

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM APARELHO MEDIDOR DE FLICKER POR MEDIÇÃO DIRETA DA VARIAÇÃO LUMINOSA

Guilherme P. Colnago¹, José Rubens Macedo Jr.² e José Luiz F. Vieira³

¹Universidade Federal de Sergipe - Departamento de Engenharia Elétrica

²Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Elétrica

³Universidade Federal do Espírito Santo - Departamento de Engenharia Elétrica
Cidade Universitária - Av. Marechal Rondon, s/n - São Cristóvão/SE
guilhermecolnago@gmail.com

Resumo - Este artigo apresenta o desenvolvimento de um novo medidor de *flicker* baseado na análise direta da variação instantânea do fluxo luminoso. A proposta do medidor é baseada no *Flickermeter* IEC modificado, o que permite medir o *flicker* produzido por flutuação de tensão em lâmpadas de tecnologias distintas. Isso o torna uma alternativa ao *Flickermeter* convencional, que não apresenta resultados válidos para ambientes iluminados com lâmpadas não-incandescentes. Um protótipo do equipamento foi desenvolvido e os resultados obtidos são apresentados e analisados.

Palavras-Chave – Flicker, Flickermeter, Flutuação de Tensão, Variação do Fluxo Luminoso.

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A FLICKERMETER WITH LUMINOUS FLUX VARIATION MEASUREMENT

Abstract – This paper presents the development of a new Flickermeter with direct luminous flux variation measurement. It is based on IEC's Flickermeter and can measure the flicker produced from lamps of different technologies under voltage fluctuation. The device is an alternative to the IEC's Flickermeter (that is limited). The experimental results of the prototype are presented and analyzed.

Keywords – Flicker, Flickermeter, Luminous Flux Variation, Voltage Fluctuation.

I. INTRODUÇÃO

A flutuação de tensão é um distúrbio mensurado, em geral, através do *flicker* (cintilação) produzido. Segundo o *Lighting Handbook* da *Illuminating Engineering Society of North America* o *flicker* é “a variação rápida na intensidade luminosa de uma fonte de luz”. Portanto, o *flicker* pode ser entendido como sendo a variação do fluxo luminoso de uma lâmpada submetida à flutuação de tensão. Um indivíduo submetido continuamente ao *flicker* pode sofrer de desconforto visual a convulsões. Logo, a limitação da flutuação na rede elétrica e, conseqüentemente, a limitação

do *flicker*, é uma necessidade, visto os efeitos adversos que podem provocar ao homem.

As normas buscam definir limites adequados para o *flicker*. No Brasil, o PRODIST define a metodologia de medição e sugere valores de referência [1]. Normas internacionais como a IEEE 1453 também tratam do tema [2]. Grande parte das normas (inclusive as citadas) é baseada na metodologia de medição da norma IEC 61000-4-15, que propõe um medidor de *flicker*, chamado *Flickermeter* [3].

O *Flickermeter* modela o sistema lâmpada-olho-cérebro, simulando a resposta do olho-cérebro (sistema visual) e da lâmpada incandescente (LI) às flutuações de tensão. Dessa forma, o sistema mensura o nível do *flicker* percebido.

Apesar da adoção do *Flickermeter* por grande parte da comunidade internacional, há problemas. O maior é que o medidor só apresenta resultados corretos de *flicker* para as lâmpadas incandescentes. Como o modelo é baseado nessa tecnologia, a simulação do sistema é limitada pela dinâmica dessas lâmpadas. Para os casos onde há iluminação com tecnologias distintas, como as lâmpadas fluorescentes ou as lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*), os resultados do *flicker* não são válidos – observação da própria norma [3]. A deficiência fica evidente na presença de flutuação de tensão associada à inter-harmônicas [4]-[6]. Há ainda problemas na divergência na medição. A norma define as características gerais do medidor, deixando liberdade na implementação para os desenvolvedores. O que pode implicar em medidores distintos e válidos produzindo resultados divergentes em uma mesma medição [7]-[10].

O modelo tem ainda mais um problema: as lâmpadas incandescentes estão caindo em desuso, pois no atual contexto da eficiência energética elas estão sendo substituídas por lâmpadas mais eficientes, como a Lâmpada Fluorescente Compacta (LFC) e a Lâmpada de LED (LLED). A União Europeia substituiu as incandescentes por lâmpadas mais eficientes e “proibiu” a fabricação das incandescentes, em vigor desde 2012 [11]. No Brasil uma portaria proíbe comercialização das lâmpadas incandescentes de maior potência (31/12/2012) e elimina as ineficientes até 30/06/2016 [12].

Essas razões fizeram a comunidade internacional procurar métodos alternativos de mensuração do *flicker*. Na literatura há diversas propostas, nas quais se pode citar: modelagem analítica das lâmpadas [13], análise espectral da flutuação de tensão [14],[15], resposta em frequência para modelo olho-cérebro [16], redes neurais [17] e até resposta fisiológica do olho humano [18]. Entretanto, tais abordagens se mostraram pouco promissoras (resultados limitados ou trabalhos sem

Artigo submetido em 15/04/2013. Primeira revisão em 17/07/2013, segunda revisão em 06/10/2013. Aceito para publicação em 06/10/2013, por recomendação do Editor Henrique A. C. Braga.

continuidade e pouco viáveis). Aparentemente, uma abordagem promissora é feita a partir da medição direta [4],[19]-[21], com resultados positivos.

A proposta deste artigo, então, é o desenvolvimento e a implementação de um aparelho medidor de *flicker* através da medição direta da variação luminosa. E, ao contrário de propostas similares, que trabalham com instrumentação virtual e têm plataforma baseada no microcomputador, neste trabalho foi desenvolvido um sistema embarcado para a medição do *flicker*, como alternativa para os medidores de *flicker* convencionais.

II. FLICKERMETER

Como os indicadores de flutuação são calculados a partir dos níveis de *flicker* (seu efeito mais conhecido), é comum haver confusão entre os fenômenos. A flutuação pode ser definida como “variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão” [1], sendo geralmente produzida por cargas com rápidas alterações na magnitude da potência ou dispositivos que introduzem inter-harmônicas na rede (ciclo-conversores ou cargas de dupla conversão) [22]. Já o *flicker* é a cintilação resultante de lâmpadas submetidas a essas flutuações de tensão.

A relação entre os fenômenos é ilustrada na Figura 1. A Figura 1 (a) apresenta uma forma de onda de tensão $v(t)$ de 120V/60Hz com flutuação, que se assemelha à modulação quadrada, com frequência f_{MOD} de 10Hz e variação de amplitude Δv de 5%, com o valor eficaz $V_{RMS}(t)$ fluindo no tempo. A tensão aplicada em uma lâmpada incandescente de 60W produziu a iluminância instantânea ilustrada na Figura 1 (b), medida com um luxímetro. Tal variação de amplitude implica em *flicker* severo.

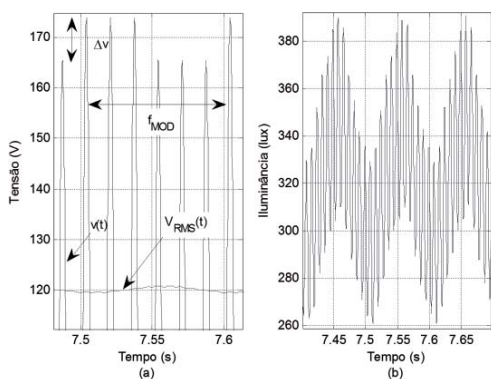


Fig. 1. Tensão com flutuação de 5% e 10Hz (a) e iluminância produzida em lâmpada incandescente de 60W (b).

Observada a diferença e a relação entre os fenômenos, pode-se abordar o *Flickermeter*. Seu objetivo é mensurar o nível de *flicker* e é dividido em 5 partes, conforme diagrama de blocos da Figura 2. O bloco 1 amostra, realiza conversão analógico-digital (A/D) e normaliza o sinal de entrada (flutuação de tensão). O sinal é processado nos blocos 2, 3 e 4, que simulam o sistema lâmpada-olho-cérebro submetido à flutuação de tensão. A saída P_{inst} do bloco 4 é o *flicker* instantâneo. Ele é processado no bloco 5 (estatístico) e o nível de severidade do *flicker* é determinado – detalhes em [23],[3]. Como a flutuação tem características aleatórias, dois parâmetros são calculados para indicar o *flicker*: o Pst e o Plt. O Pst indica a severidade em períodos curtos (minutos) e o Plt em períodos longos (horas). Ambos “quantificam” a percepção humana ao *flicker*. O limiar da irritabilidade é 1pu, no qual 50% dos observadores são afetados (conforme estudos realizados [3]). Os indicadores de Flutuação de Tensão são calculados a partir do Pst e Plt [1].

Como o *Flickermeter* utiliza o modelo da LI, agrega-se a dinâmica da lâmpada (lenta comparada a outras) à resposta. Essa dinâmica pode ser aproximada por um sistema de 1ª ordem [24] e a constante de tempo da lâmpada incandescente pode ser obtida experimentalmente aplicando-se um degrau de tensão eficaz (e.g. 120V a 125V). A Figura 3 (a) ilustra a iluminância no teste com uma lâmpada incandescente de 60W. Ela alcançou o regime em 115ms, o que implica em uma constante de tempo de 23ms. Portanto, a função de transferência (ganho unitário) da lâmpada pode ser aproximada por (1). A LFC 15W também foi testada com um degrau de tensão e sua resposta é exibida na Figura 3 (b), no qual se observa tempo de acomodação pequeno (próximo de 20ms) e coerente com a resposta rápida esperada.

$$F_{LI}(s) = \frac{1}{0,023s + 1} \quad (1)$$

Sendo:

s - variável complexa no domínio da frequência.

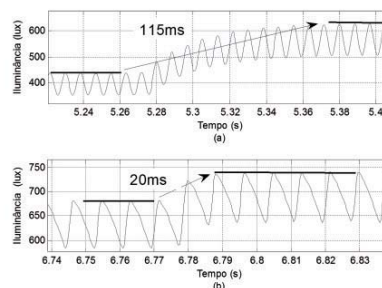


Fig. 3. Respostas em iluminância da lâmpada incandescente de 60W (a) e da LFC 15W (b) ao degrau de tensão.

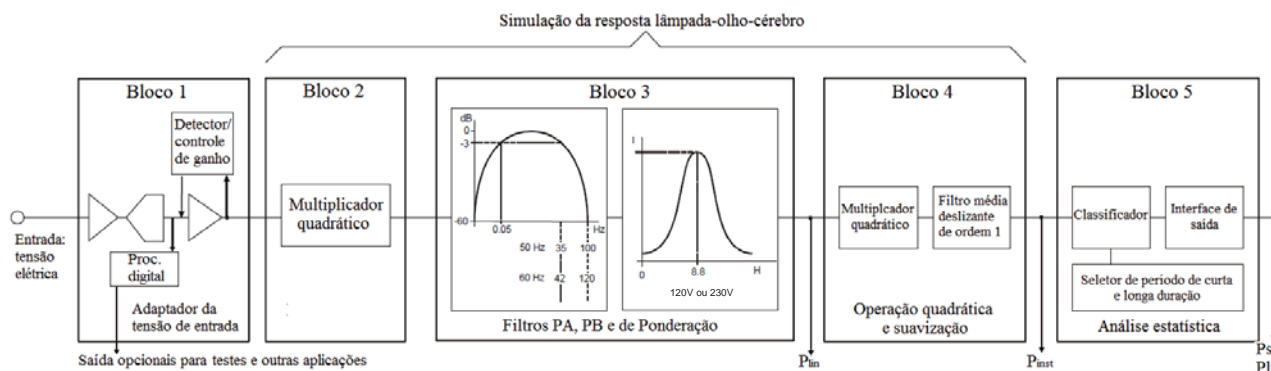


Fig. 2. Diagrama de blocos do *Flickermeter* IEC.

O diagrama de módulo da resposta em frequência de (1) está ilustrado na Figura 4. Como a frequência de corte é 7Hz, frequências superiores a 40Hz são fortemente atenuadas, ou seja, sinais “rápidos” são filtrados pela lâmpada. A dinâmica lenta da LI é um problema no *Flickermeter*, pois ele não responde a flutuações de frequências altas, o que não é adequado para sistemas com outras lâmpadas, como a LFC e a LLED, mais rápidas. As LFC, por exemplo, tem constante de tempo de arco da ordem de 5ms [25], conforme exemplo da Figura 3 (b).

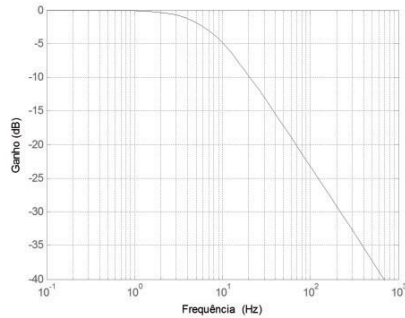


Fig. 4. Diagrama de módulo da resposta em frequência da LI 60W.

As LFC e as LLED têm dinâmica rápida e distinta da LI, sendo sensíveis às variações rápidas e à modulação de pico [4],[26]. As diferenças são evidentes já na forma de operação. A Figura 5 apresenta as curvas de tensão-corrente obtidas com uma placa de aquisição. A incandescente é linear (comportamento resistivo), já a LFC é não-linear, com corrente pulsada. Ambas as curvas estão na Figura 5 (a). Da mesma forma se avaliou dois modelos de lâmpadas de LED, denominados LLED 1 e 2, cujas curvas de tensão-corrente são ilustradas na Figura 5 (b). A não-linearidade é evidente. LLED 1 tem um *driver* mais simples (retificador), enquanto LLED 2 tem um *driver* mais complexo e melhor regulado. Nota-se que a forma da curva tensão-corrente de LLED 2 é parecida com LI, com corrente pulsada.

III. FLICKERMETER PROPOSTO

A proposta deste trabalho é desenvolver e implementar um *Flickermeter* Modificado que solucione os problemas (ou parte deles) do *Flickermeter* Original – que doravante serão denominados como FLM e FLO, respectivamente.

Foi sugerido anteriormente que o principal problema do FLO é o uso do modelo da lâmpada incandescente, pois os resultados não podem ser aplicados para outras lâmpadas [22],[4]. A solução de modelar e utilizar no FLO os diversos modelos de lâmpadas incandescentes e outros tipos é pouco viável. Primeiro porque os modelos variam de lâmpada para lâmpada (aspectos construtivos e funcionais) e as lâmpadas

não-incandescentes têm modelos complexos; segundo, e um ponto pouco (ou não) abordado na literatura, é que o tipo de iluminação adotada nas residências não é tão previsível quanto a 50 anos atrás. Atualmente o uso é misto, com LFC, incandescentes e LLED (aumentando).

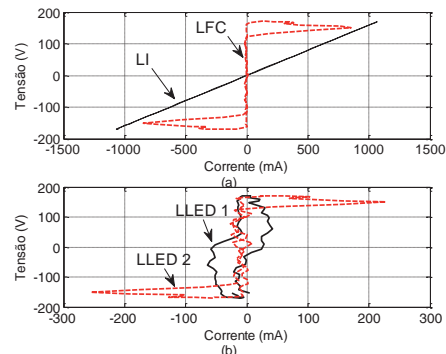


Fig. 5. Curvas corrente-tensão: LI e LFC (a) e LLED 1 e 2 (b).

Considerando que o fenômeno medido é o *flicker*, o FLO tem uma abordagem indireta, pois o *flicker* é determinado a partir do processamento do sinal de flutuação de tensão aplicado a um modelo de lâmpada – e isso cria o problema. Uma possível solução é a eliminação do modelo da LI e a medição direta da iluminância. Isso daria independência do tipo de lâmpada, pois haveria cintilação conforme as características de cada lâmpada. Nessa abordagem foi desenvolvido o FLM, composto por 4 blocos (A a D) e cujo diagrama está ilustrado na Figura 6. Deve-se destacar que o FLO foi desenvolvido considerando LI 60W alimentadas por sistemas de 120V ou 220V e frequência fundamental de 50Hz ou 60Hz. Qualquer combinação de tensão e frequência pode ser feita, bastando reprojeter os filtros (mudança de frequência) e alterar a função de transferência da lâmpada (mudança da tensão). Como o FLM foi projetado para 120V e 60Hz, os testes e experimentos foram feitos em 120V. Entretanto ele pode operar em 127V ou 220V, visto que o sistema não tem dependência da lâmpada (a função de transferência foi removida).

A. Bloco A – Entrada Luminosa

O bloco 1 foi substituído pelo bloco A no FLM. Como a medição é direta, a entrada é a iluminância. Para a conversão iluminância-tensão escolheu-se o fotossensor ISL29101, da Intersil, de resposta rápida, pois flutuações com frequências altas (poucas centenas de Hertz) podem causar *flicker*. Foi considerado que a soma dos tempos de subida, descida e atrasos da ordem de 500us, o que permite resposta adequada para a faixa desejada. Outro aspecto relevante é a resposta espectral luminosa. Como o sensor emula a resposta espectral do olho humano, ele deve ter resposta similar. A

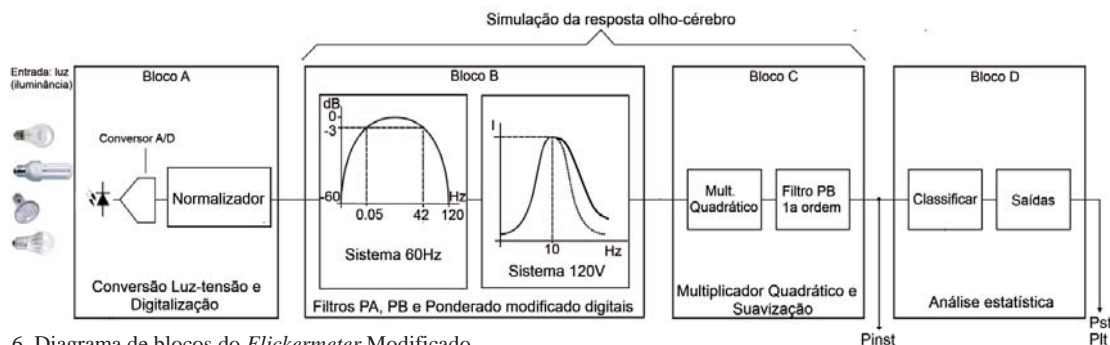


Fig. 6. Diagrama de blocos do *Flickermeter* Modificado.

resposta do olho [27] e do fotossensor são comparadas na Figura 7. Pode-se notar que são semelhantes (salvo pequeno deslocamento), com sensibilidade máxima em 560nm.

Como lâmpadas diferentes têm espectros distintos, há essa necessidade de resposta. A Figura 8 ilustra os espectros genéricos de algumas lâmpadas. O espectro da LI é amplo e contínuo, enquanto a LFC concentra o espectro em 4 ou 5 faixas e tem índice de representação de cores baixo (comparado ao índice da LI). A LLED tem limitação similar.

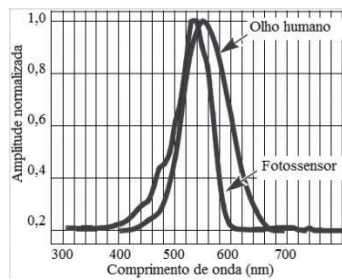


Fig. 7. Resposta espectral luminosa do olho x sensor ISL29101.

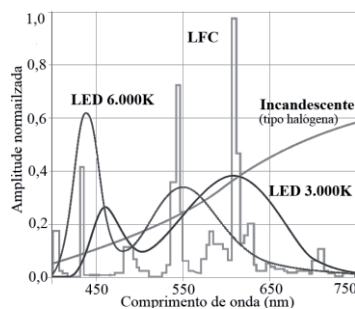


Fig. 8. Exemplo de espectro luminoso de lâmpadas incandescente (halógena), fluorescente compacta e LED (adaptado de [28]).

Após a conversão da iluminância para tensão, o próprio sensor condiciona e lineariza o sinal, que passa por um filtro *Antialiasing* e é digitalizado por um conversor analógico-digital (A/D). As outras etapas são realizadas em *firmware* (microcontrolador). O sinal digital é normalizado por um algoritmo, conforme o diagrama da Figura 9. É usado um filtro digital passa-baixas de ordem 1 e constante de tempo de 27,3s. Ele é especificado por [3] e permite que a flutuação seja mantida após a normalização. Como originalmente a entrada é um sinal de tensão, o filtro é aplicado sobre o valor eficaz. Como no FLM a entrada é iluminância, aplica-se o filtro no sinal (visto que não é alternado). O valor médio gerado divide o sinal e o normaliza. Há ainda um bloco saturador que evita *overflow* no transitório ou em flutuações muito severas (acima de 20% e não tão comuns).

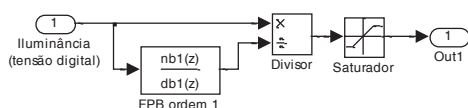


Fig. 9. Diagrama de blocos do normalizador do bloco A.

B. Bloco B – Filtragem

O bloco B processa o sinal normalizado vindo do bloco A, conforme Figura 6. Ele é similar ao bloco 3 do FLO, sendo composto por filtros digitais. Os filtros são definidos em [3]

e foram mantidos, pois suas funções continuam necessárias. Por outro lado, bloco 2 foi eliminado, pois sua função é irrelevante no novo sistema. Seu intuito era simular a relação quadrática entre a tensão e o fluxo luminoso da lâmpada incandescente [3],[29]. Com a medição direta, esse efeito é produzido pela própria lâmpada.

No bloco B, o filtro passa-altas (FPA) utilizado é do tipo *Butterworth* de ordem 1 e frequência de corte de 0,05Hz. Ele elimina o valor médio do sinal, que não está associado à cintilação. O filtro passa-baixas (FPB) é do tipo *Butterworth* de ordem 6 e frequência de corte de 42Hz (para sistemas de 60Hz). Ele atenua altas frequências e demodula o sinal, ou seja, elimina a portadora (120Hz) e mantém frequências causadoras do *flicker*.

As frequências causadoras do *flicker* são de baixo valor, da ordem de milihertz (mHz) a poucas dezenas de hertz. Valores entre 1mHz a 40Hz estão no conjunto perceptível, sendo utilizados nos procedimentos de testes da norma [3]. Essa é a faixa de percepção visual humana à modulação do fluxo luminoso. O ponto de maior sensibilidade está em 8,8Hz. Já o limite da percepção, chamado Frequência Crítica de Cintilação, varia de 15Hz a 100Hz de indivíduo para indivíduo [30]. Os filtros, portanto, foram definidos para manter essa faixa de frequência.

Apesar do *flicker* em frequências superiores não ser perceptível, ele pode causar problemas. Se uma máquina rotativa é iluminada por uma lâmpada que cintila, e a frequência do *flicker* e da rotação são iguais, a combinação cria a impressão de que a máquina está parada. Essa ilusão visual é chamada de efeito Estroboscópico e pode ocorrer em frequências superiores, como 120Hz. No passado, indústrias iluminadas com lâmpadas incandescentes ou fluorescentes (com reator magnético) podiam sofrer desses problemas, inclusive com acidentes. Mesmo para as lâmpadas modernas esse efeito ainda pode ser um problema e não é tolerado em locais onde a acuidade visual é exigida.

O último filtro é uma função de transferência que simula a dinâmica lâmpada-olho. A função original é dada por (2) [3], sendo denominada Filtro de Ponderação. A remoção da dinâmica da lâmpada foi realizada em (3), dividindo-se (2) por (1). O resultado é o Filtro de Ponderação Modificado, descrito em (4). O diagrama de módulo da resposta do filtro de Ponderação Original e Modificado está ilustrado na Figura 10, além da função da lâmpada incandescente. Ela é “subtraída” de $F_{Orig}(s)$, produzindo $F_{Mod}(s)$. O filtro modificado terá atenuação de 20dB/década a menos na banda de rejeição superior, pois a lâmpada foi eliminada. Já a banda de rejeição inferior manteve-se igual. A banda de passagem teve pequena alteração, mas se manteve com frequência central de 8,8Hz, ponto de maior sensibilidade visual.

$$F_{Orig}(s) = \frac{5,1s^2 + 93,3s}{0,001s^4 + 0,2s^3 + 10,9s^2 + 453s + 3253} \quad (2)$$

$$F_{Mod}(s) = \frac{F_{Orig}(s)}{F_{LI}(s)} \quad (3)$$

$$F_{Mod}(s) = \frac{0,1s^3 + 7,2s^2 + 93,3s}{0,001s^4 + 0,2s^3 + 10,9s^2 + 453s + 3253} \quad (4)$$

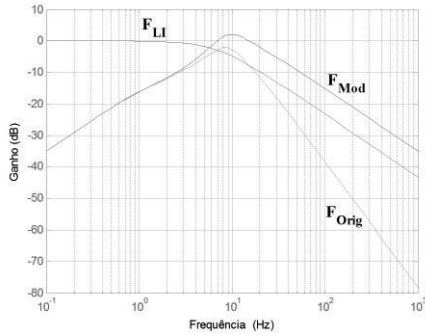


Fig. 10. Diagrama de módulo da função de transferência da lâmpada incandescente e dos filtros de Ponderação Original e Modificado.

O diagrama de blocos na Figura 11 ilustra como foi feita implementação do bloco B. Os filtros passa-altas e passa-baixas estão combinados em um bloco, que é seguido de um amplificador. Ele é necessário, pois o sinal é bem atenuado no bloco B (o componente fundamental tem 120Hz). Sem essa correção o processamento numérico em ponto fixo introduz erro significativo devido à pequena amplitude do sinal. Na sequência está o saturador (evitar *overflow*) e o Filtro de Ponderação Modificado.

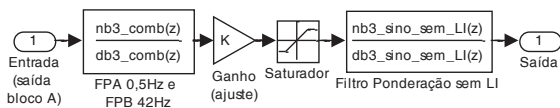


Fig. 11. Diagrama de blocos para implementação do bloco B.

C. Bloco C – Efeito Não-linear e Memória

O bloco C igual ao bloco 4 do FLO, visto que as funções devem ser mantidas. Juntamente com os blocos A e B, ele simula o sistema olho-cérebro e sua característica não-linear (exponencial) [31]. Essa tarefa é realizada pelo multiplicador quadrático. Na sequência há um saturador e um filtro passa-baixas, de ordem 1 e constante de tempo de 0,3s. É definido em [3] e é uma média móvel para simular o efeito de “memória” do sistema visual (resposta lenta). O bloco B é implementado conforme o diagrama da Figura 12. A saída é o *flicker* instantâneo. O ganho da saída é definido no processo de ajuste do FLM. Ele segue um processo de calibração determinado pela norma, no qual um determinado conjunto de flutuações deve produzir *flicker* instantâneo de 1pu de amplitude [3]. Esse valor de 1pu define o limiar da percepção do *flicker*, no qual, estatisticamente, 50% dos indivíduos percebem a cintilação [3],[23].

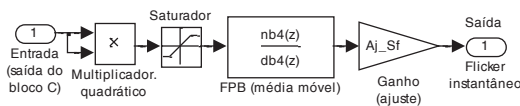


Fig. 12. Diagrama de blocos para implementação do bloco C.

D. Bloco D – Análise Estatística

O bloco D tem o mesmo princípio do bloco 5, pois a concepção da análise não muda. Ele realiza um tratamento estatístico para quantificar a severidade do *flicker* em um período de observação, simulando a percepção de uma pessoa. O período pode ser de 1 a 15 minutos e durante esse

tempo é realizada a amostragem do *flicker* instantâneo, com taxa de 240 amostras/s. As amostras são distribuídas em classes, que representam as faixas do *flicker*. Isso é feito dividindo-se amostra pelo “passo” (tamanho) das classes. São utilizadas 2048 classes (devido limite de memória) – esse valor, assim com a taxa de amostragem, é superior ao mínimo estabelecido em [3]. O fluxograma da Figura 13 (a) descreve o procedimento aplicado do bloco. As classes são incrementadas à medida que há ocorrência de valor de *flicker* instantâneo que esteja na classe.

No fim do período, as classes são processadas em uma função de probabilidade acumulativa, como na Figura 13 (b), para se determinar os percentis de *flicker*. O percentil indica o valor de nível de *flicker* com ocorrência que excede o tempo de observação em um determinado percentual. Para ilustrar: o percentil $P_{50} = 2,3$ indica ocorrências de *flicker* instantâneo de 2,3pu excede 50% do período de observação.

O resultado dessa avaliação estatística é o indicador de probabilidade de curto prazo, o Pst (*Probability short term*), que indica a severidade do *flicker*, e é definido por (5). O Plt, indicador de longa duração, é definido conforme (6) [3].

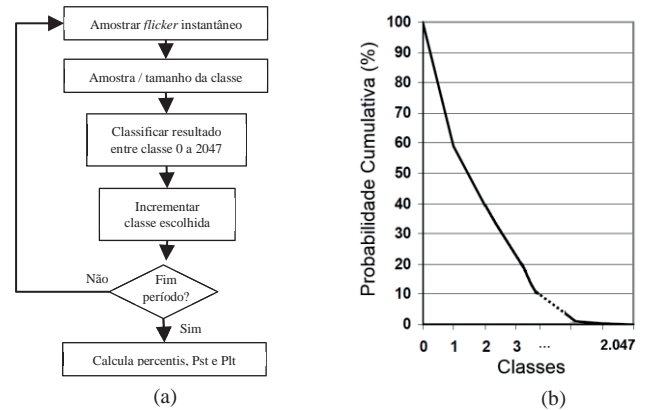


Fig. 13. Fluxograma para cálculo do Pst e Plt (severidade do *flicker*) (a) e Curva de probabilidade cumulativa do *flicker* instantâneo (b).

$$Pst = \frac{\sqrt{314P_{0,1} + 525P_{1s} + 657P_{3s} + 2800P_{10s} + 800P_{50s}}}{100} \quad (5)$$

Sendo:

P_i - percentis referentes aos níveis de flicker excedidos em $i\%$ do tempo no período de observação.

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^N Pst_i^3}{N}} \quad (6)$$

Sendo:

$N = 12$ (= 2 horas, se período do Pst for 10 minutos)

Pst_i ($i=1, \dots, N$) - leituras consecutivas de Pst.

IV. SISTEMA DE MEDIÇÃO

A Figura 14 exhibe o diagrama funcional do protótipo. O sinal do sensor é filtrado (*antialiasing*) e digitalizado. A conversão A/D é feita no microcontrolador. Tem resolução de 12 bits (mínimo da norma [3]) e taxa de amostragem de 2.400 amostras/s, que atende a norma e tem período menor

que a resposta do fotossensor. Como a faixa avaliada neste trabalho é de algumas centenas de hertz, o filtro *Antialiasing* foi definido com frequência de corte de 500Hz, sendo do tipo *Butterworth* de ordem 8.

O protótipo implementado está ilustrado na Figura 15. Ele usa o microcontrolador dsPIC33FJ256GP710, da *Microchip*, de baixo custo e com *hardware* adequado ao processamento. Destaca-se: *hardware* para processamento de sinal, operação com ponto fixo, palavra de 16 bits, *clock* 38,4MHz (usado), memória volátil de 30kB e conversor A/D interno.

Como é um sistema embarcado, foi implementada uma interface para comunicação serial com computador via USB (*Universal Serial Bus*) e um módulo para cartão de memória *flash* para armazenar resultados da medição. Comunicação e leitura são feitas por aplicativos também desenvolvidos.

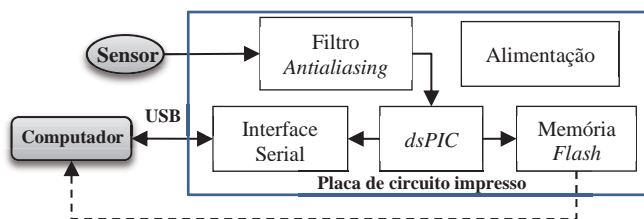


Fig. 14. Diagrama de blocos funcional do protótipo.

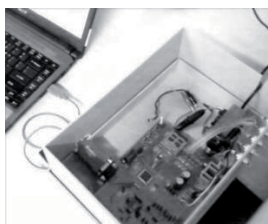


Fig. 15. Fotografia do protótipo implementado.

O processo de medição é realizado dentro de uma câmara de dimensões 70x50x50cm. Dentro estão a lâmpada e o fotossensor, que é alimentado pelo protótipo e fornece os valores de iluminância. O diagrama na Figura 16 ilustra o sistema de teste. A lâmpada é alimentada por um gerador de função de potência (fontes programáveis HP CSW11000 e Chroma 6512). As flutuações foram produzidas com sinais de tensão eficaz de 120V e 60Hz, modulados por onda quadrada (ou senoidal). Os parâmetros variados são amplitude (percentual) e a frequência da flutuação.

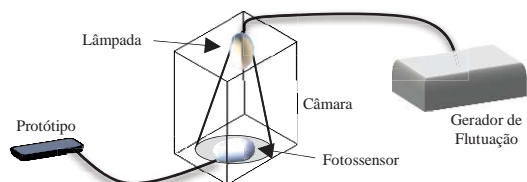


Fig. 16. Diagrama de sistema de testes.

A. Lâmpadas

Os experimentos foram realizados com lâmpadas de tipos e fabricantes diversos. Este trabalho apresenta resultados para três tecnologias comuns em residências: LI, LFC e LLED, referenciadas como:

- Lref: LI 60W/127V/60Hz clássica;
- L1: LFC 20W/127V/60Hz tipo 3U;

- L2: LLED 4W/127/60Hz tipo *spot*;
- L3: LLED 5W/bivolt tipo Bulbo.

Nos ensaios, Lref é utilizada como referência para ajustar o sistema, pois o FLO é baseado na lâmpada de 60W. Ela foi o “elo” funcional entre o FLM e o FLO nas análises iniciais.

A lâmpada fluorescente compacta é representada por L1 e pode ser dividida em cinco blocos: filtro CA, retificador, filtro CC, inversor e bulbo, conforme diagrama na Figura 17. Diversas estruturas são encontradas no mercado e literatura, desde as mais simples (sem filtro CA e correção de fator de potência) a modelos sofisticados com alto fator de potência. Nesse último caso encontram-se muitas estruturas. Em [32], por exemplo, um conversor *buck-boost* é integrado a um inversor ressonante formando uma única etapa para elevação do fator de potência e inversão. Entretanto, na prática, o mercado trabalha com modelos de baixo custo e simples. Foram avaliados modelos populares com fator de potência superior a 0,5, sendo observadas similaridades na operação (curva tensão-corrente) e na resposta à flutuação (*flicker*).

Como o principal elemento na geração de *flicker* é o reator eletrônico, os resultados estão limitados a reatores “simples”, com fator de potência e potência próximos de L1. Na prática, L1 é similar a muitas compactas, sendo, então, selecionada para representar a dinâmica de parte delas. Ainda na questão do reator, uma aplicação interessante para o FLM seria a análise do desempenho desses elementos submetidos às flutuações. Como observado por [33], uma forma de limitar o *flicker* é garantir uma potência instantânea constante para a lâmpada através de um reator adequado.

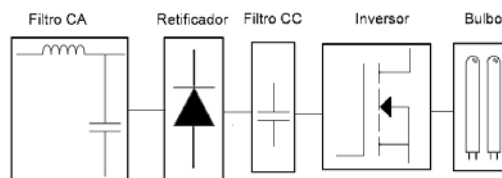


Fig. 17. Diagrama de blocos funcional genérico de uma LFC.

As lâmpadas LED podem ter estruturas simples como diagrama da Figura 18 (a), com retificador e dois capacitores, a estruturas bem sofisticadas. Foram observados modelos com diferenças mais significativas que os observados no caso das compactas, isto é, os modelos mais simples de lâmpadas LED tiveram “desempenho” inferior aos modelos mais complexos – isto é, maior a produção de *flicker* na ocorrência de flutuação de tensão. Apesar das diferenças, os preços das lâmpadas são próximos. Por essas razões são apresentados resultados para dois modelos distintos, representados por L2 e L3. A primeira diferença entre ambos está na operação, conforme as curvas de tensão-corrente da Figura 5 (b), sendo que L2 é LED 1 e L3 é LED 2; a segunda é referente ao *flicker* produzido na existência de flutuação de tensão (descrito posteriormente).

Apesar de ter apenas uma etapa de conversão CA-CC (em geral), elas requerem cuidados. Segundo [34],[35], as lâmpadas de LED são suscetíveis à mudança de fluxo luminoso com a variação da potência dissipada. A relação entre potência e fluxo luminoso é ilustrada na Figura 18 (b) [35]. A topologia de malha aberta de L2, com circuito similar ao da Figura 18 (a), é suscetível à produção de *flicker*. Esse

tipo de problema não ocorre com L3, que tem controle em malha fechada (regulação de tensão e corrente nos LED eficiente). Estruturas controladas com alto fator de potência [36] ou mesmo com o capacitor eletrolítico sendo substituído [36],[37] – o que eleva a vida útil da lâmpada – vêm sendo proposta e podem alcançar um desempenho apropriado.

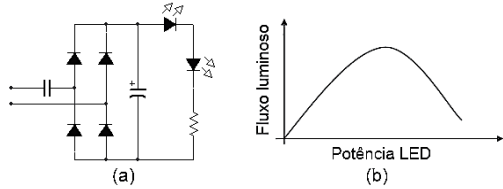


Fig. 18. Exemplo de estrutura simples para LLED (a) e relação entre fluxo luminoso e potência para LED de alto brilho.

V. EXPERIMENTOS E RESULTADOS

O primeiro teste foi feito para ajustar o sistema para obter-se *flicker* instantâneo de 1pu quando um conjunto de flutuações (com frequências e amplitudes determinadas em [3]) é aplicado em Lref. O resultado produzido foi ruidoso e houve necessidade de aplicar um algoritmo que encontrasse a média dos picos. Por ser um ajuste inicial, isso foi feito com auxílio de computador (*off-line*).

Parte do processo de medição é explicada com ajuda da Figura 19. Uma flutuação quadrada similar à Figura 1 (a), mas com módulo 3,2% e frequência de 1 variação/minuto, é aplicada em Lref. Isso provoca variação da iluminância, conforme exibido na Figura 19 (a). O sinal é processado nos blocos A, B e C e produz o *flicker* instantâneo, ilustrado na Figura 19 (b). Esse sinal passa por processamento estatístico no bloco D e produz o Pst, que indica a severidade do *flicker*.

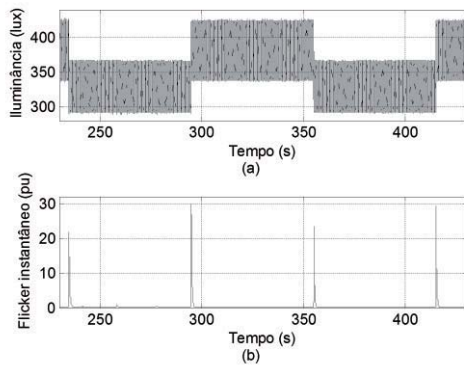


Fig. 19. Iluminância de entrada (a) e *flicker* instantâneo gerado (b).

O segundo ajuste é similar, com flutuações quadradas que produzem Pst de 1pu. Esse valor é o limiar da irritabilidade, no qual metade dos indivíduos sente incômodo visual. A Tabela I (definida em [3]) apresenta esse conjunto de flutuações para os testes. Na perspectiva dos autores é o principal ensaio, pois analisa a resposta em Pst do FLM.

Aplicando-se as flutuações da Tabela I em Lref se obtém os valores de Pst da Tabela II. A última coluna indica o erro do FLM para 1pu, que é o valor esperado (conforme norma). Os erros menores que 5% indicam adequação do FLM – a validação de um FLO requer erros na faixa de $\pm 5\%$ [3]. A análise visual permitiu constatar o *flicker* perceptível. Vários

dos ensaios foram observados por pessoas do laboratório (na faixa etária de 20 a 50 anos), que emitiram opinião sobre a percepção ou não do *flicker*. Tais informações não tem valor estatístico formal para os experimentos (não é a intenção), dando apenas uma ideia prática e ilustrativa (qualitativa) dos resultados.

TABELA I
Flutuações quadradas que produzem Pst = 1 ± 0,05 pu

Teste nº	Frequência		Amplitude (%)
	Varição/minuto	Hertz	
1	1	$8,33 \times 10^{-3}$	3,181
2	2	$16,7 \times 10^{-3}$	2,564
3	7	$58,3 \times 10^{-3}$	1,694
4	39	0,325	1,040
5	110	0,917	0,844
6	1.620	13,5	0,548
7	4.800	40,0	4,837

TABELA II
Lref submetida aos testes da Tabela I

Teste	Pst (pu)	Erro (%)
1	1,022	2,2
2	1,004	0,4
3	1,043	4,3
4	1,009	0,9
5	1,017	1,7
6	0,998	-0,2
7	0,986	-1,4

Com resultados promissores, as outras lâmpadas puderam ser avaliadas e os resultados estão apresentados na Tabela III. Visualmente não se observou *flicker*, que é coerente com os pequenos valores de Pst. A exceção foi o teste 7, pois o *flicker* foi percebido por alguns observadores em L1 e L2 – divergência é comum no limiar da percepção.

Nos resultados deve-se destacar também a resposta de L3, com baixíssimo valor de Pst (ordem 10x menor). Mesmo com o aumento da amplitude, não foi detectado nenhum *flicker* – visual e medido. Observando-se a iluminância de L2 e L3 na Figura 20, nota-se sinal constante em L3, enquanto L2 tem modulação de pico. Não se deve confundir essa modulação com o comportamento natural de L2, no qual a iluminância varia muito, indo de 0 ao valor de pico – típico de lâmpadas com *driver* de retificação simples. Essa variação natural é imperceptível, pois a frequência é 120Hz. O *flicker* em L3 só foi observado para flutuações iguais ou superiores a 10%, casos muito severos. Na prática, L3 é insensível às flutuações usuais, pois tem um *driver* robusto.

TABELA III
L1, L2 e L3 submetidas aos testes da Tabela I

Teste	L1 Pst (pu)	L2 Pst (pu)	L3 Pst (pu)
1	0,305	0,370	0,051
2	0,302	0,243	0,052
3	0,309	0,236	0,053
4	0,299	0,225	0,044
5	0,302	0,199	0,047
6	0,500	0,316	0,059
7	0,791	0,648	0,091

Os resultados da Tabela III são relevantes. De acordo com [3], o Pst para as flutuações da Tabela I é de 1pu. Entretanto, conforme a Tabela III, isso não ocorre para as lâmpadas compacta e de LED, sendo o Pst menor.

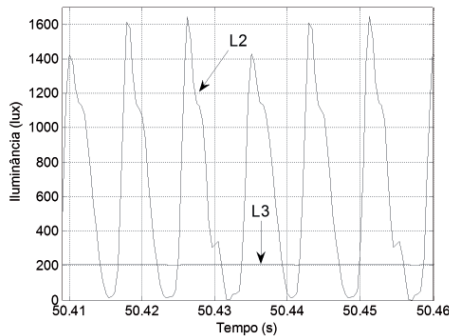


Fig. 20. Iluminância de L2 e L3 no teste 7.

Há comprovação também do problema do FLO. Em um caso hipotético, no qual existe flutuação de tensão na rede elétrica e que, porém, não ocasiona *flicker* em um ambiente iluminado com LFC, pode haver indicação de *flicker* por um FLO que monitora a rede. O resultado do FLO seria incorreto, pois contradiz a realidade.

Por outro lado, o FLO poderia não indicar existência de *flicker* para casos de flutuações em altas frequências (superiores a 60Hz). Considerando a LFC substituída da LI, foram feitos ensaios submetendo L1 a flutuações quadradas com amplitude fixa em 5% e frequências na faixa de 60Hz a 300Hz. O Pst medido pelo FLM e a percepção visual do *flicker* (qualitativa) estão na Tabela IV.

TABELA IV

Pst para L1 submetida a flutuações de 5%

Frequência (Hz)	Pst (pu)	Percepção visual
85	0,939	Observável
112	3,097	Muito forte
120	0,039	Não observado
128	3,310	Muito forte
150	1,190	Observável
170	0,387	Não observado
180	0,072	Não observado
232	1,398	Forte
240	0,041	Não observado
248,8	2,027	Forte
291,2	0,435	Não observado
300	0,056	Não observado

Nas frequências harmônicas (destacadas) não há *flicker*, pois nesses casos a tensão eficaz se mantém constante – analisando-se uma forma de onda “modulada” com uma frequência harmônica não se observa flutuação. Já a modulação com inter-harmônicas implica em flutuação, podendo haver *flicker*. Mesmo inter-harmônicas altas podem modular a fundamental. Essa modulação pode ser

determinada analiticamente a partir do módulo da diferença entre a inter-harmônica e a harmônica mais próxima, conforme (7). Deve-se notar que, mesmo que a flutuação seja modulada com frequência alta, será observada uma frequência inferior a 60Hz – uma espécie de efeito de “rebatimento” justificado por (7) [5].

$$f_{MOD} = |f_{ih} - f_h| \quad (7)$$

Sendo:

f_{MOD} - frequência observada na flutuação

f_{ih} - frequência inter-harmônica sobreposta à fundamental

f_h - frequência harmônica mais próxima de f_{ih}

Para avaliar a produção do *flicker* pelas lâmpadas, foi realizado um ensaio com flutuação quadrada, mantendo-se a amplitude de modulação fixa em 5% e se variando a frequência. A linha em 1pu (limiar) foi traçada como referência. O Pst medido pelo FLM para uma ampla faixa de frequências está ilustrada na Figura 21.

Conforme esperado, Lref (linha descontínua) tem máximo em 9Hz e produz pouco ou nenhum *flicker* em frequências superiores a 60Hz. Para validar essa resposta foi feita uma simulação com um modelo de FLO implementado em MATLAB® [23], no qual se aplicou as flutuações do teste. Foram destacados alguns pontos da curva de resposta do FLO (círculos). Eles convergem com os resultados do FLM para a lâmpada incandescente.

A resposta de L1 (linha contínua) tem *flicker* elevado nas inter-harmônicas, sendo forte próximo das harmônicas (e nulo nelas). No caso de L2 (linha pontilhada) há *flicker* nas altas frequências (até maior que nas baixas). A resposta de L3 tem valores insignificantes e não foi grafada. A análise visual (qualitativa) convergiu com os resultados das medições. Na Figura 21 fica evidente a limitação do FLO em frequências superiores em lâmpadas não-incandescentes.

Deve-se notar que o Plt não foi avaliado nos ensaios. Como foram feitos em ambiente controlado, o Plt é igual ao Pst. Na prática (em campo), o *flicker* tem característica aleatória, dependendo, por exemplo, da operação de cargas. Nesses casos há diferença e ambos são necessários para avaliar a severidade do *flicker* em períodos distintos e permitir ações para mitigação da flutuação.

A. Comentários

Os resultados do FLM demonstraram-se adequados para os testes de Pst na Tabela I (requeridos por [3]), assim como para ampla faixa de frequência ser similar ao FLO (Figura

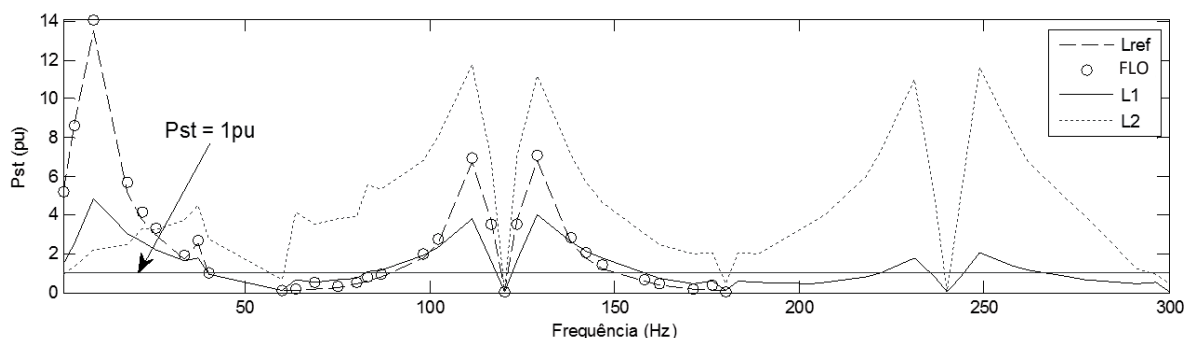


Fig. 21. *Flicker* medido no FLM para Lref (incandescente), L1 (LFC), L2 (LLED) e *flicker* esperado no FLO para flutuações de 5%.

21). Os resultados das medições de *flicker* para lâmpadas não-incandescentes foram coerentes com a avaliação visual (qualitativa) – deve ficar claro que o *flicker* medido indica o nível de severidade da cintilação que um indivíduo percebe. Com tais resultados, pode-se destacar algumas vantagens do FLM. A principal é a medição do *flicker* real de um ambiente iluminado artificialmente, independentemente da lâmpada.

Considerando essa capacidade de medir o *flicker* real, o sistema possibilitaria a análise da “qualidade” das lâmpadas, isto é, o desempenho de uma lâmpada operada (ou não) por reator eletrônico à geração de *flicker* (testando sua suscetibilidade ou robustez à flutuação de tensão). O medidor poderia contribuir no desenvolvimento das normas para regulamentação da qualidade das lâmpadas (em um quesito que trate do desempenho quando elas são submetidas à flutuação de tensão). Conforme demonstrado nos ensaios, há diferenças significativas entre modelos/fabricantes. Um índice de “robustez” poderia ser considerado para a avaliação da lâmpada e do seu circuito de potência (caso tenha). Não se localizou normas específicas sobre esse assunto.

Com base nesse índice de desempenho, outra sugestão seria que, dentro de faixas de flutuação de tensão específicas, lâmpadas de tecnologias e de modelos distintos fossem fabricadas de forma que produzissem *flicker* dentro de um limite tolerável. Isso é pertinente, pois, da forma como a regulamentação está definida, não há garantias que os limites esperados de *flicker* sejam atendidos, visto que as lâmpadas usadas pelos consumidores residenciais não são previsíveis.

VI. CONCLUSÃO

O *Flickermeter* IEC tem limitações, sendo incapaz de mensurar corretamente o *flicker* para situações em que a iluminação não-incandescente. No contexto atual isso é um problema, pois as lâmpadas incandescentes vêm sendo substituídas. Como exposto nesse trabalho, ambientes iluminados por lâmpadas não-incandescentes podem ter *flicker*, enquanto um *Flickermeter* IEC ligado à rede elétrica pode não indicá-lo.

Este artigo apresentou a proposta de um *Flickermeter* Modificado, com objetivo de medir a cintilação luminosa de forma direta. Um sistema embarcado foi implementado para os testes, tendo como objetivo ser opção aos medidores de *flicker* atuais, baseados no *Flickermeter* IEC. Seus resultados experimentais foram apresentados e analisados. Os dados quantitativos foram coerentes com a análise qualitativa, feita a partir de avaliação visual do *flicker*.

O medidor implementado tem independência do tipo de lâmpada, podendo medir o *flicker* para os tipos mais comuns de lâmpadas residenciais. Sua resposta para flutuações de frequências inter-harmônicas baixas e altas foram avaliadas e mostraram que o sistema é funcional, mensurando cintilação para a LFC e a LLED, uma limitação do *Flickermeter* IEC.

Trabalhos futuros devem ser realizados para aprimorar o sistema. Será necessário sistematizar um protocolo de teste para o medidor e avaliar outros tipos de distúrbios, como flutuação causada por inter-harmônicas individuais, além de avaliação em campo (flutuação aleatória). Seria pertinente um estudo estatístico para comparar as respostas de observadores submetidos ao *flicker* e resultados quantitativos

do FLM para lâmpadas de tecnologias distintas. Por fim, o sistema proposto poderia ser aplicado na avaliação da qualidade das lâmpadas do mercado em relação à produção de *flicker* na ocorrência de flutuação de tensão.

REFERÊNCIAS

- [1] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 8*, Norma ANEEL, Revisão 4, 2012.
- [2] *Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems*, IEEE Standard 1453-2011, 2011.
- [3] *Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications*, IEC Standard 61000-4-15, ed. 2, 2010.
- [4] G. P. Colnago, J. R. Macedo Jr., J. L. F. Vieira, “Análise dos Efeitos da Flutuação de Tensão sobre Lâmpadas por Medição Luminosa Direta”, in *X Conf. Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, 2013.
- [5] J. R. Macedo Jr., D. S. L. Simonetti, “Análise de desempenho do flickermeter na presença de componentes inter-harmônicas”, *Controle & Automação*, vol. 23, pp. 508-519, Jul./Ago. 2012.
- [6] J. Slezinger, J. Drapela, “An alternative flickermeter evaluating high-frequency interharmonic voltages”, in *IEEE Int. Workshop on Applied Measurements for Power Systems*, pp. 1-6, 2012.
- [7] M. Piekarczyk et al., “Comparative Tests of Flickermeters”, in *10th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, vol. 1, p. 220-227, Rio de Janeiro, 2002.
- [8] J. Ruiz et al., “Analysis of sensitivity to the main parameters involved in the digital implementation of the UIE flickermeter”, in *10th Mediterranean Electro-technical Conf.*, vol. 2, pp. 823-826, 2000.
- [9] W. Mombauer, “Flicker caused by phase jumps”, *European Trans. Electrical Power*, n. 16, pp. 545-567, Jun. 2006.
- [10] G. P. Colnago et al., “Real time power quality monitoring system according to new Brazilian regulation policies”, in *14th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, pp. 1-8, 2010.
- [11] Comissão Europeia. (2012, Dez. 16), Lâmpadas Economizadoras. Comissão Europeia - Energia. [Online]. Disponível: http://ec.europa.eu/energy/lumen/index_pt.htm.
- [12] Portal do Planalto. (2012, Dez. 16). Lâmpadas incandescentes sem nível de eficiência serão retiradas do Mercado. Portal do Planalto - Imprensa. Disponível: <http://www2.planalto.gov.br/imprensa/noticias-de-governo/lampadas-incandescentes-sem-niveis-minimos-de-eficiencia-comecam-a-ser-retiradas-do-mercado-gradativamente>.
- [13] G. C. Montari, L. Peretto, “A model for fluorescent lamp flicker in the presence of voltage distortion”, in *8th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, vol. 2, pp. 1206-1210, 1998.
- [14] D. Gallo, R. Langella, A. Testa, “Toward a new flickermeter based on voltage spectral analysis”, in *IEEE Int. Symp. on Industrial Electronics*, vol. 2, pp. 573-578, 2002.

- [15] C. Rong et al., "New flicker weighting curves for different lamp types based on the lamp light spectrum", in *13th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, pp. 1-6, 2008.
- [16] A. Emanuel, L. Peretto, "A simple lamp-eye-brain model for flicker observations", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, n. 3, pp. 1308-1313, 2004.
- [17] M. Szlosek, B. Swiatek, Z. Hanzelka, "Application of neural networks to voltage fluctuations measurement - neural networks Flickermeter", in *Int. School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Cracow, pp. 1-5, 2008.
- [18] L. Peretto et al., "A Measurement System for the Analysis of the Response of the Human Eye to the Light Flicker", *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 56, n. 4, pp.1384-1390, 2007.
- [19] D. Gallo, C. Landi, N. Pasquino, "An Instrument for the Objective Measurement of Light Flicker", in *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conf.*, vol. 3, pp. 1942-1947, 2005.
- [20] I. Azcarate, et al., "Type testing of a highly accurate illuminance flickermeter", in *IEEE 15th Int. Conf. on Harmonics and Quality of Power*, pp. 897-903, 2012.
- [21] J. Drapela, J. Slezinger, "Design and utilization of a light Flickermeter". in *IEEE Int. Workshop on Applied Measurements for Power Systems*, pp. 1-6, 2012.
- [22] J. R. Macedo Jr., D. S. L. Simonetti, "As inter-harmônicas e o fenômeno da cintilação luminosa", in *VIII Conf. Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica*, Blumenau, 2009.
- [23] J. R. Macedo Jr. et al., "Modelagem, construção e análise de desempenho do flickermeter IEC," *Controle & Automação*, vol. 22, pp. 118-133, Mar/Abr. 2011.
- [24] L. Peretto, A. Emanuel, "A Theoretical Study of the Incandescent Filament Lamp Performance under Voltage Flicker", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, n. 1, pp. 279-288, January 1997.
- [25] A. Emanuel, L. Peretto, "The Response of Fluorescent Lamp with Magnetic Ballast to Voltage Distortion", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, n. 1, pp. 289-295, 1997.
- [26] S. M. Halpin et al., "Voltage and Lamp Flicker Issues: Should the IEEE Adopt the IEC Approach?", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 3, 2003.
- [27] *The Basis of Physical Photometry*, CIE Standard 18.2-1983, Photocopy edition, 1996.
- [28] OSRAM (2012, Ago. 18). The new class of light. Disponível: www.osram.com/ledlamps.
- [29] D. G. Fink, H. W. Beaty, *Standard Handbook for Electrical Engineers*, sec. 26, 15th ed. McGraw-Hill Professional, 2006.
- [30] J. Mitchell et al., *MPEG Video Compression Standard*. Chapman & Hall, 1996.
- [31] S. Deutsch, A. Deutsch, "The Eye as Transducer", in *Understanding the Nervous System - An Engineering Perspective*. IEEE Press. New York, 1996.
- [32] M. Ponce et al., "A Novel High-Power-Factor Single-Switched Electronic Ballast For Compact Fluorescent Lamps", *Eletrônica de Potência*, vol. 9, n. 1, pp. 63-70, Jun. 2004.
- [33] Chang, Y. N., Hung, C. C., "Electronic Ballast with Constant Instantaneous Power Output for Fluorescent Lamps without Light Fluctuation", in *Power Conversion Conf.*, Nagoya, pp. 721-726, 2007.
- [34] S. Y. Hui, Y. X. Qin, "A General Photo-Electro-Thermal Theory for Light Emitting Diode (LED) Systems", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 24, n. 8, 1967-1976, Aug. 2009.
- [35] C. K. Lee, S. Li, S. Y. Hui, "A Design Methodology for Smart LED Lighting Systems Powered By Weakly Regulated Renewable Power Grids", *IEEE Trans. on Smart Grids*, vol. 2, n. 3, pp. 548-554, Sep. 2011.
- [36] P. S. Almeida, G. M. Soares, H. A. C. Braga, "Storage Capacitance Minimization in LED Drivers Based on Photometrical Constraints and Converter Integration", *Eletrônica de Potência*, vol. 18, n. 2, 962-971, Mar./Mai. 2013.
- [37] S. Wang et al., "A Flicker-free Electrolytic Capacitor-less AC-DC LED Driver", *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 27, n. 11, pp. 4540-4548, 2012.

DADOS BIOGRÁFICOS

Guilherme Piazentini Colnago é graduado (2005) e mestre (2010) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo. É doutorando na mesma universidade e professor na Universidade Federal de Sergipe. Suas áreas de interesse são: sistemas embarcados, processamento de sinais, qualidade da energia elétrica e flicker.

José Rubens Macedo Jr. é graduado (1997) e mestre (2002) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia e Doutor em Engenharia Elétrica (2009) pela Universidade Federal do Espírito Santo. Trabalhou no setor elétrico (1998-2010) e é professor na Universidade Federal de Uberlândia. Suas áreas de interesse são: inter-harmônicas, análise harmônica em redes elétricas, compensação reativa, projeto e implantação de filtros harmônicos passivos sintonizados e análise de cintilação luminosa. Dr. Macedo foi coordenador do grupo de trabalho sobre QEE da ABRADDEE (2003-2005), é membro do grupo de trabalho de QEE do ONS desde 2002, foi Diretor-Presidente da SBQEE (2011-2013) e é revisor do *IEEE Transactions on Power Delivery*.

José Luiz de Freitas Vieira é graduado (1981) pela Universidade Federal do Espírito Santo, mestre (1986) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutor (1993) pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor titular da Universidade Federal do Espírito Santo. Suas áreas de interesse são: conversores com comutação não dissipativa, conversores CC-CC, reatores eletrônicos, correção de fator de potência e controle microprocessado. Dr. Vieira é atualmente revisor dos seguintes periódicos: *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *IEEE Transactions on Power Electronics*, *Eletrônica de Potência*, *Controle & Automação*, *EPE Journal* e *International Journal of Circuit Theory and Applications*.