XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

Versão 1.0
XXX.YY
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO X

GRUPO DE ESTUDOS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GDS

EQUIVALENTES DINÂMICOS DE REDES ELÉTRICAS MULTI-CONECTADAS UTILIZANDO ANÁLISE MODAL

Franklin Clement Véliz (*)
Cepel

Sergio Luis Varricchio
Cepel

Sergio Gomes Jr.
Cepel

RESUMO

A utilização de equivalentes para partes de redes elétricas além de permitir a redução considerável das dimensões do sistema matricial que representa a rede, facilita manter o foco de atenção do engenheiro de estudos na área de interesse. Como conseqüência o emprego de equivalentes degenera na redução tanto do esforço computacional como do tempo requerido para a obtenção dos resultados. Neste trabalho é proposta uma metodologia baseada em análise modal para a obtenção de equivalentes dinâmicos de partes de redes elétricas de grande porte que abrange o comportamento ativo e passivo de redes elétricas. A eficácia, precisão e robustez da metodologia proposta é confirmada através das excelentes concordâncias mostradas em simulações que comparam os resultados devidos à utilização do equivalente para representar a área externa de uma rede elétrica com os obtidos quando toda a rede é representada em detalhe.

PALAVRAS-CHAVE

Equivalentes dinâmicos, análise linear, análise modal, domínio *s*, redes elétricas, harmônicos.

1.0 - INTRODUÇÃO

A realização de estudos em redes elétricas é em muitas vezes concentrada em uma área específica onde se deseja analisar algum tipo de fenômeno elétrico. Desta maneira torna-se conveniente dividir a rede elétrica em dois subsistemas. O primeiro subsistema é formado pela área de estudos que deve ser modelada em detalhe, e o segundo subsistema é composto pelo resto do sistema que pode ser representado por um equivalente. O principal motivo de utilizar equivalentes é a redução do esforço computacional e, conseqüentemente, do tempo necessário para a obtenção dos resultados. Além disto, possibilita ao engenheiro de estudos focalizar a área de interesse.

O equivalente normalmente utilizado para a área externa é uma matriz de impedâncias nodais, cujas componentes são as impedâncias próprias e de transferências de curto-circuito obtidas de suas barras de fronteira para a freqüência fundamental do sistema (equivalente de Ward [1]). Por este método, as características da área externa para outras freqüências serão perdidas, o que poderá implicar em sérios erros em análises posteriores. No entanto este problema pode ser superado se a matriz de impedâncias nodais equivalente for calculada para diversos valores discretos de freqüência dentro da faixa de interesse. Porém a inviabilidade de geração de expressões analíticas contínuas dos elementos da matriz equivalente por esta metodologia, como funções da freqüência complexa *s*, impossibilita sua utilização quando se deseja realizar a análise modal do sistema reduzido (área de estudos incorporando o equivalente da área externa). Esta análise envolve o cálculo de pólos e resíduos associados [2]-[7], sensibilidades [5], [6], etc. e suas aplicações nas áreas de harmônicos [5], [6] e de transitórios eletromagnéticos [4].

(*) Avenida Horácio Macedo, n˚ 354 – Cidade Universitária – Ilha do Fundão – CEP 21941-911 RJ – Brasil
Tel: (+55 21) 2598-6218 – Fax: (+55 21) 2598-6451 – Email: franklin@cepel.br

Neste trabalho é proposta uma metodologia para a determinação destas expressões analíticas, utilizando a análise modal. Estas expressões podem ser escritas como um somatório de frações parciais a partir do cálculo de pólos e resíduos associados das funções de transferência relativas às barras de conexão. Esta metodologia utiliza apenas os pólos associados aos resíduos com os maiores módulos dentro da faixa de freqüências de interesse. Tais pólos, denominados de pólos dominantes, e seus resíduos associados definem os principais modos naturais de oscilação da dinâmica da área externa, produzindo o equivalente dinâmico da rede externa.

A realização da análise modal de redes elétricas pode ser feita pelas modelagens espaço de estados, sistemas descritores e matriz de admitâncias nodais representada no domínio da freqüência complexa *s*, matriz **Y**(*s*). Esta última apresenta vantagens sobre as outras modelagens, como a inclusão de modelos de linhas de transmissão por parâmetros distribuídos com ou sem dependência da freqüência assim como a facilidade na sua montagem e suas dimensões reduzidas. A facilidade na montagem da matriz **Y**(*s*) faz com que a incorporação do equivalente modal da área externa à rede da área de estudos seja feito com grande facilidade. Na referência [6], é apresentada uma comparação entre estas modelagens de redes elétricas.

Em [2],[7] são descritos algoritmos para o cálculo de pólos e resíduos associados. Estes algoritmos utilizam, além da matriz **Y**(*s*), sua derivada em relação a *s*.

As simulações computacionais apresentadas neste trabalho são realizadas considerando uma rede elétrica onde a área de estudos está conectada à área externa por meio de duas barras (conexão multi-barras). Os resultados obtidos com o sistema reduzido são comparados com os obtidos considerando todo o sistema modelado em detalhe, verificando-se excelente concordância entre eles.

2.0 - MODELOS NO DOMINIO *S*

O método das correntes dos nós, cuja modelagem é descrita pelo sistema matricial mostrado em (1) [2]-[6], permite a obtenção do comportamento dinâmico de redes elétricas.

$$\mathbf{Y}(s)\,\mathbf{v} = \mathbf{i} \tag{1}$$

Y(*s*): matriz de admitância nodal no domínio *s*, **v** : vetor de tensões (saída), **i** : vetor de correntes (entrada)

Expressões para as admitâncias de ramos *RLC*, de transformadores de dois e três enrolamentos e de linhas de transmissão em relação a *s* são apresentadas em [2], [3] e [5].

A modelagem de funções de transferência com apenas uma entrada e uma saída pode ser obtida de (1) conforme apresentado em (2), onde a variável de entrada i_k é a corrente injetada na barra *k*, enquanto a variável de saída v_j é a tensão da barra *j*. Os vetores **b** e **c** são compostos de elementos nulos exceto o *k*-ésimo elemento do vetor **b** e o *j*-ésimo elemento do vetor **c**, cujos valores são iguais a um.

$$\mathbf{Y}(s)\,\mathbf{v} = \mathbf{b}\,i_k \qquad v_j = \mathbf{c}^t\,\mathbf{v} \tag{2}$$

A função de transferência, definida como a relação entre as variáveis de saída e entrada, é obtida a partir de (2) conforme mostrado em (3).

$$G(s) = \frac{v_j}{i_k} = \mathbf{c}^t\,\mathbf{Y}(s)^{-1}\,\mathbf{b} \tag{3}$$

Equivalentes dinâmicos multi-barras são obtidos a partir da matriz impedância equivalente $\mathbf{Z_{eq}}$, cujas componentes são as funções de transferências correspondentes às barras de conexão do sistema a ser equivalentado.

A dificuldade na obtenção da expressão analítica para a inversa da matriz **Y**(*s*) mostrada em (3), pode ser contornada quando é realizada uma análise modal. Esta análise permite representar a função de transferência por um somatório de pólos e resíduos associados. Em [2], [7] e [9] são mostrados métodos para o cálculo destes pólos e resíduos. Pode se observar que estes métodos requerem o cálculo da derivada da matriz **Y**(*s*) em relação a *s*. Para a construção da derivada da matriz **Y**(*s*) utiliza-se as mesmas regras utilizadas para a construção da matriz **Y**(*s*). Estas regras devem ser aplicadas às derivadas das admitâncias dos elementos do sistema em relação a *s*.

Dentre estes métodos o algoritmo de cálculo seqüencial de pólos dominantes [7] mostra-se o mais adequado para a construção de equivalentes dinâmicos. As estimativas iniciais, necessárias no processo iterativo do método, são, em geral, escolhidas como tendo partes reais nulas e imaginárias iguais as freqüências correspondentes aos máximos locais da curva de resposta em freqüência da função de transferência. A característica principal deste algoritmo consiste na exclusão de pólos já determinados da função de transferência, evitando-se desta maneira repetidas convergências para estes pólos. Este algoritmo apresenta características de rapidez e de robustez de convergência muito boas e que são descritas em [7].

Ao final o algoritmo irá fornecer os pólos dominantes (e resíduos associados) mais próximos das estimativas iniciais. Com este conjunto de pólos e resíduos associados, é possível se aproximar à função de transferência considerada pelo modelo de ordem reduzida, ou seja:

$$G(s) \cong \sum_{i=1}^{n_p} \frac{R_i}{s - \lambda_i} + d \tag{4}$$

onde n_p é o número de pólos dominantes utilizados, d é o termo direito da função de transferência (off set) cujo valor é determinado por $d = \lim_{s \to \infty} \mathbf{c}^t \, \mathbf{Y}(s)^{-1} \, \mathbf{b}$.

Se todos os pólos dominantes da função de transferência forem utilizados, o somatório do lado direito de (4) será uma excelente aproximação de $G(s)$.

2.1 Equivalentes Modais

Na Figura 1 está mostrada uma rede elétrica constituída pelas áreas de estudos e externa. Estas áreas estão conectadas por m barras. O primeiro passo para a obtenção do equivalente modal é separar as duas áreas nas barras de conexão, isolando a área externa, conforme mostrado na Figura 2.

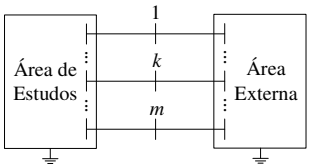


Figura 1: Áreas de estudos e externa

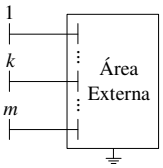


Figura 2: Área externa isolada

As impedâncias próprias das barras de conexão e as de transferência entre elas devem ser calculadas para a construção da matriz $\mathbf{Z_{eq}}$, apresentada em (5).

$$\mathbf{Z_{eq}} = \begin{bmatrix} z_{eq-11}(s) & \cdots & z_{eq-1i}(s) & \cdots & z_{eq-1n}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{eq-i1}(s) & \cdots & z_{eq-ii}(s) & \cdots & z_{eq-in}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{eq-n1}(s) & \cdots & z_{eq-ni}(s) & \cdots & z_{eq-nn}(s) \end{bmatrix} \tag{5}$$

Cada elemento desta matriz $z_{eq-ij}(s)$ pode ser escrito como uma função dos pólos dominantes $\lambda_k^{(ij)}$, resíduos associados $R_k^{(ij)}$ e termos diretos $d^{(ij)}$, conforme mostrado em (6). Estes pólos podem ser obtidos pelo algoritmo de cálculo seqüencial de pólos dominantes, onde as funções de transferência utilizadas são os elementos da matriz $\mathbf{Z_{eq}}$.

$$z_{eq-ij}(s) \cong \sum_{k=1}^{n_p} \frac{R_k^{(ij)}}{s - \lambda_k^{(ij)}} + d^{(ij)} \tag{6}$$

A matriz admitância nodal equivalente é obtida invertendo-se numericamente a matriz $\mathbf{Z_{eq}}$ para cada valor de s de interesse:

$$\mathbf{Y_{eq}} = \mathbf{Z_{eq}^{-1}} \tag{7}$$

Seja $\mathbf{Y_{es}}(s)$ a matriz admitância nodal da área de estudos isolada. Os elementos da matriz $\mathbf{Y}(s)$ que representa a área de estudos, levando-se em conta a presença da área externa (sistema reduzido), são dados por:

$$y_{ij}(s) = y_{es-ij}(s) + y_{eq-ij}(s) \tag{8}$$

onde $y_{eq-ij}(s)$ e $y_{es-ij}(s)$ são elementos das matrizes $\mathbf{Y_{eq}}(s)$ e $\mathbf{Y_{es}}(s)$, respectivamente.

Para o cálculo de pólos, quando a derivada de $\mathbf{Y_{eq}}(s)$ se faz necessária, pode-se determinar os elementos da matriz de derivada em relação a s, sendo dados por:

$$\frac{dy_{ij}(s)}{ds} = \frac{dy_{es-ij}(s)}{ds} + \frac{dy_{eq-ij}(s)}{ds} \tag{9}$$

Sendo $\frac{dy_{eq-ij}(s)}{ds}$ o elemento da derivada de $\mathbf{Y_{eq}}(s)$, dado numericamente por:

$$\frac{d\mathbf{Y_{eq}}}{ds} = -\mathbf{Y_{eq}} \frac{d\mathbf{Z_{eq}}}{ds} \mathbf{Y_{eq}} \tag{10}$$

Sendo a derivada de $\mathbf{Z_{eq}}$ analiticamente determinado derivando-se os elementos de (5) dados em (6).

2.2 Parte Ativa do Equivalente Modal

Para a obtenção da parte ativa do equivalente da área externa é utilizado o teorema de Norton. Assim, as barras de conexão devem ser ligadas à terra de modo que as correntes de curto-circuito nestas barras possam ser calculadas. Este procedimento está mostrado na Figura 3, onde $i_{cc\text{-}1}$, $i_{cc\text{-}k}$ e $i_{cc\text{-}m}$ são as correntes de curto-circuito nas barras de conexão 1,..., *k*,..., *m*, respectivamente, calculadas para cada harmônico de interesse. Estas correntes são calculadas pela manipulação do sistema linear em (1), fazendo-se as tensões do vetor **v** nulas para as barras em curto-circuito e as correntes para as demais barras iguais às injeções harmônicas quando existirem. (nulas quando não existir). Com isto consegue-se explicitar um vetor de incógnitas composto pelas tensões que não estão em curto-circuito e as correntes de curto-circuito que podem ser calculadas pela solução da equação linear matricial resultante.

Após a obtenção das partes passiva e ativa do equivalente modal, o sistema reduzido pode ser construído, conforme mostrado esquematicamente na Figura 4. Deve-se observar que a matriz admitância nodal deste sistema possui a mesma dimensão da matriz da área de estudos.

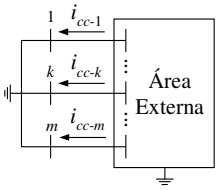


Figura 3: Correntes de curto-circuito da área externa

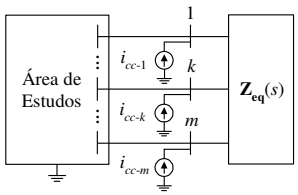


Figura 4: Esquema do sistema reduzido

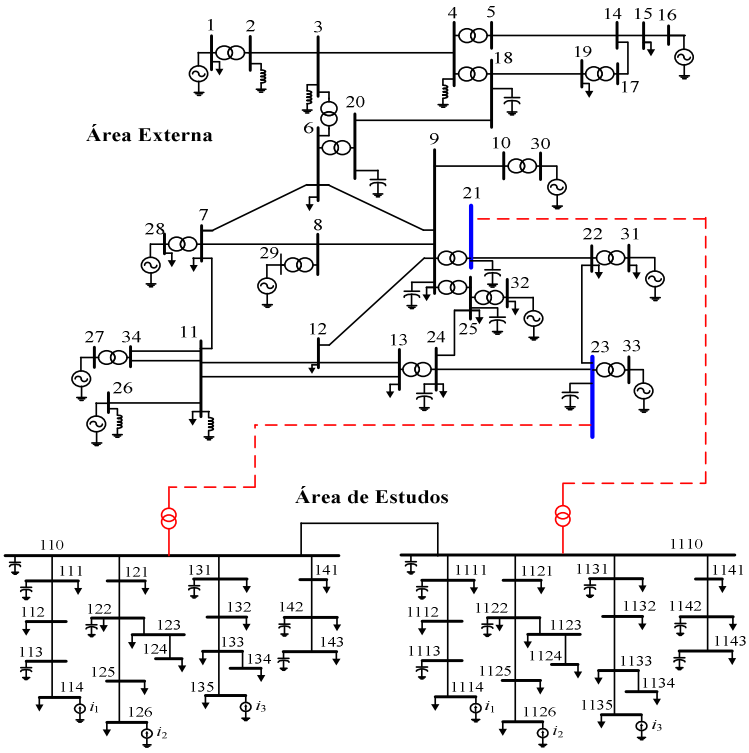
No caso de estudos de transitórios eletromagnéticos, usualmente a área de estudos possui apenas fontes de tensão à freqüência fundamental para representar os geradores, enquanto que nos estudos de harmônicos, possui fontes de correntes nas diversas freqüências harmônicas de interesse representando as cargas não lineares do sistema. Quando a área de estudos é linear, pode-se utilizar superposição. Neste caso, a utilização da parte ativa do equivalente na análise de transitórios eletromagnéticos é desnecessária, uma vez que o efeito de todas as fontes de tensão pode ser substituído pela parcela de regime permanente da resposta facilmente obtida de um programa de fluxo de potência e que pode ser somada à resposta transitória ao distúrbio aplicado considerando nula todas essas fontes.

3.0 - RESULTADOS

A rede elétrica escolhida para a análise é composta por um sistema industrial (área de estudos) conectado a um sistema de transmissão (área externa) através de uma ligação multi-barras conforme mostrado na Figura 5. O sistema de transmissão corresponde a uma modelagem simplificada da região sul do sistema elétrico brasileiro.

Os dados destes sub-sistemas são mostrados em [8], onde observa-se que todas as linhas da rede elétrica foram representadas pela modelagem por parâmetros distribuídos sem considerar a dependência da freqüência, assim como todas as máquinas geradoras foram modeladas por fontes de tensão ideal. As cargas do sistema industrial foram modeladas por circuitos *RLC* série. Para o sistema de transmissão as cargas foram modeladas por circuitos *RLC* paralelos exceto as cargas das barras 7 e 13, as quais foram modeladas por circuito *RLC* série. Deve-se observar que os dois transformadores responsáveis pelo acoplamento multi-barras entre os sub-sistemas pertencem ao sistema industrial.

Nota-se que a área externa não possui fontes de correntes harmônicas, deste modo não é necessária a determinação da parte ativa do equivalente. Em [10] é mostrado detalhadamente um exemplo onde as fontes de correntes harmônicas da área externa demandaram a obtenção da parte ativa. Em [10] são apresentados resultados de equivalente mono-barra enquanto que neste artigo são apresentados equivalentes de 2 barras.



	Sistema Industrial	Sistema de Transmissão
Barras	38	34
Linhas	37	25
Equipamentos	14	13
Transformadores	2	15
Cargas	34	16
Máquinas	0	10
Fontes Harmônicas	6	0

Figura 5: Rede elétrica exemplo

Resultados comparando curvas de resposta em freqüência e no tempo serão mostrados. Escolheu-se a escala de freqüência de 0 a 3000 Hz para o cálculo do equivalente proposto, pois além de abranger as freqüências de maior relevância para estudos de comportamento harmônico, permite reproduzir satisfatoriamente as curvas de respostas no tempo para entradas senoidais na freqüência fundamental da rede (60 Hz).

De modo a comprovar a necessidade de utilização do equivalente multi-barras para o sistema de transmissão, foram comparadas as curvas de resposta em freqüência dos módulos das impedâncias próprias das barras de conexão (barras 21 e 23) e de transferência entre elas das áreas de estudos e externa desconectadas, conforme mostrado nas Figuras 6, 7 e 8, onde a ordem de grandeza próxima entre as correspondentes curvas verificaram a importância de equivalentes para este exemplo.

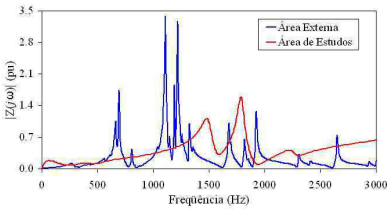


Figura 6: Módulos das impedâncias próprias da barra de conexão 21

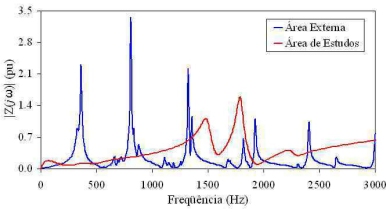


Figura 7: Módulos das impedâncias próprias da barra de conexão 23

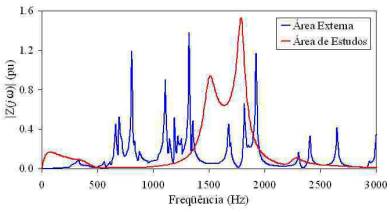


Figura 8: Módulos das impedâncias de transferência entre 21 e 23

Na conexão multi-barras, uma maneira aproximada de representar a área externa muito utilizada, consiste em utilizar impedâncias elétricas equivalentes. Estas impedâncias são ligadas nas barras de conexão da área de estudos e são obtidas a partir da matriz admitância nodal equivalente da área externa calculada para a freqüência fundamental da rede. Os valores destas impedâncias são $R = 0.0012129$ pu, $L = 0.00004065$ pu ; $R = 0.0030898$ pu, $L = 0.00007785$ pu e $R = 0.000150478$ pu, $L = 0.00000217$ pu respectivamente para as impedâncias próprias das barras 21, 23 e para a impedância de transferência 21-23.

Grande parte das características da área externa é perdida quando são empregadas estas impedâncias neste método convencional, inviabilizando sua utilização. Esta afirmação pode ser comprovada pela comparação das curvas de resposta em freqüência dos módulos das impedâncias próprias das barras de conexão (barras 21 e 23) e de transferência entre elas, considerando o sistema completo composto por ambas as áreas modeladas em detalhe e o sistema reduzido composto pela área de estudos modelada em detalhe e pelo equivalente convencional da área externa. Estas curvas estão mostradas nas Figuras 9, 10 e 11.

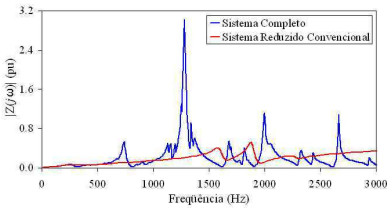


Figura 9: Módulos da impedância própria da barra de conexão 21

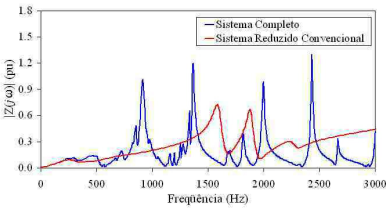


Figura 10: Módulos da impedância própria da barra de conexão 23

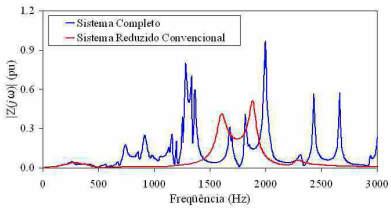


Figura 11: Módulos da impedância de transferência entre 21 e 23

Para a obtenção do equivalente multi-barras proposto, capaz de representar adequadamente a área externa, é preciso obter os pólos dominantes e resíduos associados das impedâncias próprias e de transferência das barras de conexão de tal área utilizando o método de cálculo seqüencial de pólos dominantes. Os gráficos de módulos e ângulos destas impedâncias em função da freqüência são apresentados nas Figuras de 12 a 17. Para a impedância própria da barra 21 foram utilizados 38 pares de pólos complexo conjugados, para a impedância própria da barra 23 foram 32 pares e para a impedância de transferência, 2 pólos reais e 33 pares complexo conjugados. Para as três impedâncias, o termo *d* foi nulo. Em [8] são apresentadas as listas completas de pólos e resíduos utilizados. As curvas do equivalente modal e do sistema modelado em detalhe são praticamente coincidentes para o intervalo de freqüências de interesse.

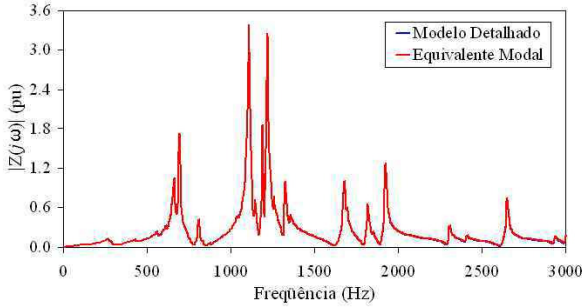


Figura 12: Módulos da impedância própria da barra 21

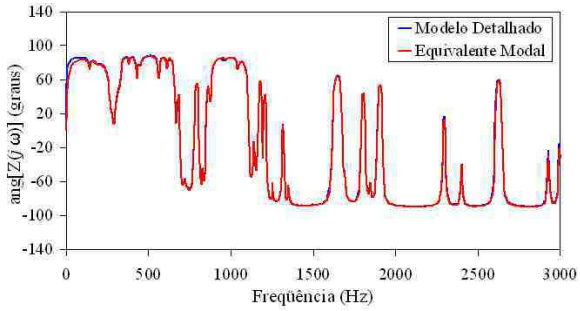


Figura 13: Ângulos da impedância própria da barra 21

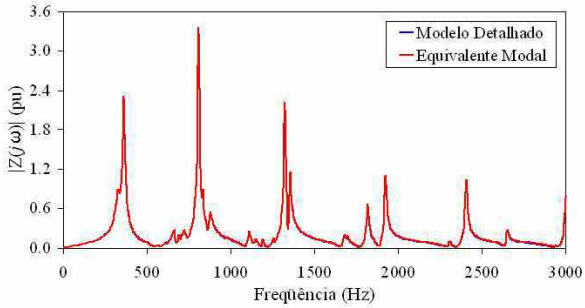


Figura 14: Módulos da impedância própria da barra 23

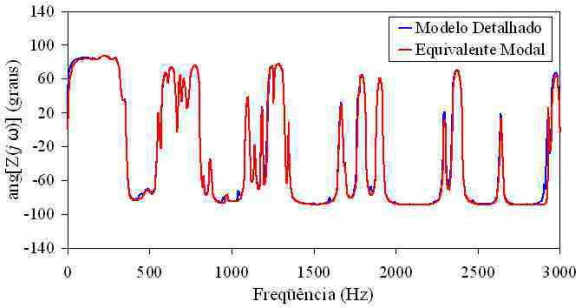


Figura 15: Ângulos da impedância própria da barra 23

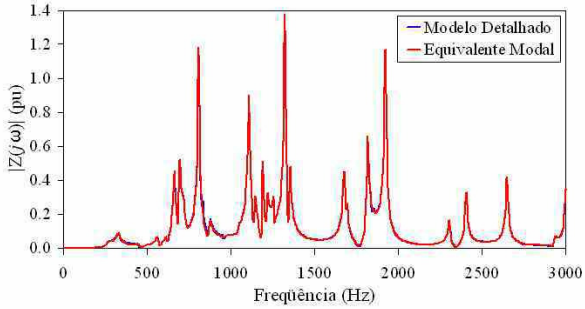


Figura 16: Módulos da impedância de transferência 21-23

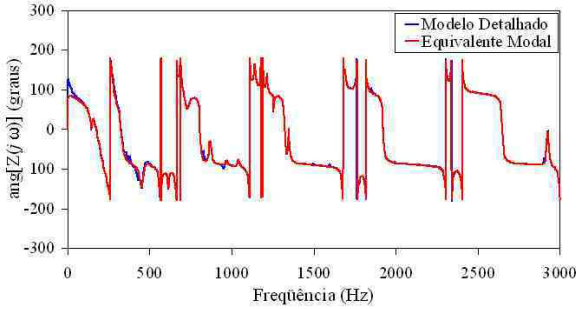


Figura 17: Ângulos da impedância de transferência 21-23

Uma vez obtidas as funções de transferência que compõem a matriz impedância equivalente $\mathbf{Z_{eq}}$, aplica-se a metodologia descrita neste trabalho para determinar as respostas em freqüência do módulo e do ângulo das impedâncias próprias das barras de conexão 21 e 23 e de transferência entre elas, considerando o sistema completo composto por ambas as áreas modeladas em detalhe e o sistema reduzido composto pela área de estudos modelada em detalhe e pelo equivalente modal da área externa. Estas curvas são mostradas nas Figuras de 18 a 23. Como se pode observar as mesmas apresentam uma boa concordância entre elas, mostrando o bom desempenho do equivalente multi-barras proposto.

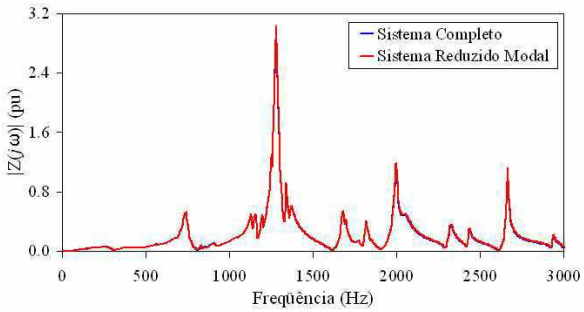


Figura 18: Módulos da impedância própria da barra 21

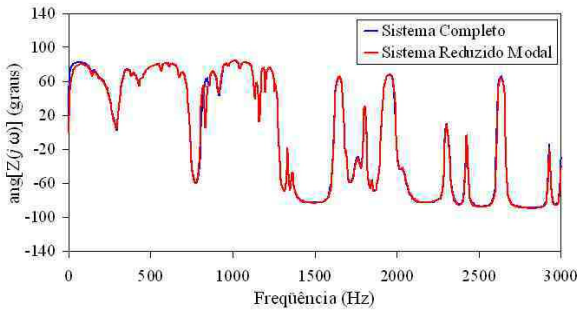


Figura 19: Ângulos da impedância própria da barra 21

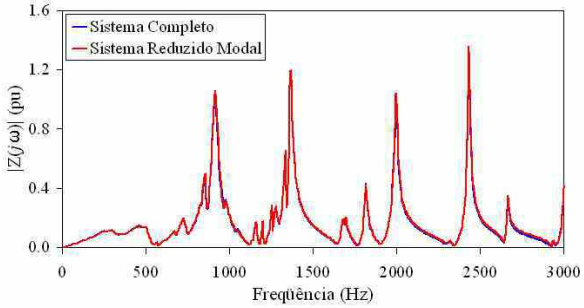


Figura 20: Módulos da impedância própria da barra 23

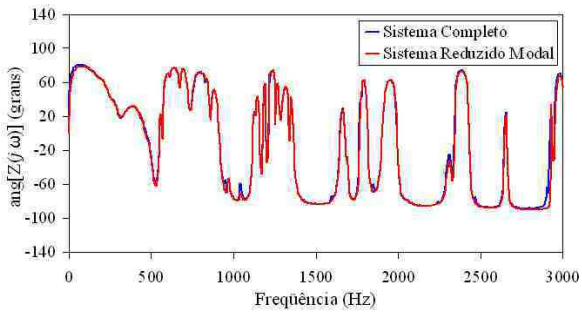


Figura 21: Ângulos da impedância própria da barra 23

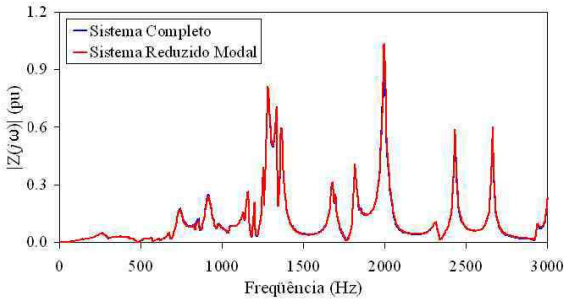


Figura 22: Módulos da impedância de transferência 21-23

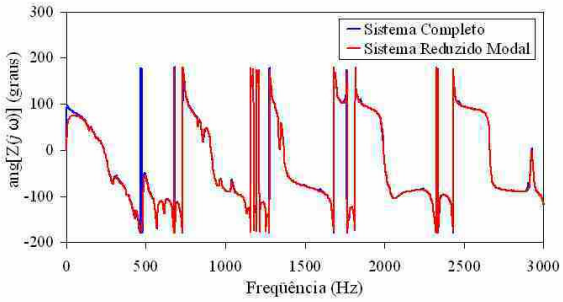


Figura 23: Ângulos da impedância de transferência 21-23

No domínio do tempo o equivalente proposto também se mostrou confiável conforme mostrado na comparação de resultados de dois casos onde é monitorada a tensão na barra 1110 devida à injeção de uma corrente cosenoidal na barra 126 na freqüência fundamental da rede. Para este exemplo foi desconsiderada a componente ativa do equivalente assumindo-se que pode ser utilizada superposição. A resposta total será dada pela soma da resposta apresentada com a solução de regime permanente obtida com um programa de fluxo de potência que leva em consideração os diversos geradores da área externa. O primeiro caso compara o sistema completo (ambas áreas modeladas em detalhe) com o sistema reduzido convencional (área de interesse modelada em detalhe e a área externa modelada por impedâncias de curto-circuito) nos regimes transitório e permanente conforme mostrado nas Figuras 24 e 25 onde se pode observar diferenças significativas apenas no regime transitório, invalidando deste modo o uso do equivalente convencional para estudos por exemplo de sobretensões de manobra. Verifica-se neste caso erros em torno de 50% do desvio da máxima sobretensão atingida.

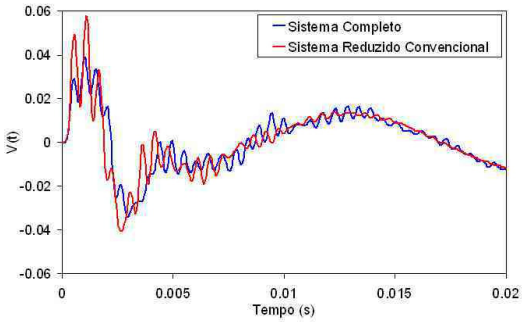


Figura 24: Regime transitório da tensão na barra 1110

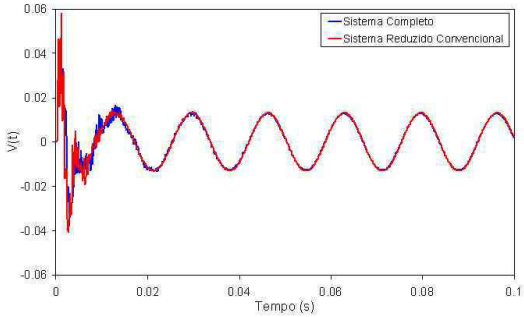


Figura 25: Regime permanente da tensão na barra 1110

O segundo caso compara o sistema completo (ambas áreas modeladas em detalhe) com o sistema reduzido proposto (área de interesse modelada em detalhe e a área externa modelada pelo equivalente proposto) nos regimes transitório e permanente conforme mostrado nas Figuras 26 e 27. Neste caso as diferenças são insignificantes para ambos períodos de tempo, comprovando novamente a qualidade e eficácia do equivalente multi-barras proposto

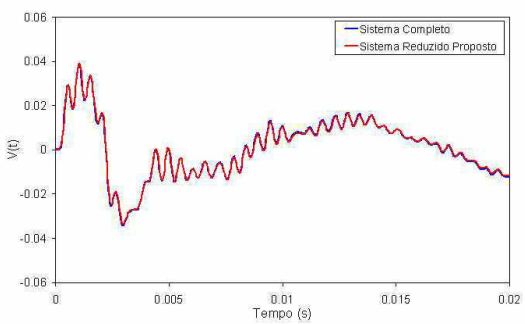


Figura 26: Regime transitório da tensão na barra 1110

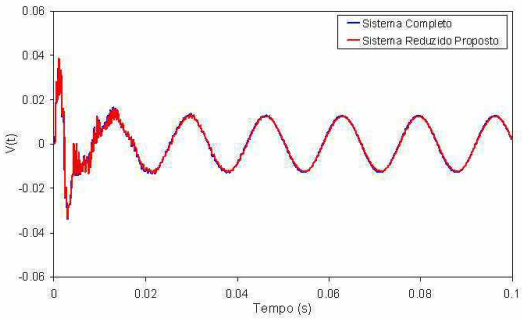


Figura 27: Regime permanente da tensão na barra 1110

4.0 - CONCLUSÃO

Geralmente a realização de estudos em sistemas elétricos é concentrada em uma área específica onde se deseja analisar algum tipo de fenômeno elétrico. Desta maneira problemas de memória devidos às grandes dimensões das matrizes, assim como elevados tempos para obtenção de resultados podem ser evitados pelo emprego de equivalentes no resto sistema. Neste trabalho é apresentada uma nova metodologia que permite a construção de equivalentes dinâmicos multi-barras que contemplam tanto o comportamento passivo como ativo da parte da rede elétrica a ser substituída pelo equivalente. A eficácia, robustez e precisão do equivalente proposto foi comprovada através de excelentes resultados de respostas em freqüência e no tempo obtidos do sistema exemplo.

Além do equivalente manter as dimensões do sistema reduzido (composto pela área de estudos modelada em detalhe e pelo equivalente modal da área externa) igual as dimensões da área de estudos, uma outra vantagem do equivalente modal proposto é que seus pólos são um subconjunto dos pólos da área externa, ou seja, os pólos deste equivalente são verdadeiros. Devido a isto, a sua ordem pode ser aumentada simplesmente pelo cálculo de um novo pólo real ou par de pólos complexos conjugados, aproveitando-se todos os pólos calculados anteriormente. Além disto, garante-se que nenhuma dinâmica falsa ou espúria seja introduzida no equivalente, o que pode acontecer com métodos baseados no cálculo de pólos aproximados da área externa.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] J. B. Ward, “Equivalent Circuits for Power Flow Studies”, AIEE Transactions 68, 373-382, New York, 1949.

[2] S. Gomes Jr., N. Martins, C. Portela, “Modal Analysis Applied to s-Domain Models of ac Networks”, Procedings of the IEEE/PES Winter Meeting, Columbus, Ohio, Janeiro 2001.

[3] S. Gomes Jr., C. Portela, N. Martins, “Detailed Model of Long Transmission Lines for Modal Analysis of ac Networks”, Proceedings of the IPST’01 - International Conference on Power System Transients, Rio de Janeiro, Brasil, Junho 2001.

[4] S. Gomes Jr., N. Martins, S. L. Varricchio, C. Portela, “Modal Analysis of Electromagnetic Transients in ac Network having Long Transmission Lines”, Transactions on Power Delivery, vol 20, issue 4, pp. 623-2630, outubro 2005

[5] S. L. Varricchio, S. Gomes Jr., N. Martins, “s-Domain Approach to Reduce Harmonic Voltage Distortions Using Sensitivity Analysis”, Proceedings of the IEEE/PES Winter Meeting, Columbus, Ohio, Janeiro 2001.

[6] Sergio L. Varricchio, Sergio Gomes Jr, Nelson Martins, Leandro Ramos de Araujo, Franklin Clement Véliz, Cristiano de Oliveira Costa, “Advanced Tool for Harmonic Analysis of Power Systems”, IX Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning – IX SEPOPE, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 23rd to 27th, May, 2004.

[7] S. Gomes Jr., N. Martins, C. Portela, “Sequential Computation of Transfer Function Dominant Poles of s-Domain System Models”, Transactions on Power Systems, aprovado para publicação em 2009.

[8] Franklin Clement Véliz, “Equivalentes Dinâmicos de Redes Elétricas de Grande Porte Utilizando Análise Modal”, Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, RJ, Brasil, Abril 2005.

[9] S Gomes Jr., “Modelagem e Métodos Numéricos para Análise Linear de Estabilidade Eletromecânica, Ressonância Subsíncrona, Transitórios Eletromagnéticos e Desempenho Harmônico de Sistemas de Potência”, Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, RJ, Brasil, Junho 2002.

[10] Franklin Clement Véliz, Sergio L. Varricchio, Sergio Gomes Jr “Equivalentes Dinâmicos para Estudos de Harmônicos usando Análise Modal”, X Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning – X SEPOPE, Florianópolis, SC, Brazil, 21rd to 25th, May, 2006.