

# Análise de Supraharmônicos com Detector de Quase-Pico

Gabriela A.C. Nascimento\* Thais M. Mendes\*  
Leandro R. M. Silva\* Carlos A. Duque\* Paulo F. Ribeiro\*\*

\* *Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal de Juiz de Fora*

*Juiz de Fora, MG, Brasil (e-mails: gabiada.engenharia@gmail.com,  
martins.thais@engenharia.ufjf.br, leadro.manso@engenharia.ufjf.br,  
carlos.duque@engenharia.ufjf.br).*

\*\* *Universidade Federal de Itajubá  
Itajubá, MG, Brasil (e-mail: pfribeiro@ieee.org).*

**Abstract:** Research on the influence of harmonic currents in the electrical system has always been important for the study of the power quality (PQ) and the establishment of standards in order to maintain a good functioning of the network. Recently, a new class of waveform distortion, called supraharmonic (SH), which encompasses the frequency range between 2 kHz to 150 kHz, has gained the attention of several PQ researchers due to the increasing use of new technologies, such as alternative energy sources and electric vehicles, which are sources of SH distortion. In this context, it is noted that researchers in the area still have doubts about how to perform PQ measurements for the SH range. This work is based on the analysis and implementation of the supraharmonics measurement methodology presented in the CISPR 16 standard. The methodology is based on the use of STFT (*Short Time Fourier Transform*) and the quasi-peak detector (QP) for SH analysis. For testing purposes, a real signal originating from an LED lamp and a synthetic signal containing supraharmonic components were used. Through the method employed, it was possible to analyze the emissions in the SH frequency range of the tested signals and to check the levels of distortions for normative comparison.

**Resumo:** Pesquisas sobre a influência de correntes harmônicas no sistema elétrico sempre foram importantes para o estudo da qualidade da energia elétrica (QEE) e estabelecimento de padrões a fim de manter um bom funcionamento da rede. Recentemente, uma nova classe de distorção de forma de onda, denominada de supraharmônica (SH), que engloba a faixa de frequência de 2 kHz a 150 kHz, tem ganhado atenção de vários pesquisadores da QEE devido ao crescente uso de novas tecnologias, tais como fontes alternativas de energia e veículos elétricos, as quais são emissoras de distorções SH. Nesse contexto, nota-se que pesquisadores da área ainda apresentam dúvidas a cerca de como realizar medições da QEE para a faixa SH. Este trabalho baseia-se na análise e implementação da metodologia de medição de supraharmônicos apresentada na norma CISPR 16. A metodologia baseia-se na utilização da STFT (*Short Time Fourier Transform*) e do detector de quase-pico (QP) para análise SH. Para fins de testes, foram utilizados um sinal real originado por uma lâmpada LED e um sinal sintético contendo componentes supraharmônicas. Através do método empregado é possível analisar as emissões na faixa de frequência SH dos sinais testados e verificar os níveis de distorções para comparação normativa.

*Keywords:* CISPR 16; Quasi-Peak Detector; Power Quality; Supraharmonics.

*Palavras-chaves:* CISPR 16; Detector Quase-Pico; Qualidade de Energia Elétrica; Supraharmônicos.

## 1. INTRODUÇÃO

A injeção de distúrbios na rede elétrica é alvo de vários estudos que visam garantir a qualidade da energia elétrica (QEE). Na última década, distorções na faixa de frequência compreendida entre 2 kHz e 150 kHz, denominada por A. McAechern no IEEE-PES GM 2013, em Vancouver como distorções supraharmônicas (SH) receberam destaque (Mendes et al., 2019). Os estudos das SH

voltaram-se somente nos últimos anos em razão de tais emissões intensificarem-se com o uso de equipamentos e tecnologias que surgiram recentemente. Um exemplo são as fontes renováveis de energia eólica e solar, que necessitam de conversores conectados à rede e são típicos elementos emissores de supraharmônicos (Yalcin et al., 2017).

De forma semelhante às distorções compreendidas na faixa abaixo de 2 kHz, as supraharmônicas também podem causar danos em bancos de capacitores e promover interferências de operação em redes elétricas de baixa e

\* Capes, Fapemig, CNPq, INERGE.

média tensão, além de provocar o mau funcionamento de equipamentos e de cargas sensíveis.

Diante da relevância do tema, esforços para conseguir uma padronização consolidada nessa faixa de frequência vêm sendo realizados nos últimos anos. Várias organizações de estabelecimento dos padrões e pesquisadores da QEE têm se dedicado consideravelmente ao desenvolvimento de atividades sobre o tema SH, como o Comitê Eletrotécnico Internacional (IEC — SC 77A), o Comitê Europeu de Normalização Eletrotécnica (CENELEC — SC 205A) e o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE). Estes buscam formalizar padrões como níveis de compatibilidade, limites de emissão, imunidade e métodos de teste que abrangem essa faixa de frequência (Mendes, 2019).

Um método de medição para a faixa de 2 kHz a 9 kHz é sugerido pela norma IEC—61000-4-7 (Commission, 2006) e a norma IEC—61000-4-30 (Commission, 2015) propõe um método de medição para a faixa de 9 kHz a 150 kHz. Além disso, informações referentes aos equipamentos, medições e métodos de imunidade para frequências acima de 9 kHz estão na norma CISPR-16 (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*) (CISPR, 2017).

O padrão CISPR 16, correspondente ao foco do presente trabalho, baseia-se em analisadores de espectro, filtros e detectores. Três diferentes tipos de detectores podem ser utilizados: o detector de pico, o detector de quase-pico (QP) e o detector de valor médio. Torna-se importante destacar que o referido padrão, durante muitos anos, destinou-se à radiofrequência (RF), faixa de frequência que abrange aproximadamente de 3 kHz a 300 GHz e que corresponde a frequência das ondas de rádio, porém nos últimos anos vêm ganhando atenção de pesquisadores da área de QEE para estudos da faixa SH, de 2 kHz a 150 kHz.

Este artigo se ateve a estudar e testar experimentalmente uma metodologia baseada nas sugestões de medição descritas na norma CISPR 16 para faixa SH, onde realiza-se um escaneamento prévio do sinal no domínio da frequência por meio da STFT (*Short Time Fourier Transform*) a fim de estimar a faixa SH a ser analisada, e, em seguida, realiza-se o processamento deste sinal no domínio do tempo através do detector de quase-pico. O detector QP retorna o nível de distorção SH da faixa de frequência analisada. O valor estimado pelo QP pode ser comparado com níveis de compatibilidade estabelecidos pela norma IEC 61000-4-2 Commission (2002). Portanto, através do método apresentado neste trabalho é possível analisar se os níveis de distorções SH de um sinal estão dentro dos limites normativos aceitáveis. Testes com sinais sintéticos e reais foram realizados via *software* Matlab com a utilização da ferramenta *simulink*.

O presente trabalho está dividido da seguinte maneira: A seção 2 conta com uma revisão dos principais padrões existentes, dentre os quais o utilizado como método deste artigo — CISPR 16. Na seção 3 está explicitada a metodologia proposta para a execução do mesmo. Na seção 4 abordam-se as características dos sinais de teste utilizados em simulação. Na seção 5 demonstram-se os principais resultados adquiridos com este trabalho. Por fim, na seção 6 são descritas as conclusões obtidas no trabalho.

## 2. REVISÃO DOS PRINCIPAIS PADRÕES PARA FAIXA SUPRAHARMÔNICA

### 2.1 CISPR 16

A norma CISPR 16, definida pelo Comitê Especial Internacional em Rádio Frequência (CISPR — *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*) (CISPR, 2017), visa regulamentar a emissão e imunidade de aparelhos eletrônicos ligados à rede. O título dessa padronização é “IEC 61000 Parte 4-7: Técnicas de teste e medição”.

Este padrão é baseado em analisadores de espectro, filtros e detectores. De acordo com a metodologia utilizada nesta norma, o sinal deve ser previamente varrido no domínio da frequência. Para esse processamento inicial, duas abordagens diferentes são propostas por esse padrão, uma corresponde ao uso de um analisador Heterodyne e outra alternativa sugere o uso da STFT, atuando como um banco de filtros. Análises de níveis de distorções do sinal são realizadas através dos detectores de pico, quase-pico ou detector de valor médio. O padrão CISPR se estende além da faixa SH, com um intervalo de 9 kHz a 30000 kHz, o qual é subdividido em bandas. A banda A se enquadra na faixa SH (9 kHz a 150 kHz), objeto de estudo do presente trabalho. Os detalhes da implementação sugerida pela norma CISPR 16 para faixa SH serão descritos na Seção 3.

### 2.2 IEC 61000-4-7

O título dessa norma é “IEC 61000 — Parte 4-7: Técnicas de teste e medição — Guia geral sobre medições e instrumentação de harmônicos e inter-harmônicos, para sistemas de alimentação e equipamentos a ele conectados”. A norma é destinada a medição espectral de distúrbios de até 9 kHz sobrepostos em uma rede de 50 Hz ou 60 Hz. Contudo, segundo Ouachalih (2018), sua metodologia de medição pode ser aplicada com eficiência a distúrbios cujos componentes em frequência localizam-se até 150 kHz.

O processo ocorre na seguinte sucessão de eventos: Primeiro, o sinal é adquirido utilizando uma frequência de amostragem ( $f_s$ ) seguindo o critério de Nyquist a fim de estimar os componentes de frequência até 9 kHz. Em seguida, o sinal é convertido para o domínio da frequência por meio da FFT (*Fast Fourier Transform*) para então ser agrupado em bandas de 200 Hz através do cálculo do valor r.m.s..

### 2.3 IEC 61000-4-30

Esse padrão é aconselhável para medições menos precisas, isso porque por meio dessa metodologia não é possível cobrir o sinal em todo o domínio temporal, mas somente 8 % dele. O título oficial é “Compatibilidade eletromagnética (EMC) — Parte 4-30: Teste e técnicas de medição — Métodos de medição da qualidade de energia” (Commission, 2015). O principal objetivo é identificar níveis de emissão em redes de 50 Hz ou 60 Hz. O método consiste no cálculo de 32 FFTs a cada 10 ou 12 ciclos, igualmente espaçadas no tempo, com uma resolução em frequência 2 kHz. Sugere-se a aplicação desta metodologia de medição para a faixa de 9 kHz a 150 kHz. Existem três parâmetros importantes: (i)

o número de intervalos de medição; (ii) a duração destes intervalos; e (iii) a resolução em frequência. Destas três, a que tem mais influência para sinais estacionários é a resolução em frequência (Ouachalih, 2018).

### 3. ABORDAGEM PROPOSTA

As etapas de implementação para a análise de supraharmônicos estão ilustradas no diagrama de blocos da Figura 1 e são detalhadas a seguir.

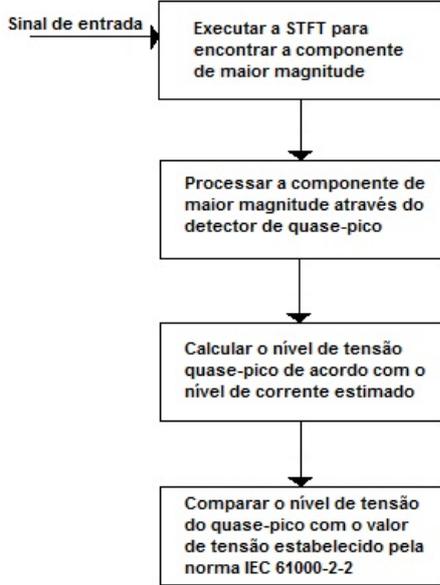


Figura 1. Diagrama com as etapas da abordagem proposta.

A metodologia proposta consiste em uma abordagem sugerida pela norma CISPR 16 para medições na faixa SH.

- (1) Executar a STFT a fim de localizar os componentes SH que apresentam amplitudes mais elevadas. O uso da STFT torna possível analisar sinais com componentes supraharmônicos não estacionários, estimativa que seria menos eficiente com o emprego da FFT. Isso é permissível, porque através de um método chamado janelamento, a STFT permite separar o sinal em subsequências ao longo do tempo, que podem ser consideradas quase-estacionárias e possibilitam a posterior aplicação da FFT.  
Este passo objetiva encontrar os componentes SH com valores de densidade de energia mais elevados, de forma que somente a janela temporal centralizada em cada componente estimado é analisada individualmente pelo detector QP. Este passo difere da metodologia proposta na CISPR 16-2-1, em que cada janela temporal estimada pela STFT é processada pelo QP.
- (2) Processar apenas os componentes SH com maiores níveis de energia através do detector quase-pico. A saída do detector corresponde ao nível de corrente QP do componente analisado.
- (3) A partir da corrente QP estimada deve-se obter o valor de tensão QP, para isso calcula-se o valor de impedância para cada componente de frequência ( $f$ ) através da equação (1). Assim, por meio desse valor de impedância e da corrente encontrada pelo processamento do detector QP, torna-se possível obter o valor

de tensão QP para o componente de frequência  $f$  sob análise.

$$Z_{L-L}(f) = 2\sqrt{\frac{20.938 + 8.16288 \times 10^{-8} \times f^2}{1 + 3.4087 \times 10^{-11} \times f^2}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

- (4) Por fim, é necessário comparar o nível de tensão QP, convertido para  $dB\mu V$  (obtido no passo anterior) com os níveis de compatibilidade estabelecidos pela norma IEC 61000-2-2 (Commission, 2002). O nível de compatibilidade, segundo a norma, é definido pela equação (2), o qual se aplica à faixa SH.

$$CL(f) = -14.3437 \times \log(f) + 186.22 \quad [dB\mu V] \quad (2)$$

onde  $f$  é a frequência da componente SH.

A seguir serão discutidos os principais conceitos a cerca das ferramentas de análise empregadas na metodologia proposta.

#### 3.1 Transformada de Fourier Janelada (STFT)

A transformada de Fourier é uma ferramenta matemática para análise de sinais e sistemas no domínio da frequência, sendo o algoritmo FFT muito empregado para tal finalidade. Para que o cálculo da FFT seja preciso o sinal deve ser estacionário, nesse contexto, o emprego da FFT para análise SH pode não ser eficaz já que estudos afirmam que grande parte dos sinais contendo SH são não estacionários (de Souza, 2004). Faz-se necessário, então, o uso de janelas deslocadas no tempo a fim de produzir subsequências, onde cada sequência é suficientemente pequena de maneira que a forma de onda seja uma aproximação de uma onda estacionária (quase estacionária) (Portnoff, 1980).

$$X[n, \Omega] = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x[n+m]w[m]e^{-j\Omega m} \quad (3)$$

A interpretação da equação (3) demonstra que esse método consiste na multiplicação do sinal de entrada  $x[n]$  por uma função de janela  $w[m]$ , deslocada por um curto período de tempo que é agrupado no fim da operação, compondo o espectro total do sinal. A técnica resulta em informações localmente conhecidas de tempo, frequência e amplitude.

A janela de Hamming foi a utilizada neste trabalho porque ela possui alta taxa de atenuação dos lóbulos secundários, o que é aconselhável para sinais com distorções distantes da fundamental, tais como os supraharmônicos. Além disso, essa janela foi utilizada por apresentar características espectrais interessantes (Petry et al., 1999) e boa atenuação entre *frames* adjacentes. A descrição matemática dessa janela é apresentada na equação (4), onde  $L$  é o tamanho da janela em amostras. A Figura 2 mostra a curva da janela de Hamming evidenciando suas quedas laterais como explicado anteriormente (Smith et al., 1997).

$$w(n) = \begin{cases} 0 & n < 0 \\ 0,54 - 0,46 \cos\left(\frac{2\pi n}{L-1}\right) & 0 \leq n < (L-1) \\ 0 & n \geq (L-1) \end{cases} \quad (4)$$

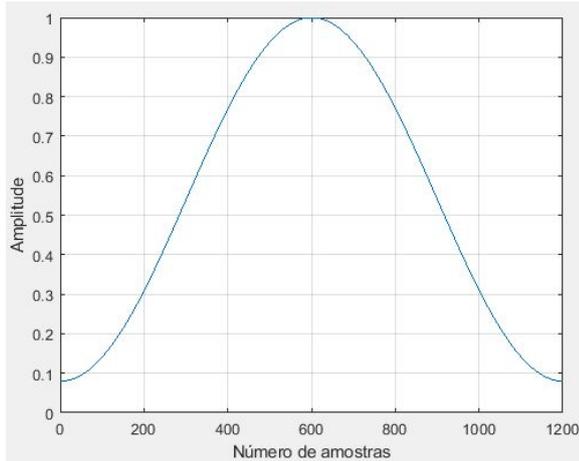


Figura 2. Representação gráfica da janela de Hamming.

Na abordagem proposta, conforme sugerida pela norma CISPR 16, empregou-se a janela de Hamming com 1500 amostras. A taxa de *overlap* (*noverlap*) foi fixada em 75 % do tamanho da janela (*wlen*) e a frequência de amostragem ( $f_s$ ) igual a 300 kHz. O número de pontos para cálculo da FFT (*nfft*) foi igual a 6000. A resolução em frequência fixada pela norma é 200 Hz, o que resulta em uma janela de tempo de 5 ms.

Como resultado, a STFT fornece um espectrograma, que é obtido após o janelamento do sinal ao longo do tempo. Em apenas um gráfico, todas as informações de frequência, tempo e amplitude são concatenadas a fim de facilitar a análise do mesmo (CEAR, 2020). A Figura 3 é um exemplo de espectrograma de um sinal cuja frequência varia ao longo do tempo.

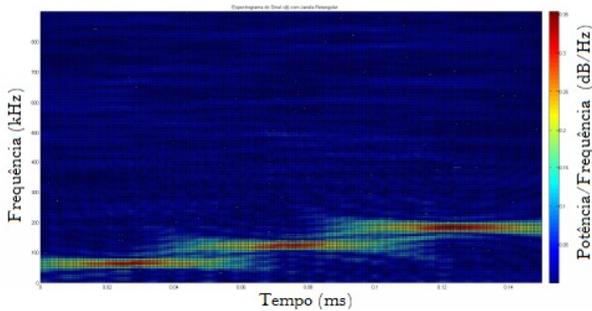


Figura 3. Espectrograma com três frequências ao longo do tempo.

De posse dessas informações, é possível analisar a faixa de supraharmônicos com maior interesse de estudo, ou seja, aquela que possui maior energia e, conseqüentemente, maior capacidade de afetar a QEE. Assim, após a STFT o processo segue para o detector QP.

### 3.2 Detector de quase-pico (QP)

O detector de quase-pico foi implementado de forma analógica neste trabalho, compreendendo basicamente em um circuito com dois resistores e um capacitor utilizado para promover ora o carregamento e ora o descarregamento do sistema, a fim de obter um sinal ponderado na saída, o qual se relaciona com a quantidade de energia e a repetição da

componente do sinal de entrada que está em análise (Ouchalih, 2018).

De acordo com a Figura 4 é possível descrever o funcionamento do QP: quando a amplitude do sinal de entrada é maior do que  $u(t)$ , o capacitor se carrega e, caso contrário, o capacitor é descarregado sobre o resistor  $R_D$ . Os detectores QP são projetados para que o tempo de carga seja muito menor que o de descarga. Com isso, quanto mais elevada a energia e a repetição de uma determinada componente, maior será a energia descarregada sobre o resistor e, conseqüentemente maior será o nível de supraharmônica do sinal que está sendo analisado (Guimarães, 2008).

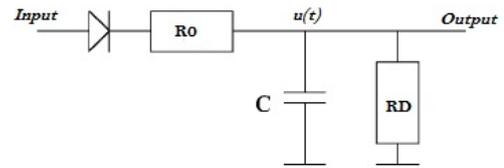


Figura 4. Detector Analógico de Quase-Pico.

Neste trabalho, para implementação do detector QP, empregou-se as recomendações propostas pela norma CISPR 16 para faixa SH onde os valores das constantes de tempo consideradas  $\tau_c$  e  $\tau_d$  são iguais a 45 ms e 500 ms, respectivamente (CISPR, 2017). Os valores correspondentes aos componentes de circuito foram de  $25 \mu F$  para a capacitância, de  $1 k\Omega$  para a resistência  $R_0$  e de  $20 k\Omega$  para a resistência  $R_D$ .

A implementação do QP por meio do *simulink* é ilustrada na Figura 5 e, na Figura 6, aparece um exemplo do sinal de saída do quase-pico para uma componente de entrada senoidal de baixa frequência, para fins de exemplificação. Uma observação importante é que o valor médio do sinal de saída do detector de quase-pico é sempre menor ou igual ao valor de pico do sinal de entrada, isso demonstra que ele é ponderado de acordo com a ocorrência SH ao longo do tempo, nunca ultrapassando o valor de máxima da amplitude do sinal.

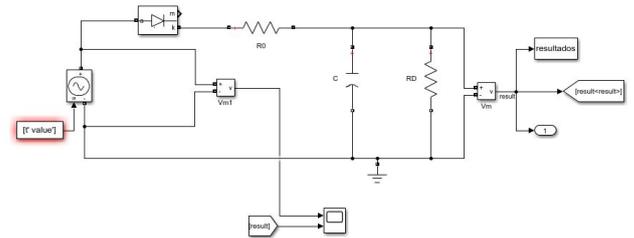


Figura 5. Configuração do circuito de quase-pico no *simulink*.

## 4. SINAIS DE TESTE

Este trabalho analisou distúrbios supraharmônicos na faixa de 9 kHz a 150 kHz seguindo sugestões da norma CISPR 16. Para validar a metodologia foram utilizados um sinal sintético e um sinal real.

O sinal sintético, exibido na Figura 7, é definido pela equação (5). Este sinal foi gerado com duas componentes

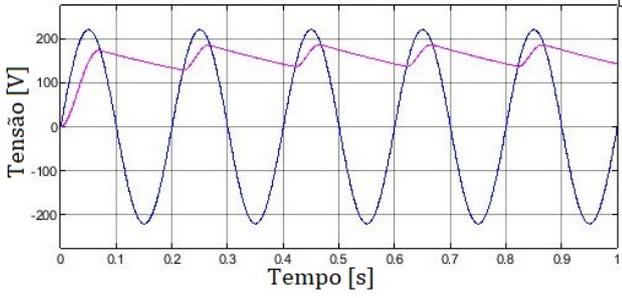


Figura 6. Exemplo de sinal de saída do detector quase-pico para uma onda senoidal de entrada em 5 Hz, tensão [V] x tempo [s].

SH de frequências  $f_{sh1}$  igual a 9,9 kHz e  $f_{sh2}$  igual a 12,5 kHz. As amplitudes das SH foram de 0,05 A e 0,2 A para  $A_{sh1}$  e  $A_{sh2}$ , respectivamente. As fases das componentes fundamental e SH foram consideradas nulas. Para geração do sinal considerou-se uma taxa de amostragem de 300 kHz, frequência de fundamental ( $f_0$ ) igual a 50 Hz com amplitude unitária.

$$x(t) = A_0 \cos(2\pi f_0 t) + A_{sh1} \cos(2\pi f_{sh1} t) + A_{sh2} \cos(2\pi f_{sh2} t) \quad (5)$$

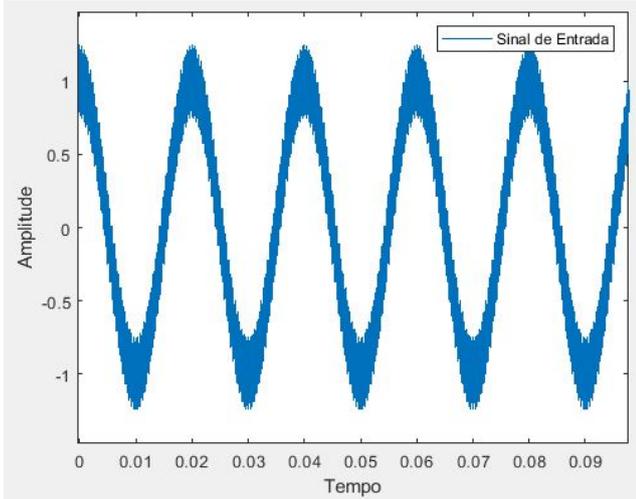


Figura 7. Sinal sintético utilizado na simulação, Amplitude [A] x tempo [s].

O sinal real, representado na Figura 8, é oriundo de uma lâmpada LED, com frequência fundamental de 50 Hz e taxa de amostragem igual a 300 kHz. Os dados foram extraídos do banco de dados PANDA (*equiPment hArmoNic Database*), desenvolvido para troca de informações sobre medidas harmônicas de equipamentos entre laboratórios de todo o mundo.

## 5. RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados alcançados com a metodologia proposta para ambos os sinais, sintético e real. Através destes fez-se uma validação do método proposto a fim de comprovar a sua eficiência.

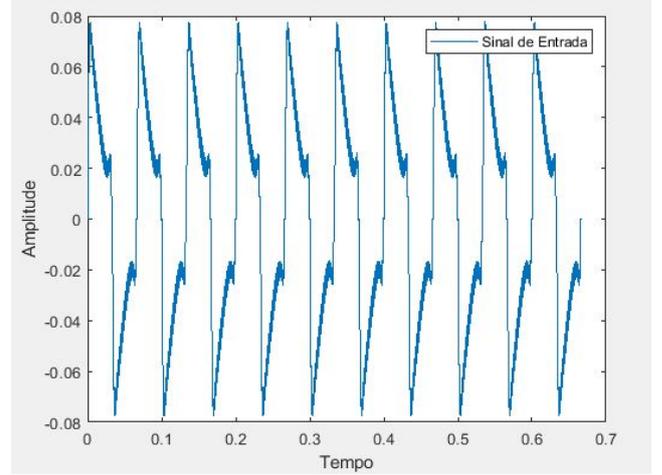


Figura 8. Sinal real utilizado na simulação, Amplitude [A] x tempo [s].

### 5.1 Resultados para o sinal sintético

Com a finalidade de avaliar o método proposto, o sinal sintético descrito em (5) foi submetido ao sistema proposto. Inicialmente, calcula-se a STFT do sinal, fornecendo como saída um vetor com as informações de tempo, frequência e magnitude do sinal. Por meio dessas informações, torna-se possível a janela temporal onde se localiza o componente de maior magnitude em frequência do sinal. A Figura 9 mostra o espectrograma do sinal em análise, com destaque para as duas componentes de maior energia nas frequências supraharmônicas adotadas.

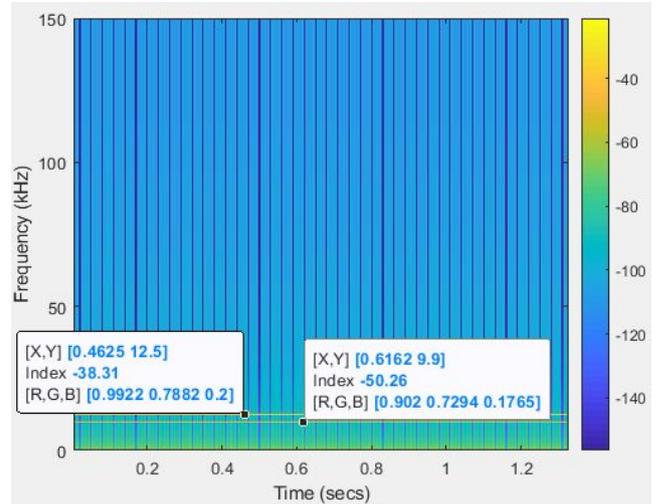


Figura 9. Espectrograma do sinal sintético.

Após estimar os componentes de maior magnitude através da STFT processa-se, individualmente, cada janela temporal centralizada no componente estimado através do detector QP. Portanto, os resultados do QP oriundos de um processamento nas frequências de 9,9 kHz e 12,5 kHz são evidenciados separadamente. As Figuras 10 e 11 representam a corrente estimada pelo detector QP para as componentes sob análise.

Para a frequência de 9,9 kHz foi encontrada uma impedância de 10,74  $\Omega$ , conforme equação (1). Com base

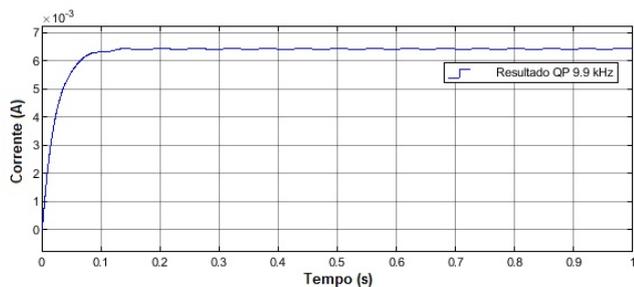


Figura 10. Nível de corrente QP para o sinal sintético na frequência de 9,9 kHz do tempo vs a amplitude.

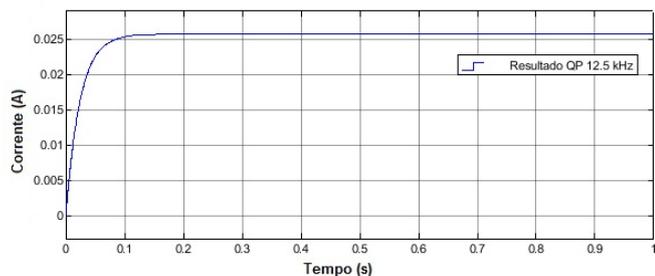


Figura 11. Nível de corrente QP para o sinal sintético na frequência de 12,5 kHz do tempo vs a amplitude.

na Figura 10, a amplitude do sinal de corrente estimado pelo QP ao final da simulação é de 0,006417 A. Assim, o nível de tensão QP é de 96,78  $dB\mu V$ , sendo menor do que nível de compatibilidade admissível pela norma, calculado através da equação (2), igual a 128,9  $dB\mu V$ . O mesmo ocorre para a frequência de 12,5 kHz, que possui uma impedância de 11,58  $\Omega$ , 0,02572 A de amplitude QP (Figura 11) e tensão equivalente igual a 109,47  $dB\mu V$ . O nível de compatibilidade para essa componente é de 127,46  $dB\mu V$  e está acima do valor emitido encontrado. Portanto, as duas componentes desse sinal não excedem os níveis de compatibilidade eletromagnética determinados pela norma.

## 5.2 Resultados para o sinal real

Em seguida o sinal real oriundo de uma lâmpada de LED (detalhes desse sinal estão na seção 4) foi testado pelo sistema proposto. Os mesmos passos de aplicação da metodologia proposta descritos anteriormente para sinal sintético são empregados para o sinal real. Portanto, o primeiro passo consiste em estimar as componentes de maior energia do sinal. Tal componente encontrada é destacada no espectrograma do sinal real mostrado na Figura 12. Neste caso, devido a natureza variante do sinal, a energia se espalha ao redor do maior componente, que se encontra em 10,5 kHz.

Posteriormente, processa-se a janela temporal correspondente centralizada no componente de maior magnitude em frequência através do detector QP. Ao final de 1 s de teste, a curva QP, na Figura 13, alcançou 0,0003391 A. O cálculo da impedância forneceu um valor igual a 10,92  $\Omega$ . Para fins de comparação, chegou-se a um valor de tensão QP de 71,37  $dB\mu V$ , sendo este valor menor que o nível de compatibilidade de 128,54  $dB\mu V$ , obtido pela equação (2) para  $f$  igual a 10,5 kHz. Portanto, o componente SH

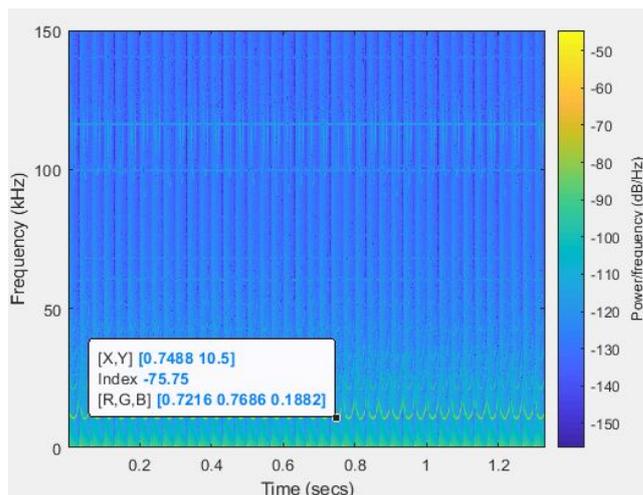


Figura 12. Espectrograma do sinal real de uma lâmpada LED.

emitido pelo sinal de LED analisado encontra-se abaixo do limite máximo estabelecido pelo padrão IEC 61000 2-2.

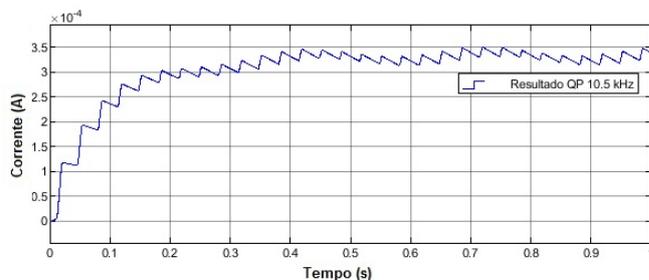


Figura 13. Curva do quase-pico para o sinal real na frequência de 10,5 kHz do tempo vs a amplitude.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos neste trabalho.

Tabela 1. Síntese dos resultados obtidos pela abordagem proposta.

Sinal	Frequência (kHz)	Tensão Quase-Pico ( $dB\mu V$ )	Tensão admissível pela norma ( $dB\mu V$ )	Excede o limite?
Sintético	9,9	96,78	128,9	Não
	12,5	109,47	127,46	
Real	10,5	71,37	128,54	Não

## 6. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi fornecer informações necessárias para se realizar análises de níveis de compatibilidade com sinais contendo distorções supraharmônicas. Para tanto, utilizou-se uma metodologia sugerida pela CISPR 16 baseada no emprego da STFT e do detector de quase-pico. A abordagem proposta é justificada pelo fato de a norma CISPR 16 ter sido pouco explorada por pesquisadores da área de QEE, já que as distorções SH tornaram-se foco nas últimas décadas. Os resultados obtidos para os sinais sintéticos e reais comprovaram a eficiência do sistema proposto. Através da análise do sinal sintético,

onde têm-se um conhecimento prévio a cerca da localização das componentes supraharmônicas do sinal, pode-se avaliar o grau de equivalência das frequências teóricas com as simuladas, embasando a confiabilidade do processo. O sinal real, de natureza variante no tempo, justificou o emprego da STFT, cuja técnica de janelamento permite análise de sinais não estacionários. O processamento do sinal através do detector QP permitiu a realização de uma análise do nível de distorção SH e posterior averiguação se o mesmo atendia aos requisitos de nível de compatibilidade encontrados na norma IEC 61000-2-2. Portanto, pode-se afirmar que o emprego da STFT e do detector de quase-pico foi uma ferramenta viável que permitiu o alcance dos objetivos planejados. Dessa forma, a metodologia adotada neste trabalho se revelou favorável para a investigação e análise de supraharmônicos para assegurar a qualidade da energia elétrica de acordo com padrões e normas reconhecidos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPEMIG, CNPq, CAPES e ao INERGE pelo apoio que permitiu a execução deste trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- CEAR (2020). *Transformada de Fourier de Curto Tempo—STFT*. Universidade Federal da Paraíba.
- CISPR (2017). *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods — Part 2-1: Methods of measurement of disturbances and immunity - Conducted disturbance measurements*. International Standard.
- Commission, I.E. (2002). *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*. International Electrotechnical Commission.
- Commission, I.E. (2006). *IEC 61000 — Part 4-7: Testing and measurement techniques - general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto*. International Electrotechnical Commission.
- Commission, I.E. (2015). *Electromagnetic compatibility (EMC) — Part 4-30: Testing and measurement techniques - power quality measurement methods*. International Electrotechnical Committee.
- de Souza, S.A. (2004). *Utilização da transformada de fourier janelada para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica*. Universidade de São Paulo. Dissertação de Mestrado.
- Guimarães, J.V. (2008). *Ensaio de proficiência em compatibilidade eletromagnética: programa exploratório de medidas de emissão radiada*. Instituto Militar de Engenharia. Dissertação de Mestrado.
- Mendes, T.M., Duque, C.A., Silva, L.R., Ferreira, D.D., and Meyer, J. (2019). Supraharmonic analysis by filter bank and compressive sensing. *Electric Power Systems Research*, 169, 105–114.
- Mendes, T.M. (2019). *Estudo e implementação de técnicas de análise de componentes supraharmônicos*. Universidade Federal de Juiz de Fora. Tese de Doutorado.
- Ouachalih, B. (2018). *Experimental study of disturbances in the frequency range between 2 and 150 kHz*. Scribner.
- Petry, A., Zanuz, A., and Barone, D.A.C. (1999). Utilização de técnicas de processamento digital de sinais para a identificação automática de pessoas pela voz. *Simpósio sobre Segurança em Informática, São José dos Campos, SP*.
- Portnoff, M. (1980). Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time fourier analysis. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 28(1), 55–69.
- Smith, S.W. et al. (1997). *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. California Technical Pub. San Diego.
- Yalcin, T., Özdemir, M., Kostyla, P., and Leonowicz, Z. (2017). Analysis of supra-harmonics in smart grids. In *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEIC/I&CPS Europe)*, 1–4. IEEE.