



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GCQ-11
19 a 24 Outubro de 2003
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

ESTIMAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE FONTES POLUIDORAS DE HARMÔNICOS

**Jacques Szczupak*
ENGENHO/PUC-RJ**

**Gustavo P. B. Castro
PUC-RJ**

RESUMO

A rede elétrica é modelada de forma a permitir a correta estimativa da injeção de harmônicos por fontes poluidoras. O método indica como selecionar localizações preferenciais para um conjunto de pontos de monitoração da poluição harmônica na rede elétrica. Esta escolha, usualmente associada a conveniências locais, permite identificar de forma única o volume de injeção harmônica por usuários não diretamente monitorados na rede elétrica. Ao contrário dos métodos atualmente conhecidos na literatura técnica, o processo não se restringe a redes radiais, aplicando-se igualmente a sistemas fortemente malhados, o que é visto em alguns casos ilustrativos.

PALAVRAS-CHAVE

Harmônicos. Qualidade de energia. Rede elétrica. Injeção de harmônicos. Rede malhada.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma das principais causas da perda de qualidade da energia é a deterioração do sinal elétrico por ação de alguns usuários. A recuperação de sua qualidade requer investimentos por parte da empresa fornecedora de energia elétrica, onerando o seu custo e, portanto reduzindo a rentabilidade do sistema elétrico. Uma correta estimativa, de quais foram os usuários poluidores e dos respectivos volumes de poluição, permitiria o controle da degradação do sinal elétrico pela penalização dos usuários excessivamente poluidores, evitando assim que o ônus da recuperação da qualidade da energia recaia tão somente sobre a empresa fornecedora.

Na realidade, a correta estimativa dos níveis individuais de poluição levaria a um novo tipo de relacionamento empresa-cliente. Possivelmente incorporando o aspecto qualidade ao custo da energia, tanto do ponto de vista do seu fornecimento, quanto do seu consumo.

Ao contrário de sistemas hidrológicos, onde em geral há uma relativa facilidade em rastrear fisicamente a fonte poluidora, por exemplo, seguindo a linha de esgoto na água, localizar e estimar corretamente a poluição em sistemas elétricos é usualmente uma tarefa complicada. A rede elétrica funciona como uma espécie de "agente socializador" do sinal poluidor, dificultando a identificação do usuário fonte. Essa dificuldade faz com que muitas vezes este usuário negue sua ação, visto ser difícil comprovar o ato. Até o momento as tentativas de corretamente identificar e estimar agentes poluidores restringem-se a métodos não exatos aplicados a pequenas redes radiais [1,2].

2.0 - OBJETIVOS E DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Esta pesquisa visa determinar as fontes poluidoras de harmônicos de um sistema elétrico a partir de medições efetuadas na rede elétrica. Para isto, os sinais elétricos são monitorados em um conjunto selecionado de pontos da rede, sendo nestes estimadas tanto a parcela correspondente à fundamental, quanto à dos diversos harmônicos de interesse. Os principais consumidores têm sua localização na rede conhecida, mas nem sempre os pontos de medição se encontram junto aos mesmos, tornando não óbvia tanto a identificação das fontes, quanto à estimativa dos harmônicos por eles injetados na rede, objetivos finais deste trabalho.

* Rua Esther Scliar 70 - CEP 22 793-760 – Rio de Janeiro - RJ - BRASIL
Tel.: (021) 3325-7054 - Fax: (021) 3325-7054 - E-MAIL: jacques@engenho.com

O trabalho inicialmente modela a rede elétrica e daí desenvolve condições a serem atendidas pelos pontos de monitoração da mesma em termos de número mínimo e localização. O processo não se restringe a redes radiais, aplicando-se igualmente a sistemas fortemente malhados. Estas condições permitem garantir os resultados das estimações de forma que estes não possam ser posteriormente questionados. Em outras palavras, o conjunto de pontos e sua localização na rede elétrica são suficientes para estabelecer uma relação um para um entre os valores monitorados na rede e os sinais de entrada à mesma. Nestes sinais de entrada estão incluídos os eventuais agentes poluidores do sistema e existe apenas uma única solução fornecendo o nível de poluição de cada um destes.

A primeira etapa no tratamento dos dados consiste no seu pré-processamento por um novo algoritmo de sincronização, que a partir dos próprios dados e da rede elétrica corrige eventuais erros nos tempos de aquisição. Este algoritmo supõe erros de sincronismo em pontos geograficamente distanciados, como é usual no processo elétrico. Neste trabalho este aspecto de sincronização é apenas mencionado, já que nos casos exemplos criados em computador ele inexistente. O processo será objeto de futura comunicação pelos autores.

A etapa final do processo consiste na estimacão das injeções de harmônicos por parte de cada um dos usuários poluidores. Para isto desenvolveu-se um novo algoritmo computacional, que opera a partir do conjunto corrigido de dados do sistema e da localização de cada agente poluidor na rede elétrica. O resultado final é a parcela de poluição harmônica estimada para cada usuário de interesse.

Por último, o trabalho apresenta casos ilustrativos com redes malhadas, ressaltando o critério na seleção dos pontos de monitoração e os reflexos da estrutura da rede elétrica no processo de estimacão. Os dados utilizados nestas ilustrações são representativos de situações reais, mas gerados por computador para permitir sua comparação com os resultados estimados pelo método proposto.

3.0 - MODELAGEM DA REDE ELÉTRICA

A rede elétrica a ser estudada é apresentada na Figura 1, tendo seus acessos externos monitorados com respeito à fundamental e aos harmônicos de interesse.

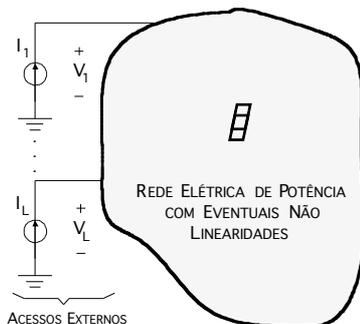


FIGURA 1 – REDE ELÉTRICA NÃO LINEAR

Os terminais externos à rede, em geral não linear, são supostos em sincronismo para fins de monitoração [4]. Isto é atualmente possível, graças a sistemas GPS, apesar das eventuais dimensões geográficas da rede em questão. Mesmo assim, eventuais perdas de sincronismo podem ser recuperadas, por exemplo, através do algoritmo desenvolvido pelos autores.

Os consumidores de energia têm sua localização conhecida na rede elétrica, mas não são necessariamente monitorados junto às suas conexões ao sistema elétrico. Esta característica torna não óbvia a correta estimacão dos harmônicos por eles injetados na rede. Além disto, eles não são os únicos responsáveis pelo comportamento não linear da rede indicada na Figura 1, caracterizado pela existência de harmônicos no sistema. Diversos equipamentos e cargas podem complementar esta característica.

A idéia básica apresentada para a modelagem da rede é a sua simplificação, tornando-a uma rede linear. Para isto é necessário monitorar alguns pontos extras na rede, além dos externos indicados na Figura 1. Isto está mais claramente indicado na Figura 2, onde uma sub-rede de dois acessos é usada como ilustração do processo.

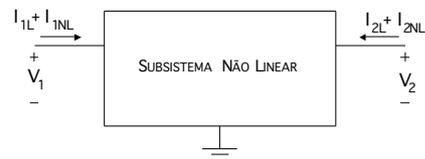


FIGURA 2 – SUB-REDE NÃO LINEAR

Por facilidade, as correntes de acesso indicadas na Figura 2 já se apresentam decompostas em uma componente linear e outra não linear, de acordo com algum critério de interesse. Note-se que sempre será possível dizer que a componente linear é nula, ficando a não linear com a totalidade da corrente correspondente. A Figura 3 indica um modelo equivalente à sub-rede mostrada na Figura 2, onde a não linearidade da rede foi removida pelas fontes externas, cada qual com o valor da parcela não linear da correspondente corrente. No caso em que as parcelas não lineares das correntes são as próprias correntes, o subsistema linear desaparece, simplificando a equivalência. Este procedimento é semelhante ao usado em [3,5].

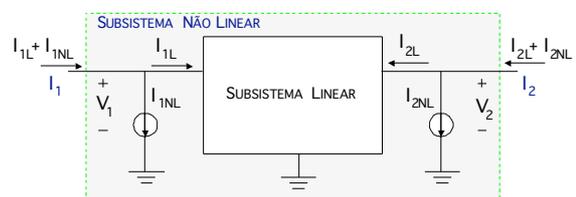


FIGURA 3 – SISTEMA EQUIVALENTE

A nova rede, vista pelos terminais externos em conjunto com os terminais extra de monitoração, pode ser vista na Figura 4. Exceto por pontos internos de injeção harmônica, usualmente não monitorados, a rede \hat{C} é linear por construção.

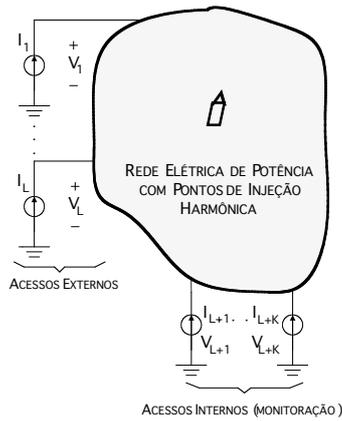


FIGURA 4 – REDE EQUIVALENTE “LINEAR”

A segunda função dos pontos extra de monitoração é, em conjunto com os acessos externos, permitir a identificação das fontes de poluição de forma única. Isto é tratado na seqüência do trabalho.

4.0 - MODELO DE ESTIMAÇÃO

O passo final na construção do modelo de estimação baseia-se na rede da Figura 4, envolvendo tanto medições pelos terminais externos, quanto pelos extra, encarregados da “linearização” da rede. A estimação tem de ser baseada em mapeamento 1 para 1, envolvendo os acessos medidos e os com injeções desconhecidas. A condição deve ser válida para a fundamental e para cada harmônico de interesse.

A situação descrita é modelada em cada freqüência de interesse pela rede indicada na Figura 5, onde se observam os novos acessos, correspondentes aos pontos internos de injeção desconhecida, nomeados como acessos de consumidores. Nesta figura observam-se:

- L acessos externos
- K acessos extra para monitoração
- M = N - (L+K) acessos de consumidores

Os primeiros (L+K) acessos têm seus dados de medição conhecidos, enquanto os M últimos têm correntes e tensões totalmente desconhecidas.

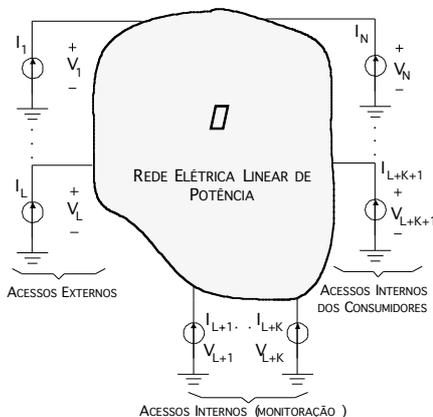


FIGURA 5 – MODELO FINAL PARA ESTIMAÇÃO

O modelo matemático descreve a rede linear por sua matriz admitância de acesso. Outras descrições são possíveis, sem perda de generalidade. Neste caso tem-se [6]

$$\begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} \begin{matrix} L \\ L \\ K \\ M \end{matrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{LL} & \mathbf{Y}_{LK} & \mathbf{Y}_{LM} \\ \mathbf{Y}_{KL} & \mathbf{Y}_{KK} & \mathbf{Y}_{KM} \\ \mathbf{Y}_{ML} & \mathbf{Y}_{MK} & \mathbf{Y}_{MM} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} \begin{matrix} V_L \\ V_K \\ V_M \end{matrix} \quad (1)$$

onde a partição indicada na matriz segue a ordenação sugerida pelos diversos acessos à rede linear da Figura 5. O negrito identifica vetor ou matriz, e os símbolos são auto explicativos a partir dos acessos correspondentes.

A matriz admitância de acesso deve ser determinada tanto na freqüência fundamental, quanto na dos harmônicos de interesse. Para uma dada freqüência pode-se estimar as tensões nos acessos desconhecidos de consumidores por

$$\mathbf{V}_M = \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} \begin{matrix} LM \\ KM \end{matrix} \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \square \\ \square \\ \square \end{bmatrix} \begin{matrix} L \\ K \end{matrix} \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{LL} & \mathbf{Y}_{LK} \\ \mathbf{Y}_{KL} & \mathbf{Y}_{KK} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \square \\ \square \end{bmatrix} \begin{matrix} V_L \\ V_K \end{matrix} \quad (2)$$

em que se supõe a existência da inversa indicada. Substituição de \mathbf{V}_M na Equação (1) permite a estimativa das correntes injetadas, \mathbf{I}_M .

A existência da inversa é função dos pontos de injeção internos, devido a consumidores, e da localização de acessos externos e extra, sobre os quais há razoável liberdade de escolha. Além disso, a escolha de uma matriz quadrada (número igual de acessos monitorados e desconhecidos) garantem a relação 1 para 1 entre dados medidos e calculados. Em outras palavras; não há outra solução para a rede e os valores estimados são os únicos possíveis.

Em qualquer situação é necessário observar a necessidade que dois terminais consumidores só são distintos se o forem eletricamente. É impossível distinguir usuários com acessos em curto, o que invalidaria até mesmo o modelo proposto. Este, entretanto, poderia ainda ser desenvolvido considerando estimar a injeção conjunta dos consumidores conectados à mesma barra, explicitando cada parcela componente da estimativa global pela medição de consumidores individualizados.

5.0 - CASOS ILUSTRATIVOS

O sistema escolhido para ilustrar o método proposto é baseado no Diagrama unifilar do sistema WSCC (Western System Coordinating Council) [7] e está representado na Figura 6. A rede original foi modificada de modo a evidenciar a injeção de correntes em 60 Hz nas barras 1, 2 e 3, capaz de manter o sistema dentro

dos valores de tensão de barra indicados na Figura 6. Seus valores estão indicados na Tabela 1.

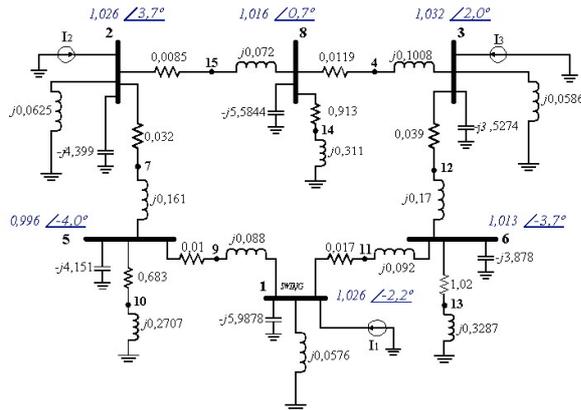


FIGURA 6 - REDE A PARTIR DO UNIFILAR WSCC

TABELA 1 - CORRENTES EM 60 HZ NOS ACESSOS EXTERNOS AO SISTEMA

BARRA	AMPLITUDE (pu)	FASE (graus)
1	18,0556	-90
2	16,4	-80,7
3	17,4915	-85,3

O caso exemplo inicial resulta da injeção de harmônicos na rede considerada, por simulação em computador digital. Desta forma, sabemos de antemão o valor da componente harmônica injetada, sua localização na rede e até mesmo a impedância harmônica que apresenta. Entretanto, o processo proposto não utiliza este pré-conhecimento, senão para uma comparação final com os valores resultantes do método. Em particular, o método proposto não utiliza ou depende das impedâncias resultantes do processo de injeção de harmônicos.

Por exemplo, pode-se considerar uma injeção de harmônicos em 300 Hz nas barras externas 1, 2 e 3 e na Barra 5, como apresentado na Figura 7. Os valores de tensão de barra estão indicados na figura, junto às respectivas barras e as correntes de injeção estão listadas na Tabela 2.

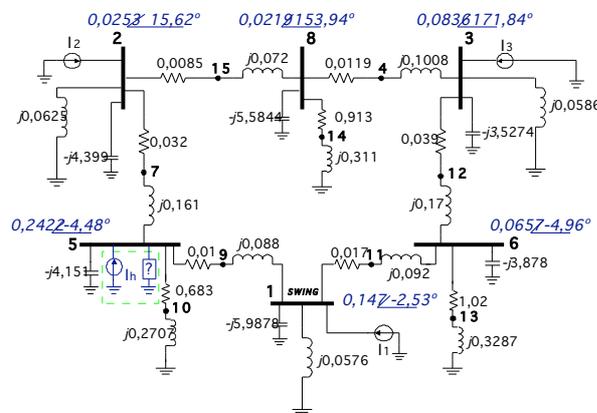


FIGURA 7 – REDE COM INJEÇÃO DE HARMÔNICOS

A rede da Figura 7 é analisada de acordo com as equações (1) e (2), onde as correntes e tensões nos acessos externos (barras 1, 2 e 3) são conhecidas. Não se consideram acessos internos de monitoração e desejam-se calcular as correntes e tensões nos acessos internos com conexão a cargas (barras 5, 6 e 8).

TABELA 2 – CORRENTES INJETADAS (300 HZ)

BARRA	AMPLITUDE (pu)	FASE (graus)
1	2,2693	-88,6440
2	0,3374	83,8035
3	2,8598	88,8688
5	2,5585	-81,2410

Os resultados são apresentados na Tabela 3 para as tensões de barra, indicando plena coincidência entre valores estimados e os realmente existentes.

TABELA 3 – TENSÕES NAS BARRAS (300 HZ)

BARRA	TENSÃO ESTIMADA		TENSÃO REAL	
	Amplitude (pu)	Fase (graus)	Amplitude (pu)	Fase (graus)
5	0,2422	-4,4758	0,2422	-4,4758
6	0,0657	-4,9627	0,0657	-4,9627
8	0,0219	153,9373	0,0219	153,9373

Por outro lado, as correntes estimadas nos acessos em questão *aparentemente* diferem ligeiramente dos valores aplicados. Isto pode ser observado na Tabela 4. Entretanto, estes valores são exatamente corretos, o que é visto a seguir.

TABELA 4 – CORRENTES NAS BARRAS (300 HZ)

BARRA	CORRENTE ESTIMADA		CORRENTE INJETADA	
	Amplitude (pu)	Fase (graus)	Amplitude (pu)	Fase (graus)
5	2,3855	-87,7522	2,5585	-81,241
6	0,0613	157,1736	0	qualquer
8	0,0227	-44,8743	0	qualquer

O motivo da aparente contradição está relacionado ao modelo da rede, descrito por sua matriz admitância de acesso. Como tal, a rede é excitada por fontes de tensão, independentes, tendo como resposta as correntes nos acessos. A corrente de acesso, portanto, engloba também os elementos conectados em paralelo com o acesso correspondente e assim também as eventuais admitâncias devidas à modelagem harmônica (que supomos desconhecidas).

Por exemplo, na rede da Figura 7 pode-se considerar a fonte harmônica I_h como a corrente de acesso à Barra 5. Neste caso a impedância harmônica terá de ser incluída na rede, inviabilizando o método, já que esta é desconhecida.

Alternativamente foi considerado que a fonte I_h e sua impedância paralela estão fora da rede, viabilizando a técnica. A nova corrente de acesso não é mais I_h , mas o que de I_h não foi drenado pela impedância harmônica. Por isso há aparente divergência nas correntes de acesso estimada e a injetada, I_h . As correntes estimadas nas barras 6 e 8, onde injetaram-se correntes nulas, não são zero porque indicam haver fluxo harmônico pelas respectivas impedâncias harmônicas, externas aos acessos.

O caso exemplo agora será ampliado, de modo que fique evidente a modularidade do método proposto. Isto será efetuado usando características comumente encontradas em sistemas de potência.

Por facilidade (e limitação de espaço para o texto) uma das cargas será substituída por uma rede equivalente, distribuindo a energia a diversos usuários. Nesse caso escolheu-se a carga conectada à Barra 5 para ilustrar o processo. Isto pode ser observado quando a rede da Figura 8 substitui a fonte I_h e sua impedância harmônica na rede da Figura 7.

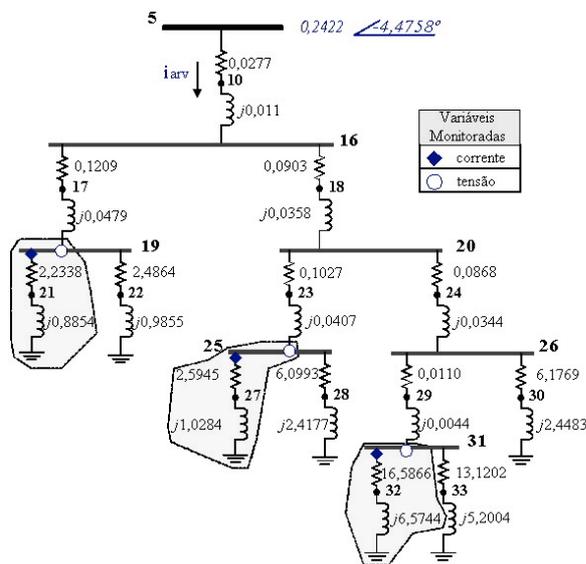


FIGURA 8 – REDE EM ÁRVORE

Pode-se agora notar que toda a estrutura em árvore foi substituída por seu equivalente Norton no caso descrito na Figura 7 e que a conexão das redes, pela Barra 5, nas figuras 7 e 8 corresponde a um caso prático. Isto também exemplifica como se pode quebrar o problema por partes, modularmente.

A sub-rede acrescentada em substituição à carga da Barra 5 está destacada na Figura 8 com impedâncias em 300 Hz. Note-se que agora já são conhecidas a tensão na Barra 5 e a corrente que entra por essa Barra na rede da Figura 7. A corrente i_{arv} indicada na Figura 8 não é mais que o negativo da corrente anteriormente calculada.

O caso sob análise permite considerar situações características, onde conveniências e custos são balanceados dentro da adequação do processo de monitoração de dados elétricos. Para tanto, sem perda

de generalidade, pode-se supor que os consumidores estão conectados aos barramentos extremos, sendo que nestes pode haver injeção de harmônicos e, portanto as impedâncias harmônicas podem ter sido alteradas em relação ao indicado na figura, sendo assim desconhecidas. A parcela da rede não aterrada (linhas,...) tem impedância conhecida. Outro requisito é que todas as correntes e tensões harmônicas sejam ou monitoradas ou estimadas pelo processo.

Uma possível solução está indicada na Figura 8, onde estão marcadas várias localizações para o sistema de monitoração. Naturalmente, procura-se reunir as medições em um menor número de pontos para atender critérios de custo. Claramente a solução não é única.

A análise da sub-rede indicada na Figura 8 é imediata e pode ser efetuada de forma qualitativa para escolher a localização das medições. Para as barras conectadas a usuários, os dados monitorados são apresentados nas tabelas 5 e 6.

TABELA 5 – TENSÕES DE BARRA NA ÁRVORE (300HZ)

BARRA	TENSÕES MONITORADAS	
	AMPLITUDE (pu)	FASE (graus)
19	0,0211	-34,7639
25	0,5953	-66,7556
31	1,2401	-19,7712

TABELA 6 – CORRENTES NA ÁRVORE (300 HZ)

Nó	CORRENTES MONITORADAS	
	AMPLITUDE (pu)	FASE (graus)
21	0,0877	-26,0981
27	1,8534	-15,6542
32	6,9620	162,2500

O mesmo algoritmo, usado anteriormente, determina os valores de tensão e corrente estimados a partir dos conhecidos (monitorados e provenientes de análise anterior).

Os resultados podem ser vistos nas tabelas 7 e 8, correspondendo aos valores de correntes e tensões. Nestas tabelas estão explicitados pela notação em *itálico* os dados previamente monitorados.

TABELA 7 – CORRENTES NA ÁRVORE (300 HZ)

NÓS	MONITORADAS / ESTIMADAS	
	AMPLITUDE (pu)	FASE (graus)
10	2,3855	92,2487
17	2,0222	-37,4772
18	3,9933	115,1710
21	<i>0,0877</i>	<i>-26,0981</i>
22	1,9364	-37,9891
23	3,3894	10,2224
24	5,8667	149,1019
27	<i>1,8534</i>	<i>-15,6542</i>
28	1,9024	35,3865
29	6,3808	172,2089
30	2,5041	59,0508
32	<i>6,9620</i>	<i>162,2500</i>
33	1,2948	-76,2081

Apesar dos casos exemplo terem sido apresentados a partir de uma primeira rede malhada, acrescentando depois a esta uma estrutura em árvore, nada impede (e muitas vezes há vantagem nisto) em partir diferentemente a rede original.

TABELA 8 – TENSÕES NA ÁRVORE (300 HZ)

BARRA	MONITORADAS / ESTIMADAS	
	AMPLITUDE (pu)	FASE (graus)
5	0,2422	-4,4758
16	0,2830	-17,2457
19	0,0211	-34,7639
20	0,6542	-32,2882
25	0,5953	-66,7556
26	1,1780	-21,8160
31	1,2401	-19,7712

6.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um novo método para a estimação de injeções harmônicas por parte de usuários de energia da rede elétrica. O objetivo do processo é duplo. Por um lado indicar como a rede elétrica deve ser monitorada de forma a garantir uma relação um para um entre valores estimados e medidos. Por outro lado adaptar-se às necessidades da empresa, permitindo atender a conveniências e particularidades do sistema.

O método é modular, permitindo sua repetida aplicação à sub-redes em que a rede original é dividida. Ele independe do conhecimento de particularidades do processo não linear associado à geração de harmônicos, utilizando o conceito de injeção por fonte harmônica carregada por impedância. Tanto a fonte quanto a carga harmônica são consideradas desconhecidas. O conhecimento de detalhes da geração harmônica, como, por exemplo, à impedância harmônica, podem ser facilmente incorporados ao processo.

O método não é restrito a redes do tipo radial, aplicando-se perfeitamente a redes malhadas. Nos casos exemplos apresentados fez-se uma evolução a partir de uma rede malhada até atingir uma rede envolvendo tanto malhas, quanto estruturas do tipo radial. O método aplica-se com facilidade a ambos os tipos de estrutura, permitindo grande flexibilidade na forma como pode ser empregado.

Nos casos exemplo as comparações sempre foram executadas a partir de modelos de rede gerados em computador, ou seja, praticamente livre dos erros que apareceriam na vida real. Para esta situação a estimativa é sempre exata, devendo degradar um pouco em função de imperfeições do sistema de monitoração e das características da rede. Este aspecto está sob análise pelos autores.

O método proposto permite acompanhar a evolução da injeção harmônica dentro do sistema elétrico,

identificando agentes poluidores e suas respectivas contribuições ao processo. Seu emprego permite uma total mudança na forma como se comercializa a energia elétrica, incluindo sua qualidade como parte do custo, tanto para o fornecedor, quanto para o consumidor.

7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) A. Teshome, "Harmonic source and type identification in a radial distribution system," in *Proc. 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp. 1605-1609.
- (2) H. Ma and A. A. Girgis, "Identification and tracking of harmonic sources in a power system using a Kalman filter," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 3, pp. 1659-1665, July 1996.
- (3) L. Pham, K. P. Wong, N. R. Watson, and J. Arrillaga, "A method of utilizing non-source measurements for harmonic state estimation," *ELSEVIER Electric Power Systems Research*, vol. 56, pp. 231-241, May 2000.
- (4) J. Szczupak, R. A. F. Chacon, P. A. M-S. David, "Real Time Precise Harmonic Estimation", *Proceedings of the 13th PSCC*, vol II, pp. 1063-1069, Thronheim, Norway, 1999.
- (5) J. Arrillaga, M. H. J. Bollen, and N. R. Watson, "Power quality following deregulation," (invited paper) *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 246-261, Feb. 2000.
- (6) N. Balabanian and T. A. Bickart, *Network Theory*, John Wiley and Sons, 1969.
- (7) H. W Dommel, "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks", *IEEE Trans. App. Systems*, Vol. PAS-88, pp 338-399, Apr. 1969.