



VI SBQEE

21 a 24 de agosto de 2005
Belém – Pará – Brasil



Código: BEL 09 7726

Tópico: Impacto Econômico e Responsabilidades

UMA PROPOSTA DE SISTEMATIZAÇÃO DA ATRIBUIÇÃO DE RESPONSABILIDADE SOBRE HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

SÉRGIO FERREIRA DE PAULA SILVA*

JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA*

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA -
UFU

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA -
UFU

RESUMO

Este trabalho apresenta uma metodologia para a determinação dos níveis de responsabilidades de consumidores e supridores, quanto às distorções harmônicas de tensão. A proposta está alicerçada nos valores de tensão e corrente medidos no ponto de acoplamento comum entre as partes. Tais informações, associadas com as impedâncias da concessionária e da carga do consumidor, conduzem a almejada atribuição das origens das distorções. Os desenvolvimentos feitos e computacionalmente avaliados permitem estabelecer um direcionamento para um futuro procedimento para esclarecer a polêmica questão aqui tratada.

qualidade da energia elétrica. O Submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) é um exemplo desta busca pela sistematização do processo de definição dos valores máximos para as distorções harmônicas e outros.

Uma vez avaliados os níveis dos desvios e que estes tenham violado os limites estabelecidos como padrões de atendimento, torna-se necessário a identificação das parcelas de responsabilidade do consumidor e do sistema supridor. Esta questão assume grande relevância a partir do reconhecimento que estas violações sejam causadoras de prejuízos para as partes e medidas corretivas devam ser implementadas.

PALAVRAS-CHAVE

Distorções Harmônicas, Atribuição de Responsabilidade, Normas e Indicadores de Qualidade.

Diferentes procedimentos de avaliação de sinais distorcidos têm sido publicados, com o intuito de identificar a fonte geradora das distorções. Nestes documentos são apresentadas metodologias fundamentadas na modelagem de cargas [2, 3, 4, 5], no fluxo harmônico da potência ativa [6], na determinação da corrente conforme e não-conforme [7]; na separação da corrente harmônica do consumidor e do concessionário [1 e 7], entre outras.

1.0 INTRODUÇÃO

Atualmente, órgãos reguladores, concessionárias e mesmo consumidores apresentam uma preocupação crescente com os níveis de distorções harmônicas presentes nos sistemas elétricos de potência. Devido ao caráter nocivo destas, normas e recomendações nacionais e internacionais procuram estabelecer fronteiras para estas distorções e outros indicadores da

Diante desta conjuntura, e devido à ausência de consenso sobre o tema, há margem para conflitos entre a concessionária e o consumidor. Deste modo, a presente proposta tem por intuito propor um primeiro encaminhamento para a solução da questão da atribuição de

responsabilidade pelas distorções harmônicas de tensão entre as partes aqui consideradas.

2.0 FUNDAMENTAÇÃO

Muito embora a maioria das metodologias anteriormente citadas utilize análises no domínio do tempo, a proposta aqui feita está fundamentada em princípios do domínio da frequência. Por tal motivo, a metodologia tem sintonia com ferramentas computacionais de baixo custo, além de permitir sua inserção em equipamentos de medição comerciais.

Assim, partindo do pressuposto que, normalmente, averiguações de conformidade estão abalizadas em dados oriundos de medições de campo, nada mais justo que empregar estes valores como dados de partida para a presente proposta. Assim procedendo, registros de harmônicos de tensão e corrente no PAC constituem este ponto de partida, valores estes também utilizados por [1, 3 e 4]. A partir destas informações pode ser estabelecida a estratégia para a determinação da parcela de tensão harmônica devida exclusivamente ao consumidor.

3.0 CONTRIBUIÇÃO DO CONSUMIDOR

Conforme demonstrado em [1] e amplamente utilizado em softwares de simulação no domínio da frequência, a modelagem de sistemas elétricos de potência através do circuito equivalente de Norton, oferece as condições necessárias à análise do dilema da responsabilidade sobre harmônicos. O diagrama unifilar ilustrado pela figura 1, retratando o PAC entre um sistema supridor e um consumidor com cargas não-lineares, permite uma melhor visualização do assunto.

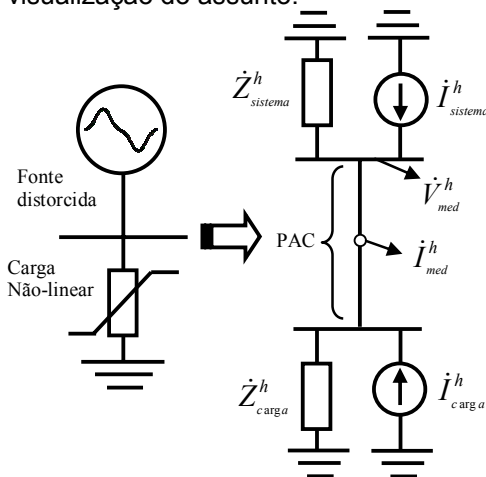


Figura 1 – Representação do PAC e equivalente de Norton. Na figura:

- h - Ordem harmônica;
- \dot{Z}_{carga}^h - Impedância da carga para a ordem h ;
- $\dot{Z}_{sistema}^h$ - Impedância da concessionária para a ordem h ;
- \dot{i}_{carga}^h - Corrente harmônica de ordem h , produzida pelo consumidor;
- $\dot{i}_{sistema}^h$ - Corrente harmônica de ordem h , produzida pela concessionária.
- \dot{V}_{med}^h - Tensão harmônica de ordem h , medida no PAC;
- \dot{i}_{med}^h - Corrente harmônica de ordem h , medida no PAC;

A corrente harmônica produzida pela carga pode ser calculada a partir da corrente medida no PAC, conforme expressão abaixo:

$$\dot{i}_{carga}^h = \frac{\dot{V}_{med}^h}{\dot{Z}_{carga}^h} + \dot{i}_{med}^h \tag{1}$$

Utilizando o divisor de corrente definido pelas impedâncias da concessionária e da carga, a componente da corrente harmônica, medida no PAC, devido as correntes harmônicas produzidas pela carga, é dada por:

$$\dot{i}_{pcc-carga}^h = \frac{\dot{V}_{med}^h + \dot{i}_{med}^h \cdot \dot{Z}_{carga}^h}{\dot{Z}_{carga}^h + \dot{Z}_{sistema}^h} \tag{2}$$

Sendo:

- $\dot{i}_{pcc-carga}^h$ - Parcela da corrente harmônica medida no PAC devido à atuação da carga não-linear.

Nestes termos, a tensão harmônica, associada exclusivamente ao efeito não-linear do consumidor, pode ser determinada por:

$$\dot{V}_{pcc-carga}^h = \dot{i}_{pcc-carga}^h \cdot \dot{Z}_{sistema}^h \tag{3}$$

Onde:

- $\dot{V}_{pcc-carga}^h$ - Parcela da tensão harmônica medida no PAC, resultante da atuação da carga não-linear.

A equação acima revela que a tensão harmônica resultante da atuação de cargas não-lineares presentes na instalação do consumidor depende somente dos valores das impedâncias do próprio consumidor e do sistema supridor. Assim, para

que esta contribuição seja determinada, as impedâncias harmônicas da concessionária e do consumidor se fazem necessárias. Normalmente, a empresa supridora dispõe das informações relativas às impedâncias do sistema elétrico de sua responsabilidade. O mesmo não se pode dizer das cargas consumidoras. Isto determina a necessidade de procedimentos para que tais informações sejam disponibilizadas. Neste sentido, as investigações aqui realizadas primaram também pela obtenção e implementação computacional de um modelo que represente a impedância do consumidor.

4.0 MODELAGEM DA CARGA

Inicialmente, deve-se ressaltar que a representação de cargas, levando-se em conta sua interdependência com a frequência, tem sido apontada como um cenário relevante para as pesquisas voltadas para o desempenho de sistemas elétricos de potência. Neste particular, as referências [3 e 4] são imbuídas do propósito de modelar uma carga na forma da associação paralela dos elementos: resistor, capacitor e indutor, apoiando-se para tanto em medições e técnicas do domínio do tempo. De modo similar, este artigo, empregando medições de campo junto ao PAC e usando o domínio da frequência como ferramenta, determina a necessária impedância harmônica da carga (consumidor).

A figura 2 ilustra as relações entre as tensões e correntes harmônicas distorcidas e os parâmetros da carga a serem determinados, R, L e C, para as distintas frequências envolvidas nos estudos.

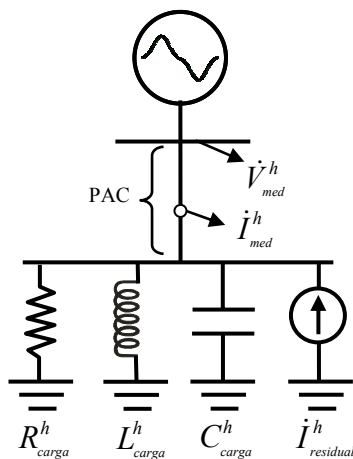


Figura 2 – Circuito equivalente da carga.

Onde:

$\dot{I}^h_{residual}$ - Componente residual da corrente harmônica;

- R^h_{carga} - Resistência para a ordem harmônica h;
- L^h_{carga} - Indutância para a ordem harmônica h;
- C^h_{carga} - Capacitância para a ordem harmônica h;

A figura anterior pode ser reestruturada como segue:

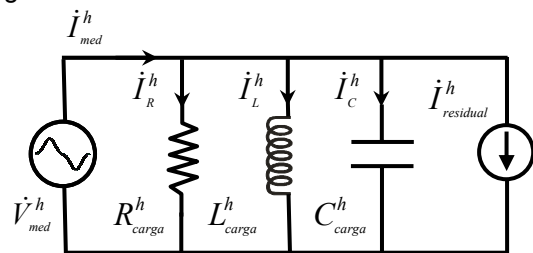


Figura 3 – Circuito equivalente re-estruturado.

Para o cálculo da resistência R, considera-se que este parâmetro está atrelado à potência ativa total medida no PAC. Vale ressaltar que a potência ativa total resultante de formas de onda distorcidas é equivalente à soma das potências de cada ordem harmônica, como indica a expressão (4).

$$P_{med} = \sum_{h=1}^H P_{med}^h = \sum_{h=1}^H V_{med}^h \cdot I_{med}^h \cdot \cos \phi_h \quad (4)$$

$$R = \frac{V_{med}^2}{P_{med}} \quad (5)$$

Onde:

- P_{med} - Potência ativa total;
- P_{med}^h - Potência ativa para a ordem h;
- ϕ_h - Diferença angular entre a tensão e corrente de ordem h;
- V_{med} - Tensão eficaz medida.

O valor de R é considerado constante para todo o espectro harmônico, hipótese esta que negligencia os conhecidos efeitos peliculares. Uma vez conhecida a resistência, torna-se possível a determinação das correntes harmônicas individuais que se estabelecem pela mesma, conforme determina a equação a seguir:

$$\dot{I}^h_R = \frac{\dot{V}^h_{med}}{R} \quad (6)$$

De posse das correntes harmônicas no resistor, pode-se subtrair esta componente das correspondentes grandezas medidas, obtendo, assim, uma parcela de corrente que, para cada ordem harmônica h , estaria atribuída aos elementos L, C e às fontes de corrente relacionadas com o consumidor e a concessionária. Isto é expresso pela equação (7):

$$\dot{I}_{nova}^h = \dot{I}_{med}^h - \dot{I}_R^h \quad (7)$$

Sendo:

\dot{I}_{nova}^h - Novo valor da corrente medida.

Este procedimento é repetido para a componente fundamental, resultando em uma corrente exclusiva para os elementos C e L. Nesse caso considera-se somente a potência ativa fundamental para o cálculo da resistência.

De posse destes novos valores de corrente, pode-se calcular as reatâncias resultantes tanto para a fundamental quanto para uma determinada ordem harmônica h .

$$X_1 = \text{Im} \left(\frac{\dot{V}_{med}^1}{\dot{I}_{nova}^1} \right) \quad (8)$$

$$X_h = \text{Im} \left(\frac{\dot{V}_{med}^h}{\dot{I}_{nova}^h} \right) \quad (9)$$

Onde:

X_1 - Reatância à frequência fundamental;
 X_h - Reatância para a ordem h .

Com os valores das reatâncias correspondentes à fundamental e à ordem harmônica h , obtém-se os subsídios necessários ao cálculo de L e C, como indicado na seqüência.

$$X_1 = X_L^1 // X_C^1 = \frac{X_L^1 \cdot X_C^1}{X_C^1 - X_L^1} \quad (10)$$

$$X_L^1 = \frac{X_C^1 \cdot X_1}{X_C^1 - X_1} \quad (11)$$

$$X_C^1 = \frac{X_L^1 \cdot X_1}{X_1 - X_L^1} \quad (12)$$

$$X_h = X_L^h // X_C^h = \frac{(X_L^1 \cdot h) \cdot \left(\frac{X_C^1}{h} \right)}{\left(\frac{X_C^1}{h} \right) - (X_L^1 \cdot h)} \quad (13)$$

$$X_h = \frac{X_L^1 \cdot X_C^1}{X_C^1 - X_L^1 \cdot h^2} = \frac{X_L^1 \cdot X_C^1 \cdot h}{X_C^1 - X_L^1 \cdot h^2} \quad (14)$$

$$X_L^1 = \frac{X_1 \cdot X_h \cdot (h^2 - 1)}{X_h \cdot h^2 - X_1 \cdot h} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (15)$$

$$X_C^1 = \frac{X_1 \cdot X_h \cdot (h^2 - 1)}{X_h - X_1 \cdot h} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (16)$$

Onde:

X_L^1 - Reatância indutiva fundamental;
 X_C^1 - Reatância capacitiva fundamental.
 f - Frequência.

Assim procedendo, são obtidos os valores de L e C que atendem tanto à componente fundamental quanto as componentes harmônicas, finalizando, assim, a modelagem da carga.

5.0 AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA

Objetivando avaliar o desempenho da metodologia proposta, estudos computacionais no domínio da frequência foram executados empregando-se como sistema teste o arranjo hipotético da figura 4. Este se apresenta como contendo distorções harmônicas provenientes da carga e da concessionária. O programa utilizado corresponde aquele mencionado nas referências [8 e 9].

O sistema de suprimento é definido por um nível de curto-circuito equivalente a 10 vezes a demanda ativa do consumidor, com ângulo de 90°. A carga, por sua vez, é definida como absorvendo 1 MW, assim, o nível de curto-circuito se apresenta com 10 MVA. Os componentes indutivos e capacitivos da carga foram considerados em valores percentuais da demanda ativa, sendo adotados os valores de 60 e 20% respectivamente (0,6 e 0,2 MVAR). Estes valores resultam num fator de potência equivalente de 0,93. Vale ainda informar que a

tensão de suprimento corresponde a 13,8 kV fase-fase.

Para efeito de verificação da metodologia, foram consideradas duas ordens harmônicas, a 5ª e 7ª (300 e 420 Hz). As distorções harmônicas de tensão resultantes no PAC, devido somente à operação da carga não-linear do consumidor correspondem a 3% para a 5ª ordem e 4% para a 7ª ordem. Com relação às distorções harmônicas provenientes do sistema supridor, foram utilizados os valores de 2% para a 5ª e 1% para a 7ª. Estes valores definem as fontes harmônicas de corrente injetadas no PAC pelo consumidor e pelo concessionário.

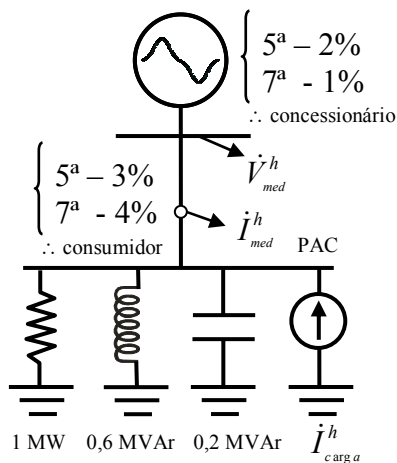


Figura 4 – Diagrama unifilar do caso base.

Tendo em vista o caráter hipotético dos estudos, como não se dispõe de resultados de medições, as distorções foram calculadas através de simulações computacionais e comparadas com a metodologia de cálculo de cargas sob condições não senoidais apresentada por [4]. Esta emprega derivadas dos sinais medidos no cálculo dos componentes indutivo e capacitivo da carga.

A tabela 1 sintetiza os resultados obtidos das simulações computacionais para o que se denominou por Caso Base. Ressalta-se que os erros foram calculados tomando-se por referência os valores das distorções anteriormente mencionadas.

Tabela 1 – Resultados para o caso base.

Metodologia Proposta		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	2,97	1%
7ª	4,01	0,25%
Metodologia [4]		
Ordem	DHV %	Erro

5ª	2,64	12%
7ª	4,33	8,25%

Observa-se que os resultados apresentados pela metodologia proposta são satisfatórios para o caso em questão.

Com o intuito de verificar os impactos das variações da impedância da concessionária, os Casos 1 e 2 representaram condições operacionais associadas com níveis de curto-circuito de 5 MVA e 20 MVA, respectivamente. Quanto às distorções harmônicas existentes, foram empregados os mesmos níveis anteriormente mencionados. Assim sendo, as fontes de corrente harmônicas foram recalculadas de forma a manter os valores das distorções harmônicas constantes. As tabelas 2 e 3 apresentam os resultados assim obtidos.

Tabela 2 – Resultados para o caso 1 – Scc = 5 MVA.

Metodologia Proposta		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	3,06	2,00%
7ª	3,95	1,25%
Metodologia [4]		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	3,53	17,7%
7ª	4,39	9,75%

Tabela 3 – Resultados para o caso 2 – Scc = 20 MVA.

Metodologia Proposta		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	2,19	27,0%
7ª	3,96	1,00%
Metodologia [4]		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	2,78	7,33%
7ª	3,76	6,00%

À exceção dos resultados para a 5ª ordem do caso 2, novamente, os erros apresentaram baixos valores, quando comparados com a metodologia destacada na referência [4].

Complementando as investigações, é importante lembrar que, muitas vezes, os consumidores possuem em suas instalações filtros harmônicos. Objetivando avaliar tal situação, o denominado Caso 3 substitui o capacitor por um filtro harmônico sintonizado, mantendo-se, entretanto, a potência reativa do capacitor em 0,2 MVar. A

ordem de sintonia foi adotada para a ordem harmônica 4,9. Mais uma vez empregou-se as mesmas condições operativas do caso base. Após as simulações, a distorção harmônica de tensão de 5ª ordem, devido somente à atuação do consumidor foi de 0,41%, evidenciando a atuação do filtro, enquanto que a de 7ª ordem foi 2,43%. Quando da consideração das harmônicas provenientes da rede de suprimento, a distorção harmônica de 5ª ordem totalizou 0,7% enquanto que a 7ª foi de 3,04%.

Os resultados dos cálculos das contribuições do consumidor estão na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados para o caso 3.

Metodologia Proposta		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	0,99	141%
7ª	2,87	18,1%
Metodologia [4]		
Ordem	DHV %	Erro
5ª	5,83	>1000%
7ª	3,78	55,55%

Muito embora os erros calculados para a metodologia proposta sejam elevados para a harmônica de ordem 5, o valor em módulo é pequeno e inferior àqueles resultantes da metodologia [4]. Os altos valores para os erros podem ser atribuídos às baixas amplitudes das distorções calculadas, todavia, o assunto será merecedor de maiores investigações teóricas e experimentais.

6.0 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou uma proposta de metodologia de cálculo destinada a identificar e quantificar as proporções da responsabilidade sobre as distorções harmônicas registradas em PAC's. A estratégia está fundamentada na análise do circuito equivalente de Norton e necessita, para sua implementação, informações advindas de medições das distorções junto ao ponto de conexão do consumidor e parâmetros representativos da impedância deste e do supridor. Tendo em vista o desconhecimento de dados relacionados com o consumidor, foi também discutida uma estratégia para atender a esta questão.

Com vistas ao estabelecimento de um procedimento de análise da consistência do

método, estudos computacionais de um sistema elétrico hipotético foram conduzidos. Os resultados obtidos foram elucidativos das etapas a serem cumpridas para a aplicação da proposta e das variáveis de influência sobre os resultados. De um modo geral a qualidade da identificação se mostrou computacionalmente apropriadas e evidenciaram que as diretrizes propostas se mostraram promissoras.

Adicionalmente às análises apresentadas, novas condições operacionais devem ser simuladas e avaliadas, visando englobar as diversas situações passíveis de ocorrência em sistemas industriais. Além disto, a aplicação da metodologia para um sistema real deverá ser detalhadamente avaliada para concluir sobre sua robustez e consistência em campo.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Wilsun Xu and Yilu Liu**, "A Method for Determining Customer and Utility Harmonic Contributions at the Point of Common Coupling" IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 15, no. 2, April 2000.
- [2] **Ahmed A Moustafa, Abdel Monem Moussa, Mahmoud A. El-Gammal**, "Separation of Customer and Supply Harmonics In Electrical Power Distribution Systems" IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, pp 1035-1040.
- [3] **E. B. Makram and S. Varadan**, "A Generalized Load modeling technique using actual recorded data and its use in a harmonic load flow program" Electric Power Systems research, vol. 27, 1993, pp 203-208.
- [4] **M. M. M. El Arini**, "A Time Domain Load Modelling Technique and Harmonics Analysis" ICHQP VIII, Conference Proc., Athens, October 1998, pp. 930-938.
- [5] **S. A. Soliman and M. Al-Kandari**, "A Simple and Noval Technique for Linear and Nonlinear Load Modelling in the Time Domain", IEEE, 1996, pp. 1615-1619.
- [6] **T. Tanaka and H. Akagi**, "A New Method of Harmonic Power Detection Based on the Instantaneous Active Power in Three-Phase Circuits" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, October 1995, pp. 1737-1742.
- [7] **K. Srinivasan and R. Jutras**, "Conforming and Non-Conforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 1, January 1998, pp. 212-217
- [8] **QUALITY Engenharia & Sistemas Ltda**, SSEP- Simulador de Sistemas Elétricos de Potência Trifásicos, Versão V1, 2004.
- [9] **QUALITY Engenharia & Sistemas Ltda**, "Manual do Usuário", PQF, Versão 7.0, 2004.