

UMA CONTRIBUIÇÃO PARA A QUANTIFICAÇÃO E QUALIFICAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA

Aloísio de Oliveira, Dr
José Carlos de Oliveira, PhD
Anderson L. A. Vilaça, Eng.º
Universidade Federal de Uberlândia
Departamento de Engenharia Elétrica
Uberlândia - MG

Anésio de Leles Ferreira Filho, MSc
Universidade de Brasília
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica
Brasília - DF

Resumo - Este trabalho apresenta uma abordagem sobre os métodos para a avaliação das distorções harmônicas de tensão e corrente, com ênfase à questão da aleatoriedade com que estes fenômenos devem ser tratados. São também discutidos os fundamentos de um programa computacional, estruturado com base em procedimentos estatísticos, e cálculo das distorções harmônicas. A partir de medições efetuadas em ambientes residenciais, são apresentados resultados experimentais que elucidam as preocupações levantadas quanto a natureza do problema e a metodologia proposta.

Palavras-chave - Qualidade da energia, harmônicos, tratamento estatístico

Abstract - This work is related to harmonic voltage and current distortion estimation procedures, with emphasis to their random behaviour. A computer program structure based on statistic/probabilistic approach is discussed and used for harmonic calculation. From a set of data derived from a typical residential complex, practical results are shown and used to illustrate the methodology

Keywords - Power Quality, harmonics, statistic approach

1. INTRODUÇÃO

Somado aos dispositivos industriais que empregam a eletrônica de potência, recentemente, os eletrodomésticos e outros equipamentos com características não lineares surgem como exemplos marcantes de cargas geradoras de harmônicos em instalações comerciais e residenciais. Neste particular, reconhece-se que as unidades são de pequenas potências, porém, constituem-se em milhares de fontes de correntes harmônicas. Estes fatos determinam que, num futuro próximo, haverá a necessidade do controle do grau de distorção harmônica, não apenas para o setor industrial, como também para as redes elétricas residenciais e comerciais.

A Universidade Federal de Uberlândia, em parceria com a Universidade de Brasília, através dos correspondentes grupos de qualidade da energia, tem procurado contribuir neste cenário, através de investigações conjuntas voltadas para os campos comerciais e residenciais. Como resultados dos primeiros trabalhos realizados, este artigo apresenta, inicialmente, as fundamentações das preocupações aqui postas. Em seguida, são citadas as principais normas e recomendações sobre limites para harmônicos. Na seqüência, é proposto e ilustrado o uso de um programa computacional para o cálculo de distorção harmônica equivalente, fundamentado em cálculos estatísticos. Empregando resultados experimentais de medições conduzidas em uma instalação residencial, são apresentados estudos

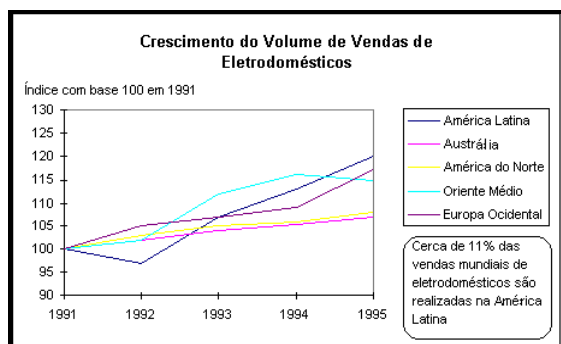
computacionais que evidenciam a aplicabilidade do programa.

Os resultados apresentados no artigo mostram que meras medições instantâneas, podem, erroneamente, conduzir a um diagnóstico prematuro e irreal sobre o estado operacional de uma rede elétrica. Estes fatos fortalecem a tese que os trabalhos relacionados com medições dos itens de definição da qualidade da energia elétrica, a exemplo das distorções harmônicas, devem ser realizados no contexto estatístico/probabilístico.

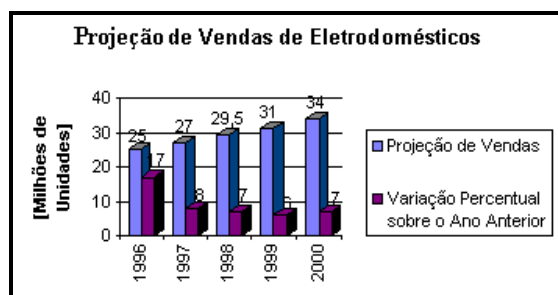
2. AS PERSPECTIVAS DO CRESCIMENTO DO USO DE ELETRODOMÉSTICOS

A referência [1] aponta o Brasil como o maior mercado de eletrodomésticos na América Latina e o de maior potencial de crescimento no próximo milênio, ao lado da China, Índia e Coréia do Sul. Como resultado da perspectiva de expansão do setor eletrodoméstico no Brasil, foi estimado que as vendas totais na América Latina crescerão 17% em 1997, e à taxa anual de 7% até o ano 2000.

Com o intuito de ilustrar esta tendência de crescimento de venda de eletrodomésticos, as figuras 1(a) e 1(b) ilustram, respectivamente, o crescimento do volume de vendas no mundo, e no Brasil.



1(a)



1(b)

Figura 1 - Panorama geral da tendência e crescimento da venda de eletrodomésticos.

3. DEFINIÇÕES MATEMÁTICAS DAS DISTORÇÕES

As distorções harmônicas são, em geral, descritas pelas equações (1) e (2), que fornecem, respectivamente, os níveis totais e individuais para estas grandezas.

$$DHV_T = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{n_{max}} V_n^2}{V_1^2}} \times 100 (\%) \quad (1)$$

$$DHV_I = \frac{V_n}{V_1} \times 100 (\%) \quad (2)$$

onde:

- DHV_T - distorção harmônica total de tensão
- DHV_I - distorção harmônica individual de tensão
- V_n - valor eficaz da tensão de ordem n
- V₁ - valor eficaz da tensão fundamental
- n - ordem da componente harmônica

Tendo em vista que os sinais a serem analisados nas áreas comerciais e residenciais apresentam-se com uma dinâmica apreciável em amplitude e frequências harmônicas, as equações (1) e (2) não constituem bases plenamente satisfatórias. Assim, para uma análise matemática adequada, é necessário um tratamento estatístico que permita a obtenção de valores equivalentes em função do tempo.

4. PROCEDIMENTOS SUGERIDOS POR NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Apresenta-se, a seguir, uma rápida descrição das principais recomendações pertinentes ao tema.

Norma do IEEE-519 - [2] e [6]

O aspecto fundamental e inovador desta norma, é a divisão da responsabilidade do problema de harmônicos entre os consumidores e a concessionária. Neste caso, os limites de distorções de tensão no ponto de ligação são de responsabilidade da concessionária, e os limites de distorção de corrente, neste mesmo ponto, são de responsabilidade dos consumidores.

Para a aplicação dos limites, é sugerido a utilização de gráficos oriundos da função de distribuição de probabilidade, e função de distribuição de probabilidade acumulada. Contudo, o documento dirigido ao usuário não é suficientemente claro quanto às definições destas funções, o que acarreta dificuldades marcantes quando da tentativa da aplicação da norma.

Norma Européia [3]

Esta norma fornece as principais características da tensão, no ponto de entrega ao consumidor, em baixa e média tensão, sob condições normais de operação. O período de observação é de uma semana, onde 95% dos valores medidos deverão estar dentro dos níveis de compatibilidade fixados pela norma. A maioria dos parâmetros são medidos como valores médios durante 10 minutos.

Este documento não fornece subsídios para o cálculo do valor equivalente com probabilidade de 95% de não ser excedido, bem como o valor médio.

Norma do IEC 1000-4-7 [3] e [8]

A norma IEC 1000, referência mundial para as medições do nível de harmônicos em sistemas de distribuição [3], utiliza-se também do índice DHV_T para a avaliação do grau das distorções harmônicas de tensão presentes nos sistemas elétricos.

A norma do IEC 1000-4-7 distingue três categorias de harmônicos quanto às janelas de observação: quase estacionária, flutuantes, e rapidamente variáveis. O tratamento dado a cada uma destas categorias, utiliza-se de processos voltados à obtenção da resultante harmônica para cada ordem, considerando-se a dinâmica do sistema.

A Recomendação Brasileira [5] e [7]

A recomendação brasileira sugere limites harmônicos (globais e por consumidor) para sistemas de tensões inferiores e superiores a 69 KV.

Este procedimento não apresenta a formulação matemática correlacionando as distorções harmônicas à processos aleatórios, ou seja, não se refere as mesmas como fenômenos variantes no tempo.

5. FUNDAMENTAÇÃO E PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA A ANÁLISE DE FENÔMENOS ALEATÓRIOS

O programa computacional desenvolvido utiliza, dentre outros fundamentos, o conceito de valor médio/equivalente definido como o resultado da composição da média aritmética, desvio padrão, da probabilidade de um valor do conjunto amostral não ser excedido, e do valor equivalente com probabilidade de 95% de não ser excedido. O valor médio (μ) e o desvio padrão (σ) são obtidos pelas equações 3 e 4, respectivamente. O cálculo da probabilidade de um valor qualquer não ser excedido, bem como a do valor equivalente com probabilidade de 95% de não ser excedido, pode ser feito através da equação 5, que é a função de distribuição acumulada de uma variável aleatória "X".

$$m = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N} \quad (3)$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - m)^2}{N}} \quad (4)$$

$$F(x_i) = P(x \leq x_i) = \sum_{i=-\infty}^{x_i} P(x_i) \quad (5)$$

Na expressão (5), $P(x_i)$ é a probabilidade acumulada, desde $-\infty$, até " x_i ", inclusive.

Embora a estatística propicie equações distintas para a obtenção de um valor médio equivalente para um conjunto (mediana, moda, média quadrática, etc.), utilizou-se neste trabalho da equação 3. Tal definição é aplicada para um único intervalo do conjunto amostral como também à sua subdivisão.

Além dos cálculos anteriores, o programa apresenta uma série de resultados numéricos e ilustrações gráficas com análises estatísticas enfocando:

- gráficos de distorções harmônicas, tanto totais como individuais, para tensão ou corrente em função do tempo de medição;
- o valor "médio/equivalente" com o respectivo desvio padrão, associado a probabilidade de 95% de não ser excedido;
- levantamentos globais das distorções harmônicas e suas respectivas probabilidades de ocorrência. Adicionalmente é interpretada sua

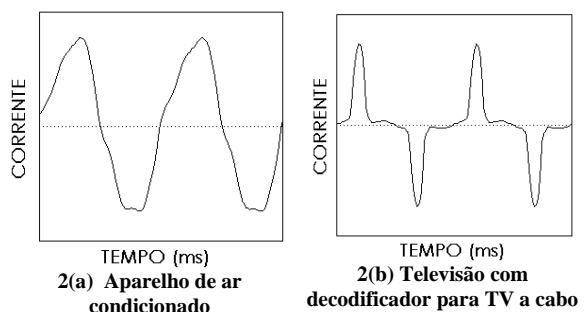
permanência no sistema elétrico, como função do tempo;

- gráfico de barra dos valores de $DHV_T\%$ ou $DHI_T\%$ maiores do que o valor estabelecido pelo usuário;
- gráfico com os tempos em que, cada valor de $DHV_T\%$ ou $DHI_T\%$ maior ou igual ao valor estabelecido pelo usuário, depois de se manifestar, permanece no sistema;
- gráfico com os intervalos de tempo necessários para que, depois de surgir um valor de $DHV_T\%$ ou $DHI_T\%$, maior ou igual ao valor estabelecido pelo usuário, um outro valor de $HV_T\%$ ou DHI_T , também maior ou igual ao mesmo valor estabelecido pelo usuário, venha a surgir.

6. RESULTADOS EXPERIMENTAIS E APLICAÇÃO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Para o propósito da aplicação e verificação dos resultados obtidos do programa computacional desenvolvido neste trabalho, utilizou-se de um ambiente residencial com as seguintes características:

- A energia média mensal consumida é 400 [KW/hora] com tensão 220/127 volts e conexão trifásica ao sistema supridor;
- A residência contém todas as cargas levantadas na tabela 1, onde são apresentados os DHI_T (%) específicos obtidos a partir de medições. A título de exemplificação, as figuras 2 mostram alguns oscilogramas extraídos quando dos trabalhos de campo. Além destes, a figura 3 fornece as formas de onda para as correntes gerais de suprimento das três fases da residência.
- O banco de dados utilizado, é formado por valores de distorções harmônicas de tensão e corrente, medidos em um período de 24:00 horas, e com medições intercaladas de 1 minuto.



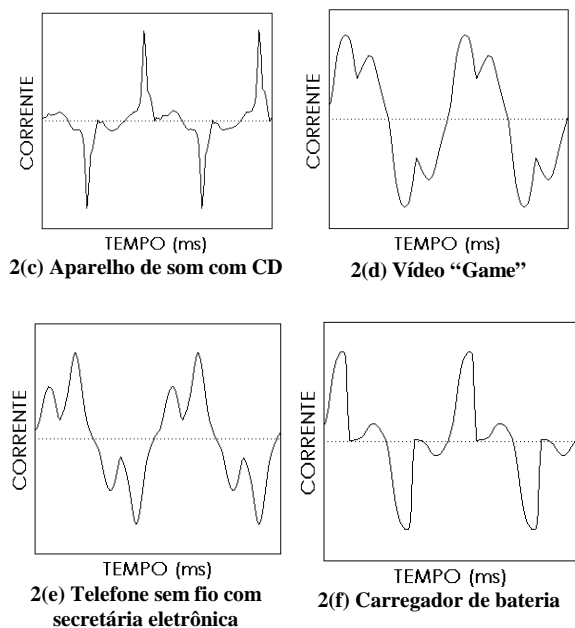


Figura 2 - Formas de onda da corrente nos diversos equipamentos residenciais

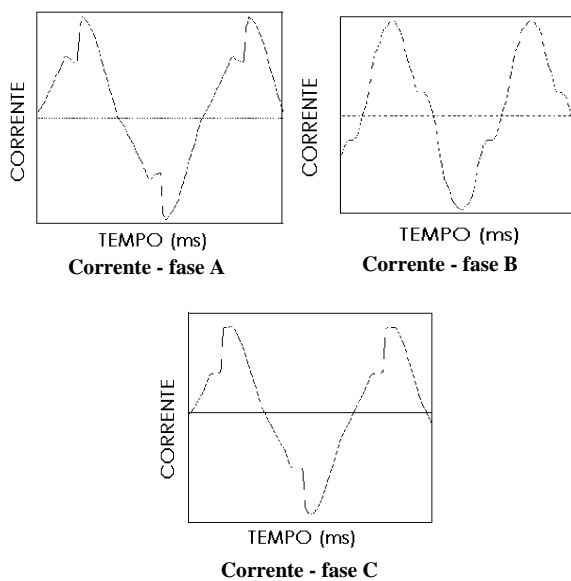


Figura 3 - Formas de onda da corrente total - Fases A, B e C

Equipamento avaliado	DHI _T (%)
Aparelho de ar condicionado	123
Microcomputador com impressora conectada	86.8
Televisão com decodificador para TV a cabo	92.3
Chuveiro com tap's para ajuste de temperatura	36.6
Geladeira	7.2
Lavadora de roupas	5.7
Lavadora de louças	10.3

Forno Microondas	46.1
Exaustor	32.1
Aparelho de som com CD	103.5
Televisão com vídeo cassete	129.1
Vídeo "Game"	32.1
Lâmpadas fluorescentes	35.8
Ventilador	4.2
Cafeteira	2.3
Torradeira	2.1
Carregador de bateria	83.1
Telefone sem fio	39.5
Telefone sem fio com secretária eletrônica	47
Rádio relógio	52.1
Transformadores de uso doméstico (50W)	33.3
Portão eletrônico	13

Tabela 1 - Nível de distorção harmônica total de corrente, para cada carga individual não-linear.

Os resultados obtidos das medições refletem as distorções harmônicas totais e individuais, em função do tempo de medição (minutos). A figura 4 ilustra o perfil das distorções harmônicas totais de tensão. As figuras 5, 6 e 7 apresentam as distorções harmônicas de tensões para as harmônicas de ordem 3, 5 e 7.

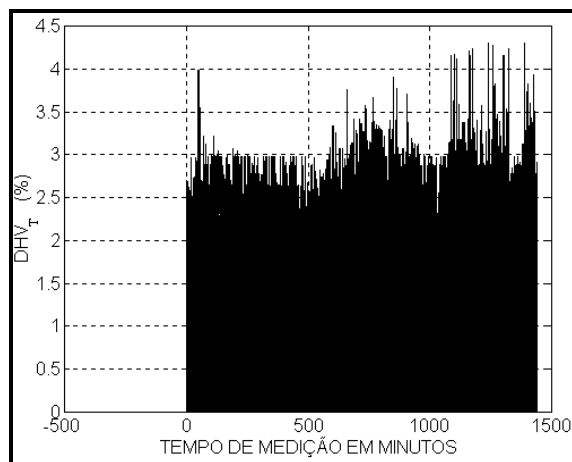


Figura 4 - Distorções harmônicas totais de tensões.

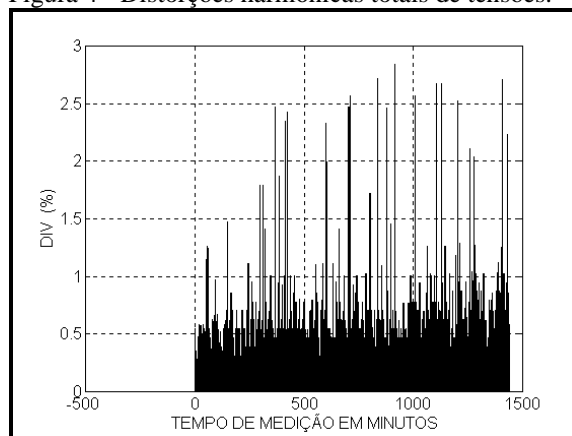


Figura 5 - Distorções harmônicas para as tensões de 3º harmônico.

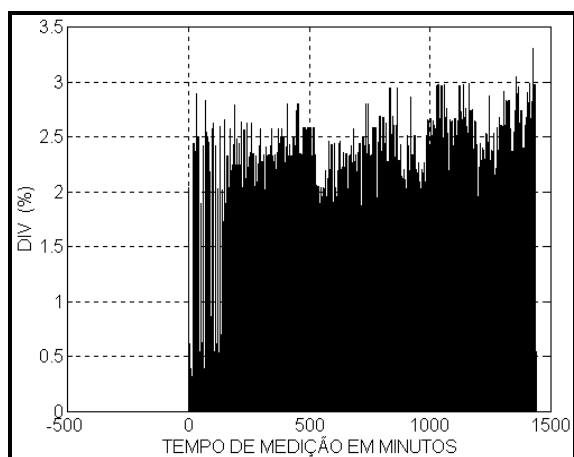


Figura 6 - Distorções harmônicas para as tensões de 5º harmônico.

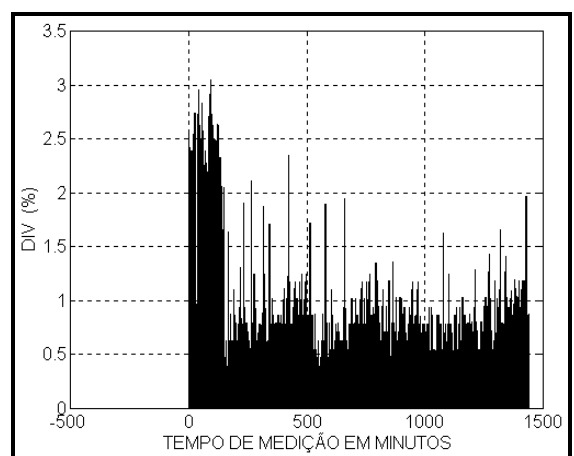


Figura 7 - Distorções harmônicas para as tensões de 7º harmônico.

Dentre os principais resultados obtidos do programa, destacam-se as tabelas 2 e 3 que apresentam, respectivamente, para as 24:00 horas de monitoração, o valor médio de $DHV_T\%$ e $DHI_T\%$ (média aritmética) com seu respectivo desvio padrão, e o valor médio/equivalente de $DHV_T\%$ e $DHI_T\%$ com probabilidade de 95% de não serem excedidos.

HORÁRIO (horas)	Valor médio de $DHV_T\%$.	Desvio padrão	Valor médio/ equivalente com probabilidade de 95% de não ser excedido.
24:00 horas de medição.	2.71	0.34	3.40

Tabela 2 - Valor equivalente para a distorção de tensão.

HORÁRIO (horas)	Valor médio de $DHI_T\%$.	Desvio padrão	Valor médio/ equivalente com probabilidade de 95% de não ser
24:00 horas de medição.	39.04	14.44	62.91

HORÁRIO (horas)	Valor médio de $DHI_T\%$.	Desvio padrão	Valor médio/ equivalente com probabilidade de 95% de não ser excedido.
24:00 horas de medição.	39.04	14.44	62.91

Tabela 3 - Valor equivalente para a distorção de corrente.

Adicionalmente, as figuras 8 e 9 ilustram, respectivamente, a função de distribuição de probabilidade e a função de distribuição de probabilidade acumulada, para as distorções harmônicas de corrente.

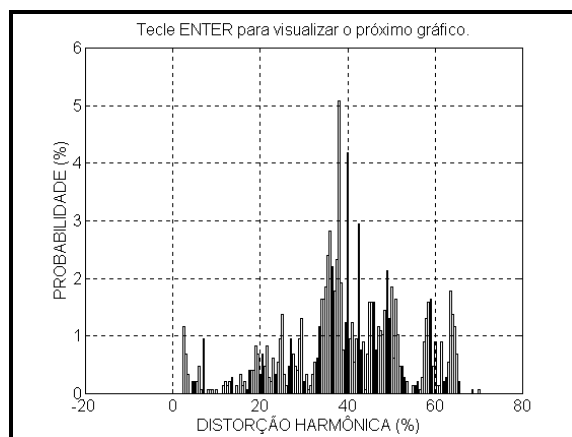


Figura 8 - Distribuição de probabilidade das distorções harmônicas totais de corrente.

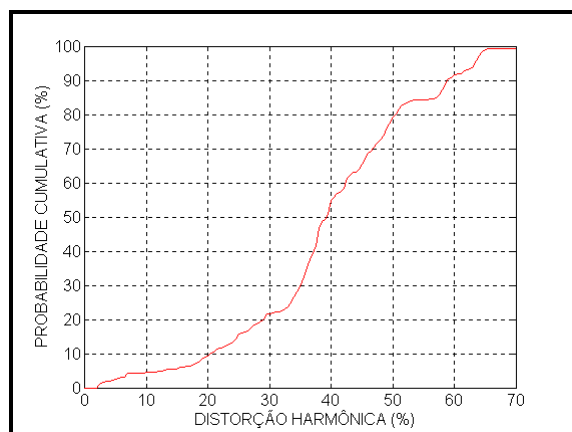


Figura 9 - Função Distribuição de Probabilidade Acumulada para as correntes.

7. CONCLUSÕES

Verificou-se que há, no presente momento, em decorrência das perspectivas que despontam para o mercado de aparelhos elétricos/eletrônicos, a necessidade de se quantificar e qualificar os sistemas elétricos de potência, no tocante ao nível das distorções harmônicas de tensão e corrente. Somado a isto, há de se reconhecer a grande aleatoriedade com que estes fenômenos se manifestam.

A síntese das principais normas pertinentes indicou que, nada se tem registrado quanto aos fundamentos e definições estatísticas relacionadas aos métodos utilizados para o estabelecimento dos limites. As informações são vagas, porém apontam a importância de tratamentos baseados em conceitos

estatísticos. Estes fatos nortearam o desenvolvimento do programa computacional desenvolvido e utilizado no trabalho.

Em seguida, empregando-se uma instalação residencial típica, procedeu-se a um conjunto de medições, do qual extraiu-se alguns oscilogramas e níveis de distorção ilustrativos para diferentes eletrodomésticos. A partir destas informações, comprovou-se que, a simples inserção e retirada destas cargas da rede elétrica, pode causar alterações acentuadas no perfil das distorções harmônicas.

O programa, quando da sua aplicação à uma situação real, mostrou-se simples, e sobretudo capaz de propiciar análises baseadas em conceitos estatísticos. Destaca-se dos diversos resultados obtidos, os valores médio/equivalente tanto para distorções harmônicas de tensão como de corrente. A ilustração dos gráficos de distribuição de probabilidade, em conjunto com a distribuição de probabilidade acumulada, permitiram a determinação da probabilidade de ocorrência de um valor qualquer de distorção, além da probabilidade de um valor preestabelecido não ser excedido. Estas informações conduzem a um retrato mais fiel dos níveis de distorções presentes, não apenas nas instalações elétricas tipo residenciais, mas também, nas comerciais e industriais.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Departamento de pesquisa da instituição financeira DKB (Desdner Kleinerwort Benson), “The Millennium Files” Latin America: Consumption Comes of Age, Londres, 1997.
- [2] IEEE- Std 519/1992 - “Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.
- [3] Study Committee 36 Collquium and Meetings, Monitoring Voltage Quality European Standart, Equipament and The Danish Monitoring Programme, Foz do Iguaçu, Brasil, May, 1995.
- [4] Bergeron, R. et all. “Análise da Norma IEC 1000-4-7 para Medição do Nível de Harmônicos”, Rev. Eletricidade Moderna, São Paulo/SP, No 266, pp. 125-133, Maio, 1996.
- [5] GCOI/SCEL/GTEE. “Critérios e Metodologias para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, XII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Recife, 1993.
- [6] Lima, A. G. G., Ross, R. P. D., Guarini, A. P., Lourenço, P., Mello, A. J. C. “Fornecimento à Indústria Metalúrgica que Utiliza Fornos de Indução”, Seminário Brasileiro da Qualidade de Energia Elétrica, Uberlândia, Brasil, 1996.
- [7] Crucq, J. H., Robert, A. “Statistical Approach for Harmonic Measurements and Calculations”, Laborelec, Report 1-JMC-AR/1310/8702, January 15, 1987.
- [8] Atkinson-Hope, G., Petroianu, A. “Power System Harmonic Field Measurements and The Application of Standards Including Simulation”, University of Cape Town, Proceedings IEEE VII ICHQP, Las Vegas, USA, 1996.