

# UMA PROPOSTA DE PROCEDIMENTO PARA A ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Francis C. Pereira, Eng. José C. de Oliveira, PhD. Aloísio de Oliveira, Dr. Anderson L. A. Vilaça, Eng.

Universidade Federal de Uberlândia  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Av. João Naves de Ávila, s/n  
38400-902 - Uberlândia - MG  
Fone/ Fax : (034) - 2365099 - email: franciscp@ufu.br

**Resumo :** Este artigo tem como objetivo apresentar uma estratégia através da qual, possam ser estabelecidos os procedimentos de campo e de análise para os estudos voltados à qualidade da energia elétrica em instalações industriais e outras correlatas . Um sistema elétrico típico industrial é usado para ilustrar a metodologia proposta.

**Palavras-chave :** qualidade de energia, análise, medições de campo

**Abstract:** This paper aims to present an engineering strategy to establish site measurement and laboratory studies in order to investigate power quality for industrial installations and others. A typical industry electrical system is used to illustrate the methodology proposed .

**Keywords :** power quality, analysis, site measurement

## 1 - INTRODUÇÃO

A “Qualidade da Energia Elétrica” é, atualmente, um tema que promove grandes discussões por parte dos profissionais na área de Engenharia Elétrica. O presente assunto está vinculado a um conjunto de alterações que porventura possam ocorrer, devido a inúmeros fatores, no fornecimento elétrico aos consumidores. Portanto, o tema é alvo de preocupações crescentes, que se justificam pelos seguintes motivos :

- Os equipamentos recentemente utilizados, são mais sensíveis às variações na qualidade do suprimento elétrico do que aqueles usados antigamente ;
- A utilização cada vez maior da eletrônica de potência na fabricação de equipamentos;
- O interesse pela conservação e melhor aproveitamento da energia elétrica.

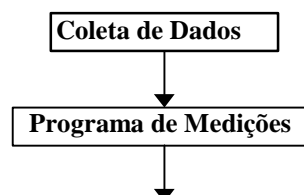
Assim, tendo em vista a importância já reconhecida da área de concentração de estudo, este artigo tem por objetivo propor uma metodologia para a análise da “Qualidade da Energia”, através da qual, os problemas possam ser identificados em instalações consumidoras e soluções adequadas, tanto do ponto de vista econômico, como técnico, possam ser propostas .

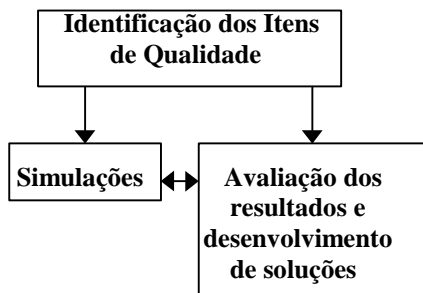
## 2 - UMA PROPOSTA DE METODOLOGIA

O desenvolvimento de uma sistemática para resolver as questões já citadas, deve levar em consideração aspectos importantes, sendo eles :

- Interdependência entre empresas concessionárias e instalações consumidoras, sendo que os problemas específicos podem ser oriundos de ambas as partes;
- Investigações através de medições, realizadas de forma segura e objetiva;
- Simulações, através das quais comparações possam ser realizadas com os resultados medidos, bem como a utilização destas para a avaliação de soluções posteriormente propostas;
- Análise dos problemas de qualidade de energia como função dos tipos de consumidores, que devem ser classificados em diversas categorias;
- Necessidade de um banco de dados;
- Sensibilidade de equipamentos.

Baseando-se nestes tópicos, nas ref. [1-2] e na experiência dos autores do referido artigo, os passos gerais envolvidos no procedimento podem ser vistos no diagrama abaixo:





#### ( i ) - Coleta de dados

Como primeiro estágio, deve-se obter o máximo de informações possíveis junto ao corpo técnico envolvido com o processo, sendo estas as seguintes :

- Identificação da natureza dos problemas e sua ocorrência;
- Caracterização dos equipamentos que estão sofrendo os efeitos da perda de qualidade;
- Verificação de cargas perturbadoras presentes na instalação elétrica, que possam causar perda da qualidade do sistema;
- Levantamento das características da rede elétrica, bem como do sistema de aterramento.

#### ( ii ) - Programa de medições

A partir dos dados iniciais, medições devem ser realizadas com o intuito de monitorar o sistema. Portanto, inicialmente, é necessário selecionar o instrumento de monitoração baseado na sua capacidade e limitações, e posteriormente, ajustar tais equipamentos de acordo com os fenômenos que se deseja registrar. Outros aspectos importantes são a localização e o período de medição, que dependem exclusivamente dos objetivos a serem alcançados.

#### ( iii ) - Identificação dos itens de qualidade

Após as medições, os resultados podem ser analisados em conjunto com os dados levantados inicialmente. Assim, é possível identificar os tipos de problemas que estão afetando os equipamentos. Entre estes problemas prováveis, identifica-se :

- Subtensão temporária
- Interrupções
- Transitórios de chaveamentos
- Harmônicos
- Oscilações de tensão
- Desequilíbrios

#### ( iv ) - Simulações

As simulações são realizadas, como um meio eficiente, para caracterizar problemas de qualidade de energia. Os modelos requeridos para as simulações dependem das características do sistema e dos fenômenos a serem estudados. Estas são inseridas em quatro categorias:

- transitórios - análise de chaveamentos e transitórios associados a descargas atmosféricas;
- harmônicos - cargas produzindo harmônicos podem ser modeladas como fontes de corrente harmônica, e as simulações são usadas para identificar tensões harmônicas e correntes por toda parte das instalações consumidoras e concessionária;
- fluxo de carga - variações na tensão fundamental como função dos níveis de carga no sistema ;
- análise dinâmica - alterações dinâmicas do sistema que podem afetar diretamente os níveis de tensão, corrente e frequência, considerando-se a interação geração - carga .

#### ( v ) - Avaliação dos resultados e desenvolvimento de soluções

Realizados os diferentes registros das grandezas elétricas, procede-se a uma criteriosa análise dos mesmos, com o objetivo de comparar os valores encontrados com os níveis recomendados por normas . Caso as variáveis não obedeçam aos padrões desejados, uma análise crítica das conseqüências deste fato, antes que medidas corretivas sejam sugeridas, deve ser realizada. Finalmente, soluções sendo propostas, estas devem ser analisadas, tanto do ponto de vista técnico, como econômico. As soluções podem ser as seguintes:

- instalação de condicionadores de energia;
- utilização de filtros;
- alteração dos procedimentos de operação ou topologia do sistema supridor;
- modificações no projeto de cargas sensíveis às alterações no fornecimento de energia.

### 3 - EXEMPLO DE ESTUDO DE CASO

#### 3.1 - Coleta de dados

Considerando-se uma determinada instalação industrial, medições foram realizadas com o intuito de identificar problemas relacionados à qualidade de energia. O diagrama unifilar simplificado da mesma pode ser visto na figura 1. Este sistema, segundo avaliações preliminares, apresentava problemas associados com harmônicos. Desta forma, a tónica das medições e análises foram voltadas a estes fenômenos.

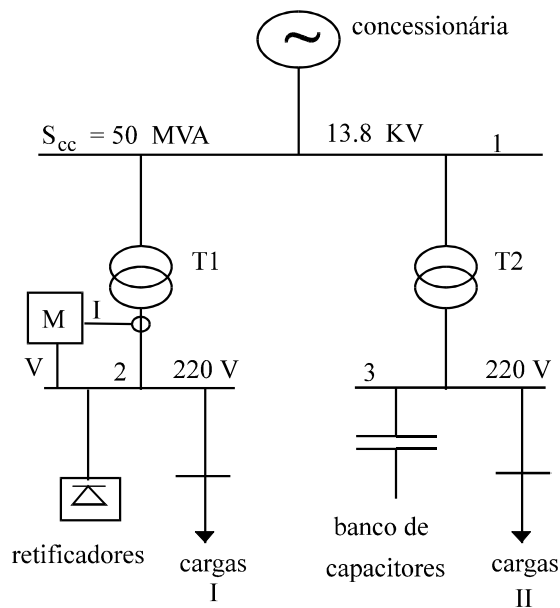


Figura 1 - Diagrama Unifilar

Dados : T1 e T2 → Ambos 13,8Δ/220Y V,  
 225 KVA, Z= 5% e R = 1%  
 Cargas I → S = 85,74 + 41,52 j KVA  
 Cargas II → S = 149,2 + 72,25 j KVA  
 Banco de capacitores → 60 KVAR  
 Retificadores →  $I_c = 400$  A

### 3.2 - Medições

As medições foram realizadas no ponto M (fig.1), onde extraiu-se as informações de tensão e corrente. Os instrumentos utilizados para realizar a monitorização são caracterizados a seguir :

- HARMONALYZER - HA 2000 - Amprobe USA → Equipamento monofásico, destinado a análise e decomposição harmônica de tensão ou de corrente.
- VIP SYSTEM 3 - ELCONTROL - Italy → Trata-se de um equipamento analisador de energia, potência ativa , reativa e fator de potência, e realiza também a decomposição harmônica do sinal ao longo do tempo.

### 3.3 - Resultados das medições

As medições, tanto de tensão quanto corrente, mostram que as ordens harmônicas predominantes são a 5ª e 7ª. Este fato é explicado pela presença dos retificadores de 6 pulsos, gerando tais harmônicas características em condições normais de operação . As medições considerando a corrente, foram realizadas em um período de 24 horas, e tensão em um período de aproximadamente 5 horas.

A figura 2 mostra o perfil de distorção harmônica total de corrente, sendo que em condições nominais de carga, o  $DHI_T$  atinge cerca de 20 % .

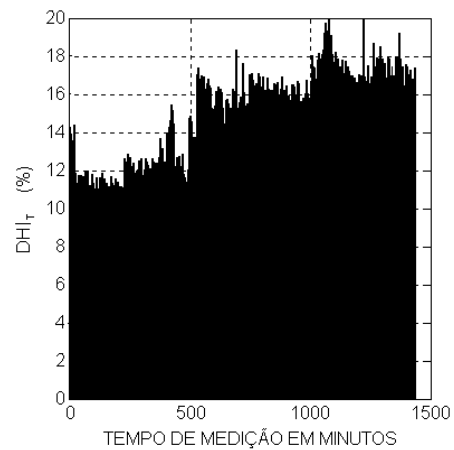


Figura 2 - Distorções harmônicas totais de corrente

A figura 3 ilustra as distorções individuais de corrente de 5ª harmônica, atingindo níveis à plena carga de 11 % .

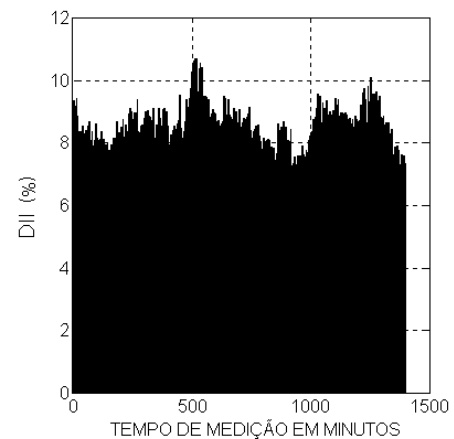


Figura 3 - Distorções harmônicas de 5ª ordem de corrente

A figura 4 mostra as distorções individuais de corrente de 7ª harmônica, atingindo à plena carga cerca de 7 % .

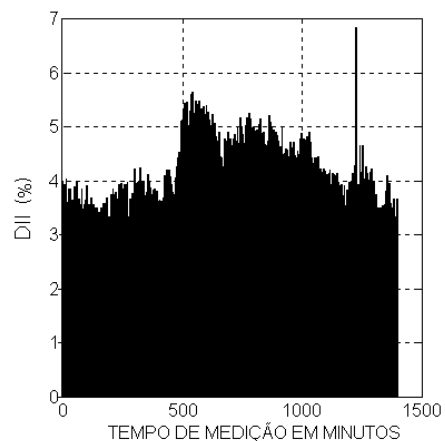


Figura 4 - Distorções harmônicas de 7ª ordem de corrente

A figura 5 mostra o perfil de distorção harmônica total de tensão, e em condições nominais o  $DHV_T$  é cerca de 9 % .

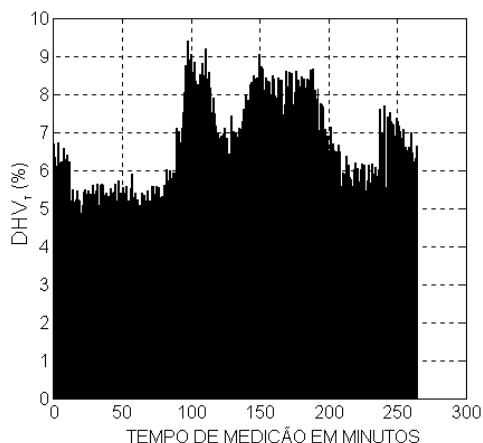


Figura 5 - Distorções harmônicas totais de tensão

A figura 6 ilustra as distorções individuais de tensão de 5ª harmônica, atingindo níveis à plena carga de 3.5 %

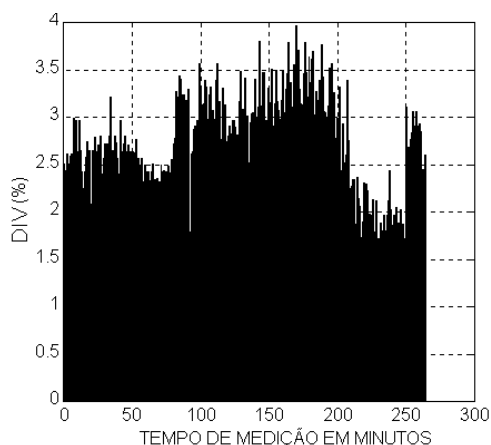


Figura 6 - Distorções harmônicas de 5ª ordem de tensão

A figura 7 mostra as distorções individuais de tensão de 7ª harmônica, atingindo à plena carga cerca de 2.5 % .

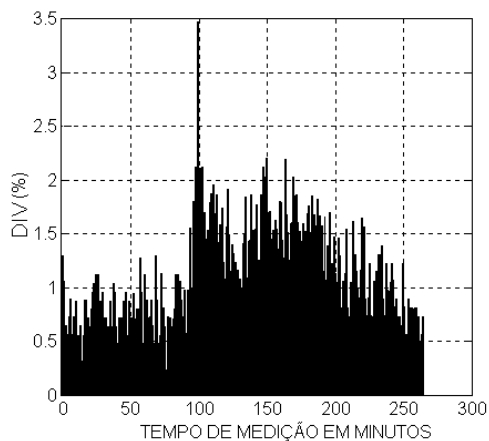
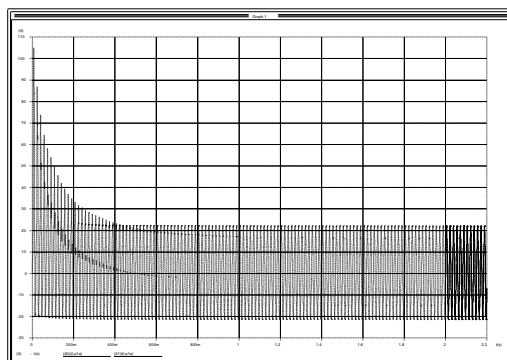


Figura 7 - Distorções harmônicas de 7ª ordem de tensão

### 3.4 Simulações

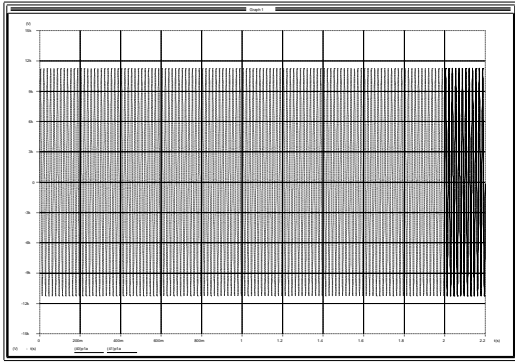
As simulações foram realizadas através de um novo programa computacional denominado SABER. Ao programa foram incorporados os mais diferentes componentes de sistemas elétricos de forma a obter uma nova opção para a simulação, empregando-se a técnica do domínio no tempo. Tal simulador identifica-se pela flexibilidade, versatilidade e riqueza de recursos gráficos. As figuras 8 à 11 mostram os resultados obtidos através das simulações realizadas com o sistema à plena carga.

As figuras 8 (a) e (b), mostram a corrente e tensão, respectivamente, na entrada do sistema, barra 1 (fig.1). A corrente após o transitório de magnetização atinge um pico de 20 A . A tensão de pico fase-neutro é 11.26 KV.



( a )

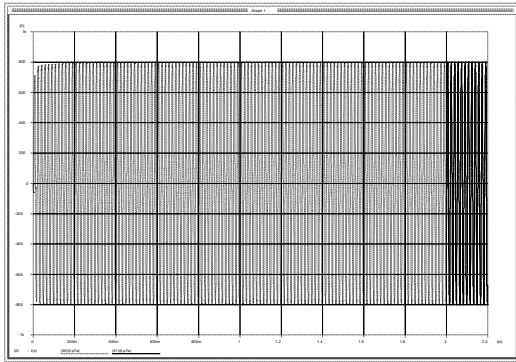
Figura 8 - ( a ) Corrente na fase a na entrada do sistema



( b )

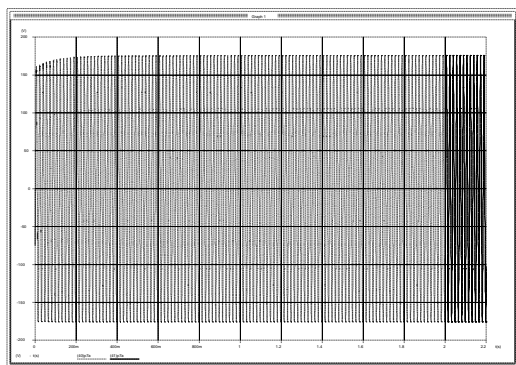
( b ) - tensão na fase a na entrada do sistema

A figura 9 ilustra corrente (a) e tensão (b) na barra 2 onde estão localizados os retificadores. O pico de corrente de carga é 800 A . O pico da tensão fase-neutro é 175 V .



( a )

Figura 9 - ( a ) Corrente na fase a , barra 2

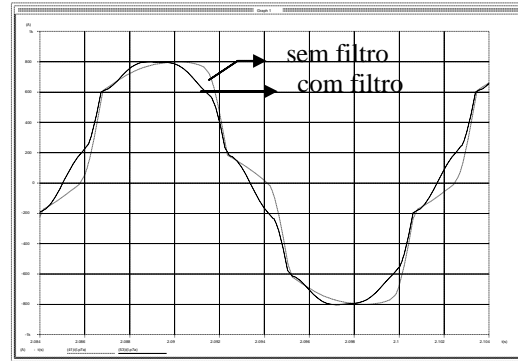


( b )

( b ) - tensão na fase a, barra 2

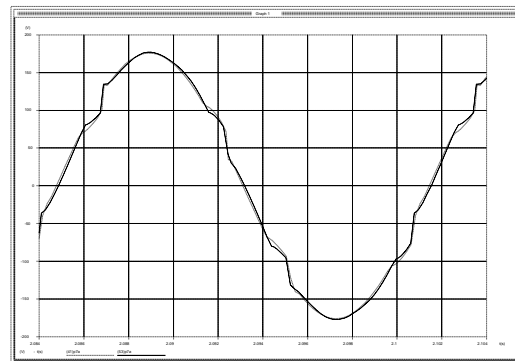
A figura 10 mostra um zoom da forma de onda de corrente (a) e tensão (b) na barra 2, comparando-se agora o sistema sem e com a instalação de filtros. Os filtros sintonizados foram projetados para 50 e 70

harmônicas com o objetivo de solucionar o problema dos níveis harmônicos no sistema. Analisando os resultados das simulações, observou-se que com a inclusão dos filtros, a distorção na forma de onda de corrente foi diminuída, enquanto para a tensão não houve mudanças significativas.



( a )

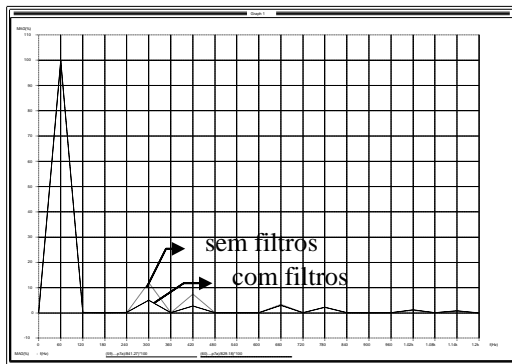
Figura 10 - ( a ) Zoom da forma de onda de corrente com e sem filtro , barra 2



( b )

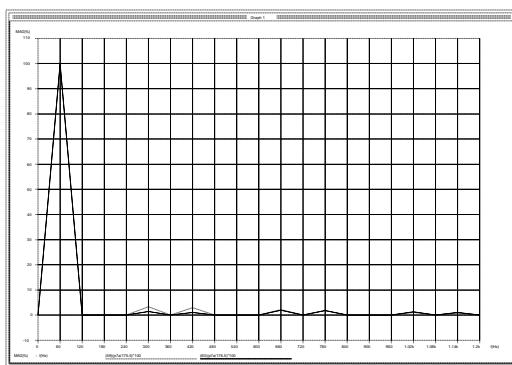
( b ) Zoom da forma de onda de tensão com e sem filtro, barra 2

A figura 11 ilustra o espectro de frequência referente à forma de onda de corrente (a) e tensão (b) na barra 2 . Fazendo-se uma comparação entre os resultados práticos e aqueles calculados sem a presença de filtros, constatou-se que as medições à plena carga mostram que as distorções individuais de corrente de 5ª harmônica estão na ordem de 11 % e de 7ª harmônica na ordem de 7 % . Por outro lado, a distorção de corrente encontrada para 5ª harmônica através da simulação foi de 12 % e para a 7ª harmônica de 8 % . Também é feita uma comparação entre o sistema na presença de filtros e na ausência destes . O espectro da corrente confirma a melhora em termos de níveis de distorção com a instalação dos filtros .



( a )

Figura 11 - ( a ) Espectro de frequência de corrente



( b )

( b ) - Espectro de frequência de tensão

### 3.5 - Análise dos resultados

Analisando-se os resultados, observou-se que a instalação industrial possui problemas referentes à distorções harmônicas. Os níveis de distorção, quando comparados às recomendações existentes em relação a harmônicos (Ref. 3), não obedecem os padrões desejados. Assim, uma solução proposta é a instalação de filtros passivos sintonizados com a 5ª e 7ª harmônicas, por apresentarem maiores níveis, respectivamente na barra 2 ( Fig. 1 ). Os filtros têm como objetivo filtrar as correntes harmônicas para as quais foram projetados. A análise dos resultados de simulação comprovaram a diminuição das corrente harmônicas ( 5ª e 7ª ) com a presença de filtros, sendo que estes apresentam para a frequência desejada baixas impedâncias. Portanto, através da análise dos resultados das simulações, pôde-se enfatizar a eficácia dos filtros.

### 4 - CONCLUSÕES

Muito embora se reconheça que a metodologia aqui proposta seja um mero reflexo dos procedimentos consensualmente utilizados, a sua apresentação e mesmo utilização expressam uma linha de procedimentos que oriente àqueles que estejam

iniciando na área. Além das discussões de caráter teórico, a estratégia apresentada foi também aplicada a um caso real. O sistema elétrico utilizado foi bastante simples em sua composição, bem como quanto aos itens de qualidade enfocados, os quais, resumidamente, recaíram tão somente sobre a questão de harmônicos. Isto se deu pelo fato que os prejuízos para esta instalação se manifestaram numa substancial redução da vida útil do transformador identificado por T1. Este, após pouco mais de dois anos de operação apresentou danos associados a elevações não admissíveis de temperatura, levando à sua substituição . Os resultados das medições e simulações foram comparados entre si e, ao longo do texto do artigo, foi possível constatar a boa correlação entre os resultados. Na verdade, deve se observar que enquanto que as medições expressam um longo período de monitoração, que engloba diferentes carregamentos para a carga perturbadora, a simulação contempla apenas o carregamento pleno da unidade retificadora. Não obstante este fato, os resultados práticos e simulados foram considerados satisfatórios. Dentro destas condições, constatou-se que as medições à plena carga mostram que as distorções individuais de corrente de 5ª harmônica estão na ordem de 11 % e de 7ª harmônica na ordem de 7 % . Por outro lado, a distorção de corrente encontrada para 5ª harmônica através da simulação foi de 12 % e para a 7ª harmônica de 8 % . As tensões não são diferentes em termos de proximidade de valores, o que comprova a eficácia do programa utilizado. Além dos aspectos discutidos, a implementação da solução cabível ao caso, isto é, a instalação de filtros, foi implementada computacionalmente e os resultados obtidos evidenciaram que a solução conduziu a significativas reduções dos níveis dos harmônicos mais expressivos.

### 5 - REFERÊNCIAS

- [1] - Gunther, E.W., Samotyj, M., "Overview of Voltage Quality from a Global Approach in Terms of Power Systems", Colloquium and Meetings, Foz do Iguaçu, May 21-27, Brazil, 1995.
- [2] - Lim, P. K., "A Systematic Approach to Resolve Power Quality Complaints", A Thesis Presented for the Master of Science Degree, Memphis State University, December, 1993.
- [3] - IEEE 519, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", Aug. 29, 1989.