função de transferência (FT) de um sistema que tem seus valores previamente conhecidos (calculados ou medidos). De forma geral, busca-se uma aproximação que represente essa FT com erro menor ou igual a uma tolerância desejada.

Tal aproximação, de uma dada ordem N , pode ser escrita como:

$$f(s) \cong \hat{f}(s) = \sum_{m=1}^N \frac{c_m}{s - a_m} + d + s \cdot h \quad (2.1)$$

onde, c_m são os resíduos, a_m os polos (considerados de multiplicidade unitária), sendo que ambos podem ser números reais ou complexos, tendo sempre seu par conjugado, d é um termo constante real e h é um termo proporcional, também real e N é o número de polos da função aproximada ou ordem de aproximação, sendo $N < N_s$.

O algoritmo do VF necessita que o usuário forneça um conjunto de polos iniciais para servir de ponto de partida do método. Em [3] o autor sugere que os polos iniciais sejam linearmente ou logaritmicamente espaçados ao longo da faixa de frequências e que sejam complexos, de forma que:

3.0 - ESTRATÉGIAS PROPOSTAS

A estratégia proposta neste Informe Técnico é dividida em duas metodologias complementares. O primeiro método consiste na estimação automática do primeiro conjunto de polos para a inicialização do VF e, por consequência, da primeira estimativa para a ordem do MR. Caso a ordem do MR não seja alta o suficiente para se atingir a tolerância desejada, estimativas subsequentes automáticas para o conjunto de polos serão definidas para a reinicialização do VF, até que a tolerância desejada seja atingida. O segundo consiste em um critério de parada para o processo iterativo do VF, onde se tenta identificar se a ordem que está sendo utilizada é suficiente para a sua convergência, permitindo, assim, que ocorra o incremento automático da ordem antes que se atinja o número máximo de iterações I_{max} .

Todas as figuras apresentadas nesta seção são referentes ao Sistema Sul Sudeste de 34 barras, apresentado mais detalhadamente na Seção 4. As barras 21 e 23 foram escolhidas como barras de fronteira, definindo, desta forma, uma matriz \mathbf{H} de FTs com duas entradas de corrente e duas saídas de tensão (sistema *multi-input multi-output* - MIMO). Deve-se observar que todas as FTs ajustadas possuem o mesmo conjunto de polos, de modo a tornar a convolução para o domínio do tempo mais rápida [3].

3.1 Primeiro Método - Estimação Automática dos Conjuntos de Polos

Este método pode ser dividido em 2 partes. A primeira consiste em estimar o primeiro conjunto de polos a partir das frequências de pico da curva de módulo da RF a ser aproximada que possui mais picos, considerando todos os elementos $h_{ij}(s)$ da matriz \mathbf{H} . Esta etapa é feita apenas uma vez. A segunda parte é executada apenas se o algoritmo não alcançar a convergência dentro de um número máximo de iterações I_{max} estipulado pelo usuário e consiste na determinação automática de um novo conjunto de polos para a reinicialização do VF, levando em consideração as respostas em frequência dos erros entre os modelos completo \mathbf{H} e reduzido $\hat{\mathbf{H}}$ da matriz de FTs.

3.1.1 Primeira Parte - Estimação do Primeiro Conjunto de Polos

A primeira parte do método adota a mesma abordagem apresentada em [4], ou seja, o algoritmo rastreia, em todas as curvas de módulo das RF dos elementos $h_{ij}(s)$, qual tem mais picos e em quais frequências eles ocorrem. Separa-se, então, a faixa de frequências de interesse em trechos limitados por estes picos, como é mostrado na Figura 1.

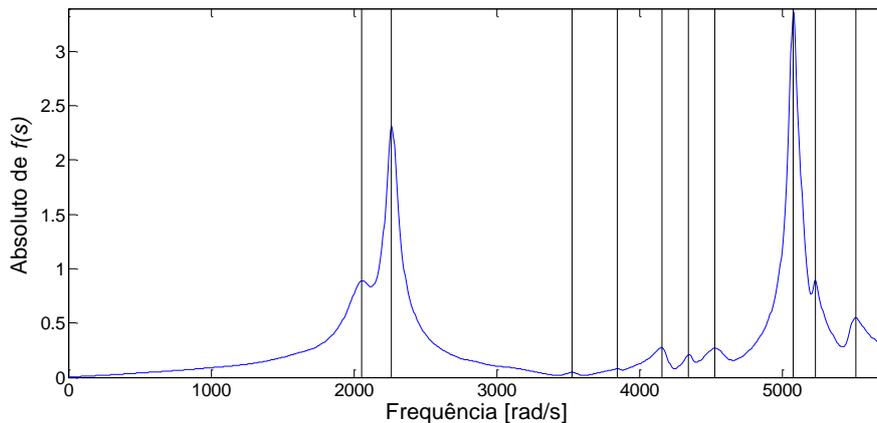


Figura 1 - Divisão da curva com mais picos em trechos limitados por suas frequências de ocorrência.

Propõe-se que a primeira estimativa da ordem do MR seja igual ao número de picos vezes 2, supondo que todos os polos sejam complexo conjugados, e multiplicado por um fator de segurança que, neste trabalho, também é igual à 2, como mostrado na Equação (2.2). Note que este fator deve ser um número inteiro para corresponder ao número de polos adicionados ao modelo reduzido.

$$ordem_0 = npicos_0 \cdot 2 \cdot nfator \quad (3.1)$$

Após a determinação da ordem, os polos são divididos em quantias iguais para cada trecho e tem os valores de suas partes imaginárias espaçada linearmente ao longo de seu trecho. Note que as partes imaginárias dos polos iniciais e finais de cada trecho coincidem com as frequências dos picos que os definem. A parte real de cada polo é escolhida como sendo 100 vezes menor do que sua parte imaginária, conforme é sugerido em [3] e mostrado na Equação (2.3).

Caso o VF não convirja, dentro do número máximo de iterações estipulado, ou seja, caso o erro médio quadrático das funções aproximadas (elementos $\hat{h}_{ij}(s)$) não seja menor do que a tolerância requisitada pelo usuário, um novo processo de estimação automática do conjunto de polos (segunda parte do método), necessário para a reinicialização do VF, é feito. Deve-se observar que as frequências dos picos $Freq_{picos_0}$, utilizadas nesta primeira estimação, são guardadas para serem utilizadas na segunda parte do método, descrita a seguir.

3.1.2 Segunda Parte - Estimação dos Conjuntos Subsequentes de Polos

Quando o número máximo de iterações I_{max} estipulado pelo usuário é alcançado sem que a precisão desejada seja atingida, entende-se que, ou a ordem estimada inicialmente não é suficientemente alta para atingir tal tolerância, ou que os polos do modelo racional, devido à escolha do conjunto de estimativas iniciais, convergiram para um “ponto de ótimo local” da solução permanecendo estagnados neste ponto ou necessitando de um número muito elevado de iterações para serem realocados mais apropriadamente. Assim, para evitar que sejam despendidos esforços computacionais muito grandes tentando realocar os polos já calculados, estes são excluídos e um novo conjunto é definido levando em consideração as curvas de erro da última iteração do VF e as frequências de pico utilizadas anteriormente na primeira parte do método.

Seja a matriz de erros $\mathbf{E}(s)$, cujos elementos $\varepsilon_{ij}(s)$ são definidos por:

$$\varepsilon_{ij}(s) = h_{ij}(s) - \hat{h}_{ij}(s) \quad (3.2)$$

Note que esta matriz de erros pode ser facilmente gerada ao término do processo de convergência do VF. A estimativa do novo conjunto de polos é baseada na Norma de Frobenius da matriz $\mathbf{E}(s)$, definida por:

$$\|\mathbf{E}(s)\|_F = \sqrt{\text{traço}(\mathbf{E}(s)\mathbf{E}^*(s))} = \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |\varepsilon_{ij}(s)|^2} \quad (3.3)$$

onde o sobrescrito * denota transposição conjugada de matriz ou vetor e m a ordem da matriz \mathbf{H} .

Assim, é obtida uma nova curva $\|\mathbf{E}(s)\|_F$ que possui características de todas as curvas de erro $\varepsilon_{ij}(s)$, como pode ser vista na Figura 2. Especulando que o que falta para o modelo ajustado ter a precisão requisitada é a quantidade insuficiente de polos, pode-se supor que cada pico que $\|\mathbf{E}(s)\|_F$ possui é devido a um dos polos que devem ser incluídos no MR. Para evitar a inclusão de polos não muito dominantes, utilizam-se, para a estimativa do novo conjunto de polos, apenas as informações provenientes dos picos que estão acima da média $E_{F_{med}}$ de $\|\mathbf{E}(s)\|_F$.

A nova ordem do modelo será estimada como sendo igual ao número de picos $npicos_0$, definido na primeira parte do método (Seção 3.1.1), somado ao número de picos que são maiores que $E_{F_{med}}$. Esta soma é, então, multiplicada por dois para levar em conta os conjugados dos polos. Para garantir que a nova ordem seja maior que a anterior, caso a quantidade de picos maior que $E_{F_{med}}$ não seja suficientemente alta, subtrai-se 10% do valor de $E_{F_{med}}$ para que novas frequências de pico sejam incluídas.

De forma análoga ao procedimento realizado na primeira parte do método, a partes imaginárias dos polos são feitas iguais às frequências dos picos e a parte real é considerada como sendo 100 vezes menor que a imaginária, conforme Equação (2.3).

Com o novo conjunto de estimativa para os polos determinado automaticamente, o processo iterativo do VF é reiniciado e repetido até que se encontrem os polos adequados ou que o número de iterações alcance I_{max} novamente. Caso isso ocorra, este processo se repete.

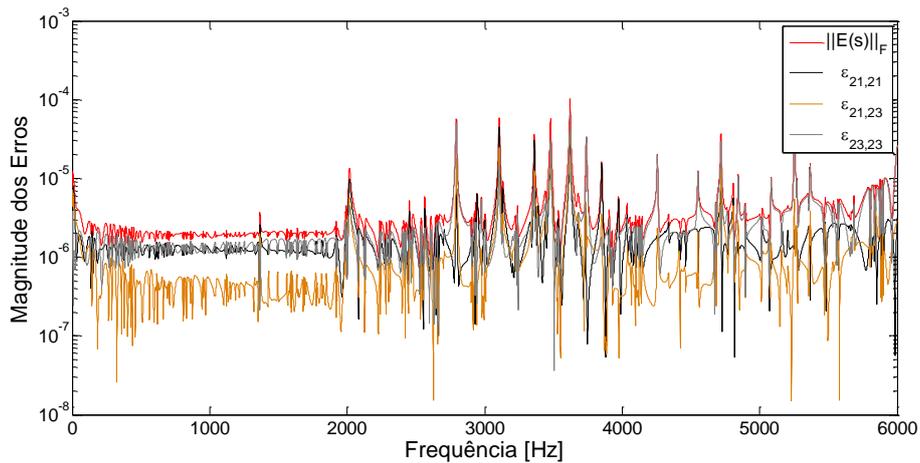


Figura 2 – Magnitudes dos erros das impedâncias próprias das barras 21 ($h_{21,21}$ - curva preta), 23 ($h_{23,23}$ - curva cinza), de transferência entre elas ($h_{21,23}$ - curva laranja) e Norma de Frobenius ($\|\mathbf{E}\|_F$ - curva vermelha).

3.2 Critério de Parada para Incremento Automático na Ordem

Durante as análises do VF, observou-se que as curvas de erro das FTs, após algumas iterações, variavam muito pouco durante o restante do processo iterativo, conforme mostrado na Figura 3. Isso se deve ao fato, como citado anteriormente, de que o VF encontra rapidamente os polos que levam a um resultado muito próximo do melhor resultado possível para determinado conjunto de estimativas e, a partir de então, o passo de convergência do método se torna muito pequeno, tendendo a estagnação.

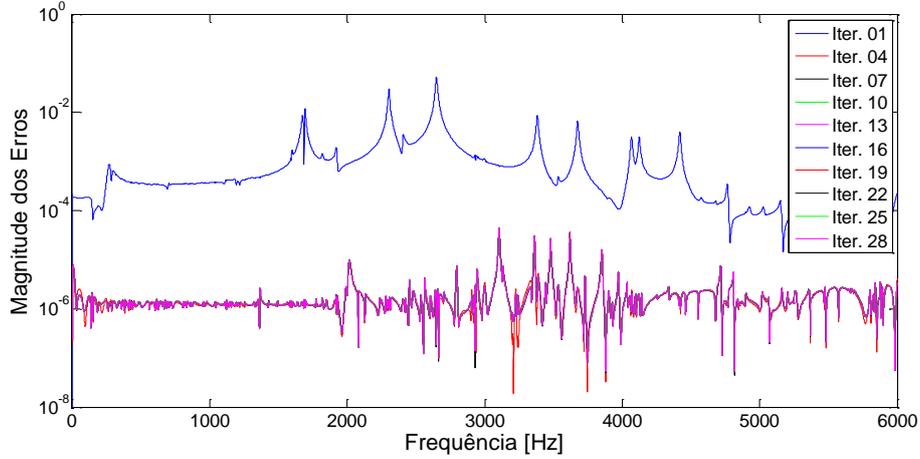


Figura 3 – Magnitude dos erros da impedância de transferência entre as barras 21 e 23. A partir da iteração 4, os erros ficam praticamente estagnados.

Esta observação sugere a criação de um critério de parada para o processo iterativo do VF, baseado na variação percentual do erro médio quadrático (RMS) entre duas iterações consecutivas. Esta variação é dada por:

$$\Delta \varepsilon_{RMS}^{(l)} = \left| \frac{\varepsilon_{RMS}^{(l)} - \varepsilon_{RMS}^{(l-1)}}{\varepsilon_{RMS}^{(l)}} \right| \times 100 \% \quad (3.4)$$

onde l é o número da iteração e ε_{RMS} é dado por:

$$\varepsilon_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^{N_s} |\varepsilon_{ij}(s_k)|^2}{m^2 N_s}} \quad (3.5)$$

sendo m denota a ordem da matriz \mathbf{H} e N_s o número de amostras (número de valores de s_k).

Caso a variação percentual do erro RMS seja menor do que 5% é iniciado uma contagem. Se este comportamento se repetir por três vezes, antes do número de iterações alcançar o seu limite máximo, o processo iterativo do VF é interrompido e um novo conjunto de estimativas para os polos é determinado, de acordo com o descrito na subseção 3.1.2, para reinicialização do VF.

4.0 - SISTEMA TESTE

O sistema teste escolhido para a aplicação da estratégia proposta é a rede de transmissão mostrada na Figura 4, possuindo 34 barras, 25 LTs de parâmetros distribuídos, 12 ramos em derivação (*shunt*) representando bancos de capacitores ou indutores, 16 transformadores, 16 cargas e 10 geradores. O conjunto completo de dados deste sistema encontra-se descrito em [11]. Como citado anteriormente, a FT MIMO selecionada tem como entradas as injeções simultâneas de correntes elétricas nas barras 21 (entrada 1) e 23 (entrada 2) (ambas destacadas em vermelho) e como saídas as tensões nestas mesmas barras, sendo a da barra 21 a saída 1 e a da barra 23 a saída 2. A faixa de frequências de interesse para este caso varia de 0 a 6000 Hz, que contém quase toda a energia desta FT MIMO, conforme mostrado em [1], [2].

1.0 - RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os testes realizados utilizando a estratégia proposta neste Informe Técnico aplicada ao sistema teste descrito na seção 4.0. Os resultados são comparados com a metodologia de estimação de polos clássica, proposta em [3], onde os polos são estimados como mostrado na Equação (2.2) e linearmente espaçados ao longo da faixa de frequências de interesse. É utilizado um incremento na ordem de aproximação fixo, conforme proposto em [4], de 20 polos, sendo o número máximo de iterações igual a 30.

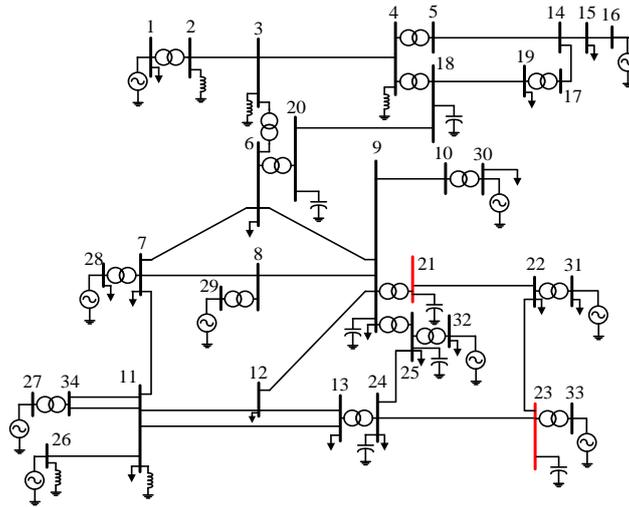


Figura 4 – Sistema teste com 34 barras e 25 LTs de parâmetros distribuídos.

Todos os testes foram realizados em um Computador com Windows 10 Pro, Intel Core I7-3770 de 3,4 GHz, 8 Gb de memória RAM e Placa Gráfica GeForce GTX 770.

Como esse caso só possui apenas duas barras de fronteira (21 e 23) existe apenas três FTs a serem aproximadas, ou seja, as impedâncias próprias das barras 21 e 23 e a de transferência entre elas.

Inicialmente estas metodologias foram avaliadas pelo tempo de CPU necessário para atingir a convergência considerando uma tolerância desejada. Para isso, a tolerância é variada de 10^{-2} até 10^{-11} . Esses tempos podem ser vistos na Figura 5, onde são comparados os tempos de CPU entre a metodologia proposta com e sem o Critério de Parada (CP), descrito na subseção 3.2, e com a metodologia base, também, com e sem o CP.

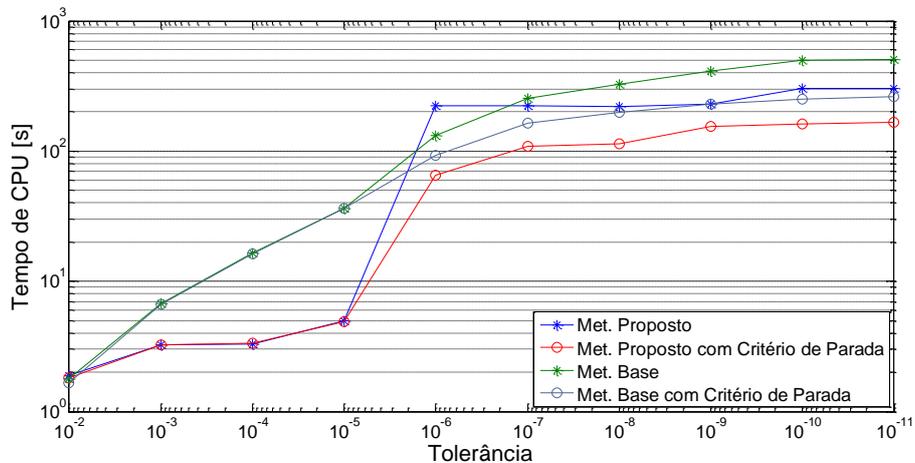


Figura 5 – Tempo de CPU para a convergência do VF

Na Figura 5 pode ser visto que o método proposto sem o CP tem seu tempo de CPU igual ou menor que o método base para a maior parte das tolerâncias testadas, chegando a ser 86% mais rápido que a metodologia base para a tolerância de 10^{-5} e 40% para a tolerância de 10^{-11} , embora tenha sido 70% mais lento para a tolerância de 10^{-6} .

Ao comparar os tempos de CPU do método base com e sem o CP, observa-se que este aperfeiçoamento fez com que o VF convergisse mais rapidamente para todas as tolerâncias testadas, chegando a ser 49% mais rápido do que o método base sem o CP para a tolerância de 10^{-10} . Considerando o método proposto com o CP, este se mostrou mais rápido que todos os demais para toda a faixa de tolerâncias.

Na Figura 6 estão comparados os valores da ordem final dos MRs obtidos após a convergência do VF para a faixa de tolerâncias. Nota-se que até 10^{-5} as ordens dos MRs são iguais para todos os métodos. Isto se deve ao fato de nenhum deles incrementar a ordem para chegar à tolerância desejada, variando entre eles apenas o número de iterações. A partir de 10^{-5} a ordem do método proposto é maior do que a do método base para quase toda a faixa de tolerâncias (igual apenas para 10^{-9}), chegando a ter uma diferença de 80 polos em 10^{-6} .

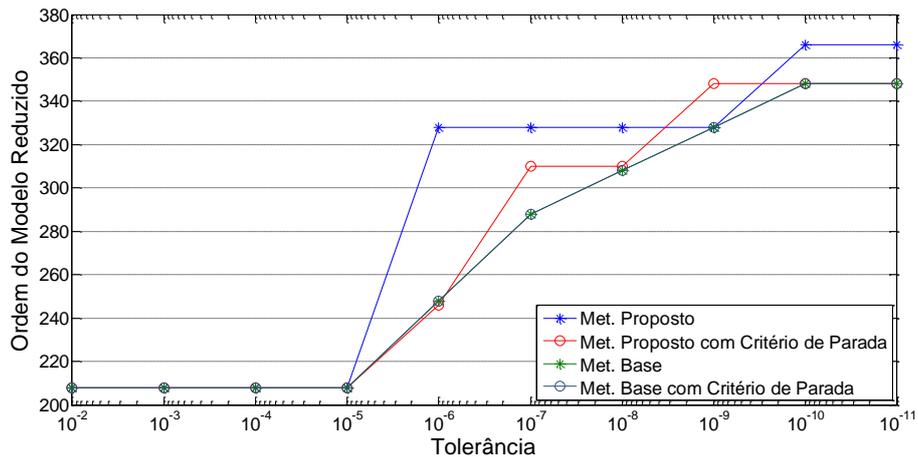


Figura 6 – Valores de ordem final dos MRs.

Na Tabela 1 são apresentados os comportamentos dos métodos propostos para a tolerância de 10^{-6} . Observa-se que os valores dos incrementos de ordem do método proposto sem o CP são pequenos com exceção do último, que adiciona 104 polos. Isso se deve ao critério de seleção de picos da curva de erro utilizado. Após muitas iterações do VF, não são encontrados muitos picos que se destacam, fazendo com que após alguns incrementos de ordem uma grande quantidade de picos seja selecionada. Com o CP isso deixa de acontecer, pois o número de iterações durante o processo de convergência do VF é significativamente menor, de forma que, mesmo após alguns incrementos de ordem, ainda permaneçam picos de valores significativos.

Note ainda que o método base tem um passo fixo definido pelo usuário. Assim, o fato de ter encontrado uma ordem menor do que o método proposto só aconteceu pela boa escolha deste parâmetro, o que pode não acontecer sempre.

Tabela 1 – Comportamento do método proposto e do método proposto com CP durante a convergência do VF para a tolerância de 10^{-6} .

	Tolerância	10^{-6}				
Método Proposto	Incrementos:	0	1	2	3	4
	Ordem:	208	214	220	224	328
	Iterações	30	30	30	30	4
Mét. Proposto com Critério de Parada	Incrementos:	0	1	2	3	4
	Ordem:	208	218	246	-	-
	Iterações	6	20	10	-	-

2.0 - CONCLUSÃO

Neste Informe Técnico foi proposta uma estratégia de utilização mais eficiente e automatizada do VF. Diferentemente de outras propostas, o método apresentado para determinação das estimativas dos conjuntos de polos é independente de parâmetros fornecidos pelo usuário, enquanto o critério de parada proposto se mostrou muito eficiente ao reduzir consideravelmente o tempo de CPU nos testes realizados. A união deste método com o CP compõe uma estratégia computacionalmente eficiente, se mostrando promissora para aplicação em sistemas de grande porte como o Sistema Interligado Nacional, onde o número de barras de fronteira pode atingir algumas centenas e não apenas 2, como o caso exemplo mostrado aqui.

Deve-se observar que utilizou-se alguns valores típicos para alguns parâmetros presentes na estratégia proposta neste IT, como, por exemplo, a porcentagem da variação do erro relativo para o Critério de Parada, comentado na Seção 3.2. Note, portanto, que tais parâmetros podem ser otimizados, através de experimentos numéricos, de forma a melhorar ainda mais a eficiência computacional da estratégia proposta.

3.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. L. Varricchio, F. D. Freitas, N. Martins e F. C. Véliz, "Computation of Dominant Poles and Residue Matrices for Multivariable Transfer Functions of Infinite Power System Models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 30, n. 3, Maio 2015.
- [2] 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*, 2015.
- [3] 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.
- [4] C. O. Costa, "Equivalentes de Redes Utilizando Vizinhanças Elétricas com Possíveis Aplicações em Estudos de Harmônicos e Transitórios Eletromagnéticos," *Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, UFRJ*, 2013.
- [5] B. Gustavsen e A. Semlyen, "Simulation of Transmission Line Transients using Vector Fitting and Modal Decomposition," vol. 13, n. 2, pp. 605-613, Abril 1998.
- [6] L. C. Z. 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".
- [7] X. Hu, L. Chaudhari, S. Lin, S. Stanton, S. Asgari e w. lian, "A State Space Thermal Model for HEV/EV Battery Using Vector Fitting," 2012.
- [8] I. R. Pordanjani e W. Xu, "Improvement of Vector Fitting by Using a New Method for Selection of Starting Poles," *Electric Power Systems Research*, vol. 107, 2014.
- [9] Y. S. Mekonnen, J. Schutt-Aine, J. Tan, C. Kumar e D. Milosevic, "Combining Rational Interpolation with the Vector Fitting Method," *IEEE*, 2005.
- [10] T. M. Campello, "Implementação de Método de Aproximação Racional para Futura Utilização em Estudos de Transitórios Eletromagnéticos," *Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica na UFF*, 2016.
- [11] F. D. Freitas, N. Martins, S. L. Varricchio, J. Rommes e F. C. Véliz, "Reduced-Order Transfer Matrices From RLC Network Descriptor Models of Electric Power Grids," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, n. 4, pp. 1905-1916, 2011.

4.0 DADOS BIOGRÁFICOS



THOMAS MOREIRA CAMPELLO Possui graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Potência na Universidade Federal Fluminense (UFF) em 2016. Está atualmente fazendo mestrado em Sistemas de Energia pela COPPE. Trabalha como bolsista de mestrado 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.