

# Effects on Light Efficiency in Discharge and Solid-State Lighting Operation, Supplied by Non-Sinusoidal Voltage

G. A. M. Clerice, B. de Castro, J. A. C. Ulson, A. L. Andreoli, *member IEEE*, N. M. da Silva Filho e R. R. Riehl

**Abstract**— The widespread use of discharge lamps and solid-state lighting is justified by its high-energy efficiency. However, the massive use causes degradation of power quality provided. In this context, the objective was the evaluation and discussion of the effect of harmonic voltage distortion (THDv) in view of the electrical system electrical operation of discharge lamps and solid state. More specifically, they were tested lamps of various types available in Brazil and evaluated rate of harmonic distortion current (THDI), current crest factor (CF), power factor (PF), luminance and bulb temperature before feeds distorted with THDv 0%, 12.6%, 14.4% and analyzed the effects on brightness and bulb temperature. The results showed that compact fluorescent lamps are the most sensitive to distorted power while the lamps for use in street lighting with magnetic ballasts are the least sensitive.

**Keywords**— Electroluminescent devices, Lighting, Power conversion, Power quality, Total harmonic distortion.

## I. INTRODUÇÃO

NO universo do consumo de energia elétrica estima-se que 24% do consumo brasileiro corresponde à iluminação [1]. O notório consumo devido à iluminação e os avanços nos estudos para o aperfeiçoamento entre a relação potência luminosa por potência ativa demandada, são constantes e levaram à proibição da venda das lâmpadas incandescentes no Brasil. A utilização das lâmpadas de descarga, que apresentam um maior rendimento luminoso que podem alcançar quatro vezes a lâmpada incandescente. Porém, apresentam a desvantagem da distorção harmônica, sendo de corrente e consequentemente na tensão elétrica, recebendo a classificação de cargas não lineares.

Cargas não lineares estão cada vez mais presentes nas residências e nos estabelecimentos comerciais; consequência do amplo uso da eletrônica de potência (fontes chaveadas, inversores de frequência em eletrodomésticos ou qualquer dispositivo que emprega tiristores, diodos, etc.). Sendo assim, impondo ao sistema elétrico distorções de corrente e tensão elétrica, afetando de forma severa a qualidade da energia fornecida, acarretando perdas técnicas, redução na estimativa da vida útil dos equipamentos, interferências eletromagnéticas em sistemas de comunicação, atuação intempestiva dos sistemas de proteção, ressonâncias, dentre outros transitórios [2].

Os reatores para as lâmpadas fluorescentes e retificadores para lâmpadas de LED (Light Emitting Diode) foram

desenvolvidos para operarem com baixo DHT de tensão (Distorção Harmônica Total)[3]. A realidade de muitas instalações hoje está longe de se livrar de tais distorções.

Portanto, este trabalho tem como objetivo a avaliação e discussão dos efeitos da distorção harmônica de tensão (DHTV) na operação das lâmpadas. Foram ensaiados diversos tipos de lâmpadas de descarga disponíveis no mercado brasileiro e as lâmpadas de LED que tendem a substituir as compactas, a fim de avaliar o desempenho da qualidade de energia elétrica como: DHTi (Distorção Harmônica Total na corrente), FC (Fator de Cresta), FP (Fator de Potência) e a eficiência entre conversão de energia elétrica em luminosa.

## II. NORMAS DISPONÍVEIS

Os fatores que influenciam o desenvolvimento de normas são centrados nas seguintes questões: descrição e caracterização do fenômeno; principais fontes de problema harmônicas; impacto sobre outros equipamentos e do sistema de potência; descrição matemática do fenômeno através de índices ou análise estatística para fornecer uma avaliação quantitativa do seu significado; técnicas de medição e diretrizes; limites de emissão de diferentes tipos e classes de equipamentos; imunidade ou tolerância de diferentes tipos de equipamentos; métodos de ensaio e os procedimentos para o cumprimento dos limites; diretrizes de mitigação [4].

Normas como a IEC 61000-3-2 e a IEEE 519-1992 tratam especificamente de distúrbios harmônicos e têm o objetivo de limitar a ocorrência dessa perturbação na rede elétrica. A organização amplamente reconhecida como a responsável pelas normas de qualidade de energia elétrica é a IEC (*International Electrotechnical Commission ou Commission Electrotechnique Internationale*), com sede em Genebra. A IEC tem definido uma série de normas chamadas de *Electromagnetic Compatibility* (EMC), normas para lidar com a questão de qualidade de energia. O IEC 61000 inclui harmônicas e inter-harmônicas como um dos fenômenos eletromagnéticos de baixa frequência. Uma alternativa generalizada ao IEC é o documento da IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*), que fornece orientações sobre harmônicas.

É muito importante reconhecer que nenhuma norma relativa ao conteúdo do sistema harmônico pode ser considerada definitiva, mas sim como a atual interpretação dos requisitos do sistema, tendo em conta o estado de monitoramento e técnicas de modelagem.

G. A. M. Clerice, Univ. Estadual Paulista, marabezzi@feb.unesp.br  
B. A. de Castro, Univ. Estadual Paulista, bruno.castro@feb.unesp.br  
J. A. C. Ulson, Univ. Estadual Paulista, ulson@feb.unesp.br  
A. L. Andreoli, Univ. Estadual Paulista, andreoli@feb.unep.br  
N. M. da Silva Filho, Univ. Estadual Paulista, nelson@feb.unesp.br  
R. R. Riehl, Univ. Estadual Paulista, rriehl1@feb.unesp.br

#### A. IEC 61000

IEC 61000 1-4: Fornece os fundamentos para limitar frequências harmônicas e inter-harmônicas nos atuais equipamentos na faixa de até 9 kHz.

IEC 61000 2-1: Descreve as principais fontes de harmônicas em três categorias de equipamentos: equipamentos do sistema de potência, cargas industriais e cargas residenciais. O crescente uso de conversores HVdc e dispositivos FACTS tornaram-se as principais fontes de distorção harmônica no sistema de transmissão. Conversores estáticos de potência e soldas a arco elétrico são os principais contribuintes da categoria industrial. Aparelhos alimentados por retificadores com capacitor de suavização (principalmente PCs e aparelhos de TV) são os componentes principais das distorções na categoria residencial.

IEC 61000 2-2: Contém uma seção sobre os níveis de compatibilidade da indústria no sistema de potência em distorções harmônicas e inter-harmônicas na baixa tensão pública.

IEC 61000 2-4: Oferece níveis compatíveis de harmônicas e inter-harmônicas para a indústria.

IEC 61000 2-12 Da mesma forma que a 61000 2-4, este documento trata de níveis de compatibilidade e perturbações conduzidas da baixa frequência, neste caso relacionados com sistemas de abastecimento de média tensão. Abrange também o assunto de sinais injetados, tais como aqueles usados no controle da ondulação.

IEC 61000 3-2 e 3-4: Com o encargo de conter limites para emissão de correntes harmônicas por equipamento com correntes de entrada inferior a 16 A por fase, também especifica o circuito de medição, fontes de alimentação e as condições de ensaio, bem como o requisito para a instrumentação.

IEC 61000 3-6: Primeiramente indica os níveis de capacidade de tensão harmônica nas redes de baixa e média tensão, bem como os níveis de planejamento para média tensão, alta tensão e o sistema de média e alta tensão. Em seguida faz uma avaliação dos limites de emissão das cargas que distorcem a média tensão e o sistema de energia de alta tensão.

IEC 61000 3-12: Indica como prover limites para a corrente harmônica produzida por equipamento conectado ao sistema de baixa tensão com corrente de entrada inferior ou igual a 75A por fase e submetido às restrições de conexão.

IEC 61000 4-7: Este é, talvez, o mais importante da série que cobre o objetivo da técnica de ensaio e medição. É um guia geral sobre medidas harmônicas, inter-harmônicas e instrumentação para sistemas de energia e equipamentos ligados ao mesmo.

IEC 61000 4-13: Também é um documento sobre técnicas de testes e medições, com referências nas harmônicas e inter-harmônicas, incluindo importantes sinalizações nas entradas da alimentação AC, bem como teste de imunidade as baixas frequências [5].

#### B. IEEE 519-1992

De acordo com a norma IEEE 519-1992, distorções harmônicas de tensão em sistemas de energia de 69 kV e

inferior estão limitados a 5% de distorção harmônica total (DHT). Os limites das harmônicas variam com a intensidade de curto-circuito do sistema. Essencialmente, quanto mais o sistema é capaz de lidar com correntes harmônicas o usuário está autorizado a injetar. A Tabela I, apresenta os limites harmônicos na tensão, enquanto, a Tabela II indica os limites harmônicos na corrente.

Os limites de harmônicas na corrente, especificam o máximo de harmônicas que podem ser injetadas no sistema da concessionária. A concessionária é responsável pelo fornecimento de um ambiente limpo (baixa distorção) para o cliente. A distribuidora só fica responsável quando o cliente satisfaz os limites harmônicos atuais. Caso contrário, o cliente pode ser culpado de causar a distorção na tensão do mesmo [6].

TABELA I  
LIMITES DE HARMÔNICAS NA TENSÃO

| Tensão no barramento no PCC | Distorção de tensão individual (%) | DHT (%) |
|-----------------------------|------------------------------------|---------|
| 69 kV e inferior            | 3,0                                | 5,0     |
| 69,001-161 kV               | 1,5                                | 2,5     |
| 161,001 kV e superior       | 1,0                                | 1,5     |

Fonte: [6]

TABELA II  
LIMITES DE HARMÔNICAS NA CORRENTE PARA UM GERAL SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

| Distorção harmônica máxima em percentual do IL ordem harmônica individual (harmônicas ímpares) |                                                                                     |      |             |             |             |        |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------|-------------|-------------|--------|
|                                                                                                |  | < 11 | 11 ≤ H < 17 | 17 ≤ H < 23 | 23 ≤ H < 35 | 35 ≤ H |
| < 20*                                                                                          | 4,0                                                                                 | 2,0  | 1,5         | 0,6         | 0,3         | 5,0    |
| 20 < 50                                                                                        | 7,0                                                                                 | 3,5  | 2,5         | 1,0         | 0,5         | 8,0    |
| 50 < 100                                                                                       | 10,0                                                                                | 4,5  | 4,0         | 1,5         | 0,7         | 12,0   |
| 100 < 1000                                                                                     | 12,0                                                                                | 5,5  | 5,0         | 2,0         | 1,0         | 15,0   |
| > 1000                                                                                         | 15,0                                                                                | 7,0  | 6,0         | 2,5         | 1,4         | 20,0   |

Todas as harmônicas estão limitadas a 25% dos limites de harmônicas ímpares acima.

\* Todos os equipamentos de geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente, independente do real  $I_{sc}/IL$ .

Onde:

$I_{sc}$  = Corrente máxima de curto-circuito no PCC.

IL = Demanda da carga máxima atual (componente de frequência fundamental) no PCC.

TDD = Distorção de demanda total (RSS), distorção harmônica da corrente harmônica em % de demanda máxima da carga.

PCC = Ponto de acoplamento comum.

Fonte: [7]

### III. FATOR DE POTÊNCIA, THD E TDD

Segundo [4] as DHT e TDD são calculadas em função das correntes harmônicas  $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$ . A Distorção Harmônica Total (DHT), compara as medições em relação, a fundamental e a Distorção de Demanda Total (DDT) compara as medições harmônicas com o máximo de corrente de demanda (1) e (2).

$$DHT_i = (I_{22} + I_{32} + I_{42} + I_{52} + \dots)^{1/2} / I_1 \quad (1)$$

$$DDT_i = (I_{22} + I_{32} + I_{42} + I_{52} + \dots)^{1/2} / I_L \quad (2)$$

Assim quando há distorção harmônica na instalação elétrica o triângulo de potências sofre uma alteração, recebendo uma terceira dimensão provocada pela potência aparente necessária a sustentar a distorção da frequência fundamental. O fator de potência real (3) é o quociente entre a potência média (ativa) e a potência aparente, onde todos os valores totais incluem a fundamental e todas as harmônicas [8].

$$FP = \cos \varphi / (1 + DHT_i^2)^{1/2} \quad (3)$$

#### IV. FUNDAMENTOS LUMINOTÉCNICOS

É a relação entre o fluxo luminoso (4) incidente em uma superfície pela área da mesma.

$$E = \phi S \quad (4)$$

Sendo: E a iluminância (lux),  $\phi$  o fluxo luminoso (lm) e S a área da superfície (m<sup>2</sup>). A eficiência luminosa, é medida entre a quantidade de luz gerada e a energia consumida, ou seja, lúmen por Watt.

À geração de radiação por descarga elétrica, segue o modelo de Bohr [9], os elétrons de um átomo giram em órbitas específicas, sem a emissão da energia radiante. Com tudo, um elétron pode saltar de uma órbita interna com menor valor energético, para uma externa que possui maior valor energético, desde que receba energia, isto é, seja excitado. Tal estado de excitação, é instável e o elétron retorna a sua órbita de origem. Quando isto ocorre, o elétron emite um fóton que é a diferença entre as energias ( $E_1 - E_2$ ) e a frequência (f) é dada por (5).

$$f = (E_1 - E_2)/h \quad (5)$$

Sendo,  $h$  a constante de Planck ( $6,63 \times 10^{-34}$  J.s).

O elétron livre, na colisão com o átomo do gás, retira um elétron de sua órbita periférica. Este fenômeno não produzirá energia radiante, porém será responsável pela condução da corrente elétrica na forma do plasma. Nas lâmpadas sem revestimento fluorescente, o fluxo luminoso provém diretamente da energia radiante oriundo da descarga elétrica nos gases. Entretanto, nas lâmpadas com revestimentos fluorescentes, a maior parcela do fluxo luminoso provém dos compostos químicos que excitados, produzem radiação ultravioleta com comprimento de onda, cujo valor é 253,7 nm encontrado na descarga de mercúrio [10].

#### V. LÂMPADAS À DESCARGA

A lâmpada de descarga produz um fluxo luminoso indiretamente por meio de passagem da corrente elétrica por um gás, mistura de gases e vapores ionizados. Essa corrente choca-se com uma camada de pintura fluorescente ou cristais de fósforos na parte interna do tubo, emitindo luz visível.

Para o funcionamento dessas lâmpadas é necessário o uso de reatores e ignitores. Os reatores eletrônicos típicos, consistem em um circuito de retificação seguido de um oscilador de 16 a 50 kHz. Por outro lado, o ignitor é um dispositivo auxiliar usado para a partida das lâmpadas a vapor de sódio de alta

pressão e a vapor metálico, logo após a partida o ignitor se desliga automaticamente.

Na conversão entre energia elétrica em fluxo luminoso conforme citado, torna-se necessária uma fonte com potência ativa, livre de distorções harmônicas.

#### V. LÂMPADAS DE LED

O LED é um diodo emissor de luz, ou seja, um semicondutor que apresenta a mesma tecnologia dos chips dos computadores, porém tem a finalidade de transformar energia elétrica em luz. Essa transformação afronta as lâmpadas convencionais, que utilizam radiação ultravioleta e descargas de gases para obter um fluxo luminoso.

Nos LEDs, a transformação de energia elétrica em luz é feita na matéria, sendo, por isso, chamado de estado sólido [11]. Esse tipo de iluminação pode ser descrito como o terceiro estágio na evolução da lâmpada elétrica. O primeiro, representado pela lâmpada incandescente desenvolvida pelo americano Thomas Edison, pouco mudou nos últimos 128 anos. O sistema de iluminação com LED ainda tem elevado custo, apesar de seu preço cair pela metade a cada dois anos. Essa tecnologia não está se tornando apenas mais barata, está também mais eficiente, iluminando mais com a mesma quantidade de energia. Uma lâmpada incandescente converte em luz apenas 5% da energia elétrica que consome, enquanto as lâmpadas LED convertem até 40%. Essa diminuição no desperdício de energia traz benefícios evidentes ao meio ambiente.

A energia gerada em um LED é dissipada como luz e calor. A luz é emitida a partir do chip semicondutor e irradiada em todas as direções, porém, não irradiam calor como em uma lâmpada convencional. O calor gerado é retido no interior do LED e deve ser eliminado através do dissipador de calor evitando falhas no mesmo. O LED não emite radiação IV (Infravermelho) ou UV (Ultravioleta) na luz visível [12].

A lâmpada LED é um conjunto de semicondutores que emitem a cor branca, interligados em série com um retificador, isto é, converter a tensão elétrica da rede em valores seguros a cada componente.

De acordo com [13], com um crescente aumento de produção de produto constituído por LED, deverá começar a regular o mercado que se encontra desprovido de tal ferramenta para filtrar os produtos LED realmente eficientes. Com a adoção da certificação, ocorre uma inovação e insere o Brasil no cenário global como um dos pioneiros no estabelecimento de regras para essa nova tecnologia de iluminação. Para receberem a certificação, as lâmpadas LED deverão atender a critérios específicos de segurança, qualidade e desempenho, como por exemplo, o valor da eficiência energética declarada na embalagem será determinado pela razão entre o fluxo luminoso declarado e a potência declarada, sendo que as lâmpadas LED devem apresentar um valor de eficiência energética medida e declarada de no mínimo 80 lm/W. O fornecedor deverá comprovar que o seu equipamento atende a todos os requisitos estabelecidos pelo Procel, por meio da submissão desses a ensaios em um dos laboratórios indicados pelo programa.

Após concedido o selo, anualmente o fabricante deve reavaliar nos laboratórios indicados as características dos seus produtos

contemplados, com a finalidade de verificar se suas características de desempenho e de segurança elétrica permanecem válidas para a manutenção da autorização do uso da certificação. Além dessas exigências, os produtos deverão ainda ter garantia mínima de três anos para obterem a concessão do selo. As lâmpadas LED são produtos ecologicamente corretos porque são produtos sem mercúrio e com menor impacto ao meio ambiente. Além disso, a utilização de LEDs possibilita a economia de 80 a 90% no consumo de energia elétrica, comparado ao consumo de lâmpadas incandescentes, e sua vida útil reduz a necessidade de troca de lâmpadas [13].

## VI. METODOLOGIA

Visando atingir os objetivos propostos, foi desenvolvido um aparato (Fig. 1) para efetuar os ensaios das lâmpadas relacionadas à Tabela III, as lâmpadas e seus acessórios foram adquiridos no mercado brasileiro. A plataforma de ensaios foi constituída por uma placa de aquisição de dados USB 6211 da National Instruments, um clamp para medição da corrente do tipo Hall modelo A622 do fabricante Tektronix e um transformador de potencial com relação 220/110 - 3 Vrms para isolar eletricamente a rede elétrica do sistema de medição e rebaixar a tensão a nível seguro para o equipamento de aquisição de dados. Com a posse desses instrumentos, um analisador de medidas foi desenvolvido no ambiente Labview. Com isto, foi possível obter os dados que levaram as grandezas, de acordo com a Tabela IV. A taxa de aquisição utilizada foi de 128 amostras por ciclo de 60 Hz.

A tensão de alimentação foi gerada por meio de uma fonte de alimentação eletrônica programável (Fig. 2), modelo 360 AMX da Pacific Power Source Inc. As tensões utilizadas nos ensaios foram: senoidal pura (0% DHTv), IEC 77A Class 1 – 12,6% DHTv e IEC 77A Class 2 – 14,4% DHTv. As Figuras 6 e 9 estão representadas respectivamente, Class 1 e Class 2.

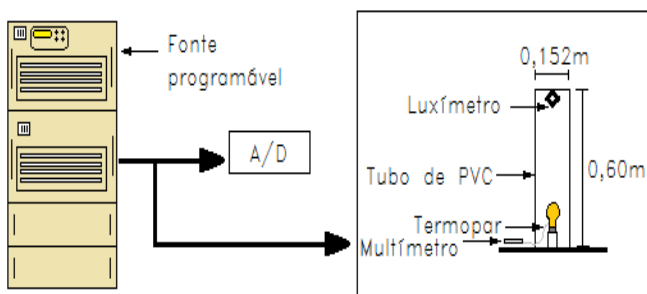


Figura 1. Aparato utilizado para os ensaios.

Para medir a luminosidade, foi utilizado um luxímetro digital modelo MLM-1011 do fabricante Minipa, e para a medição da temperatura dos bulbos das lâmpadas foi utilizado um termopar acoplado ao multímetro digital modelo MA-149 do fabricante Minipa. Cabe destacar que nas coletas dos valores das temperaturas e luminosidades foram aguardados 15 minutos para que as lâmpadas entrassem em regime. O luxímetro não recebeu calor significativo, ou seja, o equipamento operou em temperatura ambiente, assim, evitando erros de leituras providos da exposição ao calor.



Figura 2. Fonte programável utilizada nos ensaios.

## VII. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### A. Lâmpadas Florescentes Compactas

De acordo com as Tabelas IV e V, pode-se observar que, seguida da lâmpada LED, a fluorescente compacta apresentou maior  $DHT_i$  e alto FC contribuindo assim, de forma acentuada, para a redução da qualidade de energia, visto que são as lâmpadas mais vendidas no mercado, para consumidores residenciais e comerciais. Ainda, à medida que o  $DHT_v$  aumentou nos ensaios, o  $DHT_i$  teve um aumento significativo, conforme pode ser observado nas Fig. 3 e Fig. 6. Assim, o mesmo comportamento foi verificado no fator de crista. Tais índices indicam que a maneira que essas lâmpadas operam de maneira imprópria, resultando na diminuição do seu fluxo luminoso visto na Tabela VII e, aumento na temperatura de funcionamento, consequentemente impactando na vida útil destas lâmpadas.

Pode-se verificar na Fig. 4 e Fig. 7 que o teor de harmônicos homopolares é bastante acentuado. Portanto, é importante salientar que, de forma geral, as lâmpadas fluorescentes compactas são comumente interligadas entre fase e neutro. Fazendo que componentes homopolares circulem pelo condutor neutro, podendo superaquecê-los caso a quantidade de lâmpadas seja elevada. Entretanto, isto não ocorre nas lâmpadas de iluminação pública, pois são interligadas entre fases.

### B. Lâmpadas LED

Há tendência de substituir as lâmpadas fluorescente compactas por lâmpadas LED, que apresentam maior rendimento luminoso e maior vida útil. Embora de forma similar, as fluorescentes compactas impõem ao sistema elétrico uma elevada taxa de distorção harmônica e alto fator de crista conforme as Tabelas IV e V.

### C. Lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor metálico e vapor de sódio

São lâmpadas utilizadas na maioria das vezes em iluminação pública; praças e áreas esportivas, por apresentarem baixa sensibilidade à distorção harmônica de tensão conforme pode ser constatado nas Tabelas IV, V e VI.

Isto decorre do fato de utilizarem reatores magnéticos. Porém, há uma tendência mercadológica em substituir os reatores magnéticos por eletrônicos, fato que poderá levar ao aumento da poluição harmônica na rede de distribuição secundária.

#### D. Resultados oriundos dos ensaios em bancada

TABELA III  
TIPOS DE LÂMPADAS UTILIZADAS

| Índice | Tipos de lâmpadas            |
|--------|------------------------------|
| 1      | Fluorescente compacta - 28W  |
| 2      | Incandescente - 60W          |
| 3      | LED - 4W                     |
| 4      | Vapor de mercúrio (VM) - 80W |
| 5      | Vapor metálico (VMet) - 70W  |
| 6      | Vapor de sódio (VS) - 70W    |

TABELA IV  
RELAÇÃO  $DHT_V$  -  $DHT_i$

| $DHT_V$ (%) | 0%          | 12,6% | 14,4% |
|-------------|-------------|-------|-------|
|             | $THD_i$ (%) |       |       |
| 1           | 160,1       | 170,4 | 235,0 |
| 2           | 1,0         | 13,6  | 15,4  |
| 3           | 156,5       | 175,9 | 213,1 |
| 4           | 9,9         | 13,4  | 12,5  |
| 5           | 11,4        | 15,1  | 14,2  |
| 6           | 11,8        | 15,9  | 14,9  |

TABELA V  
RELAÇÃO  $DHT_V$  - FATOR DE CRISTA

| $DHT$ (%) | 0%              | 12,6% | 14,4% |
|-----------|-----------------|-------|-------|
|           | FATOR DE CRISTA |       |       |
| 1         | 4,5             | 4,9   | 6,0   |
| 2         | 0,1             | 0,1   | 0,1   |
| 3         | 3,9             | 5,0   | 5,6   |
| 4         | 1,7             | 1,7   | 1,7   |
| 5         | 1,6             | 1,6   | 1,6   |
| 6         | 1,6             | 1,7   | 1,7   |

TABELA VI  
RELAÇÃO  $DHT_V$  - FATOR DE POTÊNCIA

| $DHT_V$ (%) | 0%                | 12,6% | 14,4% |
|-------------|-------------------|-------|-------|
|             | FATOR DE POTÊNCIA |       |       |
| 1           | 0,37              | 0,34  | 0,29  |
| 2           | 0,99              | 0,99  | 0,99  |
| 3           | 0,33              | 0,31  | 0,23  |
| 4           | 0,48              | 0,48  | 0,48  |
| 5           | 0,38              | 0,37  | 0,37  |
| 6           | 0,36              | 0,36  | 0,37  |

Os resultados advindos das Tabelas IV, V e VI, comprovam a importância da regulamentação e fiscalização de órgãos competentes em relação à qualidade e eficiência de energia elétrica. Sendo que nenhuma lâmpada, exceto a incandescente, que é uma resistência puramente não linear, as lâmpadas que empregam eletrônica de potência ou reatores indutivos, não atingiram um  $FP \geq 0,50$ , alimentados por tensão senoidal pura.

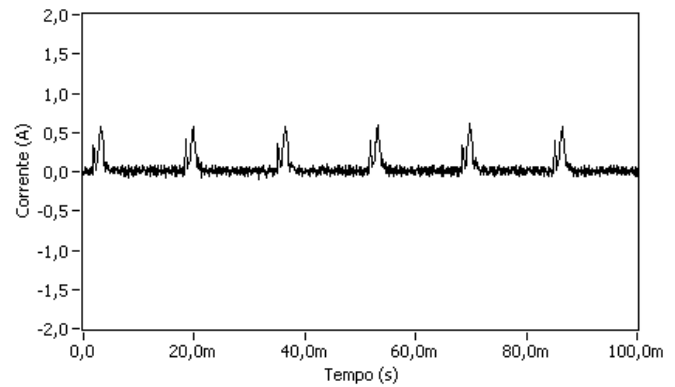


Figura 3. Forma de onda da corrente – lâmpada fluorescente compacta alimentada com 12,6% de  $DHT_V$ .

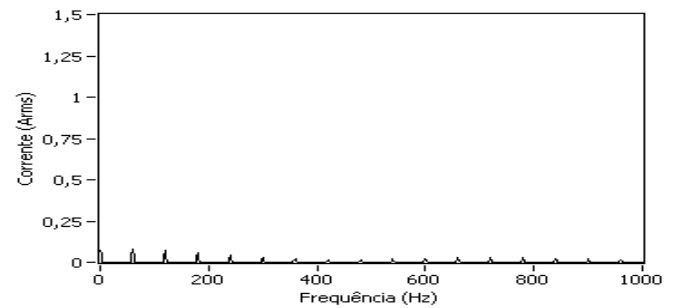


Figura 4. Espectro da corrente – lâmpada fluorescente compacta com 12,6% de  $DHT_V$ .

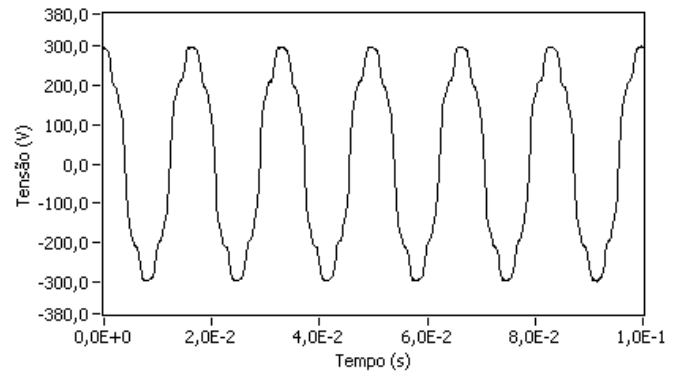


Figura 5. Forma de onda da tensão com 12,6% de  $DHT_V$ .

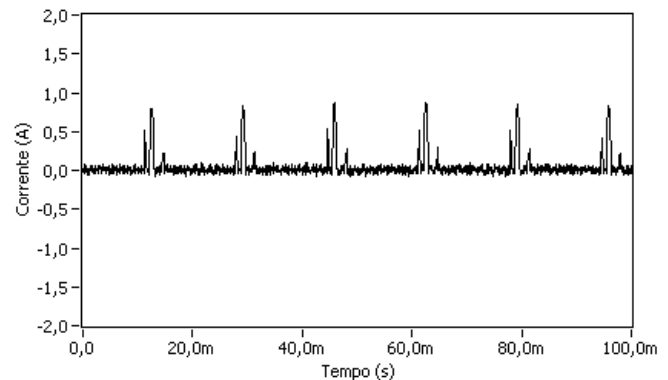


Figura 6. Forma de onda da corrente – lâmpada fluorescente compacta alimentada com 14,4% de  $DHT_V$ .



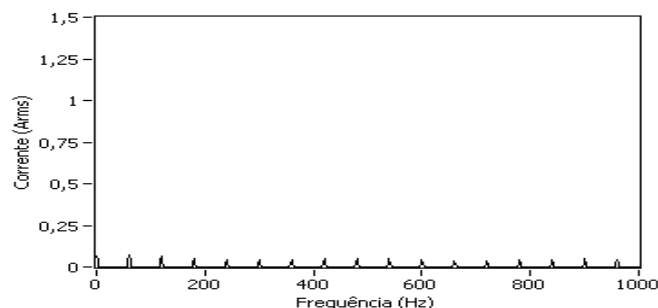


Figura 7. Espectro da corrente – lâmpada fluorescente compacta com 14,4% de DHT<sub>V</sub>.

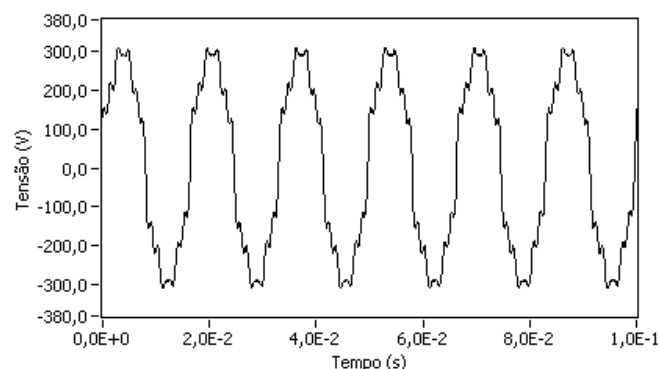


Figura 8. Forma de onda da tensão com 14,4% de DHT<sub>V</sub>.

De acordo com a Tabela VII, há atenuações na iluminância das lâmpadas e superaquecimento, ou seja, a energia necessária para sofrer trabalho (potência ativa) é convertida em energia térmica e consecutivamente o rendimento luminoso é atenuado.

TABELA VII  
RELAÇÃO DHT<sub>V</sub> COM A ILUMINÂNCIA E TEMPERATURA

|   | DHT <sub>V</sub> - 0 % |           | DHT <sub>V</sub> - 12,6 % |            | DHT <sub>V</sub> - 14,4 % |           |
|---|------------------------|-----------|---------------------------|------------|---------------------------|-----------|
|   | Lum. (lx)              | Temp (°C) | Lum. (lx)                 | Temp. (°C) | Lum. (lx)                 | Temp (°C) |
| 1 | 1.340                  | 43        | 1.256                     | 45         | 1.253                     | 46        |
| 2 | 2.706                  | 97        | 2.686                     | 100        | 2.686                     | 100       |
| 3 | 9.116                  | 37        | 9.030                     | 42         | 8.956                     | 56        |
| 4 | 10.130                 | 61        | 9.250                     | 61         | 8.770                     | 61        |
| 5 | 18.276                 | 90        | 16.986                    | 93         | 16.240                    | 96        |
| 6 | 18.260                 | 75        | 16.573                    | 80         | 16.383                    | 84        |

## VIII. CONCLUSÃO

Ao proscrever as vendas das lâmpadas incandescentes no mercado brasileiro, as lâmpadas de descarga e a LED estão se definindo como padrão residencial e comercial. Apesar do ganho substancial na eficiência energética, irrompe consequências negativas ao quesito qualidade da energia. Contemplou que o aumento da distorção harmônica na tensão de fornecimento infere um aumento na distorção harmônica de corrente no fator de potência, principalmente nas lâmpadas fluorescentes compactas. Sendo assim, atinou um aumento na dissipação de calor no bulbo das lâmpadas ensaiadas e perda na iluminância, fazendo que seu rendimento sofra queda. Como resultado disso, a expectativa de vida útil é reduzida pois os circuitos que utilizam capacitores são sensíveis a

distorções harmônicas. Sendo estes componentes carregados pelo valor de pico da tensão, isto é, o alto fator de crista, podem causar a explosão do mesmo, entre outros danos que o calor excessivo podem provocar. À vista disso, é necessária uma fiscalização rigorosa por parte dos setores competentes a fim de penalizar os fabricantes que não atenderem os quesitos mínimos da qualidade de energia elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) por fornecer recursos ao laboratório de qualidade de energia elétrica, com a fonte 360 AMX da Pacific Power Sourcer Inc.

## REFERÊNCIAS

- [1] ABILUX. Associação Brasileira da Indústria de Iluminação. Requisitos de avaliação da conformidade para lâmpadas fluorescentes compacta com reator integrado a base. Portaria nº 489 de dez. 2010. Disponível em: <[http://www.abilux.com.br/portarias/01\\_portaria\\_489-2010.pdf](http://www.abilux.com.br/portarias/01_portaria_489-2010.pdf)>. Acesso em 12 jan. 2013.
- [2] R. P. B. Silva, V. H. F. Brito, E. O. P. Carvalho, M. M. David e M. S. Quinalia and L. C. P. Silva. The Influence of Compact Fluorescent Lamps in Power Measurement and Billing. EEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 14, NO. 4, pp 1822, APRIL 2016.
- [3] Clerice, G.A.M.; Ulson, J.A.C.; Borges, F.A.; Mancussi, B.E.P.; Creppe, R.C.; Coelho, S.S.; Campos, F. S.; Alves, A.F., Influência das Distorções Harmônicas de Tensão na Operação de Lâmpadas de Descargas Comerciais, X CBQEE, Araxá-MG, 2013.
- [4] Arrillaga J.; Watson N. R.. Power System Harmonics. New Zealand: John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [5] IEC 61000 Series.
- [6] IEEE Std 519-1992, Helps Define Application Of Harmonic Limits.
- [7] IEEE Std 1531-2003, Guide For Application And Specification Of Harmonic Filters.
- [8] C. S. Prasana Kumar, S. P. Sabberwal, A. K. Mukharji, "Power Factor Measurement And Correction Techniques", Electric Power System Research, no.32, pp. 141-143, 1995.
- [9] Philips Lighting Division. Manual de Iluminação. 3ª Ed. Eindhoven, Holanda, 1986.
- [10] Andreoli, A.L. Modelagem de Lâmpadas de Descarga: uma Análise de Desempenho Considerando Parâmetros de Qualidade da Energia. Tese (doutorado), Universidade de São Paulo, São Carlos. 2011.
- [11] Scopacasa, V. Os LEDs: de pequenos notáveis a titãs do futuro. Disponível em: <[http://lumearquitectura.com.br/pdf/ed43/ed\\_43%20EP%20-%20LEDs.pdf](http://lumearquitectura.com.br/pdf/ed43/ed_43%20EP%20-%20LEDs.pdf)>. Acesso em 3 jan 2015.
- [12] Rangel, G. R.; Silva, P.B. LED - Iluminação de estado sólido, Universidade do Vale do Paraíba. 2009.
- [13] ABILUX. Associação Brasileira da Indústria de Iluminação. Lâmpadas LED ganham Selo Procel. Disponível em: <<http://www.abilux.com.br/portal/noticiasInt.aspx?id=120>>. Acesso em 3 jan 2015.

## REFERÊNCIAS



**Guilherme Augusto Marabizzi Clerice**, possui graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Universidade Paulista (2012), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (FEB/UNESP - 2014). Atualmente é aluno regular de doutorado no programa em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista (FEB/UNESP). Seu campo de pesquisa concentra-se nas áreas de: sistemas inteligentes, controle de sistemas dinâmicos, processamento de sinais e sistemas de controles tolerantes a falhas (SCTF) em dispositivos elétricos/eletrônicos. <http://lattes.cnpq.br/7112664633501360>.



**Bruno Albuquerque de Castro**, é mestre em Engenharia Elétrica e Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual Paulista - Unesp, campus de Bauru. Atualmente é docente substituto do Departamento de Engenharia Elétrica da Unesp, campus de Bauru. Possui campo de pesquisa na área de sistemas inteligentes, processamento de sinais, análise não destrutivas no monitoramento de dispositivos e estruturas

(SHM), emissão acústica, desenvolvimento de motores de indução e sistemas de controle e automação. Também foi membro do conselho da pós graduação da Faculdade Engenharia e é revisor periódico da revista IEEE América Latina. <http://lattes.cnpq.br/8045301068970267>



**José Alfredo Covolan Ulson**, possui graduação em Engenharia Elétrica pela UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - (1990), mestrado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela UNESP (1997) e doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela UNESP (2002). Atualmente é professor assistente doutor e chefe do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade

de Engenharia de Bauru - UNESP. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Controle e Automação Eletrônica de Sistemas Elétricos e Processos Industriais, atuando principalmente nos seguintes temas: identificação de sistemas, sistemas inteligentes, controle e automação de processos, sensores e instrumentação, processamento de sinais. <http://lattes.cnpq.br/4517057121462258>



**André Luiz Andreoli**, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista (1997), mestrado em Engenharia Industrial pela Faculdade de Engenharia de Bauru - Universidade Estadual Paulista (2005) e doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade de São Paulo (2011).

Atualmente é professor assistente doutor da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Qualidade da Energia Elétrica, atuando principalmente nos seguintes temas: eficiência energética, eletrônica industrial, máquinas elétricas e dispositivos de potência, acionamento de máquinas elétricas e automação eletrônica de processos elétricos e industriais. <http://lattes.cnpq.br/8962036732560069>



**Nelson Medeiros da Silva Filho**, possui graduação em Licenciatura Plena em Física pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho - UNESP (Bauru - 2007) e em Tecnologia em Sistemas Biomédicos pela Faculdade de Tecnologia de São Paulo - FATEC (Bauru - 2011). Participou como aluno especial do programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da

UNESP/Bauru. Possui formação nível técnico em habilitação Eletrônica pelo Colégio Técnico Industrial da UNESP-Bauru. Atualmente é Assistente de Suporte Acadêmico - Especialidade Eletrônica, do Depto. Eng. Elétrica da Faculdade de Engenharia da UNESP de Bauru (FEB - UNESP). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica e Ensino de Física, com ênfase em Sistemas Industriais, Qualidade da Energia Elétrica, Eletrônica de Potência, Circuitos Eletrônicos e Automação de Processos, Administração da Manutenção, Ensino de Física Geral e Aplicada. <http://lattes.cnpq.br/8348916505693957>



**Rudolf Ribeiro Riehl**, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade de Bauru (1985) e Mestrado (1994) e Doutorado (2010) em Engenharia Elétrica pela Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). Atualmente é Professor Assistente - Doutor do Departamento de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia da UNESP, Campus de

Bauru. Atua nas áreas de Acionamentos e Controle de Máquinas Elétricas e Qualidade de Energia, com ênfase em automação eletrônica de processos elétricos e industriais, projeto de conversores estáticos de potência, ensaios de máquinas elétricas e instrumentação. <http://lattes.cnpq.br/3649226507115021>