SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GCQ - 10
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

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

IDENTIFICAÇÃO DE FORMAS GERAIS DE POLUIÇÃO EM BARRAS NÃO MONITORADAS DA REDE ELÉTRICA

Jacques Szczupak*

ENGENHO/PUC-RJ

RESUMO

Neste estudo generaliza-se um conhecido método de estimação de harmônicos injetados na rede elétrica. O objetivo é estimar formas de injeção quaisquer (e não mais apenas harmônicos) em barras não monitoradas do sistema elétrico, evitando a pressuposição sobre o tipo de perturbação, ou mesmo a existência de uma perturbação. O resultado da aplicação desta técnica disponibiliza a real injeção ocorrida, permitindo que sobre esta seja efetuada eventual decomposição da forma de onda. Um caso exemplo, desenvolvido sobre rede fortemente malhada, suporta o método, fazendo uso de perturbações sintetizadas numericamente. São indicadas formas de reduzir a complexidade computacional associada ao processo.

PALAVRAS-CHAVE

Distorção, Qualidade, Estimação, N-acessos, Monitoração, FFT, Multitaxa.

1.0 - INTRODUÇÃO

A perda de qualidade na energia fornecida pelo sistema elétrico é fator que ganha importância em função do amplo uso da energia elétrica. Sua regularização exige investimentos por parte da empresa concessionária, onerando custos e portanto reduzindo a rentabilidade do sistema elétrico. A estimativa correta da fonte poluidora permitiria controlá-la, seja atuando técnicamente sobre a causa poluidora, seja por acordos comerciais em que custo e qualidade seriam ajustados, de comum acordo, entre fornecedores e consumidores da energia.

Entretanto, estimar a fonte poluidora do sistema elétrico não é tarefa simples. Por um lado são complicadores a complexidade e as dimensões do sistema sob análise e por outro lado a variedade de distorções que os sinais podem apresentar. Uma tentativa, aceita por praticamente todo o setor elétrico, é qualificar os sinais de acordo com o tipo de distorção apresentada, aprimorando técnicas específicas à sua deteção e estimação. Harmônicos, flickers, sags, swells, etc, representam esta forma de estruturação do campo de estudo [1].

Apesar dos grandes avanços que derivam desta forma de análise da qualidade da energia, tem sido comum encontrar críticas à aplicação em campo de técnicas de estimação específicas. Alguns motivos podem ser apontados para isto na forma de estimação do fenômeno, envolvendo particularidades dos algoritmos utilizados. Entretanto, independente deste aspecto, o fator mais fortemente observado é o que os eventos a serem analizados podem e usualmente englobam mais de um dos tipos de distorção anteriormente mencionados. Em outras palavras, a medição de harmônicos, mesmo que implementada corretamente, tem seu resultado alterado pelo aparecimento conjunto de sags, etc.

*Rua Esther Scliar, 70 - CEP 22793-760 – Rio de Janeiro- RJ - BRASIL
Tel.: (021) 3325-7054 - Fax: (021) 3325-7054 - e-mail: jsz@engenho.com

2.0 - OBJETIVOS E DESCRIÇÃO

Este trabalho aborda a qualidade de energia de uma forma mais geral, não separando “a priori” as possíveis fontes de poluição. Na realidade, a pesquisa generaliza resultados anteriores [2,3] na estimação de fontes poluidoras de harmônicos, mostrando que é possível estimar uma forma de onda qualquer, injetada em barra do sistema elétrico. O problema de decompor esta forma de onda geral em harmônicos, sags, etc, é deixada a uma etapa posterior, seja usando os algoritmos já existentes, ou até mesmo empregando novos processos, especialmente desenvolvidos para este fim.

Tal qual no caso da identificação harmônica, a metodologia utilizada parte da monitoração de um conjunto selecionado de pontos da rede, sendo nestes coletadas as amostras de sinais de tensão e corrente. Usualmente os principais consumidores têm sua localização conhecida na rede, mas nem sempre os pontos de medição se encontram junto aos mesmos, tornando não óbvia a estimação dos sinais (correntes) por eles injetados na rede. A partir destes dados, recolhidos ao longo de janelas de tempo [2,3,4], e do conhecimento da rede elétrica, determinam-se injeções quaisquer de corrente em cada barra não monitorada do sistema elétrico.

O trabalho mostra inicialmente as condições necessárias e suficientes à escolha dos pontos de monitoração da rede elétrica. Em seguida, trata da influência dos parâmetros utilizados na aquisição de dados, como a largura da janela de observação e a taxa de aquisição de dados, relacionando-os com os objetivos finais da estimação; alcance em frequência e exatidão. Uma atenção especial é atribuída à complexidade computacional, indicando formas de reduzí-la ao longo do processo. Por último, o trabalho apresenta caso ilustrativo com rede malhada, servindo de suporte aos resultados alcançados.

3.0 - MODELAGEM DA REDE ELÉTRICA

O modelo selecionado para análise da rede elétrica supõe sua monitoração por L acessos, caracterizando uma subrede em geral não linear. Essa característica de não linearidade torna difícil sua descrição, o que é contornado pela “extração” dos seus elementos não lineares. Tudo se passa como se da subrede de L acessos fossem extraídos os possíveis subsistemas não lineares, junto com os fios que os conectam à rede total. É como se a rede não linear de L acessos passa-se a ter um maior número de acessos (L+1 a L+K), resultantes da fiação que conecta os elementos não lineares extraídos ao resto da rede. A sub rede assim definida está apresentada na Figura 1, onde os elementos extraídos são substituídos por pares equivalentes de tensão e corrente caracterizando cada um dos K acessos ditos de “linearização”.

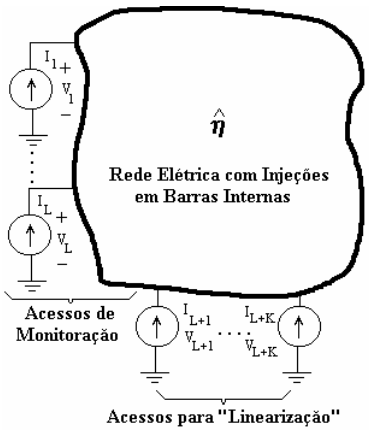


FIGURA1 – Rede após Extração dos Elementos Não Lineares

Praticamente, o descrito corresponde a monitorar todos os acessos de cada subsistema não linear e assim substituí-lo pelos pares de tensões e correntes correspondentes. Por exemplo, a extração de um transformador com três acessos de entrada e três de saída aumenta em seis o número de acessos de “linearização”, exigindo em contraparte a monitoração dos correspondentes parâmetros.

A rede $\hat{\eta}$ formada pelo conjunto de acessos (os de monitoração e os de “linearização”) ainda não pode ser dita linear, já que usuários do sistema podem estar injetando correntes quaisquer nas barras internas da mesma. No entanto, caso fosse possível extrair também estes usuários poluidores resultaria uma rede final, η linear. Esta é a situação representada na Figura 2 pela rede de N acessos; os de monitoração (L), os de “linearização” (K) e os de “usuários” (N-L-K).

A rede linear, η, será descrita por sua matriz admitância de acesso [9] através de

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{11} & \mathbf{Y}_{12} \\ \mathbf{Y}_{21} & \mathbf{Y}_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathrm{V}_1 \\ \mathrm{V}_2 \end{bmatrix}, \tag{1}$$

onde os acessos associados a $(\mathbf{V_1}, \mathbf{I_1})$ são os monitorados bem como os de "linearização". Estes vetores são, portanto, conhecidos. Os pares $(\mathbf{V_2}, \mathbf{I_2})$ correspondem aos acessos dos consumidores e são, portanto, desconhecidos.

O restante do método segue de forma imediata: supondo igual número de acessos para monitoração e para os desconhecidos, se $\mathbf{Y_{12}^{-1}}$ existe pode-se escrever

$$\mathbf{V_2} = \mathbf{Y_{12}^{-1}}(\mathbf{I_1} - \mathbf{Y_{11}}\mathbf{V_1}) \tag{2}$$

e consequentemente, substituindo (2) em (1), tem-se

$$\mathbf{I}_2 = \mathbf{Y}_{21}\mathbf{V_1} + \mathbf{Y}_{22}\mathbf{V_2} \tag{3}$$

A existência de $\mathbf{Y_{12}^{-1}}$ serve como base para a escolha dos pontos de monitoração do sistema, em geral permitindo uma variedade de soluções, que devem então ser adequadas às conveniências da empresa.

O caso mais interessante, quando as dimensões dos pares de vetores são desiguais, corresponde à dimensão de $(\mathbf{V_1}, \mathbf{I_1})$ menor que a de $(\mathbf{V_2}, \mathbf{I_2})$. Nesta situação não mais se pode garantir ser a solução única, como em (2) e (3). Entretanto existem soluções que podem ser exploradas, como, por exemplo, a da inversa generalizada [5], muitas vezes com adequação aos interesses da empresa. Este tipo de problema está sob análise pelo autor, com resultados bastante interessantes, não sendo, entretanto, objeto deste trabalho.

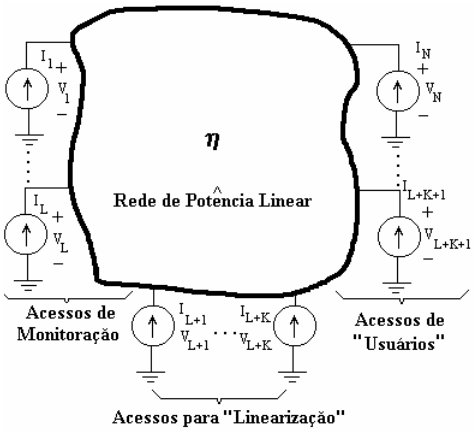


FIGURA 2 – Rede Linearizada

Apesar da facilidade no emprego das equações (2) e (3), deve ser realçado que toda a descrição matemática foi desenvolvida no domínio da frequência. Isto passa transparente quando o objetivo final é uma única frequência, como no caso da análise harmônica [2,3], onde ótimos resultados podem ser obtidos, trabalhando em cada uma das frequências de interesse. Entretanto, para disturbios quaisquer ocupando todo o espectro de frequências e não apenas as harmônicas, há necessidade de estabelecer limites apropriados à correta utilização de (2) e (3). Transitórios rápidos, por exemplo, exigem maiores frequências de amostragem. Este assunto é tratado a seguir.

4.0 - CASO DE INJEÇÕES QUAISQUER

A proposta agora é estender o caso de frequência isoladas (harmônicos) à situação de uma perturbação utilizando todo o espectro de frequências, até uma frequência limite, f_{lim}. A idéia básica é amostrar de forma conveniente o sinal em frequência, permitindo seu mapeamento de volta ao domínio do tempo por um simples IFFT [4].

Por operarmos necessariamente com janelas de dados, há a necessidade que haja uma tarjeta de tempo associada a cada conjunto aquisitado de dados de tensão ou corrente. Há mesmo a conveniência de concentrar todos estes dados em uma unidade central de processamento, onde seria aplicado o Algoritmo a ser descrito.

4.1 Algoritmo

Para cada janela de dados:

i) Calcular a FFT de modo a gerar o correspondente conjunto de dados em frequência. Estes serão os pares de vetores conhecidos $(\mathbf{V_1}, \mathbf{I_1})$.

ii) As correspondentes soluções em frequência, $(\mathbf{V}_2, \mathbf{I}_2)$, seguem da aplicaçào das equações (2) e (3) a cada frequência amostrada pela FFT. Por exemplo, se a amostragem de dados é feita na frequência f_S e a janela de dados tem comprimento L par, então a amostragem em frequência é uniforme, com L amostras, iniciando em zero e terminando em f_S. Sendo os sinais de tensão e corrente reais, basta obter a informação da frequência zero a $f_S/2$ para caracterizar o espectro[4]. Note que $f_S/2$ é a máxima frequência passível de ser representada, devendo f_S ser selecionada levando isto em consideração.

iii) Como resultado dos procedimentos anteriores, tem-se cada variável em $(\mathbf{V}_2, \mathbf{I}_2)$ amostrada regularmente em frequência. Basta agora mapear cada uma delas de volta ao domínio do tempo por aplicação do operador inverso, IFFT. Desta forma recuperam-se todas as amostras no tempo das variáveis desconhecidas, caracterizando qualquer perturbação representável pela amostragem adotada, f_S.

Apesar de solucionado o problema do ponto de vista teórico, deve-se observar o esforço computacional associado à aplicação de (ii). Ele exige o cálculo de $\mathbf{Y}_{12}^{-1}$ em cada uma das frequências de amostragem. Este esforço cresce com a dimensão da rede, com a frequência de amostragem e com a resolução escolhida em frequência, f. Esta última função direta do comprimento, L, da janela adotada [4].

4.2 RELAÇÕES ENTRE PARÂMETROS

Alguns dos parâmetros utilizados neste processo resultam diretamente dos objetivos da análise. Por exemplo, caso se deseje corretamente representar até o trigésimo segundo harmônico de 60 Hz, então o mínimo valor é f_S = 2x60x32 Hz = 7680Hz. Entretanto, para registrar um pulso no tempo, deve-se estimar, ou mesmo medir em laboratório, uma frequência máxima a partir da qual a energia no espectro deste sinal seja desprezível. f_S deverá no mínimo dobrar este valor.

O comprimento da janela de dados, L, é outro fator a ser observado com cuidado. Escolhido L, a amostragem do eixo de frequência fornece $\Delta f = f_S / L$. L muito elevado pode varrer de maneira exagerada o eixo de frequências, sobrecarregando computacionalmente o processo. Os próprios algoritmos FFT e IFFT tornam-se ineficientes na medida que crescem de dimensão, sem mencionar o peso do cálculo de $\mathbf{Y}_{12}^{-1}$ a cada intervalo de frequência considerado.

Esta argumentação pode induzir ao uso de poucos pontos do espectro em frequência, ao invés de todos os disponíveis. Isto reduziria bastante o esforço computacional, evitando as inversas e demais operações associadas a cada um dos pontos utilizados. Entretanto, observe-se ser isto um contrasenso, já que f_S foi determinada pelo tipo de sinal a registrar e reduzir o número de pontos (mantendo a uniformidade) também reduz o número de pontos na volta ao tempo. Assim, se ao invés dos L pontos usarmos apenas L/10, ao invés de obter todos os sinais, só se recuperarão as primeira L/10 amostras de cada um destes, nada se sabendo das demais amostras.

5.0 - CASO ILUSTRATIVO

O caso escolhido é baseado no diagrama unifilar do WSCC (Western System Coordinating Council) [10], indicado na Fig. 3, modificado de forma a simplificar sua análise por nosso simulador. Observe-se que para atender à operação do simulador introduziu-se uma numeração para barras virtuais, de forma a manter apenas um elemento entre barras da rede. A injeção de 60 Hz é feita nas barras 1, 2 e 3, correspondendo aos valores apresentados na Tabela 1.

Supõe-se que as barras 1, 2 e 3 são os acessos monitorados da rede, enquanto que as barras 5, 6 e 8 são as onde poderão existir cargas não lineares.

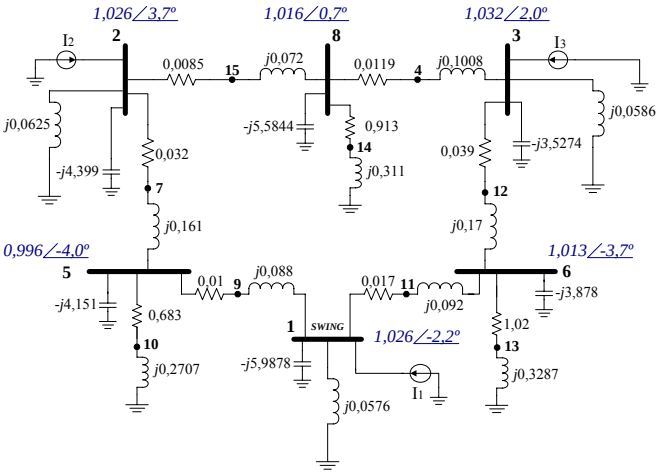


FIGURA 3- Diagrama Unifilar WSCC

TABELA 1

FONTES EXTERNAS DE CORRENTE EM 60 HZ

Barra	Amplitude (pu) (A)	Fase (graus)
1	18.0556	-90.0
2	16.4000	-80.7
3	17.4915	-85.3

Às fontes descritas, somaram-se outras para fins de generalidade do teste. A idéia é injetar correntes extremamente (absurdamente) distorcidas pelas seis barras consideradas (1, 2, 3, 5, 6, e 8), simulando as saídas reais no tempo, ou seja obtendo os pares ($\mathbf{v}_1$,$\mathbf{i}_1$) e ($\mathbf{v}_2$,$\mathbf{i}_2$) como sinais no tempo. Aplicação do FFT gera automaticament os correspondentes vetores em frequência; ($\mathbf{V}_1$, $\mathbf{I}_1$) e ($\mathbf{V}_2$, $\mathbf{I}_2$).

Em seguida aplica-se o Algoritmo, partindo do conhecimento apenas dos sinais, ($\mathbf{V}_1$, $\mathbf{I}_1$), presumidamente monitorados. O par de vetores estimados ($\mathbf{V}_{r2}$, $\mathbf{I}_{r2}$) é então calculado através de (2) e (3), para cada uma das frequências varridas pelo FFT. O resultado final é mapeado de volta ao tempo por IFFT aplicado a cada variável, gerando ($\mathbf{v}_{r2}$,$\mathbf{i}_{r2}$), onde o r identifica recuperado.

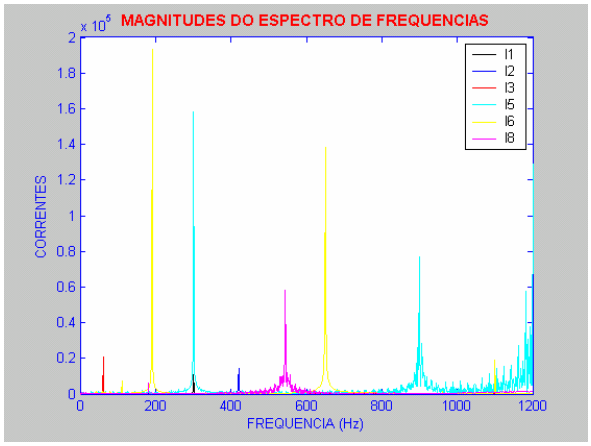
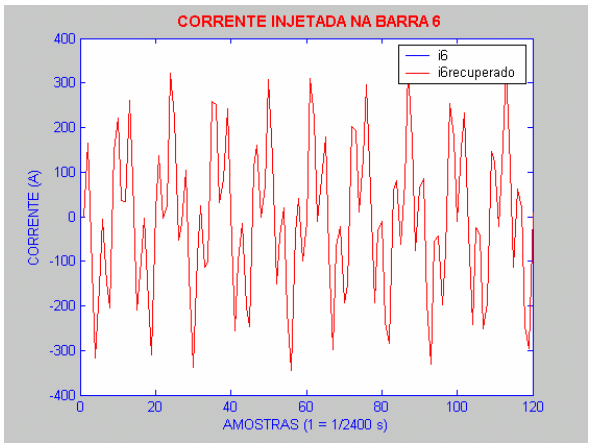


FIGURA 4 – Magnitude do Espectro das Correntes Injetadas

Os parâmetros deste teste foram f_S = 2400 Hz e Δf = 1Hz, resultando em janelas de 2400 amostras. A Figura 4 ilustra o experimento através das magnitudes do espectro de frequência das diversas correntes injetadas nas barras 1, 2, 3, 5, 6 e 8. A criação destas injeções incorporou desde senóides puras em frequências quaisquer a pulsos exponenciais aleatórios. O objetivo final era utilizar todo o espectro de frequências, o que foi alcançado, como se observa na figura em questão.

As figuras 5 e 6 representam detalhes de algumas das correntes recuperadas, comparadas aos seus valores originais, resultantes da simulação da rede completa no tempo. Nestas figuras pode-se observar a prática superposição entre as diversas correntes correspondentes, recuperadas e originais.



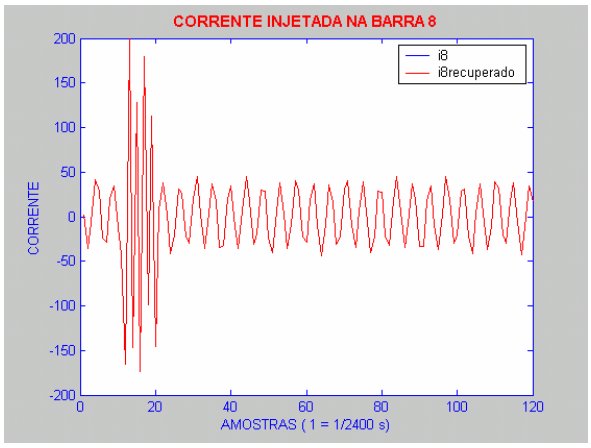


FIGURA 5 – Correntes i6 e i6recuperado – Detalhe

FIGURA 6 – i8 e i8recuperado - Detalhe

A Figura 7 apresenta toda a janela de dados, sendo possível observar a variedade de sinais contidos na corrente em questão, bem como a aderência entre a corrente recuperada e a original.

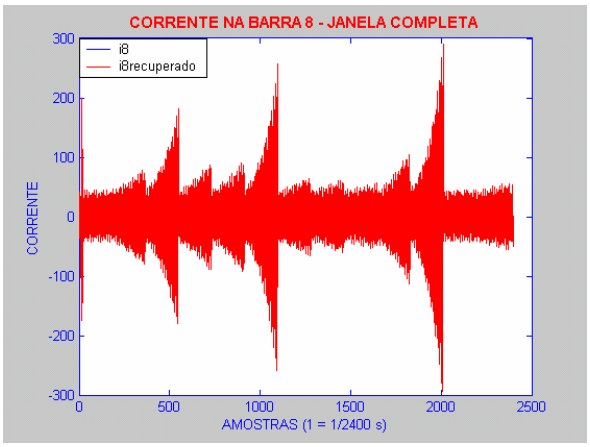


FIGURA 7 – i8 e i8 recuperada – Janela Completa

6.0 - ESFORÇO COMPUTACIONAL

O esforço computacional é sem dúvida a maior restrição ao método apresentado. Entretanto, alguns cuidados podem reduzi-lo de forma apreciável, como, por exemplo, tirar partido da simetria e assimetria no espectro de sinais reais [4], como é o caso. O cuidado seguinte refere-se à escolha da mínima frequência de amostragem necessária à representação dos sinais. Resta por último escolher o maior intervalo de amostragem em frequência, limitando assim o tamanho da janela de dados. A janela só deve ser estendida se a rede apresentar flutuações muito grandes em seus parâmetros em um curto intervalo de frequências. Esta situação é característica de ressonâncias, que, felizmente, devem ser evitadas em redes elétricas de potência.

Afora a seleção cuidadosa dos parâmetros, o esforço computacional pode ainda ser substancialmente reduzido pela utilização de técnicas de processamento digital multitaxa. A idéia básica é obter $\mathbf{Y}_{12}^{-1}$ apenas em um pequeno conjunto de frequências, deixando a interpolação dos demais pontos por conta de filtragem digital multitaxa. Este expediente pode ser imensamente eficiente em alguns casos. Por exemplo, no caso aqui abordado há alternância de barras monitoradas (1, 2, 3) e não monitoradas (5, 6, 8) ao longo da rede malhada. Isto coloca uma linha

conectando os pares monitorados e não monitorados. Cada linha destas é predominantemente um filtro passa baixa com resposta suavizada em baixas frequências. Isto permitiu reduzir em mais de 16 vezes a complexidade computacional, sem aparente perda de exatidão. No entanto, a característica de resposta depende muito da rede elétrica, devendo ser estudada caso a caso.

7.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho generalizou uma técnica anteriormente utilizada na obtenção de harmônicos [2,3] para que abrangesse virtualmente qualquer forma de injeção em barras não monitoradas da rede elétrica. O método é bastante simples, apoiando-se em mapeamentos entre os domínios do tempo e da frequência por operadores FFT.

Um caso exemplo ilustra o procedimento, recuperando com erros desprezíveis as injeções em barramentos da rede elétrica. O esforço computacional associado pode ser reduzido por um conjunto de critérios na seleção dos parâmetros do Algoritmo, mas também explorando técnicas de filtragem digital multitaxa. Se bem que no caso exemplo este último ganho tivesse sido substancial, ele depende da rede sob análise para sua efetividade.

Os resultados alcançados permitem antever que sinais coletados em pontos geograficamente dispersos poderão servir de base à análise e obtenção de injeções nos barramentos da rede. Desta forma, torna-se agora viável falar na decomposição destes sinais no nosso universo de harmônicos, swells, etc, ou mesmo em outro que se faça necessário.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) J. ARRILLAGA, M. H. J. BOLLEN, e N. R. WATSON, "Power quality following deregulation," (invited paper) Proceedings of the IEEE, vol. 88, no. 2, pags. 246-261, Fev.. 2000.

(2) V.L.PHAM, K.P.WONG, N..WATSON e J. ARRILLAGA, “A Method of Utilizing Non-Source Measurements for Harmonic State Estimation”, Elsevier Electric Power System Research vol. 56, pags. 231-241, Maio de 2000.

(3) J. SZCZUPAK e G. P. B. CASTRO, “Estimação e Localização de Fontes Poluidoras de Harmônicos”, Anais do XVII SNPTEE, CDROM, Uberlândia, MG, 2003.

(4) S. K. MITRA, Digital Signal Processing – A Computer-Based Approach, McGraw-Hill, 1998.

(5) S. HAYKIN, Adaptive Filter Theory, Prentice Hall, Upper Side River, NJ, third edition, 1996.

(6) A.TESHOME, "Harmonic source and type identification in a radial distribution system," in Proc. 1991 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, pags. 1605-1609.

(7) H. MA e 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, Julho 1996.

(8) J. SZCZUPAK, R. A. F. CHACON e P. A. M-S. DAVID, “Real Time Precise Harmonic Estimation”, Proceedings of the 13th PSCC, vol II, pp. 1063-1069, Throndheim, Noruega, 1999.

(9) N. BALABANIAN e T. A. BICKART, Network Theory, John Wiley and Sons, 1969.

(10) M. A. PAI e P. W. SAUER, Power System Dynamics and Stability, Prentice Hall, 1998.