

# Impacto de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não-lineares no Sistema de Distribuição

## Parte II – Medições das Cargas em Alimentadores Típicos

M. L. y Gonzalez, S. Visacro F., P. C. A. de Almeida e I. A. Pires

**Resumo-** Neste trabalho os autores descrevem os aspectos da investigação que realizam no tema “Impacto de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não-lineares no Sistema de Distribuição” e apresentam os primeiros resultados do projeto, ora em desenvolvimento. Particularmente é enfatizada a segunda atividade de medições, relativa às medições das cargas em alimentadores típicos. São apresentados resultados obtidos de tensão, corrente, harmônicas de tensões e correntes, distorções harmônicas totais de tensões e correntes em consumidores residenciais (residências de 2 e 3 quartos), consumidores comerciais (Bar, curso de informática e uma loja de venda de roupas), um transformador de consumidores residenciais e uma saída de alimentador de 11,4 kV de uma subestação. Estas medições permitirão avaliar o impacto das cargas no sistema de distribuição.

**Palavras-chave**—Cargas eletrônicas não lineares, Cargas residenciais e comerciais, Eficiência energética, Impacto de cargas, Sistema de distribuição.

### I. INTRODUÇÃO

Recentemente tem havido uma expansão crescente do uso de cargas eletrônicas eficientes e não lineares nas instalações dos consumidores residenciais e comerciais. Estas cargas podem gerar componentes harmônicas, capazes de causar problemas de natureza diversa no sistema de distribuição de energia elétrica. Apenas a título ilustrativo, podem-se citar alguns efeitos indesejáveis relacionados às harmônicas [1]:

---

M. L. y Gonzalez: Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG; Pesquisador do LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (UFMG-CEMIG). E-mail: [manuel@cpdee.ufmg.br](mailto:manuel@cpdee.ufmg.br).

S. Visacro F.: Professor Doutor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG; Pesquisador e Coordenador do LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (UFMG-CEMIG). E-mail: [Lrc@cpdee.ufmg.br](mailto:Lrc@cpdee.ufmg.br).

P.C.A. de Almeida, chefe do Departamento de Engenharia da Empresa Luz e Força Santa Maria – ELFSM ([engenharia@elfsm.com.br](mailto:engenharia@elfsm.com.br)) e coordenador do projeto de P&D.

I. A. Pires, mestrando em Engenharia Elétrica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG. E-mail: [igor@cpdee.ufmg.br](mailto:igor@cpdee.ufmg.br).

- (a) Erros nos valores de faturamento relativos ao consumo de energia;
- (b) Aumento de perdas de energia e redução da tensão de distribuição;
- (c) Diminuição do tempo de vida útil dos transformadores de distribuição;
- (d) Riscos aos bancos de capacitores do sistema;
- (e) Interferências com sinais de comunicação.

A carência de investigações aprofundadas no tema, que complementem as condições particulares do sistema de distribuição da Empresa Luz e Força Santa Maria - ELFSM motivou esta empresa a formular o projeto “Impacto de cargas eletrônicas residenciais e comerciais eficientes e não lineares no sistema de distribuição”. Este projeto está atualmente em desenvolvimento, através de parceria com o LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas. O projeto tem duração de 2 anos, e o primeiro ciclo foi basicamente dedicado a quatro tarefas (etapas) básicas: uma avaliação crítica do tema, com exaustiva pesquisa bibliográfica; a identificação de cargas eletrônicas residenciais e comerciais eficientes e não lineares; medições individuais de amostras de cargas (eletrodomésticos) e medições das cargas em alimentadores típicos. Todos os tópicos foram abordados em relatórios técnicos dirigidos à ELFSM [2-5].

O presente artigo é especificamente dedicado à apresentação de resultados obtidos na etapa de medições de cargas em alimentadores típicos. Um segundo artigo [1] mostra os resultados obtidos nas medições de amostras de cargas individuais (eletrodomésticos). O artigo [6] também apresenta resultados relativos ao primeiro ciclo.

### II. A METODOLOGIA

Para se avaliar o impacto das cargas eletrônicas residenciais e comerciais eficientes e não-lineares no sistema de distribuição, torna-se necessário identificar todas as cargas, ou pelo menos as cargas mais significativas, classificando-as em cargas lineares e não lineares. Em seguida, avaliar suas potências, correntes nominais, harmônicas, Distorções Harmônicas Totais (DHT's) e modos de operação.

Conforme [7], cargas não-lineares são aquelas que têm uma corrente não-senoidal quando submetidas a uma fonte de tensão senoidal. Uma DHT é determinada por:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n X_h^2}}{X_1} \quad (1)$$

onde  $X$  é tensão (V) ou corrente (I) e  $h$  é o número da harmônica. Com esses parâmetros, e através de simulações computacionais, pode-se avaliar o impacto das cargas eletrônicas no sistema de distribuição.

Neste projeto, foram identificadas as cargas típicas indicadas pelos consumidores da ELFSM, através das solicitações de novas ligações feitas nos últimos anos. Com a relação das cargas, fez-se medições individuais das mesmas, em laboratório e nas próprias instalações da Concessionária. Em seguida, mediram-se consumidores residenciais e comerciais, transformadores de potência e alimentadores primários (11,4 kV).

### III. AS MEDIÇÕES

As medições de tensão, corrente, harmônicas e DHT's de tensão e corrente foram feitas nas cargas apresentadas na Tabela I. Os tempos de medição foram basicamente escolhidos, considerando-se a forma de funcionamento de cada carga (constante ou não constante).

TABELA I  
RELAÇÃO DE CARGAS COM MEDIÇÕES EXECUTADAS

Item	Carga
1	Residência de 2 quartos
2	Residência de 3 quartos
3	Agência de turismo
4	Bar
5	Escritório de condomínio de shopping
6	Curso de informática
7	Escritório/estúdio de Emissora de TV
8	Loja de venda de bijuterias
9	Loja de venda de computadores
10	Loja de venda de cosméticos
11	Loja de venda de roupas
12	Prédio sede de concessionária de energia elétrica
13	Prédio sede de concessionária telefonia
14	Seguradora
15	Transformador de força de consumidor residencial
16	Saída de alimentador de 11,4 kV de SE

### IV. OS RESULTADOS

São apresentados, a seguir, os resultados das cargas seguintes:

- Residência de 2 quartos
- Residência de 3 quartos
- Bar
- Curso de informática
- Loja de Venda de Roupas
- Transformador do consumidor residencial
- Saída de alimentador de 11,4 kV de SE.

Estas cargas representam uma amostra significativa das

cargas encontradas em ambientes residenciais e comerciais.

#### A. Consumidores Residenciais

##### A1. Residência de 2 quartos

Este consumidor é atendido apenas por 1 fase. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 1 a 8. As Figuras 1 e 2 apresentam os valores eficazes de tensão e corrente para este consumidor. Analisando a curva de corrente, nota-se claramente o ciclo do compressor de uma geladeira (período da madrugada) e a utilização de chuveiro elétrico (picos de corrente). Estas suposições foram confirmadas junto ao consumidor, quando realizada uma pesquisa sobre as cargas existentes na residência e seu período de utilização.

As Figuras 3 e 4 mostram as DHT's de tensão e corrente durante o período de medição. Comparando a Figura 4 com a Figura 2, nota-se uma correlação inversa entre a corrente e sua DHT. Quando a corrente tem um valor grande, a DHT tem um valor pequeno. Quando a corrente tem um valor pequeno, a DHT tem um valor grande. Isto é explicado pela presença de carga linear significativa no consumidor residencial (chuveiro convencional).

As Figuras 5 e 6 mostram dois momentos distintos de DHT no consumo: um momento onde a DHT é baixa e outro momento onde a DHT é alta. As Figuras 7 e 8 mostram o espectro harmônico destes dois momentos.



Figura 1. Valor eficaz de tensão em uma residência de 2 quartos

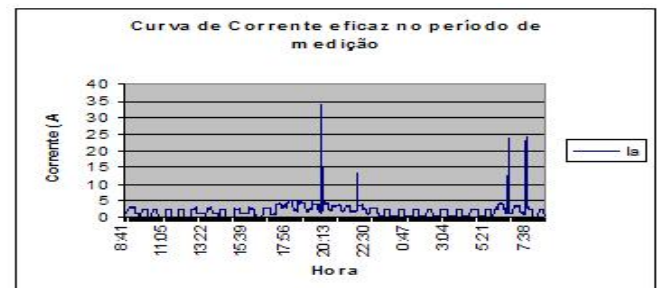


Figura 2. Valor eficaz de corrente obtido em uma residência de 2 quartos



Figura 3. DHT da tensão em uma residência de 2 quartos

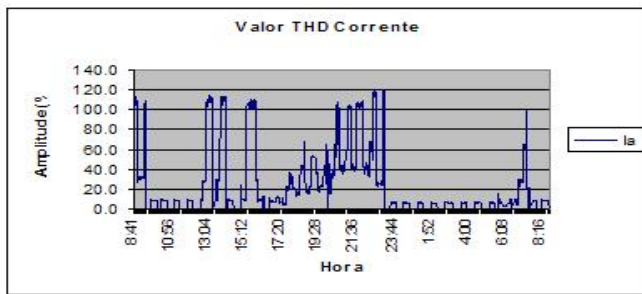


Figura 4. DHT da corrente em uma residência de 2 quartos

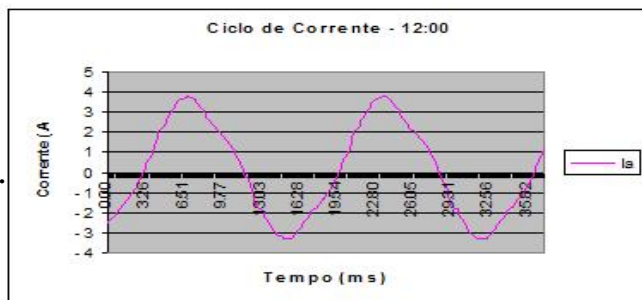


Figura 5. Onda de corrente com DHT baixa em uma residência de 2 quartos

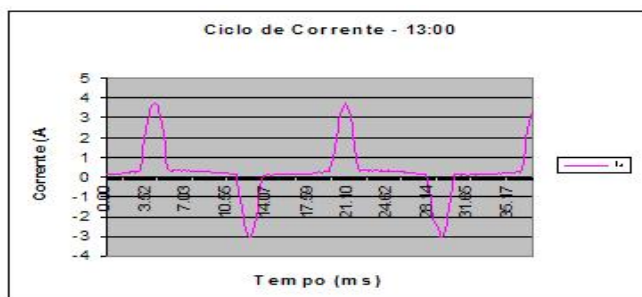


Figura 6. Onda de corrente com DHT alta em uma residência de 2 quartos



Figura 7. Espectro harmônico da Figura 5 em uma residência de 2 quartos

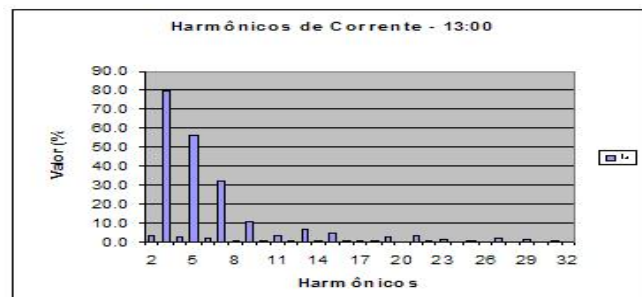


Figura 8. Espectro harmônico da Figura 6 em uma residência de 2 quartos

## A2. Residência de 3 quartos

Este consumidor é atendido por 3 fases. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 9 a 17. As Figuras 9 e 10 apresentam os valores eficazes de tensão e corrente para o consumidor. Analisando as curvas de corrente, percebe-se que os picos de corrente se devem à utilização de chuveiro elétrico e que este é monofásico, pois a curva de corrente de neutro acompanha o aumento visualizado na fase A. Através de pesquisa realizada, confirmou-se esta suposição.

As Figuras 11, 12 e 13 mostram, respectivamente, as DHT's das tensões, das correntes de fase e da corrente de neutro durante o período de medição. Analisando as Figuras 10 e 12, a maior parte das cargas na fase B devem ser cargas eletrônicas, devido ao alto DHT de corrente apresentado nesta fase ao longo do tempo. Já a fase A deve ter uma geladeira e um chuveiro elétrico a ela ligados. A fase C deve estar com um freezer, devido a seu valor oscilante de corrente e baixo DHT. O DHT da corrente de neutro acompanha os intervalos de grande DHT das fases A e B, entre 17:34hs e 22:52hs, momento de utilização de televisores e iluminação, com predominância de lâmpadas fluorescente compactas. Este fato foi confirmado pelo proprietário da residência.

As Figuras 14 e 15 mostram dois momentos distintos de DHT no consumo: um momento onde a DHT é baixa e um outro momento onde a DHT é alta. As Figuras 16 e 17 mostram o espectro harmônico deste dois momentos.

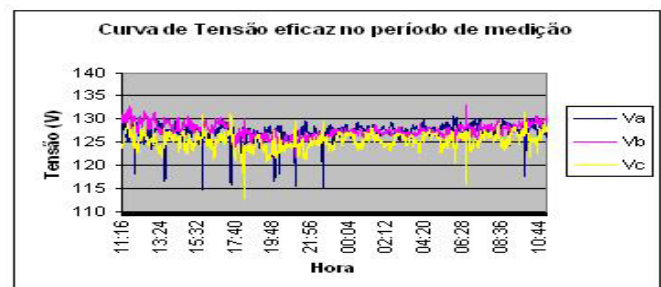


Figura 9. Valor eficaz de tensão em uma residência de 3 quartos

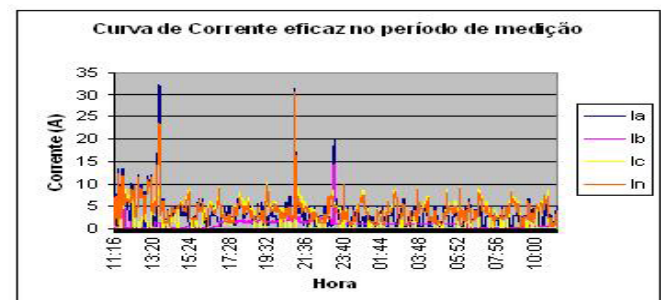


Figura 10. Valor eficaz de corrente obtido em uma residência de 3 quartos

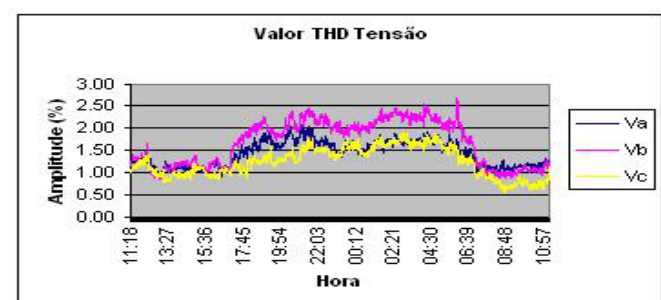


Figura 11. DHT da tensão em uma residência de 3 quartos

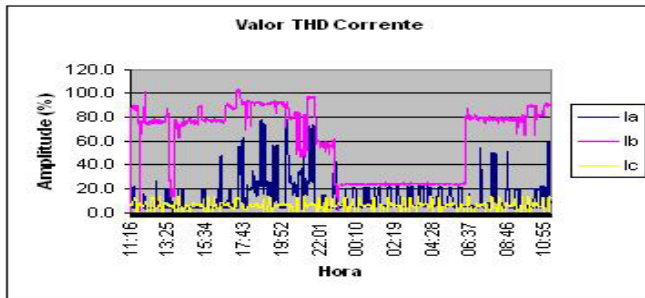


Figura 12. DHT da corrente em três fases em uma residência de 3 quartos

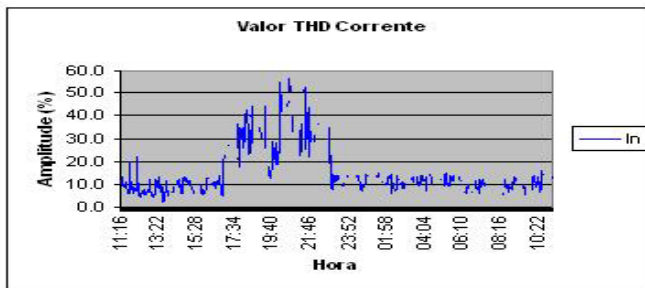


Figura 13. DHT da corrente no neutro em uma residência de 3 quartos

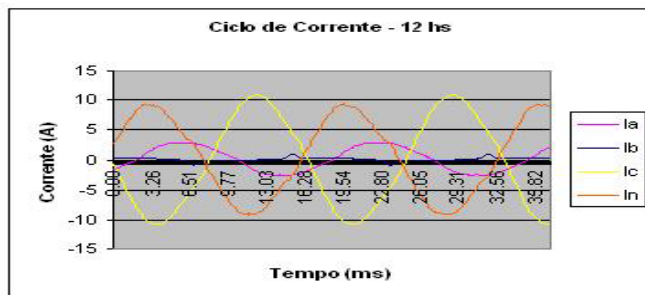


Figura 14. Onda de corrente com DHT baixa em uma residência de 3 quartos

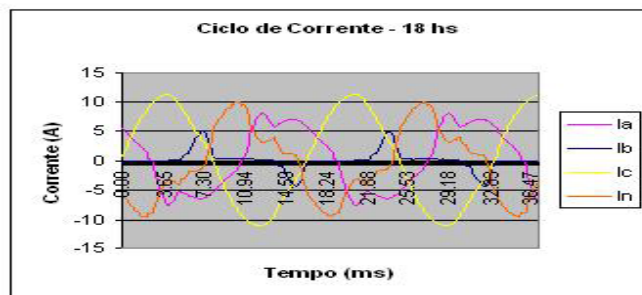


Figura 15 – Onda de corrente com DHT alta em uma residência de 3 quartos

## B. Consumidores Comerciais

### B1. Bar

O bar é atendido por 2 fases. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 18 a 25. As figuras 18 e 19 apresentam os valores eficazes de tensão e corrente para este consumidor. A predominância de cargas neste estabelecimento é de refrigeradores, confirmado pela alternância na curva de corrente através da Figura 19.

As Figuras 20 e 21 apresentam os DHT's de tensão e cor-

rente medidos. Nota-se a baixa DHT de corrente neste consumidor, confirmando que a maior parte das cargas presentes são lineares.

As Figuras 22 e 23 mostram dois momentos distintos de DHT no consumo: um momento onde a DHT é baixa e outro momento onde a DHT é alta. As Figuras 24 e 25 mostram o espectro harmônico destes dois momentos.

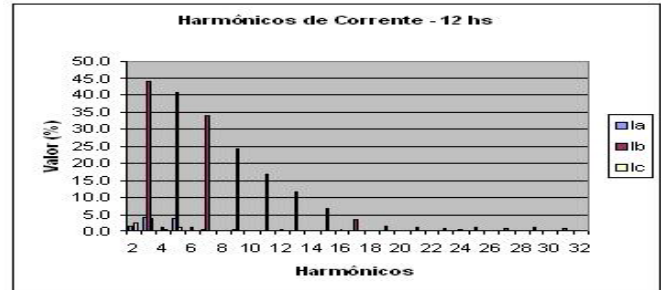


Figura 16. Harmônicas da Figura 14 em uma residência de 3 quartos

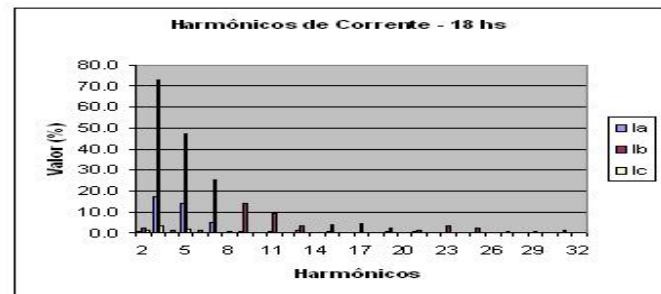


Figura 17. Harmônicas da Figura 15 em uma residência de 3 quartos

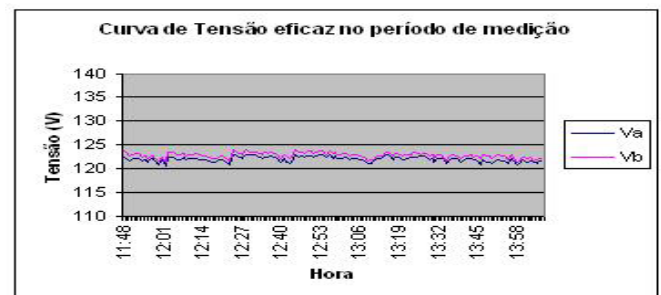


Figura 18. Valor eficaz de tensão em um Bar

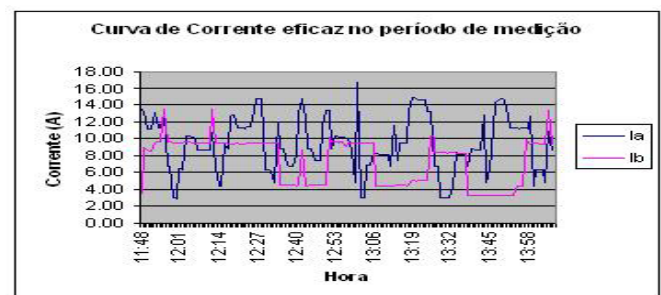


Figura 19. Valor eficaz de corrente obtido em um Bar

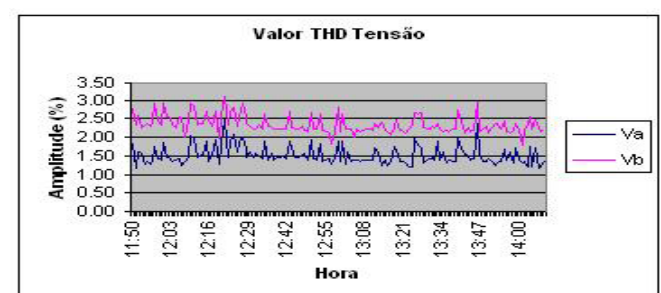


Figura 20. DHT da tensão em um Bar

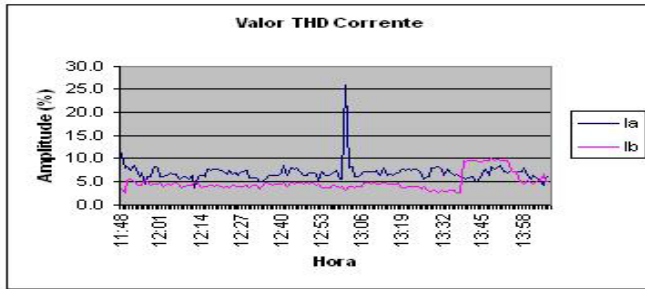


Figura 21. DHT da corrente em três fases em um Bar

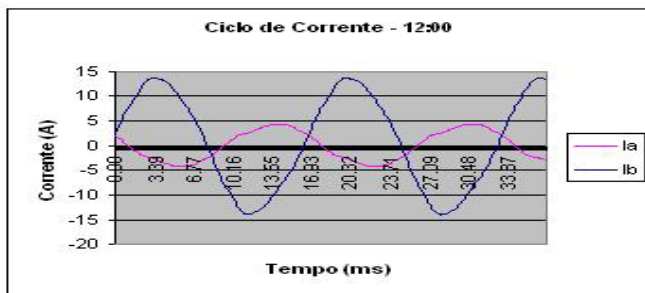


Figura 22. Onda de corrente com DHT baixo em um Bar

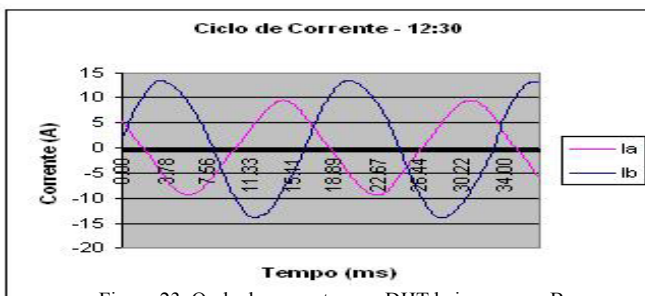


Figura 23. Onda de corrente com DHT baixo em um Bar

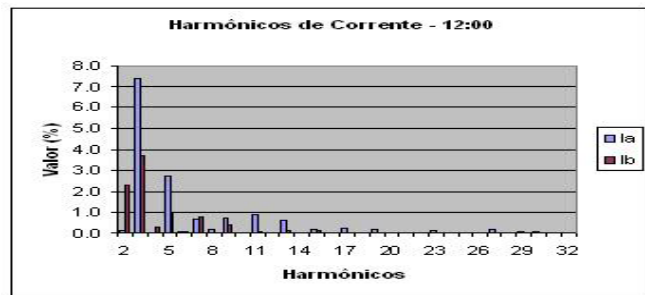


Figura 24. Harmônicas da Figura 22 em um Bar

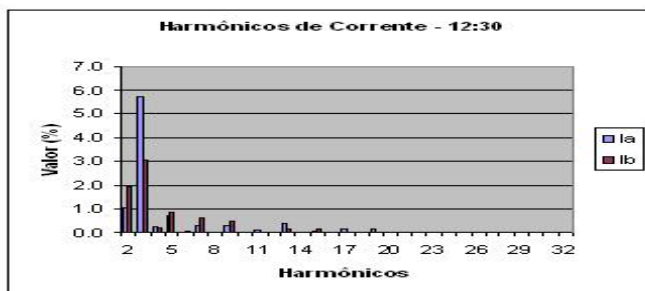


Figura 25. Harmônicas da Figura 23 em um Bar

## B2. Curso de informática

O curso de informática é atendido por duas fases. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 26 a 31.

A Figura 26 apresenta os valores eficazes de tensão ao longo do período de medição. Os computadores estavam distribuídos nas duas fases, fato comprovado pela Figura 27. Esta Figura apresenta dois sub-períodos distintos de carga, antes e depois das 14 horas, quando teve o início das aulas de computação.

As Figuras 28 e 29 mostram as DHT's de tensão e corrente no período de medição. Da Figura 29, percebe-se a alta taxa de distorção harmônica provocada pelos computadores. Não houve medição de neutro por motivos de dificuldade técnica, porém certamente este condutor também continha uma alto conteúdo harmônico, principalmente o terceiro.

A Figura 30 apresenta as curvas de corrente, às 15:30hs, enquanto a Figura 31 descreve o conteúdo harmônico destas.

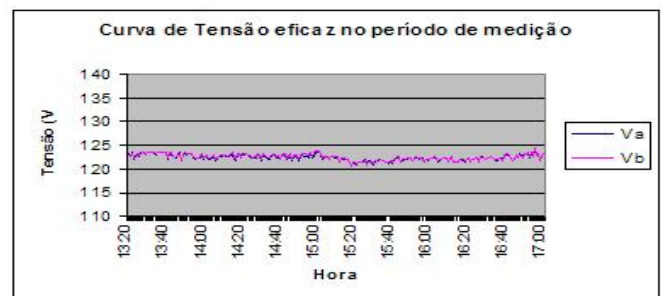


Figura 26 – Valores eficazes de tensão em um curso de informática

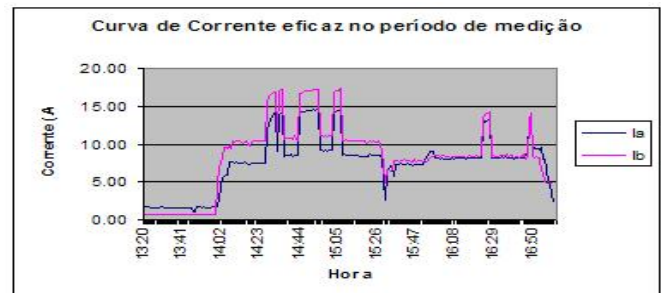


Figura 27 – Valores eficazes de corrente em um curso de informática

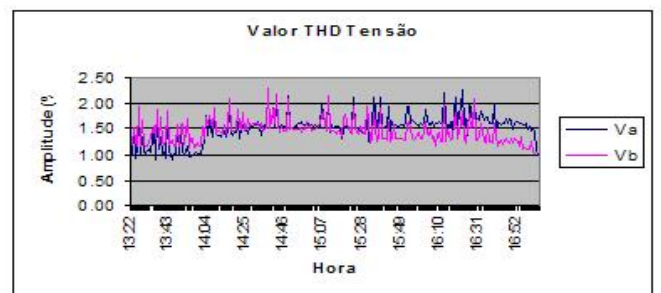


Figura 28 – DHT's das tensões em um curso de informática

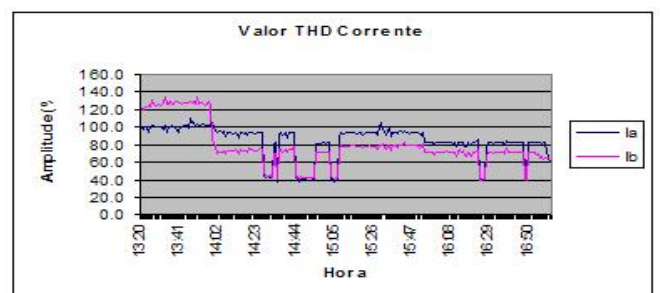


Figura 29 – DHT's das correntes em um curso de informática

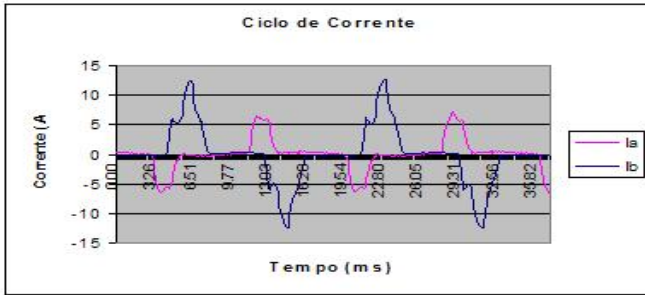


Figura 30 – Formas de onda de corrente em um curso de informática

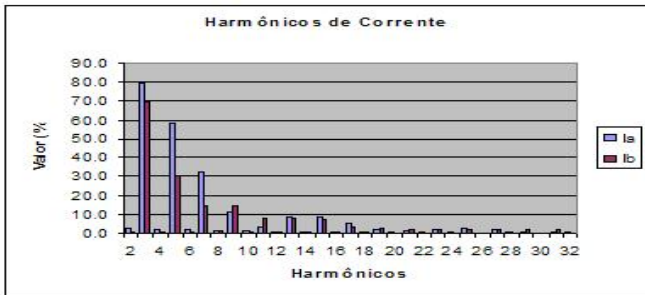


Figura 31 – Espectro harmônico da Figura 30 em um curso de informática

## B2. Loja de Venda de Roupas

Esta loja é atendida por 2 fases. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 32 a 37. Os valores eficazes de tensões e correntes fornecidas, no período de medição, são apresentados nas Figuras 32 e 33, respectivamente. A Figura 33 mostra o desbalanceamento encontrado entre as fases (fase A mais carregada do que a fase B).

As DHT's de tensão são apresentadas na Figura 34 e as de corrente na Figura 35. Nota-se um alto valor de DHT na corrente da fase B, devido ao intenso uso de cargas eficientes de iluminação.

A Figura 36 apresenta as formas de onda de corrente enquanto a Figura 37 mostra os harmônicos relativos a esta. Estas harmônicas evidenciam a não-linearidade da curva de corrente da fase com LFC's.

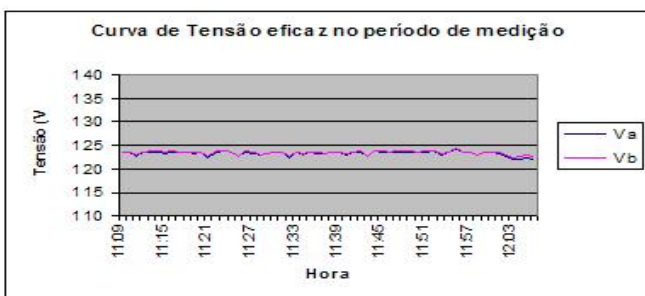


Figura 32 - Valores eficazes de tensão em uma loja de venda de roupas

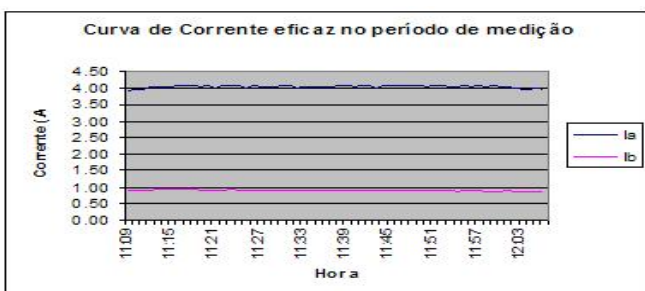


Figura 33 - Valores eficazes de corrente em uma loja de venda de roupas

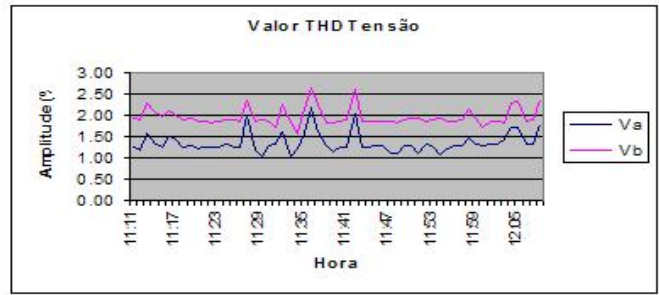


Figura 34 – DHT's das tensões em uma loja de venda de roupas

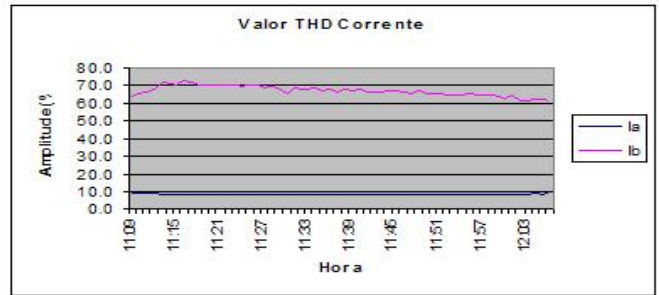


Figura 35 – DHT's das correntes em uma loja de venda de roupas

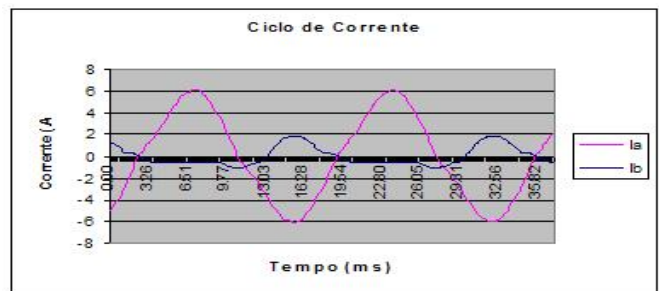


Figura 36 – Formas de onda de corrente em uma loja de venda de roupas

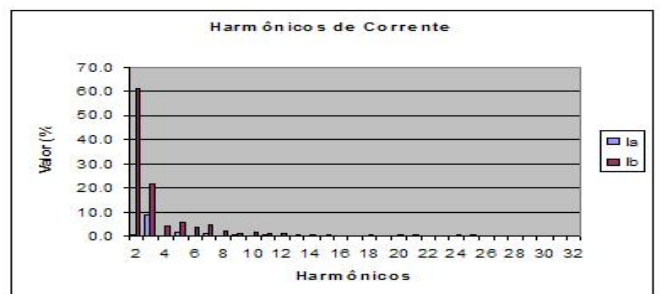


Figura 37– Espectro Harmônico da Figura 36 em uma loja de venda de roupas

## C. Alimentadores típicos

Para os consumidores residenciais apresentados anteriormente, mediu-se o transformador que os alimentavam. No caso dos consumidores comerciais, as medições foram feitas na saída do alimentador de 11,4 kV na SE que alimenta a região destes consumidores.

### C1. Transformador dos consumidores residenciais

O transformador medido é de 45 kVA. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 38 a 43. As Figuras 38 e 39 mostram os valores eficazes de tensão e corrente. Na Figura 39 também é apresentado a corrente de neutro. Seu valor, em alguns momentos, se torna alto, mostrando

um desequilíbrio presente nas fases.

As Figuras 40 e 41 mostram as DHT's de tensão e corrente. As Figuras 42 e 43 apresentam a forma de onda e suas harmônicas, em um momento significativo de distorções harmônicas.

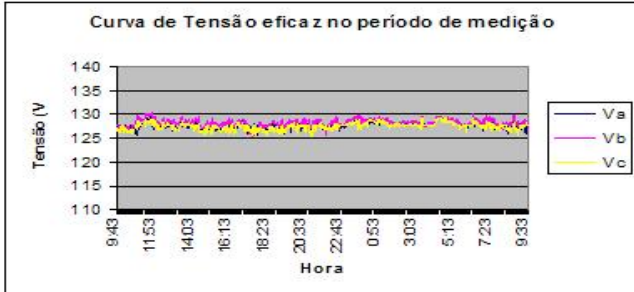


Figura 38 – Valores eficazes de tensão em um transformador de força

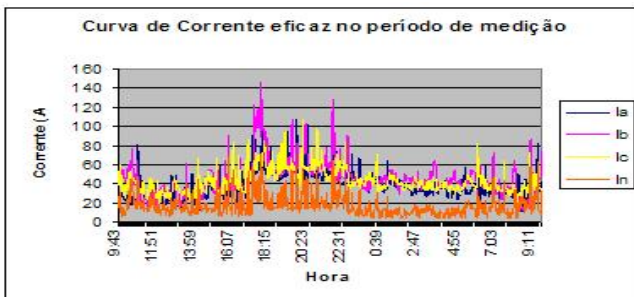


Figura 39 – Valores eficazes de corrente em um transformador de força

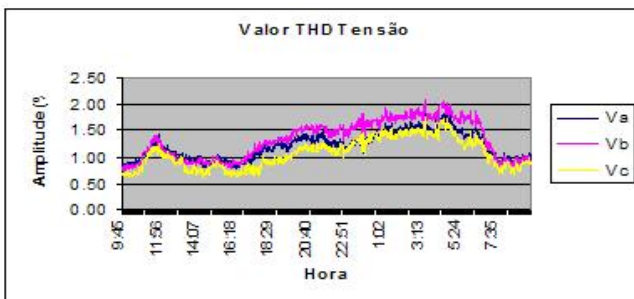


Figura 40 – DHT's das tensões em um transformador de força

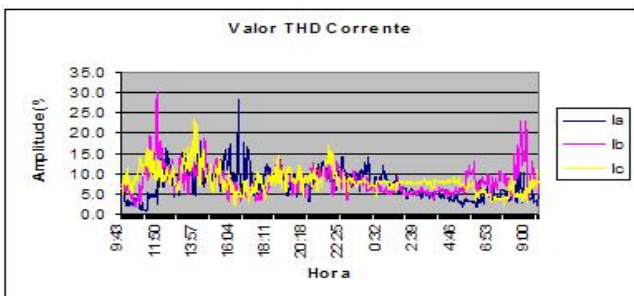


Figura 41 – DHT's das correntes em um transformador de força

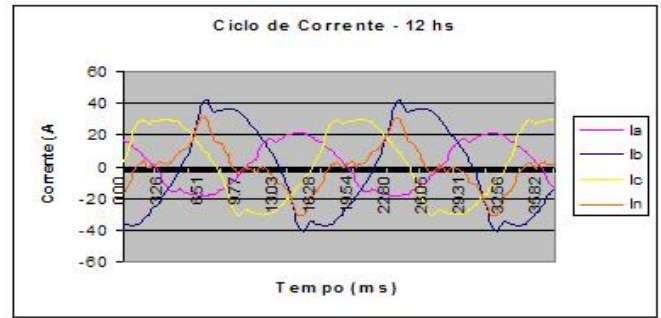


Figura 42 – Forma de onda de corrente em um transformador de força

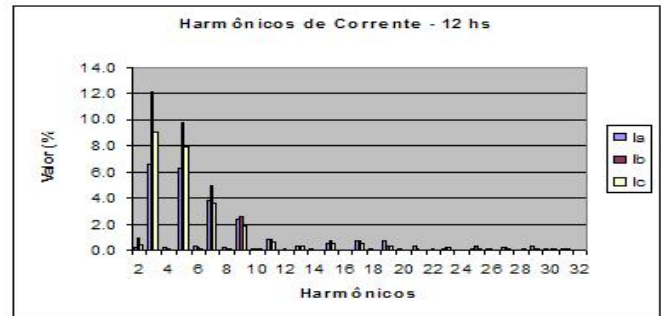


Figura 43 – Espectro harmônico da Figura 42

## C2. Saída da sub-estação que alimenta os consumidores comerciais

O transformador do barramento que alimenta a área que contém os consumidores comerciais medidos é um transformador de 10MVA, com tensão de 69 kV no primário e 11,4 kV no secundário. Os resultados das medições são apresentados nas Figuras 44 a 51. Os valores eficazes de tensão e corrente são mostrados nas Figuras 44 e 45, respectivamente. Os valores de tensão apresentados são de tensão de fase.

Nas Figuras 46 e 47 são apresentadas as DHT's de tensão e corrente no período de medição. As DHT's de tensão e corrente nas fases são baixas, enquanto as correntes de neutro assume valores significativos. As Figuras 48 e 49 mostram as correntes, sendo os espectros harmônicos mostrados nas Figuras 50 e 51, para os horários de fora de ponta e ponta do sistema elétrico.

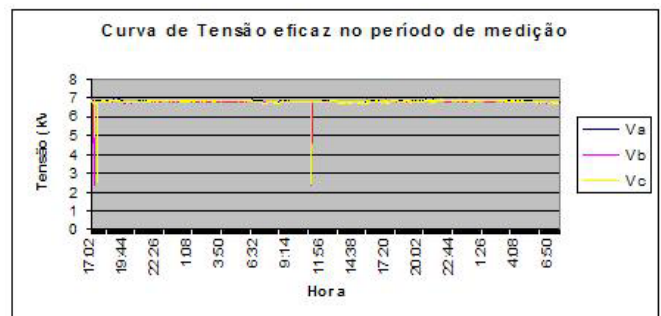


Figura 44 – Valores eficazes de tensão

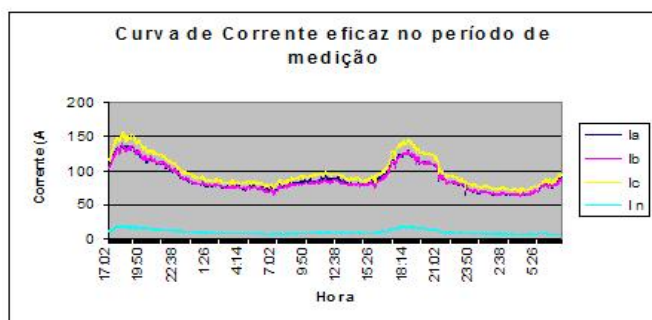


Figura 45 – Valores eficazes de corrente

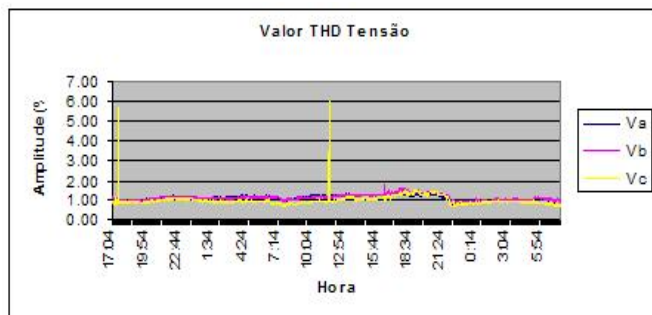


Figura 46 – DHT's das tensões

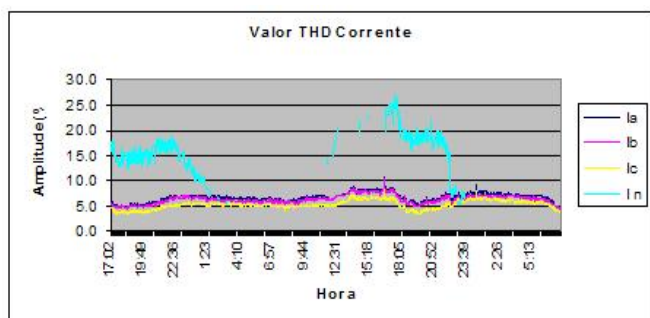


Figura 47 – DHT's das correntes

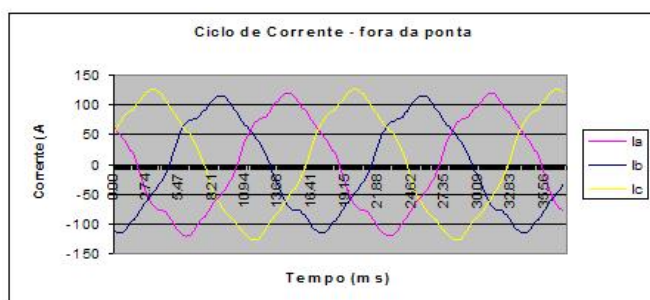


Figura 48 – Forma de onda de corrente – fora de ponta

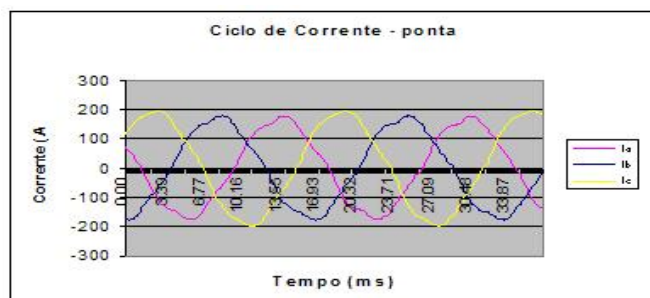


Figura 49 – Forma de onda de corrente – ponta

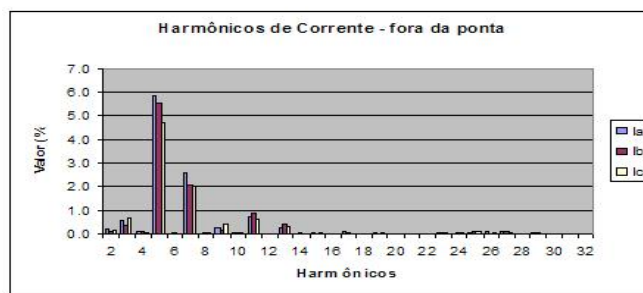


Figura 50 – Espectro harmônica da Figura 45

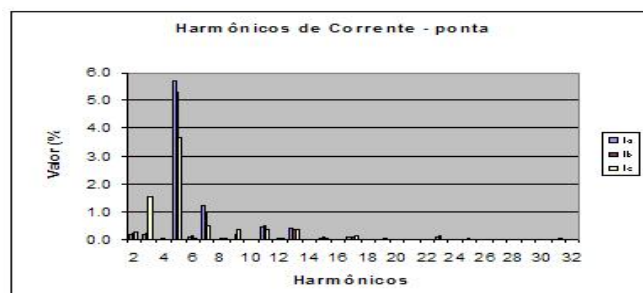


Figura 51 – Espectro harmônica da Figura 46

## V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma amostra dos resultados de medições de cargas em alimentadores típicos. Estas medições foram feitas no primeiro ano do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento entre a ELFSM e a UFMG, intitulado “Impactos de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não-Lineares no Sistema de Distribuição”.

Resultados de medições de valores eficazes de tensão e corrente, formas de onda de tensão e corrente, distorções harmônicas totais de tensão e corrente em residências de 2 e 3 quartos, em um Bar, em um Curso de informática, em uma Loja de venda de Roupas, em um transformador do consumidor residencial e em uma saída de alimentador de 11,4 kV de SE são apresentados neste trabalho.

Todas as medições permitirão avaliar o impacto das cargas eletrônicas eficientes e não lineares no sistema de distribuição da ELFSM.

## VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. L. y Gonzalez, S. Visacro F., P. C. A. de Almeida, I. A. Pires, “Impacto de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não-lineares no Sistema de Distribuição - Parte I – Medições de Amostras de Cargas Individuais(Eletrodomésticos)”, submetido ao Comitê Técnico do III Citenel.
- [2] I. A. Pires, M. L. y Gonzalez, S. V. Filho, “Compilação das Referências Bibliográficas”. Relatório Técnico. UFMG, outubro de 2004.
- [3] I. A. Pires, M. L. y Gonzalez, S. V. Filho, “Identificação de Cargas Eletrônicas Residenciais e Comerciais Eficientes e Não Lineares”. Relatório Técnico. UFMG, dezembro de 2004.
- [4] I. A. Pires, M. L. y Gonzalez, S. V. Filho, “Medições Individuais de Amostras de Cargas”. Relatório Técnico. UFMG, Janeiro de 2005.
- [5] I. A. Pires, M. L. y Gonzalez, S. V. Filho, “Medições das Cargas em Alimentadores Típicos”. Relatório Técnico. UFMG, Maio de 2005.
- [6] M. L. y Gonzalez, I. A. Pires, S. R. Silva, P. C. A. de Almeida, “Correntes Harmônicas em aparelhos eletrodomésticos”, apresentado no VI SBQEE, Brasil, set/2005.
- [7] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE Standard 519-1992, Apr. 1993.