

Efeitos das Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Sistemas de Distribuição

J. E. L. Almeida, P. M. Silveira, J. P. G. Abreu

**Grupo de Qualidade da Energia Elétrica, Departamento de Eng. Elétrica,
Universidade Federal de Itajubá**

R. Prina, S. G. Carvalho

Light Serviços de Eletricidade S. A.

E-mail: jose@iee.efei.br

Palavras-chave: Qualidade da Energia Elétrica, Distorção harmônica, lâmpadas fluorescentes compactas, cargas não lineares, desequilíbrio

Resumo: O artigo apresenta resultados de uma pesquisa que avalia os impactos da utilização em larga escala de lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) na Qualidade da Energia Elétrica (QEE) de um sistema de distribuição

Sabe-se que nas residências existe uma composição de cargas lineares e cargas não-lineares que, associadas das mais diversas formas e quantidades, irão influenciar o perfil de funcionamento de um sistema de distribuição, incluindo a presença dos harmônicos de corrente e de tensão. Assim, o uso crescente das LFCs é um dos fatores de preocupação.

Após medições laboratoriais, simulações computacionais foram desenvolvidas buscando-se o comportamento das distorções harmônicas de tensão e corrente, incluindo a corrente de neutro, os fatores de potência e as diversas potências. Uma rede de distribuição alimentando condomínios residenciais tem sido modelada e simulada, sendo que cargas típicas e hábitos de consumo foram considerados.

Como as cargas possuem perfis totalmente aleatórios, um programa utilizando técnicas estatísticas (método de Monte Carlo) foi desenvolvido. Conseqüentemente, neste caso, o desequilíbrio das cargas acaba sendo contemplado.

As distorções dos sinais aumentam com o aumento das cargas não-lineares. Em muitos casos os efeitos de tais distorções mostram-se irrelevantes frente à redução da corrente eficaz, no entanto, a corrente de neutro pode atingir 140% ou mais da corrente eficaz de fase.

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

I. INTRODUÇÃO

Este trabalho está voltado para a análise dos reais problemas que irão impactar na Qualidade da Energia Elétrica, como resultado da utilização em larga escala das lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) em combinação com outras cargas não lineares, tais como televisores, computadores, lâmpadas fluorescentes tubulares (LFTs), microondas, aparelhos de som, etc.. Estas cargas não lineares poderão ou não estar associadas às cargas lineares como chuveiro convencional, ferro elétrico, lâmpadas incandescentes (LIs) e outras de uso mais constantes como geladeiras, *freezers* e ar condicionado. Todas estas cargas, associadas das mais diferentes formas e em diferentes quantidades produzem correntes harmônicas, podendo distorcer a forma de onda da tensão do sistema supridor¹ e provocar, em maior ou menor escala, diferentes efeitos. Dentre os efeitos estão: aumento da amplitude da corrente distorcida que é absorvida da rede, redução do fator de potência verdadeiro, ressonância, aumento da corrente de neutro, perdas adicionais em transformadores, máquinas, cabos e capacitores, atuação incorreta de relés de proteção, erros em medidores de energia, interferência em circuitos de controle, de comunicação e telefonia. Trabalhos anteriores^{2,3} apresentam como resultados muitos destes efeitos citados, porém enfocam sistemas equilibrados e não consideram a aleatoriedade de funcionamento das mesmas.

Estas situações, desequilíbrio e aleatoriedade das cargas, que também foram analisadas através de simulações computacionais utilizando-se o *software* Matlab[®] e seu aplicativo para modelagem e simulação, o *Simulink*[®]. Um programa computacional foi desenvolvido para se levar em conta a aleatoriedade do funcionamento das cargas residenciais. Modelos de redes trifásicas, com opções de alterar a configuração e a quantidade de cargas com base em curvas de consumo, também foram elaborados. Foram utilizados dados de pesquisas^{4,5} para se obter modelos de residências próximas do real, com as suas respectivas cargas típicas, de modo que os resultados retratassem com mais fidelidade a situação do sistema elétrico de distribuição.

O que motivou este trabalho é o constante crescimento, nos últimos anos, da instalação de LFCs, em substituição às LIs. Associado a este fato encontra-se o crescimento do consumo de eletroeletrônicos, com características não lineares, em residências, áreas comerciais e industriais. No caso das LFCs, o Brasil não possui ainda uma legislação eficaz que exija menores índices de poluição harmônica, de modo que lâmpadas compactas que são utilizadas no país, apresentam baixos fatores de potência e elevados níveis de distorção harmônica total de corrente (*DHTi*).

Neste artigo serão apresentados primeiramente, os resultados de medições laboratoriais as quais tiveram como objetivo levantar diversas características elétricas das LFCs, bem como de uma ampla variedade de eletroeletrônicos e, em seguida, a elaboração e validação de modelos computacionais destes dispositivos. Na seqüência apresenta-se uma descrição do sistema base simulado e da metodologia de simulação. Uma breve apresentação de alguns conceitos sobre potências e fatores de

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

potência é necessária para que os resultados de pesquisa e análise dos mesmos sejam então considerados. Finalmente, as conclusões finais seguidas das referências bibliográficas fazem parte do texto.

II. MEDIÇÕES LABORATORIAIS

A primeira atividade deste trabalho foi fazer um levantamento das características elétricas de diferentes marcas de LFCs, bem como de outras cargas não lineares. Para facilitar tal tarefa uma pequena bancada de testes foi instalada no laboratório do departamento de eletrotécnica da Universidade Federal de Itajubá.

Através de diversas medições obteve-se, para cada tipo de carga (LFCs, TVs, computadores, LFTs, geladeiras, etc.), os valores de potência ativa (P), não ativa de deslocamento ou “reativa” (Q) e aparente (S), fator de potência verdadeiro (FP) e fator de deslocamento ($\cos \phi$), corrente eficaz, distorções harmônicas totais de corrente ($DHTi$), de tensão ($DHTv$) e os espectros harmônicos de tensão e de corrente (amplitude e fase) até 49ª ordem. Para isso, foram utilizados os registradores de grandezas elétricas PM300 da *Voltech Instruments* Ltda. e o MARH-21-992 da RMS. Todos os dados levantados em laboratório foram guardados em um banco de dados.

A título de exemplo, a tabela 1 informa os principais dados que são obtidos em uma medição. No caso, trata-se de uma LFC marca Osram de 23 W, 127 V. Já a figura 1 mostra o espectro de amplitude da corrente desta LFC. Por sua vez tabela 2, contém dados de valores médios de distorção harmônica e fator de potência, obtidos por medição, para diferentes marcas de LFCs.

TABELA 1 – MEDIÇÃO DE LFC OSRAM 23 W

Grandeza	Intensidade
Watts (RMS)	25.48 [W]
Watts (Fund.)	25.95 [W]
VA (RMS)	44.25 [VA]
VA (Fund.)	26.69 [VA]
VAr (RMS)	36.17 [VAr]
VAr (Fund.)	-6.240 [VAr]
Volts (RMS)	128.00 [V]
Volts (Fund.)	127.95 [V]
Amps (RMS)	345.7 [mA]
Amps (Fund.)	208.6 [mA]
Power Factor	0.576
Cos Phi (Phase)	0.972
Volts DHT	2.899%
Amps DHT	132.72%
Frequency	59.96 Hz

Observa-se na tabela 1 que a tensão de alimentação da rede no momento do registro das grandezas, para o exemplo ilustrado, já apresentava uma distorção harmônica total de 2,899%. Chama-se atenção para o fato de que valores da ordem de 2% a 4% têm sido comuns em nossos dias, em alguns momentos ultrapassando 5%, nas redes de distribuição de baixa tensão, já denotando uma certa poluição como consequência, dentre outros fatores, das cargas não lineares presentes no sistema.

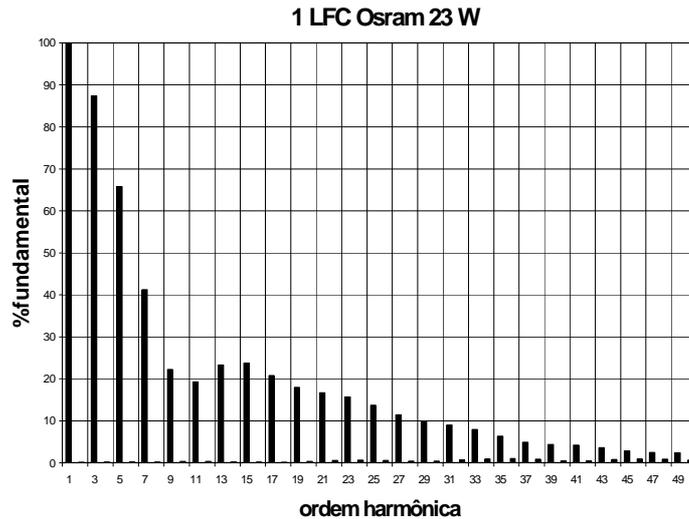


FIGURA 1 – ESPECTRO DE AMPLITUDE DE CORRENTE - LFC OSRAM 23 W

TABELA 2 – CARACTERÍSTICAS DAS LFCS UTILIZADAS (127 V)

Fabricante	Potência (W)	DHTi (%)	FP
Osram	23	132,72	0,58
FLC	25 (220 V)	168,27	0,50
GE 2700 K	15	138,48	0,59
Philips	15	116,79	0,60
Philips	20	130,41	0,56
FLC	25	111,75	0,64
GE	20	123,24	0,59
Empalux	15	102,29	0,62
Empalux	20	126,42	0,58
GE 4100 K	15	122,24	0,58

III. MODELAGEM E VALIDAÇÃO

De posse dos dados obtidos nas medições laboratoriais, partiu-se para a modelagem das diversas cargas residenciais. Estas foram representadas por um ramo $P + jQ$ da componente fundamental e, para representar a não linearidade das cargas, foram utilizadas fontes de corrente senoidais ideais, para cada componente harmônica relevante, sendo que as componentes pares, por possuírem valores muito pequenos, foram desprezadas, conforme figura 2, a seguir. Para a modelagem das cargas, foi utilizado o software *Simulink* (Matlab 6.5), que possui em sua biblioteca *Power Systems Blockset* modelos de cabos, ramais, cargas, fontes de corrente e tensão e transformadores. As simulações foram realizadas no domínio do tempo considerando o sistema em regime permanente.

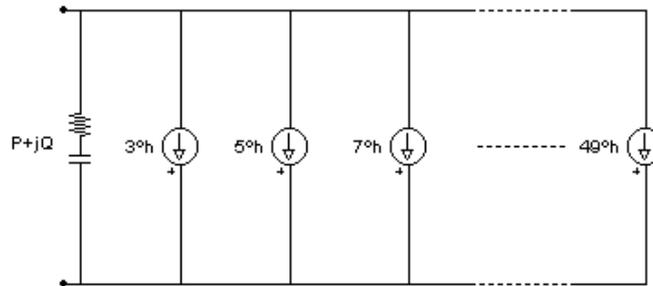


FIGURA 2 – MODELO DE CARGA NÃO LINEAR

A tabela 3 mostra os resultados da modelagem da LFC Osram 23 W, cujos dados reais foram mostrados na tabela 1. Comparando-se os valores da medição e da simulação, verificam-se pequenos erros da ordem de 1 a 2%, o que é considerado aceitável. As formas de onda são praticamente as mesmas.

TABELA 3 – RESULTADO DE SIMULAÇÃO – OSRAM 23 W

Grandeza	Valores
Potência Ativa (W)	25,8
Potência Reativa (Var)	-5,975
Potencia Aparente (VA)	44,32
Fator de potência	0,5843
Tensão RMS (V)	128
Corrente RMS (mA)	346,3
<i>DHT_v</i> (%)	2,923
<i>DHT_i</i> (%)	129,4

IV. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

As simulações, cujos resultados são apresentados no decorrer deste artigo, tiveram como base o diagrama elétrico mostrado na figura 3. Os dados relativos às impedâncias dos cabos e dos transformadores foram obtidos de um sistema real da Light - Rio, constituindo-se de um circuito radial alimentando um condomínio predial residencial. As características das cargas existentes em cada apartamento foram escolhidas tomando como base as Pesquisas de Posse de Eletrodomésticos e Hábitos de Consumo, realizadas pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL sob a coordenação da ELETROBRÁS^{4,5}.

O sistema elétrico foi representado por sua impedância de curto-circuito em 13,8 kV. Este sistema alimenta 6 transformadores de distribuição em conexão delta-estrela DY11 de 225 kVA, 13,8/0,22-0,127 kV, e cada transformador alimenta 90 apartamentos, totalizando 540.

As cargas consideradas para cada apartamento foram: 8 LIs ou 8LFCs, 1 chuveiro, 1 ferro elétrico, 1 microondas, 1 geladeira, 2 LFTs, 1 aparelho de som, 1 máquina de lavar roupa e 1 TV 20”.

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

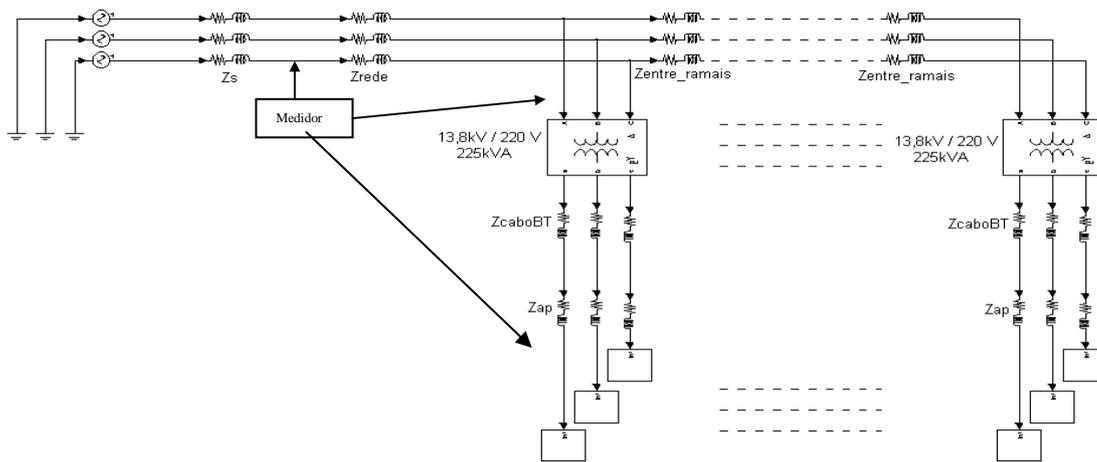


FIGURA 3 – SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

Estes dispositivos estão presentes em uma residência do tipo 2, alimentada por uma única fase, a qual representa 72% dos consumidores na região sul-sudeste^{4,5}. Outros dois modelos de residências, com diferentes configurações de cargas também são utilizadas na pesquisa.

V. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

Conhecer, em um determinado instante ou intervalo de tempo, a quantidade de carga em funcionamento de um sistema de distribuição, as suas respectivas distribuições nas fases do sistema e o tempo de funcionamento de cada uma delas é uma tarefa demasiadamente complexa, quiçá impossível.

Visando contribuir para a elaboração de um modelo mais consistente, cuja dinâmica se aproxime de um sistema real, foi desenvolvido um programa que simula o comportamento das cargas ao longo do dia, levando em conta a aleatoriedade do funcionamento das mesmas. Este programa é baseado no Método de Monte Carlo, o qual utiliza séries históricas denominadas de curvas de densidade de probabilidades do evento a ser analisado, para então gerar novas séries como funções de distribuição de probabilidades acumulada. Estas servirão como parâmetros que irão provocar os eventos desejados: ligar ou o desligar eletroeletrônicos em cada residência. As curvas de densidade de probabilidades são as curvas de carga de cada eletroeletrônico doméstico. Estas curvas foram também obtidas das citadas pesquisas^{4,5}. Em outras palavras, o programa concebido irá executar o acionamento das cargas de um sistema, em um determinado horário escolhido. Esses acionamentos são feitos de modo aleatório, porém obedecendo às curvas que retratam o comportamento individual de cada equipamento ao longo do dia. Uma vez o programa de aleatoriedade tenha sido rodado, para aquele instante ou período escolhido pelo usuário, todas as cargas de todas as residências estarão configuradas (o tipo, o estado, a fase e o tempo de permanência), podendo-se em seguida rodar o simulador (*simulink*). O tempo de simulação é previamente ajustado.

O esquema de simulação está concebido com duas importantes características: (i) É possível escolher o percentual/tipo de lâmpada a ser usada, ou seja, 100% LI, 50% LI e 50% LFC, 100% LFC ou outro

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

percentual desejado. Com esta escolha, poder-se-á comparar resultados da substituição das LIs pelas LFC. (ii) É possível fazer um levantamento do perfil elétrico do sistema ao longo do dia, contemplando, por exemplo, as distorções de corrente e de tensão, para análise do comportamento diário.

VI. CONCEITOS

Em um sistema elétrico trifásico simétrico, tem-se a seguinte equação para as potências aparente vetorial (S_v), ativa (P), reativa (Q) e de distorção (D):

$$S_v = \sqrt{\left(\sum_k P_k\right)^2 + \left(\sum_k Q_k\right)^2 + \left(\sum_k D_k\right)^2} \quad (1)$$

Sendo $k = 1, 2, 3$ (3 fases)

Se as cargas forem lineares, a potência de distorção é nula em cada fase. Neste caso tem-se:

$$S_v = \sqrt{\left(\sum_k P_k\right)^2 + \left(\sum_k Q_k\right)^2} \quad (2)$$

As cargas não lineares, que absorvem correntes harmônicas, conduzem ao conceito de potência de distorção (D).

Dentre as várias proposições para cálculo da potência de distorção (D), a fórmula de Budeanu modificada, tem conseguido resultados satisfatórios e tem sido bastante utilizada⁸. A expressão de Budeanu é resultante do produto cruzado entre os harmônicos de tensão pelos de corrente de mesmas fases⁸ e permite, obter diretamente a potência de distorção D .

$$D = \sum_{k=A,B,C} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} V_{km}^2 I_{kn}^2 + V_{kn}^2 I_{km}^2 - 2 \times V_{km} I_{kn} V_{kn} I_{km} \cos(\gamma_{km} - \gamma_{kn})} \quad (3)$$

Sendo que γ_m é o ângulo formado entre a tensão e a corrente da harmônica de ordem m e γ_n é o ângulo formado entre a tensão e a corrente da harmônica de ordem n :

$$\begin{aligned} \gamma_m &= \phi_m - \varphi_m \\ \gamma_n &= \phi_n - \varphi_n \end{aligned} \quad (4)$$

Os sistemas reais convivem com um certo grau de assimetria de tensão e corrente devido, principalmente, às cargas monofásicas distribuídas nas fases, que têm características de funcionamento aleatório. Para se considerar a assimetria, há que se alterar o conceito do cálculo de potência aparente. Neste caso S passa a ser denominada de potência aparente do sistema⁹ (S_s), dada por:

$$S_s = V_{rms_{3\phi}} \cdot I_{rms_{3\phi}} = \sqrt{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2} \cdot \sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2} \quad (5)$$

Sendo:

$V_{rms_{3\phi}}$ - tensão eficaz trifásica

$I_{rms_{3\phi}}$ - corrente eficaz trifásica

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

$V_a, V_b, V_c, I_a, I_b, I_c$ – tensões eficazes de fase e correntes eficazes de linha

Obviamente, nesta situação a expressão da equação 1 não fecha e passa a ser necessária um novo conceito de potência chamada de potência não ativa de assimetria ou de desequilíbrio (A). É o resultado do produto cruzado dos sinais de tensão e corrente (fundamental e harmônicas) de fases diferentes⁸.

Assim, a potência aparente do sistema pode também ser representada pela equação 6.

$$s_s = \sqrt{\left(\sum_k P_k\right)^2 + \left(\sum_k Q_k\right)^2 + \left(\sum_k D_k\right)^2 + \sum_h A_h^2} \quad (6)$$

Onde h é o índice de cada harmônica presente e $k = 1,2,3$ (3 fases)

O fator de potência tem sido historicamente abordado como sendo a eficiência em se realizar um trabalho, com uma potência ativa “ P ”, a partir de uma certa ocupação do sistema elétrico traduzida como potência aparente “ S ”.

O fator de potência (FP) é universalmente conhecido sendo:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (7)$$

No caso de cargas lineares e equilibradas, coincide com o $\cos\phi$ (ϕ é o ângulo entre tensão e corrente de cada fase). Porém, na existência de cargas não lineares, haverá o aparecimento da potência de distorção e logo ter-se-á não mais um triângulo de potências mas sim, um tetraedro de potências¹. Neste caso, o fator de potência dado pela equação 7, que pode ser denominado de fator de potência vetorial (FP_v), não mais coincidirá com o $\cos\phi$. Este por sua vez, passa a ser denominado de fator de deslocamento (FP_d).

Finalmente, em sistemas trifásicos assimétricos, utilizando-se o conceito de potência aparente do sistema (S_s), o fator de potência calculado por (7), agora denominado de fator de potência do sistema (FP_s), resultará em um valor menor quando comparado com o fator de potência calculado utilizando-se S_v , ou seja:

$FP_v > FP_s$ em sistemas trifásicos desequilibrados.

VII. RESULTADOS

São muitos os resultados das simulações. Assim, para efeito de apresentação neste artigo, foram escolhidos resultados em um período de grande concentração de cargas não lineares. Mais precisamente os resultados a seguir referem-se ao horário das 21:30 h.

A tabela 4 apresenta, para o horário citado, a distribuição das cargas nas três fases do primeiro transformador, nos casos 100% LI, 50% LFC-50% LI e 100% LFC. Pode-se observar o efeito da aleatoriedade das cargas. Isto, a princípio, poderia comprometer a comparação entre os resultados de cada caso, porém, como é isto que ocorre na prática, o modo de análise seguiu esta tendência, sem perder a consistência dos resultados.

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

TABELA 4 – CARGAS LIGADAS – 21:30 H – TRANSFORMADOR 1

Cargas/ fases	100% LI			50% LI - 50% LFC			100% LFC		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
Ferro	0	0	3	2	0	1	1	0	0
TV	20	29	14	18	22	26	18	25	22
microondas	1	0	1	0	0	3	1	0	0
Chuveiro	0	0	0	0	0	0	1	2	0
Geladeira	15	10	8	8	17	15	12	8	16
Radio	1	3	5	3	4	2	3	5	2
LFT	23	32	39	25	34	33	19	19	23
L. Roupa	0	0	0	0	1	0	0	0	0
LI	159	158	168	68	75	71	0	0	0
LFC	0	0	0	71	83	89	138	165	155

Por sua vez a tabela 5 mostra os valores eficazes das tensões de fase (V_{rms}), correntes de linha (I_{rms}), corrente de neutro (I_n) e as distorções totais de tensão e de corrente em cada fase. Além disso, a tabela 6 apresenta a distribuição das potências trifásicas envolvidas e os valores dos fatores de potência verdadeiros na baixa tensão (BT) e na média tensão, medidos no primário do primeiro transformador (MTt) e no alimentador geral da rede de 13,8 kV (MTg), conforme indicado na figura 2.

TABELA 5 – VALORES EFICAZES DE TENSÃO E CORRENTE, CORRENTE DE NEUTRO E DISTORÇÕES DE TENSÃO E CORRENTE – 21:30 H

Distr. carga		V_{rms} [V]			I_{rms} [A]			I_n [A]	DTH_i (%)			DHT_v (%)		
		BT	MT	MTt	BT	MT	MTt		BT	MT	MTt	BT	MT	MTt
100% LI	a	126,0	7951	7951	121,6	2,2	13,8	31,9	8,1	3,3	3,6	0,30	0,05	0,05
	b	126,1	7952	7952	108,7	1,8	13,3		8,9	4,5	3,7	0,35	0,05	0,05
	c	125,9	7952	7952	142,5	2,0	14,0		6,0	3,8	3,7	0,25	0,06	0,05
50 % LI	a	126,3	7952	7951	85,5	1,7	10,7	76,6	18,0	12,3	8,6	0,55	0,10	0,09
	b	126,2	7953	7954	92,4	1,5	10,9		19,7	10,7	8,8	0,65	0,10	0,10
	c	126,0	7952	7953	134,4	1,8	11,8		22,8	11,9	8,5	0,83	0,10	0,10
100% LFC	a	126,4	7952	7953	73,0	1,0	8,3	90,8	40,1	26,6	20,1	1,26	0,19	0,18
	b	126,2	7954	7954	120,2	1,5	8,6		26,4	15,4	18,5	1,50	0,18	0,17
	c	126,4	7953	7953	63,2	1,5	9,5		50,7	18,7	19,0	1,42	0,19	0,18

TABELA 6 – DISTRIBUIÇÃO DAS POTÊNCIAS TRIFÁSICAS E FATOR DE POTÊNCIA – 21:30 H

Distr. carga	P [kW]			Q [kVAr]			D [kVA]			A [kVA]			S [kVA]			FP_s		
	BT	MTt	MTg	BT	MTt	MTg	BT	MTt	MTg	BT	MTt	MTg	BT	MTt	MTg	BT	MTt	MTg
100% LI	46,6	47,2	322	4,3	6,9	52,1	3,6	1,8	11,9	5,7	5,0	9,7	47,3	48,0	327	0,99	0,98	0,99
50% LI	38,2	38,7	261	4,5	7,0	37,2	8,0	4,6	22,4	8,1	4,4	16,0	40,2	39,9	265	0,95	0,97	0,99
100% LFC	30,1	30,5	204	2,8	5,1	31,4	10,9	5,9	38,5	10,2	7,4	16,3	33,7	32,4	210	0,89	0,94	0,97

VIII. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Alguns resultados das simulações são avaliados a seguir:

1) Pela tabela 5, como se esperava, os desequilíbrios das correntes são acentuados enquanto que das tensões quase inexistentes. Por outro lado, estes desequilíbrios são sensivelmente atenuados quando se

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

chega à entrada do alimentador. Na BT, no caso 100% LFC, o desequilíbrio da corrente é de 24,2% e da tensão é de 0,175%. Já na MTg, tem-se o desequilíbrio de 7,85% (corrente) e 0,017% (tensão). Como se sabe, a atenuação do desequilíbrio de corrente na MTg se deve à distribuição uniforme da alimentação de energia das residências em cada fase, bem como à própria aleatoriedade do funcionamento das cargas, cuja função se aproxima de uma distribuição uniforme à medida que o conjunto de amostras aumenta.

Uma outra constatação é o acréscimo das distorções de corrente e de tensão, tanto na MT como na BT, entre os casos 100% LI e 100% LFC. Este acréscimo tem seu reflexo no aumento da potência de distorção (D), como pode ser notado na tabela 6. Contudo, é importante salientar que mesmo com o acréscimo das potências de distorção (D) e de assimetria (A), a substituição das LIs por LFCs, diminui o carregamento do sistema elétrico, o que pode ser comprovado pela redução no consumo das potências ativa (46,59 kW para 30,08 kW) e aparente (47,28 kVA para 33,68 kVA) na BT. Em termos percentuais, houve um aumento de 205% da potência de distorção, 79,4% da potência de assimetria e reduções de 29% na potência aparente e 35,4% na potência ativa. Do mesmo modo, observa-se na tabela 5 a redução da corrente na BT e na MT com a substituição das LIs de 60 W por LFCs de 20 W.

Depreende-se, neste caso, que o acréscimo de corrente devido à distorção harmônica é irrelevante frente à redução total da corrente eficaz.

2) A distorção total de tensão, tanto na BT como na MT, se manteve em patamares adequados e bastante reduzidos, atendendo aos requisitos da IEEE-519⁶ que a limita em 5% para tensões abaixo de 69 kV. Cabe mencionar que tal resultado deve-se a um sistema forte, com alta capacidade de curto-circuito. Simulações mostraram que, com a redução da capacidade de curto-circuito do sistema supridor, a distorção de tensão tende a crescer, podendo até atingir os limites recomendados.

3) Excedentes de potência não ativa em níveis residenciais não são taxados (ao menos ainda) pelas companhias de energia elétrica. Mesmo assim, o fator de potência é considerado como um dos índices de avaliação da taxa de ocupação de um alimentador. No exemplo em questão, observa-se na tabela 6, que o *fator de potência verdadeiro* ficou abaixo de 0,92 na BT para o caso 100% de LFC. Embora, neste exemplo, não se tem uma situação preocupante, em outras circunstâncias com grande carregamento de cargas não lineares (p.ex. edifícios comerciais com grande número de computadores) tal elemento pode se tornar um problema para as concessionárias.

4) A maioria das cargas não lineares utilizadas, como as LFCs, apresenta correntes com elevados valores de 3º harmônico. Seus múltiplos (9º, 15º, 21º, etc.) também estarão presentes no espectro, como pode ser visto na figura 1. Tendo-se um transformador delta-estrela alimentando as cargas em questão, estes harmônicos deveriam ser aprisionados no delta, diminuindo bastante a DHT_i na MT. De fato isto ocorre, conforme mostra a tabela 5, porém resíduos do 3º harmônico e de seus múltiplos estarão presentes no lado de MT. Isto está perfeitamente coerente, pois, mesmo sendo a fonte senoidal, as cargas não lineares estão desequilibradas, gerando harmônicos desequilibrados na rede trifásica. As figuras 4 e 5 mostram as formas de onda de corrente, onde se pode observar os efeitos da filtragem das

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

componentes homopolares (seqüência 0) pelo transformador DY, tornando as correntes do lado MT mais alisadas.

É importante comentar, que a conexão delta-estrela do transformador utilizado provoca um deslocamento angular de $+30^\circ$ nas componentes de seqüência negativa (5^a , 11^a) e -30° nas componentes de seqüência positiva (1^a , 7^a , 13^a), da BT para MT, modificando portanto o espectro de fase dos sinais na média tensão.

5) Uma constatação de grande importância nas diversas simulações realizadas, é o aumento da corrente de neutro. A tabela 5 apresenta resultados desse aumento à medida que LIs são substituídas por LFCs. No caso 100% LI, a corrente de neutro corresponde em média a 25,6% das correntes eficazes de fase, ao passo que no caso 100% LFC, ela já representa 106,2%, mostrando a necessidade de um sobre-dimensionamento do condutor neutro. Dentre os problemas causados por tais correntes está o mau funcionamento de equipamentos eletrônicos sensíveis e a operação indevida de relés de neutro na MT.

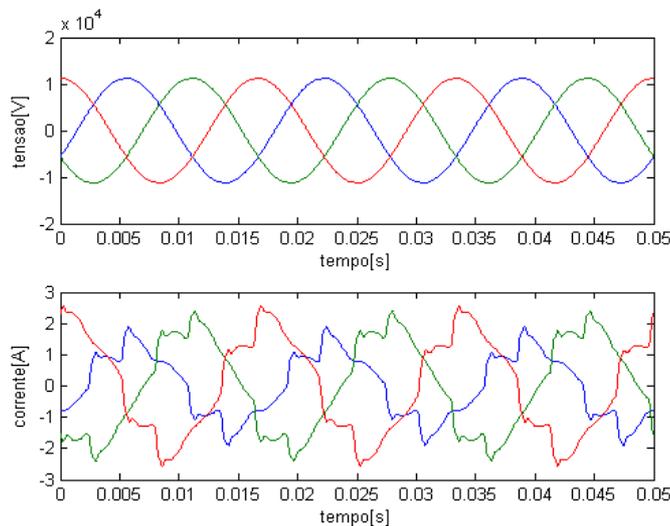


FIGURA 4 - FORMAS DE ONDAS – 100% LFC – 13,8 kV

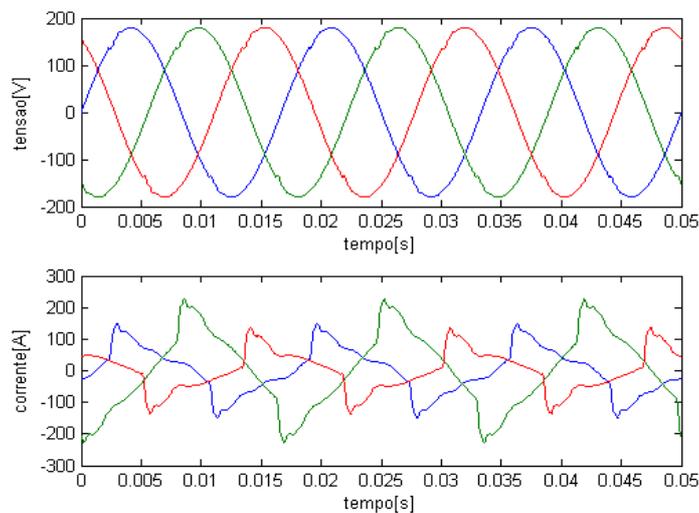


FIGURA 5 - FORMAS DE ONDAS – 100% LFC – 127 V

A título de ilustração a figura 6 apresenta a forma de onda da corrente de neutro no caso 100% LFC.

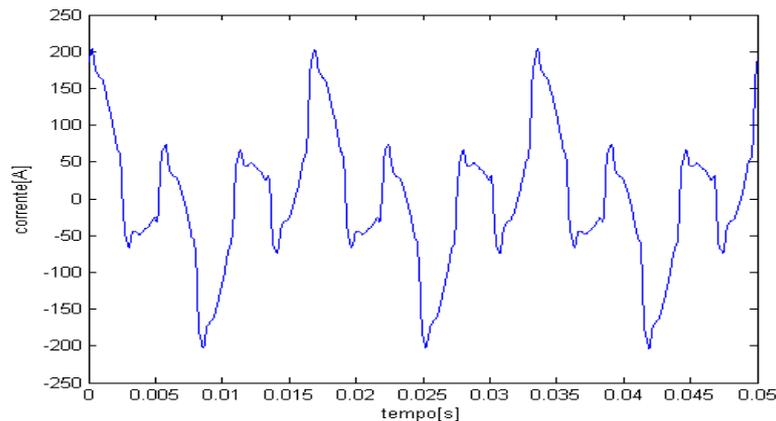


FIGURA 6 - FORMA DE ONDA – CORRENTE DE NEUTRO – 100% LFC – 21:30 H

6) Outra constatação diz respeito às componentes fundamentais de corrente das cargas residenciais: estas podem ser indutivas ou capacitivas. Enquanto geladeiras, máquinas de lavar, micro-ondas apresentam características indutivas, outras cargas como LFCs, televisores, videocassetes e *notebooks* apresentam características capacitivas. Por sua vez, as LFTs, podem ser indutivas ou capacitivas, o que dependerá do reator ser do tipo eletromagnético ou eletrônico.

Sendo assim, dependendo do arranjo das cargas e de suas potências nominais, poderá ocorrer melhoria do fator de potência mesmo com o acréscimo de cargas não lineares. Resultados de simulações vêm mostrando tal realidade. A tabela 7 a seguir ilustra esta variação sendo que em um primeiro momento tem-se apenas TVs distribuídas nas 3 fases. Em seguida são agregadas outras cargas, como apresenta a referida tabela.

TABELA 7 – FATORES DE POTÊNCIA RESULTANTES DE AGREGAÇÃO DE CARGAS NA BAIXA TENSÃO ÀS 21:00 H

Cargas – 3 fases - BT	FP_d	FP_v	FP_s
TVs	0,997	0,736	0,734
TVs + geladeiras (gel)	0,794	0,772	0,764
TVs + gel + LFC	0,919	0,837	0,823
TVs + gel + LFC + Ap.Som	0,929	0,841	0,823
TVs + gel + LFC + Ap.Som + LFTs	0,972	0,905	0,897
TVs + gel + LFC + Ap.Som + LFTs + microondas	0,970	0,922	0,900

7) Diversas outras simulações, em outros horários ao longo do dia, mostraram que a inclusão de cargas lineares, tais como: chuveiros (convencionais), LIs e ferros elétricos, atenuam sensivelmente os efeitos de distorção das cargas não lineares. Nestes casos, o percentual de acréscimo de potência ativa passa a ser bem maior que o percentual de acréscimo da potência aparente.

SENDI 2004
XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA
IX. CONCLUSÕES

O enfoque deste trabalho, o qual está ainda em andamento, é avaliar o reflexo da penetração de lâmpadas fluorescentes compactas em relação às lâmpadas incandescentes em consumidores de baixa tensão de um típico sistema de distribuição já composto por cargas lineares e não lineares. Levando-se em consideração a aleatoriedade de funcionamento das cargas, algumas conclusões podem ser resumidas :

(i) O aumento do número de LFCs tem provocado aumento das distorções de tensão e de corrente, queda do fator de potência, aumento da corrente de neutro, redução das potências ativa e aparente e aumento da potência de distorção (D). O efeito deste aumento das distorções de tensão e de corrente na potência de assimetria (A) dependerá de possíveis desequilíbrios das componentes harmônicas. Pondera-se aqui que o efeito na DHT_v está diretamente relacionado à capacidade de curto-circuito do sistema supridor. Quanto mais fraco o sistema, maior o aumento da DHT_v devido às cargas não lineares.

(ii) Por outro lado, o aumento da corrente elétrica devido à distorção harmônica tem sido “ocultado” pela forte redução da corrente fundamental, a qual causa alívio no sistema elétrico.

(iii) Três fatores podem contribuir para que o aumento das cargas não lineares nas residências não seja tão prejudicial para o sistema elétrico:

(1^o) As diferentes características das cargas, indutivas ou capacitivas, cujas combinações poderão conduzir a uma redução da potência não ativa de deslocamento (Q) melhorando assim o fator de potência.

(2^o) A própria aleatoriedade do funcionamento das cargas irá causar diferentes combinações entre as lineares e não lineares, amenizando as distorções harmônicas e seus efeitos, elevando o fator de potência e reduzindo o desequilíbrio a montante, onde o universo de consumidores passa a ser maior.

(3^o) A diversidade dos ângulos de fase dos diferentes componentes harmônicos dos diversos tipos de cargas não lineares poderá ocasionar o cancelamento de correntes harmônicas, conduzindo a uma redução da distorção total⁷.

Mesmo considerando todas estas possíveis eventualidades, os autores chamam a atenção de que deve haver uma preocupação real com o crescimento da corrente de neutro devido às cargas não lineares, principalmente em sistemas já existentes.

A tabela 8 mostra o resultado de medições simultâneas realizadas pela Light-Rio na entrada de um apartamento, no quadro geral do prédio e na saída de 13,8 kV do transformador de 10 MVA da subestação onde pode-se observar as potências e os diversos fatores de potências. Como esperado, tanto a distorção harmônica como o desequilíbrio se atenuam à medida que se aproxima da fonte de alimentação. Nestas medições, não se tem o conhecimento detalhado das cargas em funcionamento. Como apontam os resultados das simulações, a maciça substituição das LIs por LFCs aliada ao

XVI SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

aumento da utilização de equipamentos eletrônicos com fontes chaveadas, poderá apresentar um quadro de aumento da potência de distorção e redução do fator de potência verdadeiro.

TABELA 8 – GRANDEZAS ELÉTRICAS DE CASO REAL ÀS 11:44 H DE 06/02/04

Local	P [kVA]	Q [kVAr]	D [kVA]	A [kVA]	S _s [kVA]	FP _d	FP _v	FP _s
Apto	0,091	-0.063	0,042	0,053	0,129	0,822	0,769	0,700
Prédio	5,472	3,623	0,582	1,380	6,732	0,834	0,830	0,813
SE	2.319	1.145	101,6	47,4	2.589	0,897	0,896	0,896

Finalmente, os autores devem mencionar que para o consumidor residencial, que hoje paga apenas potência ativa, a substituição das LIs por LFCs representa um ganho. Considerando-se, por exemplo, 8 lâmpadas com 2 horas de funcionamento por dia, o consumidor terá o seu investimento recuperado após aproximadamente um ano. Para a concessionária de energia elétrica, o reflexo virá no faturamento o qual será reduzido, porém o alívio na potência do sistema poderá postergar investimentos ou mesmo ser utilizado com novos consumidores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a importante contribuição dos alunos Marcel Parentoni, Francisco Galvão e Yuri Cândido do 5º ano de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Itajubá.

X. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R.C. Dugan, M.F. MsGranaghan, S. Santoso, H.W. Beaty, *Electrical Power System Quality*, McGraw Hill, USA, Second Edition, 2002, p.209-220.
- [2] A.E. Emanuel, T.M. Gentile, D.J. Pileggi, C.E. Root, E.M. Gulachenski “The effect of modern compact fluorescents lights on voltage distortion”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, Nº 3, July 1993, pp. 1451-1457.
- [3] J.C. Oliveira, M.D. Teixeira, C.A. Medeiros, “A power quality comparative analysis related to electronic and electromagnetic fluorescent ballast operation”, *10th International Conference on Harmonics and Quality Power ICHQP*, 2002, Rio de Janeiro, RJ.
- [4] Eletrobrás-Procel. “*Pesquisa de posse de eletrodomésticos e de hábitos de consumo*” Projeto 5.2.3, 1989.
- [5] Eletrobrás-Procel. “*Pesquisa de posse de eletrodomésticos e de hábitos de consumo*”, CEMIG – MG, 2000.
- [6] IEEE Std. 519. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Standart 519, New York, 1993
- [7] W. M. Grady, A. Mansoor. “Analysis of Compensation Factors Influencing the Net Harmonic Current Produced by Single-Phase Non-Linear Loads”, *8th Conference on Harmonic and Quality Power ICHQP98*, Athens, Greece, October,1998.
- [8] - Yildirim, D. and Fuchs, E.F., “Commentary on Various Formulations of Distortion Power D”, *IEEE Power Engineering Review*, volume 19, number 5, pp. 50-52, May 1999.
- [9] *Power System Quality Assessment* – Ed. John Wiley & Sons, J. Arrillaga, N. R. Watson, S. Chen, 2000.