



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005

Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 11 7534
Tópico: Modelagem e Simulações

ANÁLISE HARMÔNICA TRIFÁSICA EM SISTEMAS ELÉTRICOS DESEQUILIBRADOS

LEANDRO R. ARAUJO

SERGIO LUIS VARRICCHIO

SERGIO GOMES JR

CEPEL

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia trifásica baseada em coordenadas de fase para análise de harmônicos em redes elétricas, possibilitando a representação de características importantes dos transformadores, cargas em diversas configurações, linhas de transmissão (LT) com parâmetros distribuídos e variáveis na frequência, fontes harmônicas trifásicas, etc. Alguns dados a serem utilizados nos estudos de harmônicos são obtidos por meio de um fluxo de potência trifásico do sistema elétrico. Os resultados da metodologia proposta, aplicada a um sistema exemplo, são comparados com os obtidos com o programa de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC.

PALAVRAS CHAVES

Modelagem de sistemas trifásicos, Análise harmônica, Sistemas elétricos desequilibrados

1.0 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O estudo do desempenho harmônico dos sistemas elétricos torna-se cada vez mais importante, pois a quantidade de cargas não lineares tem crescido continuamente. Atualmente, os sistemas de distribuição e industriais possuem várias cargas não-lineares constituídas, por exemplo, de fontes chaveadas, pontes conversoras e fornos a arco. Na subtransmissão também existem indústrias que geram grandes quantidades de harmônicos, bem como na transmissão onde existem vários equipamentos FACTS (compensadores séries controlados a

tiristores, compensadores estáticos de reativos, conversores AC-DC) e grandes cargas não lineares que geram um amplo espectro de harmônicos.

Para analisar o efeito destes equipamentos e cargas não-lineares nos sistemas elétricos de médio e grande porte são geralmente utilizados equivalentes monofásicos de seqüência positiva. Estes equivalentes são eficazes para o estudo da propagação harmônica em sistemas elétricos equilibrados, como podem ser considerados os sistemas de transmissão.

Por outro lado, os sistemas de subtransmissão, distribuição e os industriais apresentam, em geral, muito desequilíbrio, pois possuem longos ramais sem transposição de fase, ramais monofásicos e bifásicos e cargas desequilibradas. Uma alternativa para realizar estudos nestes sistemas seria a utilização de componentes simétricas. Mas como citado anteriormente os ramais não são sempre trifásicos e possuem grande desequilíbrio, com isto, o uso de componentes simétricas torna-se pouco atraente e ineficaz.

Para estudar o comportamento harmônico destes sistemas desequilibrados, este trabalho propõe uma metodologia trifásica baseada em coordenadas de fase, possibilitando representação de características importantes dos transformadores, cargas em delta, LTs, fontes harmônicas trifásicas, etc.

Alguns dados a serem utilizados nos estudos de harmônicos são obtidos por meio de um fluxo de

potência trifásico do sistema elétrico. Estes dados são relativos aos elementos que variam com a tensão, como por exemplo, as cargas especificadas em potência ou corrente constantes ou os taps dos transformadores.

A metodologia trifásica proposta é comparada com a monofásica por meio de estudos de comportamento harmônico do sistema exemplo com e sem desequilíbrios. Esta comparação tem como objetivo principal mostrar em quais casos as metodologias são equivalentes e em quais existem diferenças significativas entre os resultados, mostrando a importância da modelagem trifásica de alguns sistemas. Nestes estudos são calculadas as distorções de tensão, impedâncias próprias e de transferência entre barras de mesma fase e fases distintas. Alguns resultados obtidos com a metodologia proposta, considerando o sistema exemplo desequilibrado, são comparados com os obtidos com o programa PSCAD/EMTDC.

Além dos resultados das simulações, serão também apresentados alguns aspectos importantes dos modelos trifásicos dos componentes do sistema.

2.0 MODELO DOS COMPONENTES

Nesta seção serão apresentados os modelos trifásicos dos componentes.

2.1 Equipamentos Rlc

Circuitos elétricos compostos de resistências, indutâncias e capacitâncias conectadas em série, paralelo ou em outra configuração podem representar diversos tipos de componentes, entre os quais, filtros harmônicos passivos, compensação reativa (reator ou capacitor em derivação), cargas, etc.

Na Figura 1 são apresentados elementos RLC, representados por suas admitâncias, conectados em estrela aterrada e em delta. As matrizes $\mathbf{Y}_{\text{barra}}$ destes elementos estão apresentadas em (1) (estrela aterrada) e (2) (delta).

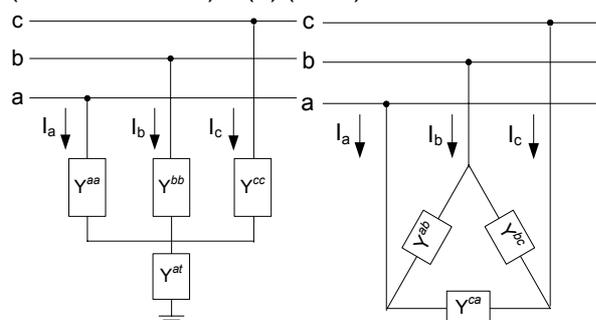


Figura 1 – Tipos de conexões de RLC

$$\mathbf{Y}_y = \frac{1}{Y_t} \begin{bmatrix} Y_t Y^{aa} - Y^{aa^2} & -Y^{aa} Y^{bb} & -Y^{aa} Y^{cc} \\ -Y^{aa} Y^{bb} & Y_t Y^{bb} - Y^{bb^2} & -Y^{bb} Y^{cc} \\ -Y^{aa} Y^{cc} & -Y^{bb} Y^{cc} & Y_t Y^{cc} - Y^{cc^2} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_\Delta = \begin{bmatrix} Y^{ab} + Y^{ca} & -Y^{ab} & -Y^{ca} \\ -Y^{ab} & Y^{ab} + Y^{bc} & -Y^{bc} \\ -Y^{ca} & -Y^{bc} & Y^{bc} + Y^{ca} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Onde: $Y_t = Y^{aa} + Y^{bb} + Y^{cc} + Y^{at}$.

2.2 - Linhas de transmissão

A matriz dos parâmetros elétricos longitudinais por unidade de comprimento de uma LT, para uma frequência complexa $s = \sigma + j\omega$, é dada por [1]:

$$\mathbf{Z}(s) = \mathbf{Z}^{(e)}(s) + \mathbf{Z}^{(i)}(s) \quad (3)$$

A matriz de impedâncias $\mathbf{Z}^{(e)}(s)$ considera a configuração geométrica da torre e o retorno pelo solo. Seus elementos são dados por:

$$z_{ii}^{(e)}(s) = \frac{s\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{2y_i + 2p}{R_e}\right), \text{ para } i = j \quad (4)$$

$$z_{ij}^{(e)}(s) = \frac{s\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{\bar{H}_{ij}}{D_{ij}}\right), \text{ para } i \neq j \quad (5)$$

Onde:

$$\bar{H}_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j + 2p)^2}, \text{ } i \neq j \quad (6)$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, \text{ } i \neq j \quad (7)$$

$$p = \sqrt{\rho_{\text{solo}} / s\mu_0} \quad (8)$$

Nestas equações μ_0 , R_e e ρ_{solo} denotam, respectivamente, a permeabilidade magnética do ar, o raio externo do condutor e a resistividade do solo. A influência do solo foi considerada utilizando o método de distância de penetração complexa [2], p , dada por (8). Alternativamente as equações de Carson poderiam ser utilizadas. O significado geométrico de algumas coordenadas (x_i, y_i) é mostrado na Figura 2.

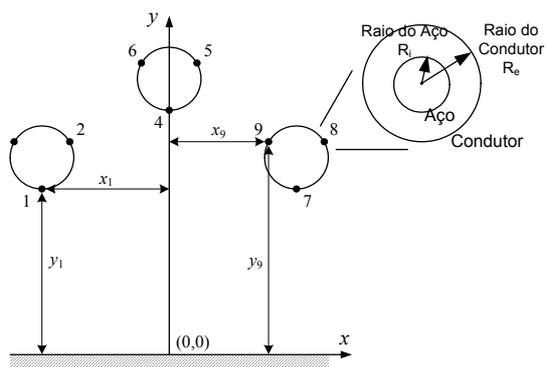


Figura 2 – Linha de transmissão e cabo

A matriz de impedâncias internas dos condutores $\mathbf{Z}^{(i)}(s)$ é diagonal, sendo os elementos dados por:

$$z_{ii}^{(i)}(s) = k \frac{I_0(a_e)K_1(a_i) + I_1(a_i)K_0(a_e)}{I_1(a_e)K_1(a_i) - I_1(a_i)K_0(a_e)} \quad (9)$$

sendo:

$$k = \sqrt{\frac{s\mu_0}{\sigma}} \frac{1}{2\pi R_e}, \quad \sigma = 1/R_{cc} \pi (R_e^2 - R_i^2) \quad (10)$$

$$a_i = R_i \sqrt{\sigma\mu_0 s}, \quad a_e = R_e \sqrt{\sigma\mu_0 s} \quad (11)$$

Os símbolos σ , R_i e R_{cc} denotam, respectivamente, a condutância, o raio da alma de aço (Figura 2) e a resistência a corrente contínua dos cabos condutores da LT. I_0 e I_1 representam as funções de Bessel modificadas de primeira classe e ordem 0 e 1, respectivamente. K_0 e K_1 são as funções de Bessel modificadas de segunda classe de ordem 0 e 1, respectivamente.

Caso o cabo não possua alma de aço deve-se utilizar (12) ao invés de (9).

$$z_i(s) = k \frac{I_0(a_e)}{I_1(a_e)} \quad (12)$$

A matriz de admitâncias transversais por unidade de comprimento da LT $\mathbf{Y}_t(s)$ é dada por:

$$\mathbf{Y}_t(s) = s\mathbf{P}(s)^{-1} \quad (13)$$

Os elementos da matriz de coeficientes de potenciais $\mathbf{P}(s)$ são dados por:

$$p_{ii}(s) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2y_i}{R_e}\right), \quad \text{para } i = j \quad (14)$$

$$p_{ij}(s) = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{H_{ij}}{D_{ij}}\right), \quad \text{para } i \neq j \quad (15)$$

Onde H_{ij} é dado por (6) considerando $p = 0$ e D_{ij} é dado por (7). O símbolo ϵ_0 denota a permissividade do ar.

2.2.1 Correção hiperbólica

Para corrigir hiperbolicamente a matriz de admitâncias nodais da LT, recorre-se ao processo de transformação modal para diagonalizar as matrizes $\mathbf{Z}_t(s)$ e $\mathbf{Y}_t(s)$ [1]. Primeiramente deve-se calcular as matrizes de autovetores a direita (\mathbf{T}_u) e a esquerda (\mathbf{T}_i) do produto matricial $\mathbf{Z}_t(s)\mathbf{Y}_t(s)$. Aplica-se então a transformação modal:

$$\mathbf{Z}_m = \mathbf{T}_u^{-1} \mathbf{Z}_t(s) \mathbf{T}_i, \quad \mathbf{Y}_m = \mathbf{T}_i^{-1} \mathbf{Y}_t(s) \mathbf{T}_u \quad (16)$$

onde as matrizes \mathbf{Z}_m e \mathbf{Y}_m são diagonais.

As correntes e tensões terminais da linha, após a transformação modal, se relacionam pela matriz modal de admitâncias de barras:

$$\mathbf{Y}_{bm} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{bm}^{(p)} & \mathbf{Y}_{bm}^{(m)} \\ \mathbf{Y}_{bm}^{(m)} & \mathbf{Y}_{bm}^{(p)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Os elementos das submatrizes diagonais $\mathbf{Y}_{bm}^{(p)}$ e $\mathbf{Y}_{bm}^{(m)}$ são dados por:

$$y_{bm_{kk}}^{(p)} = y_{c_k} \coth(\gamma_k l), \quad y_{bm_{kk}}^{(m)} = y_{c_k} \operatorname{csch}(\gamma_k l) \quad (18)$$

sendo:

$$y_{c_k} = \sqrt{y_{m_{kk}}/z_{m_{kk}}}, \quad \gamma_k = \sqrt{z_{m_{kk}} y_{m_{kk}}} \quad (19)$$

Note que $z_{m_{kk}}$ e $y_{m_{kk}}$ são os elementos da posição (k,k) das matrizes \mathbf{Z}_m e \mathbf{Y}_m .

Realiza-se, então, a transformação inversa para determinar as submatrizes de fase:

$$\mathbf{Y}_b^{(p)}(s) = \mathbf{T}_i \mathbf{Y}_{bm}^{(p)}(s) \mathbf{T}_i^t, \quad \mathbf{Y}_b^{(m)}(s) = \mathbf{T}_i \mathbf{Y}_{bm}^{(m)}(s) \mathbf{T}_i^t \quad (20)$$

As correntes e tensões terminais da LT em coordenadas de fase se relacionam por:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_b^{(p)} & \mathbf{Y}_b^{(m)} \\ \mathbf{Y}_b^{(m)} & \mathbf{Y}_b^{(p)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{Y}_b \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \end{bmatrix} \quad (21)$$

sendo \mathbf{Y}_b a matriz de admitâncias nodais de fase.

Cabos pára-raios e múltiplos condutores por fase podem ser incluídos na modelagem, construindo a matriz de impedâncias para todos os cabos e depois reduzindo-a conforme em [3].

2.4 Cargas

As cargas (estrela ou delta) são representadas utilizando o modelo ZIP para o fluxo de potência trifásico. Na análise harmônica as cargas são transformadas em elementos RLC em série ou paralelo com base no valor atual de tensão nodal da barra em que a carga se encontra conectada.

3.0 SISTEMA TESTE

A metodologia proposta não apresenta restrições quanto a dimensão e complexidade de sistemas. No entanto, por limitações de espaço e para uma maior facilidade de reprodução de resultados, optou-se pelo sistema apresentado na Figura 5 que, embora de pequenas dimensões, apresenta as principais características e complexidades de sistemas práticos.

Este sistema exemplo possui uma linha trifásica não transposta entre as barras 1 e 2, sendo que os condutores são cabos do tipo “rail” com o centro das fases nas coordenadas (-10,16), (0,16) e (10,16). A distância entre condutores de mesma fase é de 0,46m. Os cabos pára-raios são do tipo ½”HS com os centros em (-6,25) e (6,25). Estas ordenadas consideram a altura média do vão.

A impedância de dispersão do transformador é de 0,1 pu na sua base.

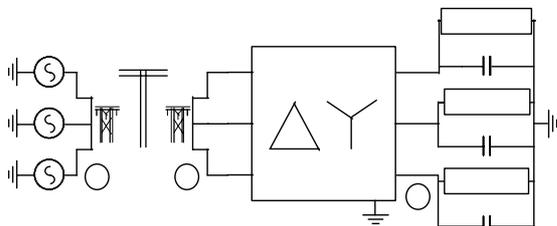


Figura 5 – Sistema exemplo de três barras

Na Tabela 1 são apresentados os valores das tensões nodais do sistema exemplo da Figura 5, onde V^{an} , V^{bn} e V^{cn} denotam as tensões das fases a , b e c para o nó terra. Estes valores foram calculados utilizando um programa de fluxo de potência trifásico a partir da metodologia descrita em [5]. Neste estudo de fluxo de potência as cargas da barra 3 foram consideradas com potência constante.

Tabela 1 – Tensões convergidas

Barra	V^{an} (kV)	V^{bn} (kV)	V^{cn} (kV)
1	288,67	288,67	288,67
2	292,61	282,05	302,68
3	125,41	132,44	137,24

Para a realização do estudo de comportamento harmônico do sistema exemplo, as cargas foram

representadas por circuitos RL série. Os valores das impedâncias à frequência fundamental destes circuitos são calculados por (32) e estão apresentados na Tabela 2.

$$Z_{serie}^s = \left| V^{sn} \right|^2 / (S^s)^* \quad (32)$$

Tabela 2 – Valores das impedâncias

Z^{aa} (Ω)	Z^{bb} (Ω)	Z^{cc} (Ω)
74,39+j53,14	117,72+j82,40	150,68+j113,01

4.0 ANÁLISE HARMÔNICA

Em geral estudos de comportamento harmônico de sistemas de potência envolvem o cálculo das distorções de tensão em suas barras, bem como a determinação das impedâncias próprias de determinadas barras e de transferências entre elas. A partir do conhecimento das distorções de tensão nas barras, o cálculo das correntes harmônicas que fluem através dos equipamentos conectados às mesmas é trivial.

Para a realização destes cálculos, a construção da matriz de admitâncias nodais Y do sistema é de fundamental importância. Note que esta matriz deve ser construída considerando todas as características dos equipamentos que podem interferir significativamente no comportamento harmônico do sistema. Assim, as LTs devem ser modeladas considerando sua natureza distribuída e variável com a frequência. No caso dos transformadores, a modelagem dos tipos de ligações dos seus enrolamentos pode ser também de grande importância.

O cálculo das impedâncias próprias de determinadas barras e de transferência entre elas pode ser feito a partir da inversão da matriz Y . Por ser a inversão explícita um processo caro computacionalmente, utiliza-se a fatoração LDU [5]. O cálculo é repetido para toda a faixa de frequências de interesse.

Por outro lado, as cargas e equipamentos não-lineares podem ser modelados como fontes de correntes harmônicas, arranjadas em um vetor I . Assim, as distorções harmônicas de tensão nas diversas barras do sistema podem ser obtidas resolvendo-se o sistema linear:

$$I_h = Y_h V_h, \quad h = 1, 2, \dots, n \quad (33)$$

onde h representa a ordem da frequência harmônica em que a matriz Y e os vetores I e V são calculados e n o número de harmônicos considerados.

4.1 Impedância de transferência

Na Figura 6.a são mostradas as curvas do módulo da impedância própria da barra 2 na fase *a* em função da frequência, obtidas com a metodologia proposta e com o PSCAD. A Figura 6.b é análoga à Figura 6.a considerando a fase *a* da barra 3. Como se observa, as curvas são visualmente coincidentes.

Seja Z_{2a} , Z_{2b} e Z_{2c} os módulos das impedâncias próprias da barra 2 nas fases *a*, *b* e *c*. Considere, também, que os símbolos Z_{2ab} e Z_{2ac} representem os módulos das impedâncias de transferências entre as fases *a* e *b* e *a* e *c* da barra 2. Na Figura 6.c são mostradas as curvas em função da frequência das diferenças $Z_{2a} - Z_{2b}$ e $Z_{2a} - Z_{2c}$, e na Figura 6.d as curvas das diferenças $Z_{2a} - Z_{2ab}$ e $Z_{2a} - Z_{2ac}$.

As impedâncias de transferência entre duas barras trifásicas de um sistema elétrico desequilibrado são dadas por uma matriz quadrada de dimensão 3, complexa e assimétrica, cuja forma é mostrada em (34), para as barras 3 e 2.

Na Figura 6.e e na Figura 6.f são mostradas as curvas dos módulos em função da frequência de alguns elementos da matriz em (34).

$$\begin{bmatrix} V_{2a} \\ V_{2b} \\ V_{2c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{3a,2a} & Z_{3b,2a} & Z_{3c,2a} \\ Z_{3a,2b} & Z_{3b,2b} & Z_{3c,2b} \\ Z_{3a,2c} & Z_{3b,2c} & Z_{3c,2c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{3a} \\ I_{3b} \\ I_{3c} \end{bmatrix} \quad (34)$$

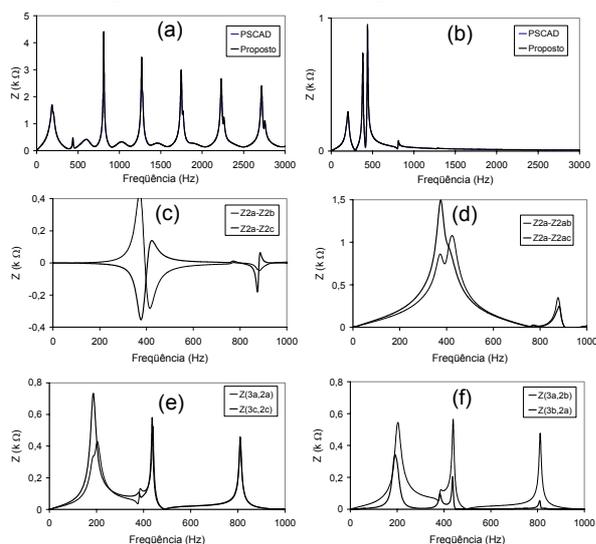


Figura 6 – Resposta a frequência

4.2 Distorções de tensão

No sistema exemplo da Figura 5 é adicionada uma fonte de corrente harmônica trifásica na

barra 3. Os valores de módulo e ângulo desta corrente são apresentados na Tabela 3. Nesta tabela, os harmônicos de ordem $3q$ são de seqüência zero, os de ordem $3q+1$ são de seqüência positiva e os de ordem $3q-1$ de seqüência negativa, sendo q um número inteiro.

Tabela 3 – Correntes harmônicas – Fase *a*

Ordem	f (Hz)	I (A)	θ (graus)
3 (0)	180	350	0
5 (-)	300	200	0
7 (+)	420	145	0
11 (-)	660	100	0
13 (+)	780	75	0

Os módulos das correntes são iguais nas três fases e os ângulos nas fases *b* e *c* encontram-se defasados de $120q$ e $240q$ graus, respectivamente, em relação à fase *a*.

Deve-se observar que para o equipamento não linear considerado, as injeções harmônicas de ordem superior a 13 de todas as seqüências apresentaram módulos de corrente muito baixos sendo, portanto, desprezadas.

Na Figura 7.a apresenta-se as distorções de tensões nas fases *a*, *b* e *c* da barra 2 devidas à fonte de corrente harmônica localizada na barra 3. Observa-se que por ser o sistema desequilibrado o transformador estrela-delta não filtrou totalmente o terceiro harmônico.

Na Figura 7.b o sistema foi equilibrado e recalcularam-se as distorções de tensão, neste caso o transformador filtrou totalmente o terceiro harmônico.

No caso equilibrado os resultados das distorções de seqüência positiva foram idênticos aos obtidos utilizando-se o programa HarmZs do CEPTEL.

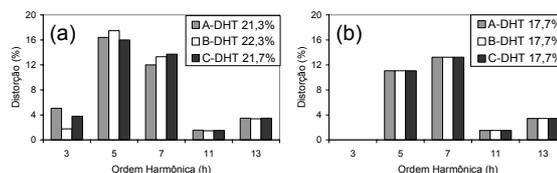


Figura 7 – Distorções harmônicas

5.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma metodologia trifásica baseada em coordenadas de fase para análise de harmônicos em redes elétricas, possibilitando a representação de características importantes dos equipamentos de um sistema.

Os resultados da metodologia proposta, aplicada a um sistema exemplo com desequilíbrios, foram validados com os obtidos com o PSCAD.

Mostrou-se também que para o sistema exemplo equilibrado, a metodologia proposta apresentou os mesmos resultados que o programa HarmZs do CEPEL, que utiliza equivalentes de seqüência positiva. Observa-se, no entanto, que os valores de distorções harmônicas de tensão podem ser consideravelmente diferentes nos casos de sistemas com e sem desequilíbrios.

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sergio Gomes Jr., “Modelagem e Métodos Numéricos para Análise Linear de Estabilidade Eletromecânica, Ressonância Subsíncrona, Transitórios Eletromagnéticos e Desempenho Harmônico de Sistemas de Potência”, Rio de Janeiro, COPPE, Junho de 2002.
- [2] A. Deri, G. Tevan, A. Semlyen, A. Castanheira, “The Complex Ground Return Plane; A Simplified Model for Homogeneous and Multi-Layer Earth Return”, IEEE Trans on Power System, vol.100, no. 8, pp.3686-3693, 1981.
- [3] Paul. M. Anderson, “Analysis of Faulted Power Systems”, Iowa State Press, NY, EUA.
- [4] Sergio L. Varricchio, Sergio Gomes Jr., Ricardo D. Rangel, “Modelagem no Domínio da Freqüência de Transformadores de Dois e Três Enrolamentos para Estudo de Comportamento Harmônico e Análise Modal de Redes Elétricas”, Relatório Técnico CEPEL DPP/POL – 615/02, Agosto de 2002.
- [5] Leandro R. Araujo, “Uma Contribuição ao Fluxo de Potência Ótimo Aplicado a Sistemas de Potência Trifásicos Usando o Método dos Pontos Interiores”, Rio de Janeiro, COPPE, Abril de 2005.

