

Erros de Medição Decorrentes de Definições Imprecisas de Fator de Potência: o Caso de Luminárias LED

Jose Antenor Pomilio
Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
Campinas, Brasil
antenor@unicamp.br

Sigmar Maurer Deckmann
Professor aposentado
Universidade Estadual de Campinas
Campinas, Brasil
sigmardec@hotmail.com

José Carlos Ugaz Pena
Faculdade de Eng. Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
Campinas, Brasil
jcpena@unicamp.br

Abstract—Este artigo discute o anacronismo, a insuficiência e a imprecisão da formulação e das definições de fator de potência presentes em diversas normativas nacionais. Para o caso de unidades consumidoras na rede de distribuição, analisa-se como a ANEEL, anacronicamente, define essa figura de mérito. No caso de equipamentos individuais, embora de forma menos problemática, também os procedimentos de aferição do INMETRO fazem uso de fórmulas que, a depender do princípio de funcionamento do dispositivo ensaiado, conduzem a resultados tecnicamente equivocados. Como exemplo são analisados resultados de luminárias LED pretensamente de elevado fator de potência. Conclui-se que para o caso monofásico a solução é simples, bastando utilizar a formulação correta de fator de potência como a razão entre a potência ativa e a potência aparente. Tais grandezas são facilmente obtidas pelos modernos instrumentos digitais de medição e não incorrem a erros que podem advir do uso de grandezas como os fatores de distorção ou de deslocamento da fundamental.

Keywords—Fator de Potência, Luminárias, Normas, Qualidade da Energia Elétrica.

I. INTRODUÇÃO

Fator de Potência (FP) é um conceito clássico que e cuja interpretação desde sempre tem sido bastante discutida. Em sua formulação mais aceita, representa a relação entre a potência ativa (P), dada em Watt [W], e a potência aparente (S), dada em Volt-Ampère [VA], relacionadas com as tensões e correntes terminais de um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas das ondas $v(t)$ e $i(t)$, desde que sejam ambas periódicas (com período T).

O conceito pode ser estendido para um conjunto de cargas em uma unidade consumidora (UC), sendo uma grandeza de interesse das empresas distribuidoras de energia elétrica uma vez que tem impacto na tarifação das UCs. No entanto, como será discutido, a legislação brasileira não adota a definição acima descrita, preferindo outros modos de identificação do FP que são, no mínimo, problemáticos, se não equivocados, certamente anacrônicos.

No entanto, mesmo quando se trata de analisar um simples equipamento elétrico, a depender de como se define o fator de potência, as diferenças nos resultados podem ser gritantes. Para exemplificar, este artigo trará resultados de testes com luminárias LED, cujos ensaios elétricos são estabelecidos pelo INMETRO.

Este artigo foi realizado e apresentado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Processo # 303859/2020 e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP – Processo # 2021/11258-5.

A. Contexto Histórico

Em 1892 J. Fleming, em seu artigo "Experimental Researches on Alternating Current Transformers" [1] utilizou pela primeira vez a expressão "fator de potência". Fleming afirmou que, se as correntes e tensões forem funções senoidais, então o fator de potência é cosseno do ângulo de defasagem entre corrente e diferença de potencial. Tal definição de Fleming era, para ele, apenas uma medida do desempenho do transformador em vazio. Com o avanço da eletrificação e, em especial com o uso crescente dos motores de indução, tornou-se importante para as distribuidoras de eletricidade quantificarem a demanda de energia de tais máquinas. Em 1901, Browne descreveu os princípios de diferentes tipos de medidores eletromagnéticos de potência e corrente ativa e reativa [2]. Já à época, esse era um problema relevante para a tarifação dos consumidores.

Não havia consenso sobre o que era e como deveria ser aferido o valor dessa grandeza. O Fator de Potência foi discutido em encontros históricos para as definições de grandezas elétricas, como o realizado em 1920 pela American Institute of Electrical Engineers: AIEE Special Joint Committee, "Power factor in polyphase circuits" [3]. Vários aspectos importantes dessas discussões foram reapresentados em [4]. Uma das conclusões é que, apesar de alguns avanços, não se chegou a um acordo sobre as definições e métodos de medição, em especial para o caso trifásico não ideal.

A grandeza Fator de Potência no contexto atual foi definida em 1922 por Buchholz [5], sendo aplicada e aceita a circuitos CA monofásicos. O conceito foi estendido para quaisquer formas de ondas de tensão e corrente (periódicas) por Fryze, em 1933 [6] e continua em uso, praticamente sem alteração [7,8]: "o fator de potência pode ser interpretado como a razão entre a energia transmitida à carga e a máxima energia que poderia ser transmitida, mantidas as perdas na linha de alimentação". A igualdade de perdas implica que se tenha o mesmo valor eficaz de corrente.

II. DEFINIÇÕES

A. Fator de Potência

O Fator de Potência (FP) é a relação entre a potência ativa (P), dada em Watt [W] e a potência aparente (S), dada em Volt-Ampère [VA]. A potência aparente é o produto do valor eficaz da tensão, V_{ef} , pelo valor eficaz da corrente, I_{ef} . O FP pode ser determinado para um dispositivo, equipamento ou para uma instalação (unidade consumidora). De acordo com (1), seu valor é determinado independentemente das formas

que as ondas de tensão e corrente apresentem, desde que sejam periódicas (período T).

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt}{V_{ef} \cdot I_{ef}}, \quad (1)$$

onde

$$V_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 \cdot dt} \text{ e } I_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)^2 \cdot dt}$$

A definição (1) é um conceito aplicável em circuitos monofásicos ou polifásicos equilibrados a partir de funções temporais. Em casos desequilibrados, a própria definição de valor eficaz se torna controversa. O procedimento de medição será discutido na sequência.

Para ondas senoidais, a equação anterior se torna igual ao cosseno da defasagem, ϕ , entre a tensão e a corrente:

$$FP_{seno} = \cos \phi. \quad (2)$$

A norma IEC 61000-4-30 [9], da International Electrotechnical Commission (IEC), adotada como padrão pela ANEEL para os analisadores de qualidade da energia elétrica (QEE), estabelece técnicas de ensaio e de medição para aferição da QEE. Este documento define a grandeza DPF (*Displacement Power Factor*) como o cosseno da defasagem entre a fundamental da tensão e o correspondente da corrente. Define também TPF (*True Power Factor*) como a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Quando a tensão for senoidal, o FP pode ser expresso por:

$$FP_{Vseno} = \frac{P_1}{S} = \frac{I_1}{I_{ef}} \cos \phi_1, \quad (3)$$

onde I_1 é o valor eficaz da componente fundamental e ϕ_1 é a defasagem entre esta componente da corrente e a onda de tensão. Essa definição é consistente com (1) e válida também para casos trifásicos equilibrados. A relação entre as correntes é chamada de *fator de forma* e o termo em cosseno é chamado de *fator de deslocamento* da fundamental, correspondendo ao DPF. A determinação do FP por esse cálculo, no entanto, sofre de uma dificuldade prática que é a extração da componente fundamental da corrente e a obtenção da defasagem. Note-se que o cálculo através de (1) não necessita de tais valores.

Seguindo a análise de (3), o valor eficaz da corrente pode ser expresso a partir dos coeficientes da série de Fourier que descreve a função temporal $i(t)$:

$$I_{ef} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}. \quad (4)$$

Define-se a Distorção Harmônica Total – DHT (em inglês, THD - *Total Harmonic Distortion*) como sendo a relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas e o da fundamental. Observe que (4) e (5) indicam um somatório de infinitos componentes espectrais o que, na prática, é inviável.

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}, \quad (5)$$

e, em função de (3), (4) e (5) o FP pode ser rescrito como:

$$FP_{Vseno} = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DHT^2}}. \quad (6)$$

Torna-se evidente a relação entre o FP e a distorção da corrente. Normas regulamentam os valores máximos dos harmônicos de corrente que um dispositivo ou equipamento pode injetar na linha de alimentação [10], ou que resultam de um conjunto de cargas em uma UC [11]. Essas normas também dão indicação de quantos harmônicos devem ser quantificados. Por exemplo, a IEC que estabelece os padrões para as normas europeias, indica medições até a ordem 40. O IEEE indica medições até o 50º harmônico. No entanto, novos procedimentos têm avançado até a ordem 100, como o indicado por empresas no Reino Unido [12].

Nesse contexto, cabe o questionamento de qual deve ser o limite de ordem harmônica para a determinação das grandezas indicadas em (4) e (5) e, conseqüentemente, do valor do fator de potência. Novamente enfatiza-se que o cálculo do FP usando (1) não padece deste tipo de restrição.

B. Fator de Potência nas regulamentações brasileiras

Os aspectos aqui discutidos não se referem a como se determina a valoração do consumo de potência não ativa, mas apenas como se define o FP que, em última instância, é o parâmetro adotado no país para quantificar essa parcela da potência aparente.

O valor do FP para uma UC, de acordo com a ANEEL [13], deve ser calculado a partir dos valores registrados das potências ativa e reativa (P, Q) ou das respectivas energias (Ea, Er), utilizando-se as seguintes fórmulas:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}, \text{ ou} \quad (7)$$

$$FP = \frac{Ea}{\sqrt{Ea^2 + Er^2}}. \quad (8)$$

Eq. (7) difere dos conceitos embutidos na definição de FP decorrentes de (1), que não utilizam a grandeza “potência reativa”, que carece de uma definição consensual e consistente em situações em que as formas de onda não sejam senoidais. Situações estas que são cada vez mais comuns, especialmente em redes de distribuição em baixa tensão devido à elevada presença de cargas não lineares.

O PRODIST define a determinação do fator de potência como uma relação que depende da potência ou da energia reativa, mas não especifica como tal grandeza deve ser medida, o que é um problema para formas de onda não senoidais e em casos trifásicos com desequilíbrio.

A ANEEL define energia elétrica reativa como “aquela que circula entre os diversos campos elétricos e magnéticos de um sistema de corrente alternada, sem produzir trabalho, expressa em quilo-volt-ampère-reactivo-hora (kvarh)”. Em tal contexto, todas as componentes espectrais da corrente e que não possuam a respectiva harmônica na tensão, devem ser incluídas dentro de tal parcela. Formalmente esse é um procedimento temerário, senão errado.

Aparentemente essas definições confundem uma figura de mérito (o Fator de Potência) com a maneira como, antes do advento de medidores digitais, se determinava o FP. A equação (8) é apenas uma forma de calcular o FP a partir de dados registrados em quantificadores de energia ativa (kWh) e “reativa” (kvarh) e não uma definição tecnicamente correta, consistente e válida para correntes não senoidais.

Para o caso trifásico o cálculo é mais complexo, em situações de redes desequilibradas e com distorção. Tal discussão, embora de grande relevância, está além dos

objetivos deste texto, de modo que não será aqui aprofundada. Sugere-se a leitura de artigos que tratam de tais estudos [14-16].

A modernização das tecnologias cria situações que obriga a adaptação da legislação, o que nem sempre ocorre com a rapidez desejada. Em situações vigentes no passado recente, em que os consumidores conectados às redes de distribuição simplesmente consumiam energia da rede e as correntes se apresentam razoavelmente senoidais, as definições dadas em (7) e (8) se mantiveram minimamente adequadas. No entanto, a partir do momento em que os consumidores também passaram a produzir potência ativa, tornou-se necessário rever a aplicação do FP como uma figura de mérito que pode, inclusive, penalizar indevidamente o consumidor [17].

Recentemente a ANEEL, vedou a aplicação de penalização por baixo FP aos consumidores do grupo B¹. Resta, no entanto, o problema para os consumidores de grupo A², uma vez que a questão conceitual é de definição da grandeza e não do tipo de consumidor [18].

Do ponto de vista da rede, pode-se argumentar que o interesse é preservar a qualidade da tensão de suprimento, a qual é afetada por correntes associadas à potência reativa. Tal efeito deletério, no entanto, se relaciona ao valor absoluto de tal parcela da corrente. Uma figura de mérito relativa, como é o FP, pode indicar valores baixos não pelo aumento da potência reativa, mas pela redução da potência ativa. Como muitos códigos de distribuição determinam penalidades para uma excessiva demanda de reativos [19-21] e esse “excesso” é determinado a partir de valores indicativos de FP ou de potência ativa, é preciso redefinir o método de cálculo. Melhor seria diretamente definir um valor máximo potência não ativa que uma UC pode demandar, que sirva facilmente quantificável pelos modernos medidores digitais.

III. MEDIDORES DIGITAIS

Se as definições anacrônicas para o FP estão vinculadas à maneira de como se aferia tal grandeza por meio de medidores eletromecânicos, é preciso contextualizar o quanto as tecnologias de medição evoluíram e como atualmente permitem, de maneira muito mais precisa, realizar medições de tensão e de corrente e o consequente cálculo de componentes da potência elétrica.

Todos os modernos medidores de grandezas elétricas são baseados em sistemas digitalizados. Essa é uma tecnologia iniciada na década de 1980 [22-23] e que se consolidou no início dos anos 2000 quando as normas internacionais estabeleceram os atuais procedimentos de medição.

Por exemplo, o valor eficaz da função periódica $x(t)$, amostrada uniformemente com N valores (x_i) contidos em um período T , é definido pela raiz quadrada do valor quadrático médio dessas N amostras, ou seja:

$$X_{ef} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (9)$$

¹ Grupo B: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo B1 – residencial; b) subgrupo B2 – rural; c) subgrupo B3 – demais classes; e d) subgrupo B4 – Iluminação Pública.

² Grupo A: grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de

Para determinar a potência ativa associada aos valores simultaneamente amostrados de tensão e de corrente, o cálculo é ainda mais simples, bastando fazer as multiplicações dos valores amostrados, somá-los cumulativamente, até atingir o total de amostras em um período T e dividir o total pelo número de amostras.

$$P = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i \cdot i_i \quad (10)$$

Se a quantidade de amostras for uma potência de 2 ($2^5=32$, $2^6=64...$), a divisão do equivalente valor binário se reduz a um simples deslocamento à direita desse valor na quantidade do expoente da potência de 2 (5, 6... no exemplo acima, pois cada “shift” à direita representa divisão por 2).

Do ponto de vista espectral, fazendo uso da transformada discreta de Fourier (TDF), ou sua versão FFT, “Fast Fourier Transform” (aplicável quando N é uma potência de 2), de acordo com o teorema de Nyquist-Shannon, sabe-se que a capacidade de identificação de uma frequência em um sinal amostrado necessita de pelo menos duas amostras por ciclo. Com poucas amostras por ciclo, embora a frequência seja identificável, a obtenção de sua amplitude não é muito precisa. Os medidores atuais operam com centenas ou milhares de amostras por ciclo da rede, o que significa frequências de amostragem na faixa de dezenas de kHz e a consequente possibilidade de identificação espectral até a ordem de centenas de harmônicos.

Assim, determinar com precisão adequada os valores de potência ativa (10) e de potência aparente torna-se, do ponto de vista do algoritmo, trivial, permitindo obter um valor muito preciso para o FP, sem recorrer a outras grandezas, como a potência reativa ou o cosseno da defasagem entre as componentes fundamentais da tensão e da corrente. Quando os medidores digitais indicam o DPF, o valor disponibilizado é determinado por (3), a partir do FP calculado como em (1), de I_{ef} calculado como em (9) e do valor de I_l obtido por algum método numérico de filtragem ou de TDF [24]. Analogamente, a indicação de um valor de potência reativa na frequência fundamental é feita a partir dos valores medidos e calculados indicados acima.

IV. FP EM LUMINÁRIAS

A regulamentação do comportamento de cargas individuais no Brasil é feita pela ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. Por ser membro da IEC, é usual que o padrão nacional tenha embasamento nos documentos da IEC.

No caso da regulamentação para luminárias eletrônicas, desde a década de 1990 a ABNT define um padrão de desempenho incluindo restrições para o fator de potência. Foi a primeira regulamentação brasileira que estabeleceu um valor mínimo de FP para um dispositivo eletrônico.

Por exemplo, a NBR 5170, de 1996 [25] indicava que a medição ou o cálculo do fator de potência devia ser feito com um instrumento que levasse em consideração a distorção

sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômnia e subdividido nos seguintes subgrupos: a) subgrupo A1 – tensão de fornecimento igual ou superior a 230 kV; b) subgrupo A2 – tensão de fornecimento de 88 kV a 138 kV; c) subgrupo A3 – tensão de fornecimento de 69 kV; d) subgrupo A3a – tensão de fornecimento de 30 kV a 44 kV; e) subgrupo A4 – tensão de fornecimento de 2,3 kV a 25 kV; e f) subgrupo AS – tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição.

harmônica ou então calculá-lo usando a relação (1) entre potência ativa e potência aparente.

Seguindo a evolução tecnológica, a norma ABNT NBR 14418 [26] estabelece $FP > 0,92$ e que a medição deve incluir harmônicos. No entanto, diferentemente da norma de 1996, o padrão de 2011 e os subsequentes não mais indicam que o cálculo pela relação entre potência ativa e potência aparente. Indica-se apenas o uso de (6) e ainda limitam a análise da DHT até o quadragésimo harmônico. Esse mesmo procedimento se repete em legislações mais recentes.

Para tornar o cenário ainda mais confuso, a ABNT NBR IEC 62612:2022 [27] estabelece uma verificação do fator de deslocamento, $\cos\phi_1$ (3), ao invés de utilizar o FP. Observe-se que os equipamentos de medição são capazes de indicar um valor para o fator de deslocamento a partir da medição do FP (P/S) e do cálculo da DHT, o que seria, em princípio, correto. Os aparelhos de medição não fazem uma aferição direta do deslocamento entre a tensão (suposta senoidal) e a componente fundamental da corrente. Os requisitos do equipamento de medição definidos em [27] são aqueles presentes na IEC 61000-4-7 [28], fazendo uso da FFT.

Em relação às luminárias LED, o fator de deslocamento está relacionado à capacitância do filtro de entrada do *driver* da lâmpada e poderia servir para limitar o valor da capacitância. No entanto, os projetistas tendem a minimizar esse componente por razões de custo. De qualquer modo, este comportamento está devidamente incluído no valor do FP.

A norma EN 62612 [29], que é a origem de [27], traz o seguinte texto: “*Tendo em vista regulamentações futuras, a EN 62612 define - o fator de deslocamento como métrica primária, assim como seu método de medição e valores recomendados - ao invés da métrica do fator de potência.*” O uso do fator de deslocamento como indicador de qualidade equivalente ao fator de potência ocorre apenas na hipótese de corrente senoidal. Assim, a citação de uma “regulamentação futura” faz sentido no caso da imposição de uma regulamentação de fator de potência para as lâmpadas LED que se aproximasse da unidade.

De acordo com o INMETRO [30], que é o órgão que define os procedimentos de ensaio, para lâmpadas LED com potência nominal declarada de 5 W a 25 W, deve-se ter $FP \geq 0,70$. Não é exigido um fator de potência mínimo para lâmpadas com potência menor que 5 W. Para lâmpadas com potência nominal maior que 25 W, deve-se ter $FP \geq 0,92$ e as correntes harmônicas não podem exceder os limites apresentados na Tabela 1. Para lâmpadas tubulares de LED deve resultar $FP \geq 0,92$ e correntes harmônicas que não podem exceder os limites da Tabela 1.

TABELA 1 – LIMITES DAS CORRENTES HARMÔNICAS

Ordem Harmônica (n)	Correntes harmônicas máximas permitidas, expressas como porcentagem da corrente de entrada na frequência fundamental (%)
2	2
3	30 λ
5	10
7	7
9	5
11 < n < 39 (Somente harmônicas ímpares)	3

onde: λ é o fator de potência do circuito

A regulamentação do INMETRO difere do estabelecido em [26] pois faz a medição do fator de potência e não do fator de deslocamento. Os valores da Tabela 1 reproduzem os

estabelecidos em [10], não obstante o documento da IEC ser explícito ao dizer que aquela norma não trata de cargas com alimentação inferior a 220 V (fase-neutro).

A. Ensaios de luminárias LED

Foram realizados ensaios em luminárias LED tubulares que devem ter alto fator de potência, atestado de acordo com a legislação nacional. A Fig. 1 mostra resultados em uma das luminárias ensaiadas. A parte superior mostra o espectro da corrente e na parte inferior tem-se a tensão e a corrente do dispositivo. Nota-se que a corrente está aproximadamente em fase com a tensão e que sua distorção não é muito elevada.

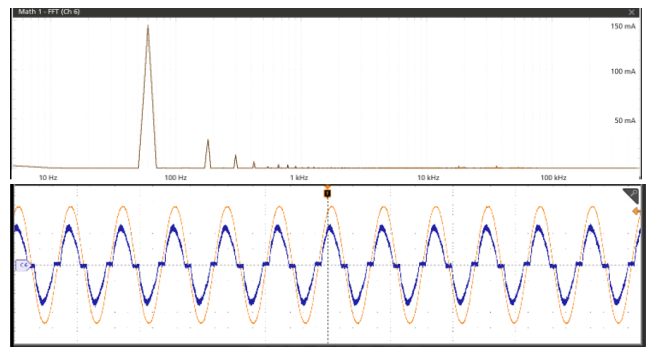


Fig. 1. Ensaio de luminária LED. Acima, espectro da corrente da rede (50 mA/div.), escala horizontal (logarítmica) de 5 a 500 kHz; abaixo, formas de onda da tensão (laranja, 50V/div.) e da corrente (azul, 100mA/div.) na rede, escala horizontal: 20ms/div, 1 MS/s.

A Fig. 2 mostra valores registrados por um osciloscópio com funções de análise de potência, operando com taxa de amostragem de 1MS/s. A Fig. 2 mostra também o circuito interno de alimentação dos LEDs, composto por um circuito corretor de fator de potência baseado em conversor abaixador de tensão [31], com filtro CLC (capacitor/indutor/capacitor) na entrada, que minimiza a propagação de componentes espectrais devidas ao chaveamento do conversor.

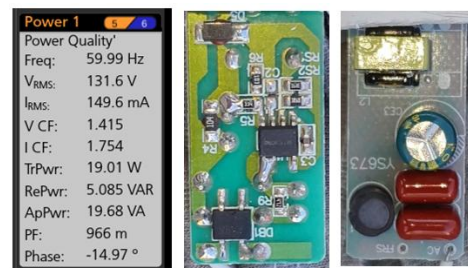


Fig. 2. Resultados de medição (à esquerda). Circuito interno do conversor que alimenta o conjunto de LEDs (ao centro e à direita).

O FP é calculado pelo método $FP=P/S$ e resulta 0,966. A potência ativa medida é 19,01 W. A partir dos valores de potência ativa e de potência aparente, o aparelho registra um valor *calculado* para a potência reativa (5,085 var) usando a regra do triângulo (ou seja, supondo sinais senoidais). Da mesma forma, calcula $\phi_1 = -14,97^\circ$, também supondo sinais senoidais, uma vez que $\cos\phi_1 = 0,966$. Observe-se que essa medição, por não seguir o estabelecido em [28], não deve ser considerada válida do ponto de vista de conformidade.

A Fig. 3 mostra resultado semelhante para luminária de outra fabricação. De imediato vê-se que este dispositivo não realiza a filtragem da alta frequência produzida pelo conversor *buck*. Isso é visível no espectro, com componentes na faixa de dezenas de kHz, e no sinal de corrente no tempo.

O espalhamento espectral na alta frequência, entre 60 e 100 kHz no primeiro agrupamento, indica que o circuito opera com frequência de comutação variável. Os agrupamentos seguintes são “harmônicos” do chaveamento.

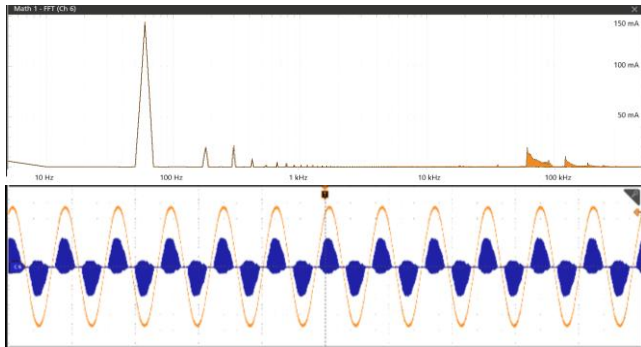


Fig. 3. Ensaio de luminária LED, sem filtro de alta frequência. Acima, espectro da corrente da rede (50 mA/div.), escala horizontal (logarítmica) de 5 a 500 kHz; abaixo, formas de onda da tensão (laranja, 50V/div.) e da corrente (azul, 100 mA/div.) na rede, escala horizontal: 20 ms/div., 1 MS/s.

A Fig. 4 mostra os resultados das medições de corrente e potência. Note que o fator de potência obtido pelo método P/S é de apenas 0,563. Observe-se ainda um valor de desfasagem de 55°, o que não é condizente com as formas de onda. No entanto, como já dito, esse valor é *calculado* pelo algoritmo do aparelho a partir da suposição de sinais senoidais. O fabricante especifica seu produto como sendo de alto fator de potência (FP>0.92), como mostra a Fig. 4.

Do ponto de vista do circuito de alimentação do conjunto de LEDs, pode-se dizer que o fabricante minimizou o custo de seu produto pela exclusão do filtro de entrada. Beneficiou-se ainda da maneira como o INMETRO faz a medição do FP, com o uso de (6), limitando o valor da DHT ao quadragésimo harmônico. De fato, como se vê no espectro, as componentes de baixa ordem são reduzidas, similares às da Fig. 1.

A presença da alta frequência manifesta-se no valor eficaz, que se eleva para 254 mA, contra 149 mA da primeira luminária, resultando em um aumento na potência aparente para 33,46 VA, e a consequente diminuição do FP para 0,56.



Fig. 4. Resultados de medição em luminária sem filtro de alta frequência, indicando baixo FP com cálculo pelo método P/S e dados de embalagem da luminária (à direita).

Ao utilizar um analisador de energia classe A, DRANETZ HDPQ Visa SP, em conformidade com [27] os resultados também podem não ser conclusivos. A Fig. 5 mostra as formas de onda da tensão e da corrente fazendo uso do filtro de *anti-aliasing* do analisador. O sinal processado da corrente minimiza as componentes de alta frequência e a corrente considerada nos cálculos se torna “limpa”. Assim, resulta um fator de potência calculado de 0,972, com DHT₄₀ de 16,6%. No entanto, essa está longe de ser a corrente que a luminária efetivamente injeta na rede.

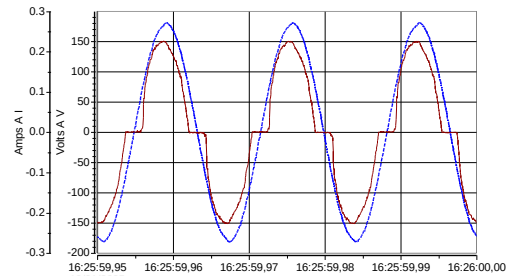


Fig. 5. Formas de onda de tensão (azul) e corrente (vermelha) processadas pelo analisador de energia, fazendo uso do filtro de *anti-aliasing*.

Ao excluir o filtro de *anti-aliasing* (o procedimento de ensaio é omissivo em relação a isso), o sinal da corrente processado pelo analisador é fortemente afetado, como mostra a Fig. 6, apresentando comportamentos em alta frequência, mas ainda é diverso da corrente real. A forma do sinal de corrente sofre efeitos da amostragem (em 30,72 kHz) de um sinal com componentes na faixa de 60 a 100 kHz [32]. É a partir desse sinal deformado da corrente que o aparelho faz seus cálculos. Usando o método das potências, resulta FP=P/S=0,76. No entanto, tem-se DHT₂₅₅=81% (inclui até harmônico de ordem 255, limite do analisador), e DHT₄₀=63%. O fator de deslocamento é $\cos\phi_1=0,997$.

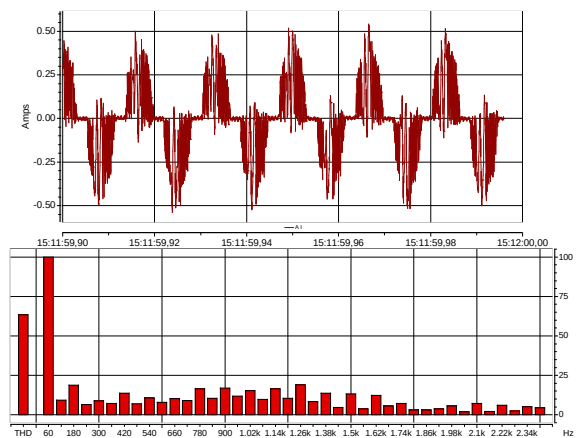


Fig. 6. Acima, corrente processada pelo analisador (sem filtro de *anti-aliasing*). Abaixo, espectro dessa corrente até o 40º harmônico.

Do ponto de vista de interferência eletromagnética (IEM) conduzida, a faixa de frequência que engloba o chaveamento do conversor *buck* é regulamentada pela NBR IEC CISPR 15 [33], que estabelece procedimentos de medição de interferência eletromagnética conduzida na faixa de 9 kHz a 30 MHz. A portaria do INMETRO [30] indica que este é um dos ensaios de segurança que deve ser realizado para a certificação da luminária. O eventual atendimento das limitações impostas pelo ensaio de IEM, no entanto, não muda a conclusão de que o fator de potência indicado pelo fabricante da segunda luminária está conceitualmente errado, embora condizente com o procedimento do ensaio do INMETRO.

V. CONCLUSÕES

Este artigo procurou trazer a discussão sobre a inadequação das atuais definições de fator de potência tanto na legislação ANEEL, quanto em normas ABNT/INMETRO. No primeiro caso (ANEEL) ao utilizar o conceito de potência reativa, ao invés do bem determinado conceito de potência aparente, a regra para FP de unidades consumidoras torna-se

imprecisa na ocorrência de tensões e, principalmente, correntes distorcidas.

O uso de medidores eletrônicos, em substituição aos registradores eletromecânicos de energia, possibilita uma quantificação muito precisa tanto da potência ativa quanto dos valores eficazes de tensão e corrente, consequentemente da potência aparente, levando a uma identificação imediata do FP, sem recorrer a outras grandezas de determinação mais complexa, como a DHT e o DPF.

No que se refere ao FP de cargas individuais, questão pertinente à ABNT e ao INMETRO, a análise feita de luminárias LED indica a inadequação do cálculo do FP por meio da DHT limitada ao quadragésimo harmônico, como previsto na normativa atual.

Obviamente, para que isso ocorra na situação analisada para a luminária sem filtro, o equipamento de medição necessita de uma amostragem mais elevada do que os analisadores comuns. A identificação dos componentes espectrais de alta frequência mais relevantes necessita, no caso específico, no mínimo, uma amostragem em 200 kHz, no caso estudado. Como esta discussão é sobre o procedimento de certificação, não parece demasiado exigir que o órgão certificador possua um equipamento com tais características.

O cálculo a partir da relação entre potência ativa e potência aparente fornece valores muito mais confiáveis e que são facilmente obtidos por medidores eletrônicos. No entanto, para que se obtenha um valor correto, é necessário que a luminária garanta a adequada filtragem da corrente CA, para que fique livre de componentes de alta frequência produzidas pelo conversor que alimenta os LEDs. Havendo componentes de alta frequência na corrente, muito provavelmente os valores medidos seguindo os atuais procedimentos do INMETRO não corresponderão ao real FP do dispositivo.

REFERÊNCIAS

- [1] J. A. Fleming, Experimental researches on alternate-current transformers. *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, 21(101), 594–686, 1892. <https://doi.org/10.1049/jiee-1.1892.0031>
- [2] W. H. Browne, "Power Factor Indicators," in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XVIII, pp. 287–312, 1901, doi: 10.1109/T-AIEE.1901.4764183
- [3] Special Joint Committee, "Power Factor in Polyphase Circuits" in *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. XXXIX, no. 2, pp. 1449–1450, July 1920, doi: 10.1109/T-AIEE.1920.4765333
- [4] H. Kirkham, D.R. White, A. Riepnies, "Power Factor revisited," In *IEEE International Instrumentation and Measurement Conference (I2MTC 2020)*, May 25–28, 2020, Dubrovnik, Croatia. doi:10.1109/I2MTC43012.2020.9129199
- [5] F. Buchholz, Die Drehstrom-scheinleistung bei Ungleichmassiger Belastung der Drei Zweige, Licht und Kraft, no. 2, pp. 9–11, Jan. 1922.
- [6] S. Fryze, "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit Nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung", *Elektrotechnische Zeitschrift*, vol. 53, No. 25, 1933.
- [7] International Electrotechnical Commission - IEC TR 61000-1-7 - Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 1-7: General – Power factor in single-phase systems under non-sinusoidal conditions, 2016.
- [8] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Non Sinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2010, IEEE Press.
- [9] International Electrotechnical Commission - IEC 61000-4-30: Testing and measurement techniques — Power quality measurement methods, 2015.
- [10] International Electrotechnical Commission, IEC 61000-3-2:2019+A2:2024, "Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase)", 2024.
- [11] IEEE Std 519-2022, "IEEE standard for harmonic control in electric power systems", (Revision of IEEE Std 519-2014), Aug. 2022.
- [12] Energy Networks Association, "Harmonic voltage distortion and the connection of harmonic sources and/or resonant plant to transmission systems and distribution networks in the United Kingdom", 2020.
- [13] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, Ver. 12, 2020.
- [14] H. K. M. Paredes, F. P. Marafao and L. C. P. da Silva, "A comparative analysis of FBD, PQ and CPT current decompositions — Part I: Three-phase, three-wire systems," 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009, pp. 1–8, doi: 10.1109/PTC.2009.5282173
- [15] E. H. Watanabe, H. Akagi, and M. Aredes, "Instantaneous p-q Power Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems", *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 84, no. 6, pp. 28–37, 2008.
- [16] M. Depenbrock, "The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analyzing Power Relations," *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 8, no. 2, pp. 381–387, May 1993.
- [17] J. A. Pomilio, J. P. Bonaldo, H. K. Morales-Paredes, P. Tenti, "About Power Factor and THDi in the Smart Micro-Grid Scenario", 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference – IEEE-SPEC, Fortaleza, 2015.
- [18] Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, Resolução Normativa No. 569, De 23 De Julho De 2013.
- [19] Essential Service Commission, Electricity Distribution Code – Version 6, Australia, January 2011.
- [20] Pacific Power & Light Company, Schedule No. A-32, General Service 20 kW and Over, Oregon, USA, June 2015.
- [21] France, Decision du 5 Juin 2009 relative aux tarifs des réseaux publics de transport et de distribution d'électricité, Paris, June 2015.
- [22] M. A. H. Abdul-Karim and D. H. Boghosian, "A Digital Power-Factor Meter Design Based on Binary Rate Multiplication Techniques," *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 29, issue 4, pp. 435–438, Dec. 1980.
- [23] Michael F. Matouka, "A Wide-Range Digital Power/Energy Meter for Systems with Nonsinusoidal Waveforms," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. IE-29, issue: 1, pp. 18–31, Feb. 1982.
- [24] S.M.Deckmann e J. A. Pomilio, "Qualidade da Energia Elétrica – Conceituação e Processamento Digital", Editora Blucher, 2024.
- [25] ABNT NBR 5170:1996: Reator para lâmpada a vapor de mercúrio a alta pressão – Ensaios, 1996.
- [26] ABNT NBR 14418:2011: Reatores eletrônicos alimentados em corrente alternada para lâmpadas fluorescentes tubulares – Prescrições de desempenho
- [27] ABNT NBR IEC 62612:2022: Lâmpadas LED com dispositivo de controle incorporado para serviços de iluminação geral com tensões de alimentação > 50 V – Requisitos de desempenho.
- [28] International Electrotechnical Commission EN 61000-4-7:2002+A1:2009, Electromagnetic compatibility (EMC). Testing and measurement techniques. General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, 2009.
- [29] International Electrotechnical Commission – EN 62612:2013+A2: Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements, 2018.
- [30] Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - INMETRO Portaria nº 69, de 16 de fevereiro de 2022, Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade e os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base – Consolidado. <http://sistema-sil.inmetro.gov.br/rtac/RTAC002922.pdf>
- [31] J. A. Pomilio, Pré-reguladores de Fator de Potência, disponível em <https://dsce.fee.unicamp.br/pfp>
- [32] G. Ortenzi, E. Sangoi, J. A. Pomilio, J. I. Y. Ota, and R. K. Carneiro, "Harmonics Measurement Errors in Grids with High Presence of Power Electronics Converters", *Eletrônica de Potência*, vol. 29, p. e202439, Oct. 2024.
- [33] NBR IEC/CISPR15, Limites e métodos de medição das características de radioperturbação dos equipamentos elétricos de iluminação e similares, dezembro de 2019.