

AVALIAÇÃO DO AGRUPAMENTO DE LÂMPADAS FLUORESCENTES COMPACTAS PARA REPRESENTAÇÕES DE EQUIVALENTES EM SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS DE FLUXO HARMÔNICO

Márcio Melquíades Silva¹, Manuel Losada y Gonzalez²

¹Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG e Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais,
E-mail: marcioms@deii.cefetmg.br

²Universidade Federal de Minas Federal, Escola de Engenharia, Departamento de Engenharia Elétrica, Belo Horizonte – MG,
E-mail: Manuel@cpdee.ufmg.br

Resumo - Neste artigo são realizadas análises das distorções harmônicas de corrente de lâmpadas fluorescentes compactas de diversas potências, observando-se a amplitude e ângulo de fase dos harmônicos mais significativos. Através de resultados das medições, analisa-se a possibilidade do agrupamento destas cargas para efeitos de simulação de harmônicos nas instalações. Os resultados mostram que lâmpadas de potências diferentes podem gerar ângulos também diferentes resultando na diminuição da distorção harmônica total de corrente. É mostrado também que a distorção harmônica de tensão influencia a distorção harmônica de corrente nestas cargas.

Palavras-Chave - Cargas eletrônicas, harmônicos na rede elétrica, lâmpadas fluorescentes compactas, simulação computacional.

ASSESSMENT OF COMPACT FLUORESCENT LAMPS GROUPING FOR REPRESENTATIONS OF EQUIVALENTS IN COMPUTATIONAL SIMULATION OF HARMONIC POWER FLOW

Abstract - The aim of this paper is to study the behaviour of compact fluorescent lamps of several powers, observing the amplitude of the harmonic and the phase angles. Through the results of measurements, it assesses the lamps grouping possibilities for simulation effects of harmonic in the facilities. The results show that lamps of different powers can also generate different angles resulting in reduction of total harmonic current distortion. It is also shown that the total harmonic voltage distortion influences the total harmonic current distortion of the loads.

Keywords – Compact fluorescent lamps, computational simulation, electronic loads, harmonic in power system.

NOMENCLATURA

LFC	Lâmpada fluorescente compacta.
DHT-I	Distorção harmônica total de corrente.
DHT-V	Distorção harmônica total de tensão.
P_{nom}	Potência ativa nominal da LFC.
P_{medida}	Potência ativa medida na LFC.
S	Potência aparente medida na LFC.

I. INTRODUÇÃO

Programas de conservação de energia têm sido adotados por diversas empresas. Dentre as diversas medidas adotadas, várias incluem a instalação de equipamentos que podem interferir na qualidade da energia elétrica e também gerar danos na própria instalação. Entre as medidas adotadas algumas incluem a substituição dos sistemas de iluminação com a troca de reatores eletromagnéticos por eletrônicos, instalação de lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) e a aplicação de inversores de frequência para controle de motores de indução. Este fato tende a agravar com o fim da comercialização das lâmpadas incandescentes no Brasil, a partir de 2016. Atualmente as distorções harmônicas destas cargas são conhecidas e já existem preocupações com a qualidade da energia elétrica. Existem também programas computacionais que realizam a análise harmônica com a simulação dos sistemas elétricos para a identificação de problemas antes da instalação de cargas geradoras de harmônicos ou ainda para o dimensionamento de filtros. Entretanto, quando os harmônicos provêm de diversas cargas de baixa potência, pode ser inviável a simulação do sistema elétrico com a representação individual de cada uma das cargas. Neste artigo, através de medições é realizada a análise do comportamento do agrupamento de pequenas cargas harmônicas, observando o efeito de cancelamento de harmônicos e a viabilidade do agrupamento destas cargas em simulações.

II. EFEITOS DOS HARMÔNICOS NAS INSTALAÇÕES

Os harmônicos na rede elétrica podem causar diversos danos às instalações e equipamentos tais como a alteração no valor da corrente de disparo de disjuntores, sobreaquecimento dos condutores devido ao efeito pelicular, em motores elétricos podem causar sobreaquecimento, alteração do torque ou ruídos e podem ainda danificar banco de capacitores devido a fenômenos de ressonância [1]. Softwares podem ser utilizados para identificar possíveis problemas com



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

harmônicos [2]. Entretanto, a simulação de instalações contendo um número elevado de cargas pode ser trabalhoso caso estas cargas não puderem ser agrupadas como uma única carga. Em [3] são mostrados modelos para o agrupamento de cargas equivalentes lineares. Entretanto, para cargas não lineares é necessário conhecer as características destas para a simulação. Praticamente todos os programas de simulação de harmônicos, seja no domínio do tempo ou da frequência permitem representar cargas geradoras de harmônicos como fontes de correntes nas diversas frequências harmônicas. Nas instalações comerciais, LFC e computadores estão presentes em grande número, porém são cargas de pequenas potências distribuídas em várias partes das instalações. Desta forma, agrupá-las como uma única carga equivalente pode facilitar a simulação tornando-a viável. Entretanto, o problema está em determinar de forma correta a amplitude de cada uma das fontes de corrente utilizadas para a simulação.

III. MEDIÇÕES

A. Medições individuais em uma fonte

Foram medidas as distorções harmônicas totais de corrente (DHT-I) de 26 LFC, sendo 16 de 55W e as demais de 8W até 23W de diversas marcas conforme Tabela I.

Tabela I - Resultados das medições nas lâmpadas utilizadas

LÂMPADA	I (mA)	DHT-I	P _{nom} (W)	P _{medida} (W)	S (VA)
L1	124	121,9	8	9	16
L2	120	101,4	8	9	15
L3	193	98,2	15	14	24
L4	200	97,0	15	15	25
L5	209	104,2	15	15	27
L6	222	131,8	15	16	28
L7	224	107,4	20	17	28
L8	253	104,7	20	19	32
L9	280	125,2	23	20	32
L10	338	112,3	23	24	43
L11	757	126,5	55	53	96
L12	752	129,1	55	53	95
L13	755	130,3	55	53	96
L14	755	128,0	55	53	96
L15	751	127,5	55	53	95
L16	772	127,6	55	54	98
L17	770	127,1	55	54	98
L18	781	127,6	55	55	99
L19	776	127,6	55	55	99
L20	776	127,2	55	55	99
L21	776	126,5	55	55	98
L22	778	126,6	55	55	99
L23	789	128,3	55	55	100
L24	779	126,5	55	55	99
L25	779	126,6	55	55	99
L26	784	126,0	55	55	100

Nas medições foi utilizada uma fonte de tensão *Agilent 6813B* com tensão de saída com DHT-V desprezível e um analisador de qualidade de energia *ION 7650* da *Power Measurement/Schneider* e foi utilizada a fonte ajustada para fornecer as cargas sua tensão nominal, sendo que a DHT-V medida nos terminais da carga foi inferior a 0,1%. As LFC de até 23W eram de diferentes fabricantes ou modelos. Já as LFC de 55W eram da mesma marca e modelo e tiveram resultados semelhantes nas medições. As formas de onda para as LFC L1 até L10 de potências diferentes são mostradas na Figura 1

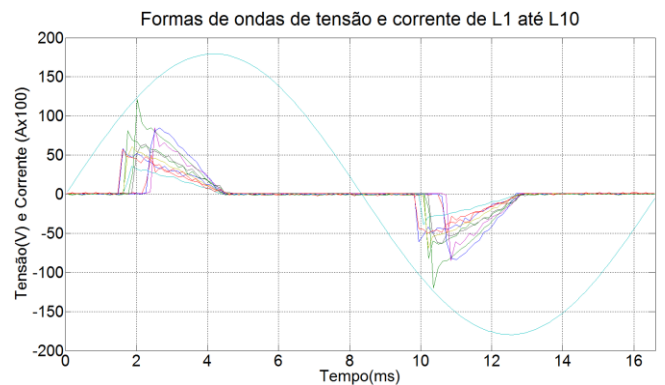


Fig. 1. Formas de ondas de corrente para L1 até L10.

Na Figura 2 são mostrados as formas de onda para as LFC L11 até L26, ambas de 55W.

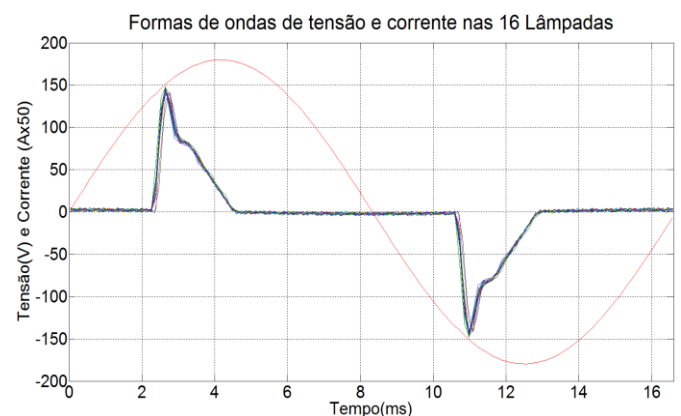


Fig. 2. Formas de ondas de tensão e das correntes das 16 lâmpadas de 55W.

Foi realizada também análise individual dos harmônicos. Nas Figuras 3 e 4 são mostrados amplitude e ângulos de fase, respectivamente, dos harmônicos ímpares até a 15º ordem para as LFC L1 até L11. Nesta figura, cada cor representa uma lâmpada diferente ordenadas, em ordem decrescente de potência.

Nas Figuras 5 e 6 têm-se a amplitude e o ângulo de fase, respectivamente para as lâmpadas L11 até L26 de 55W. Pelas figuras, percebe-se que para lâmpadas fluorescentes de mesma potência e marca apresentaram harmônicos com a mesma amplitude e fase. Já as lâmpadas de potências diferentes, somente o 3º e 5º harmônicos tiveram ângulos de fase parecidos. Assim, para os harmônicos de ordem superior a 5 poderá haver redução ou cancelamento da amplitude

destes harmônicos caso estas cargas sejam ligadas em paralelo.

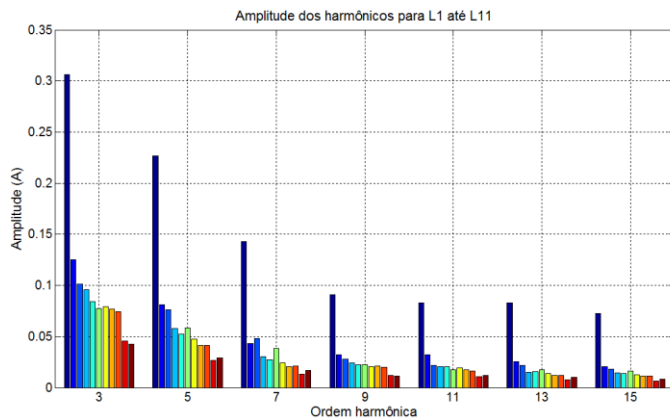


Fig. 3. Amplitude dos harmônicos ímpares até 15º ordem para as 11 LFC.

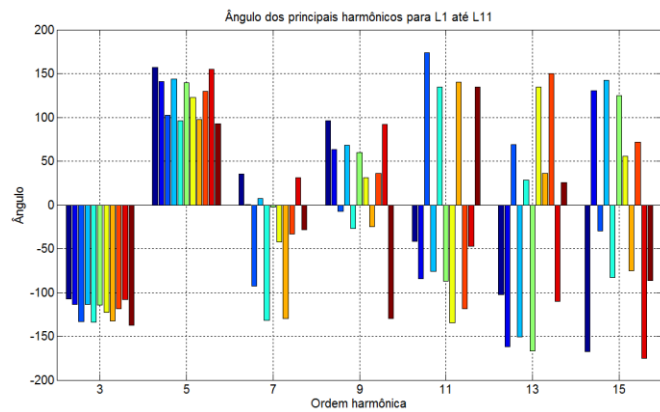


Fig. 4. Ângulos de fase para os harmônicos seleccionados na LFC L1 até L11.

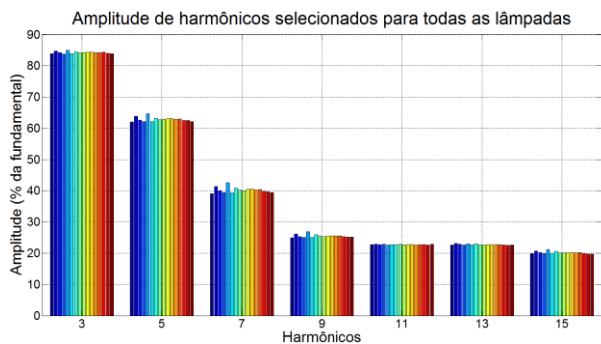


Fig. 5. Amplitude dos harmônicos ímpares até 15º ordem para as 16 LFC.

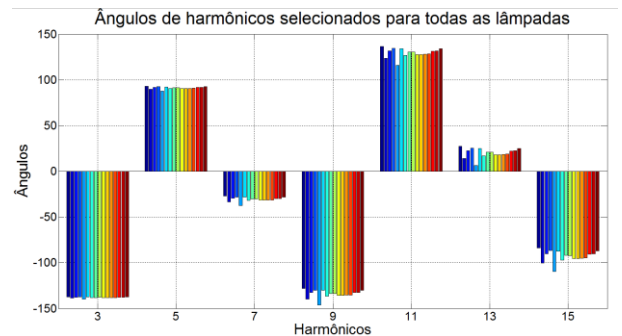


Fig. 6. Ângulos de fase até 15º ordem para 16 LFC.

B. Medições individuais na rede

As lâmpadas foram submetidas a medições da DHT-I quando estas estavam ligadas na rede da concessionária. A instalação onde foram realizadas as medições possuem muitas cargas não lineares, como computadores e reatores eletrônicos, resultando em tensões com DHT-V acima de 9% em alguns momentos. Em uma medição, durante 24 horas, para uma LFC de 55W ligada na rede apresentou os resultados mostrados na Figura 7.

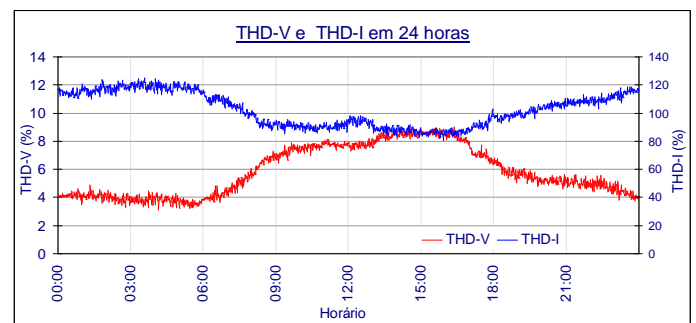


Fig. 7. DHT-V e DHT-I medida nos terminais de uma LFC ligada na rede da concessionária durante 24 horas.

Percebe-se que a THD-I medida na lâmpada teve um valor mínimo de 80% e máximo de 125%, sendo que o valor da DHT-I era inversamente proporcional a distorção harmônica de tensão da rede.

Durante as medições, a DHT-V da rede variou entre 3,1% até 9%. Parte desta distorção foi causada pela interação da própria corrente das lâmpadas medida com os condutores do circuito de alimentação.

Na Tabela II é mostrado o resultado das medições para algumas DHT-V de tensão e de corrente e na Figura 8 são mostrados as amplitudes em percentual da fundamental dos harmônicos ímpares até a 21º ordem e na Figura 9 são mostrados os ângulos.

Tabela II - Valores medidos de DHT-V e DHT-I para uma LFC durante 24 horas

Valores medidos	
DHT-V (%)	3,1 4,0 5,0 6,0 7,0 8,0 9,0
DHT-I (%)	122 113 106 96 89 88 83

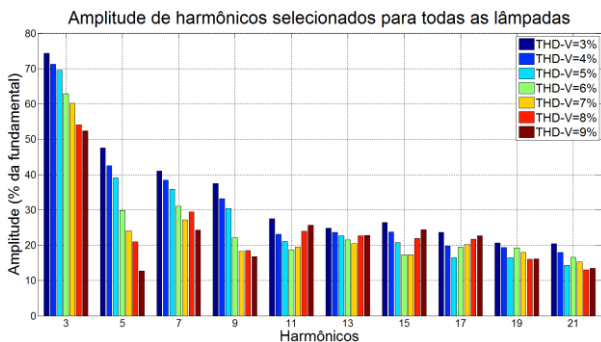


Fig. 8. Harmônicos ímpares para diversas DHT-V.

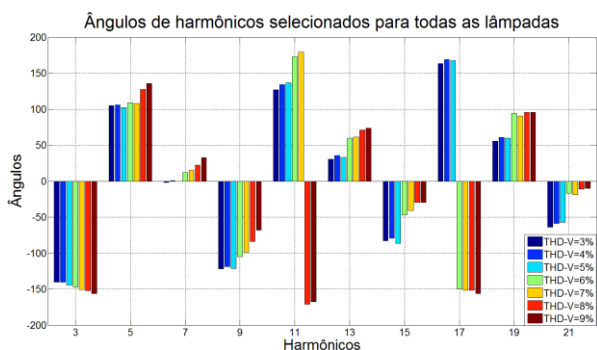


Fig. 9. DHT-V na rede e DHT-I da lâmpada em 24 horas.

Percebe-se pela figura, que houve diminuição da amplitude dos harmônicos de correntes mais significativos com o aumento da DHT-V até a nona ordem. A partir deste, não se percebe pelo gráfico, um padrão de comportamento.

Na rede analisada, os harmônicos de tensão provocaram o achatamento da forma de onda da tensão. Este comportamento foi observado na rede durante todo o período de medições. Assim houve o aumento do tempo de condução dos diodos no circuito retificador da carga, reduzindo a THD de corrente. Desta forma, é esperada a redução da THD-I quando as combinações dos harmônicos de tensão na rede, em função dos seus ângulos de fase, provocaram o achatamento da onda da tensão. Caso os harmônicos provocassem um pico na forma de onda da tensão, ocorrerá o aumento da THD-I.

C. Medições de grupos de lâmpadas utilizando a fonte

Após as medições individuais das cargas, foram realizadas as medições dos conjuntos de lâmpadas. Os agrupamentos medidos foram compostos por 2, 4, 6, 10 e 16 lâmpadas. Inicialmente o conjunto de lâmpadas foi alimentado pela fonte ideal. Os resultados das medições são mostrados na tabela III.

Percebe-se pela tabela que a DHT-I do conjunto foi praticamente a mesma obtida para apenas uma lâmpada, devido a semelhança de amplitude e ângulo de fase para cada um dos harmônicos, exceto para o agrupamento com 16 lâmpadas. Nesta situação, percebe-se o aumento da DHT-V da tensão aplicada nas lâmpadas, fato que provavelmente provocou a diminuição da DHT-I do conjunto.

Tabela III - Resultados das medições na fonte.

Nº de LFC	Lâmpadas	Potência das LFC	THD-V (%)	THD-I (%)	I (A)
1	L11	55W	0,10	127,42	0,79
2	L11-L12	55W	0,23	128,15	1,55
4	L11 até L14	55W	0,46	130,49	3,12
6	L11 até L16	55W	0,65	132,06	4,67
10	L11 até L21	55W	1,00	130,02	7,94
10	L1 até L10	Diversas	0,16	95,16	1,97
11	L1 até L11	Diversas	0,24	99,18	2,69
16	L11 até L26	55W	2,28	112,79	11,15

Nas situações onde a DHT-V é baixa pode-se representar todas as cargas por apenas uma única fonte de distorção, multiplicando apenas a potência da carga pela potência do conjunto, mantendo-se o mesmo espectro harmônico da carga a serem representadas em simulações. Porém, no agrupamento das 16 lâmpadas iguais, percebe-se que houve atenuação significativa da DHT-I do conjunto. O aumento da DHT-V foi causado pela interação da corrente distorcida com a impedância da fonte e da rede de alimentação do conjunto. Para os agrupamentos de cargas com potências diferentes, como esperado, houve uma diminuição da DHT-I devido ao cancelamento de harmônicos.

D. Medições de grupo de lâmpadas ligadas na rede

Para o agrupamento de lâmpadas, a variação não controlada da DHT-V da rede observada ao longo do dia dificulta uma abordagem precisa e comparações.

Na Tabela IV são mostrados resultados médios para cada um dos agrupamentos medidos.

Tabela IV - Resultado das medições de grupos de lâmpadas ligadas na rede.

Nº de LFC	Lâmpadas	Potência das LFC	DHT-V (%)	DHT-I (%)	I (A)
1	L11	55W	6,45	101,74	0,60
2	L11-L12	55W	6,48	108,60	1,32
4	L11 até L14	55W	6,63	100,69	2,57
6	L11 até L16	55W	7,36	92,60	3,68
10	L11 até L21	55W	7,99	79,45	5,68
11	L1 até L11	Diversas	6,05	83,81	2,39
16	L11 até L26	55W	8,10	73,06	8,71

Pela Tabela IV, percebe-se que no agrupamento, a DHT-I também foi inversamente proporcional a DHT-V. Quando comparado com a Tabela III, percebe-se que o valor da corrente também diminuiu apesar do valor médio da tensão durante todas as medições ter ficado bem próximo de 127V. De forma geral, as menores distorções de corrente foram obtidas para agrupamentos de lâmpadas de potências diferentes ligadas na rede com distorções de tensão.

IV. CONCLUSÕES

Neste artigo foi avaliado o agrupamento de cargas geradoras de harmônicos. Medições em diversas LFC compactas do mesmo fabricante e de mesma potência mostraram semelhanças entre os valores dos harmônicos e ângulos de fase quando ligadas em redes com mesma THD-V. Desta forma, pode-se somar as correntes destas cargas durante a simulação, sendo possível trabalhar como se houvesse uma única fonte de harmônicos. Já as medições de lâmpadas de potências diferentes mostraram que pode haver cancelamento ou atenuação de harmônicos a partir da 7ª ordem. Neste caso não é possível somar a amplitude destes harmônicos diretamente para obter uma fonte equivalente. Foi mostrado também que o aumento da DHT-V da tensão de alimentação diminui a DHT-I produzida pelas LFC. Desta forma, na modelagem destas cargas é necessário conhecer as DHT-V da rede onde serão ligadas, sugerindo a necessidade de uma simulação iterativa. Em uma instalação com um número elevado de cargas semelhantes, porém instaladas em locais distintos, devido à diferença de THD-V, cargas iguais podem injetar harmônicos com amplitude ou ângulos distintos, não sendo possível assim a agregação destas cargas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a FAPEMIG pelo financiamento do projeto de pesquisa (processo APQ-4250-6.01/07).

REFERÊNCIAS

- [1] ARRILLAGA, J; WATSON, N. R. Power system harmonics. London: John Wiley & Sons, 1993. 389 p.
- [2] LINDELL, L. C. Problems and Simulates Alternative Solutions. In IEEE Computer Applications in Power. 1993.
- [3] IEEE WORKING GROUP ON HARMONICS MODELING AND SIMULATION. Test systems for harmonics modeling and simulation. In IEEE Transactions on power delivery. Vol. 14, nº2. April 1999.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcio Melquíades Silva nascido em 16/04/1970 em Belo Horizonte é professor efetivo do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG. Formado em Engenharia Elétrica pela PUC-MG em 1993 é Mestre pelo CEFET-MG (2004) e doutorando no programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas. Suas áreas de interesse são: Eficiência energética, qualidade da energia e instalações elétricas.

Manuel Losada y Gonzalez, nascido em 28/09/1953 em Ourense – Espanha é professor associado do Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Recebeu os graus de barachel, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela UFMG nos anos de 1978, 1995 e 2000, respectivamente. Suas áreas de pesquisa incluem sistemas elétricos de potência, eficiência energética e qualidade de energia.