DOI: 10.48011/sbse.v1i1.2168

Avaliação Comparativa de Métodos de Agrupamento para Quantificação de Harmônicas e Inter-harmônicas ⋆

Fabricio de Matos Alves * **Jorge Cormane** **

* *Engenharia de Energia, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, DF, (e-mail: fabriciomatos02@gmail.com).*
** *Engenharia de Energia, Faculdade UnB Gama, Universidade de Brasília, DF, (e-mail: jcormane@unb.br)*

Abstract:
This work aims to comparatively evaluate the discrepancies between the results of the quantification of harmonic and inter-harmonic distortions after applying the grouping methods proposed in the literature. Therefore, a sensitivity analysis methodology based on the variation of the amplitude and frequency of the harmonic and inther-harmonic components is used. The test signals are constructed from references in the literature and according to module 8 of PRODIST. The results verified that for the evaluated methods, the presence of inter-harmonics with amplitude above 20 % of the fundamental in different places of the spectrum affect the grouping methods and influence the quantification of distortions.

Resumo: Este trabalho objetiva avaliar comparativamente as discrepâncias entre os resultados da quantificação das distorções harmônicas e inter-harmônicas após a aplicação dos métodos de agrupamento propostos na literatura. Para tanto, é utilizada uma metodologia de análise de sensibilidade baseada na variação da amplitude e da frequência das componentes harmônicas e inther-harmônicas. Os sinais de teste são construídos a partir de referências na literatura e conforme o módulo 8 do PRODIST. Os resultados verificaram que para os métodos avaliados, a presença de inter-harmônicas com amplitude acima de 20% da fundamental em diferentes locais do espectro afetam os métodos de agrupamento e influenciam na quantificação das distorções.

Keywords: Grouping method; Harmonics; inter-harmonics; IEC 61000-4-7.
Palavras-chaves: Método de agrupamento; Harmônicas; Inter-harmônicas; IEC 61000-4-7.

1. INTRODUÇÃO

Os procedimentos para a quantificação dos parámetros de qualidade da energia elétrica (QEE), são baseados no padrão IEC 61000-4-7. Dito padrão apresenta o conceito de agrupamento das componentes harmônicas e inter-harmônicas a partir de grupos e subgrupos (IEC, 2002). Além deste documento, observa-se na literatura uma outra proposta de agrupamento em Chang et al. (2004).

Trabalhos que tratam do agrupamento de frequência são abordadas nessa seção. Destacando as as adaptações realizadas ao método proposto pelo IEC 61000-4-7 e as pesquisas alternativas para o desenvolvimento de novas técnicas de agrupamento de frequência.

Em (Chang et al., 2004) é proposto um novo método de agrupamento de frequência baseado no conceito de frequência de grupo, para uma banda de frequência cujas características são preservadas e representadas por uma componente equivalente. Os autores aplicaram os conceitos de FG para quantificar as inter-harmônicas obtidas sinal de um sinal de corrente de carga de controladores de ciclo integral. Estes concluíram que as frequências de grupo melhor preservam as características das componentes do espectro original quando comparadas com o método padrão IEC 61000-4-7.

Estudos que tratam sobre a presença de inter-harmônicas e os efeitos vazamento espectral a partir da implementação do método de agrupamento do IEC 61000-4-7, são apresentador a seguir. Em (Bracale et al., 2008), propõe-se a aplicação de técnicas de estimação espectral, para a redução dos efeitos da não sincronização de frequência . Em (Lin, 2008), um método é baseado no cálculo da porção de distribuição de energia em torno das frequências adjacentes em cada harmônico para determinar a frequência inter-harmônica, é proposto.

Outros trabalhos foram desenvolvidos utilizando a FFT em conjunto com o conceito de energia de grupo harmônico. Desta forma, Lin et al. (2011) e Lin et al. (2013) desenvolveram algoritmos que tratam a distribuição da energia dentro do grupo harmônico, o primeiro por meio de um processo iterativo de minimização da energia e o segundo por meio do conceito de com sobreposição de partes (PGER, do inglês *Piecewise-overlapped Group-harmonic Energy Restoring*). Em (Monteiro et al., 2014) avaliaram de forma comparativa o método de interpolação

⋆ Este trabalho foi realizado no âmbito do Edital FAPDF 04/2017. TOA 1373/2017 e Processo: 193.001.474/2017.

no domínio do tempo e no domínio da frequência, ambas as técnicas aplicadas para calcular os grupos e subgrupos de harmônicas e inter-harmônicas da norma IEC 61000-4-7. Os autores observaram que as técnicas de interpolações permitem desvios na frequência sendo que as mesmas funcionam em cenários de amostragem assíncrona.

Em (Hui et al., 2012), unicamente são agrupadas as componentes inter-harmônicas. Os autores afirmam que a interferência espectral entre as harmônicas e inter-harmônicas é fortemente reduzida, aumentando a precisão das informações (frequência, amplitude e ângulo de fase) das componentes do sinal. Seguindo a mesma linha de pesquisa, Yuan et al. (2014) propuseram o método de separação de harmônica e inter-harmônica, mas utilizando uma técnica diferente do trabalho anterior, onde o vazamento espectral é removido para melhorar a precisão das medidas, quando a amostragem é assíncrona com a resolução. De acordo com os autores, a aplicação do método em tempo real atinge as exigências inerentes da simulação.

Observam-se discrepâncias entre os resultados divulgados pelos autores dos trabalhos consultados, o que pode trazer dúvidas no que diz respeito à aplicação do método de agrupamento de componentes harmônicas e inter-harmônicas proposto pelo IEC 61000-4-7. A partir da problemática encontrada, este trabalho apresenta uma metodologia para a análise de sensibilidade à amplitude e frequência dos métodos de agrupamentos propostos no IEC 61000-4-7 e (Chang et al., 2004).

Com o resultado desta análise pretende-se identificar e mitigar as discrepâncias presentes entre os métodos de agrupamento. Este fato possibilitará o aprimoramento do processo de medição, permitindo estabelecer uma relação de confiança entre os clientes e as concessionárias de energia elétrica.

2. METODOLOGIA

Os métodos de agrupamento proposto no IEC 61000-4-7 e mo Chang et al. (2004) são apresentados nesta seção, como também, os indicadores de distorção e energia do espectro que serão os parâmetros de utilizados para avaliar os métodos.

2.1 Método IEC 61000-4-7

O IEC 61000-4-7 recomenda um método de medições de componentes de frequências que estão na faixa de até 9 kHz acima da frequência fundamental do sistema elétrico de 60 Hz ou 50 Hz (IEC, 2002). O documento estabelece uma série de procedimentos e requerimentos de instrumentação para a realização das medições e do monitoramento das frequências harmônicas e inter-harmônicas.

A etapa da norma IEC 61000-4-7 que será abordada e aprofundada neste trabalho é método de agrupamento de componentes, em outras palavras, métodos de grupos e subgrupos. A base fundamental dos métodos é a análise de Fourier, onde primordialmente a aplicação da DFT usando uma janela retangular no domínio do tempo de 200 ms, cerca de 12 ciclos de 60 Hz, que equivale, no domínio da frequência, em uma resolução de 5 Hz. Os grupos e subgrupos harmônicos são definidos para 60 Hz, respectivamente, pela (1) e (2) mostradas a seguir.

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-6}^2}{2} + \sum_{i=-5}^{5} C_{k+i}^2 + \frac{C_{k-6}^2}{2} \tag{1}$$

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^{1} C_{k+i}^2 \tag{2}$$

Onde, os valores $G_{g,n}$ e $G_{sg,n}$ caracterizam as magnitudes do n-ésimo grupo e n-ésimo subgrupo harmônico em RMS, o C_k é o valor RMS da k-ésima componente espectral na frequência harmônica.

Desta forma, em (1) mostra-se que o grupo harmônico é feito utilizando 6 componentes anteriores e 6 componentes posteriores em relação ao componente harmônico de referência. Já em (2) observa-se que para o subgrupo harmônico leva em consideração 1 componente anterior e 1 posterior ao componente harmônico de referência. As frequências harmônicas dos grupos e dos subgrupos são definidas como as próprias frequências dos componentes harmônicos de análise. Os grupos e subgrupos inter-harmônicos são apresentados para 60 Hz, respectivamente, em (3) e (4).

$$G_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^{11} C_{k+i}^2 \tag{3}$$

$$G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^{10} C_{k+i}^2 \tag{4}$$

Onde, os valores $G_{ig,n}$ e $G_{isg,n}$ caracterizam as magnitudes em RMS do n-ésimo grupo e *n-ésimo* subgrupo inter-harmônicos.

Verifica-se em (3) que o grupo inter-harmônico é feito utilizando as componentes entre dois harmônicos, sem incluí-los. Já em (4) mostra-se que para o subgrupo inter-harmônico é utilizado as componentes entre dois harmônicos, sem incluí-los e sem incluir seus adjacentes. As frequências inter-harmônicas de grupo e subgrupo são definidas pela (5), mostrada a seguir.

$$f_{ihg,n} = f_{ihsg,n} = \frac{f_{n_h} + f_{n_h+1}}{2} \tag{5}$$

Onde, $f_{ihg,n}$ e $f_{ihsg,n}$ são, respectivamente, frequências inter-harmônicas de grupo e subgrupo. n_h é a ordem harmônica. Portanto, a frequência é obtida através da média entre duas frequências harmônicas consecutivas (IEC, 2002), (Abada, 2018).

Conforme a norma ABNT NBR IEC 61000-4-30 (ABNT, 2011), é selecionada uma configuração que melhor atende às integridades dos índices globais de distorção, isto é, a configuração de subgrupo harmônico e subgrupo inter-harmônico (de Oliveira, 2015). Portanto, neste trabalho, para avaliação do método IEC 61000-4-7 será abordado somente os subgrupos harmônicos e subgrupos inter-harmônicos.

Na Figura 1 apresenta-se de forma ilustrativa em barras espectrais (valores em RMS) a aplicação de subgrupos harmônicos e inter-harmônicos para um sinal. São ilustrados apenas os harmônicos até a 5º ordem e as respectivas inter-harmônicas.

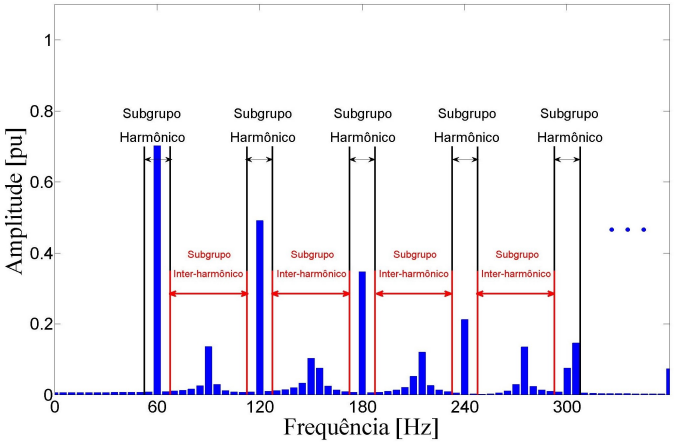

Figura 1. Representação gráfica dos subgrupos harmônicos e inter-harmônicos.

2.2 Método Chang (Chang et al., 2004)

Este método baseia-se no conceito da frequência de grupo (FG) para uma determinada banda de frequência de sequência dominante. A determinação dessa banda de frequência parte da ideia de caracterizar as frequências harmônicas e inter-harmônicas por meio da sequência de fase, após isto, uma sequência dominante é encontrada, seja ela, positiva, negativa ou zero.

A Figura 2 ilustra as bandas de frequências de sequências dominantes que serão incluídas no processo de agrupamento.

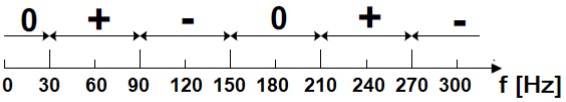

Figura 2. Bandas de frequências de sequência dominante para 60 Hz. Sequências positiva e negativa e zero (+,−,0). Fonte: Adaptado de Chang et al. (2004).

As bandas de frequências cujas sequências predominam são descritas para sequência positiva, negativa e zero:

- Sequência positiva é dominante de $(3N + 0,5)f_o$ à $(3N + 1,5)f_o$ Hz, $N = 1, 2, 3 \ldots$.
- Sequência negativa é dominante de $(3N + 1,5)f_o$ à $(3N + 2,5)f_o$ Hz, $N = 1, 2, 3 \ldots$.
- Sequência zero é dominante de $(3N - 0,5)f_o$ à $(3N + 0,5)f_o$ Hz, $N = 1, 2, 3 \ldots$.

Conforme mostrado na Figura 2, as bandas de frequências de sequência dominante, $(N - 0,5)f_o$ à $(N + 0,5)f_o$, são escolhidas como a banda de frequência de um grupo de frequências. A FG é, fisicamente, um componente equivalente dos componentes pertencentes à banda de frequências de sequência dominante baseado no mesmo impacto de qualidade de energia (Chang et al., 2004). Uma frequência de grupo possui amplitude e frequência, a fase não é considerada pois não impacta nos índices qualidade de energia. A amplitude ($X_{G,(f_1,f_2)}$) é definida em (6).

$$X_{G,(f_1,f_2)} = \sqrt{\sum_h (X_h)^2} \tag{6}$$

Onde, o h é dado por $f_1 < h \leq f_2$. O $X_{G,(f_1,f_2)}$ é o valor RMS da amplitude da FG em uma banda de frequências f_1 à f_2 que é dada pelo teorema de Parseval (Oppenheim and Schafer, 2010).

A frequência equivalente ($f_{G,(f_1,f_2)}$ de uma FG é obtida para um mesmo valor específico de K_Ω, como se apresenta em (7).

$$f_{G,(f_1,f_2)} = \sqrt{K_\Omega} f_o \tag{7}$$

Onde, K_Ω é dado pelo fator-K na banda de frequência Ω e f_o é a frequência fundamental. Portanto, K_Ω é expresso em (8), conforme a seguir.

$$K_\Omega = \frac{\sum_{h=m}^{n} \left(\frac{f_h}{f_o} X_h\right)^2}{\sum_{h=m}^{n} (X_h)^2} \tag{8}$$

Onde, m e n são representados pelos índices mínimos e máximos, respectivamente, em uma banda de frequências definida entre f_1 e f_2. As frequências f_1 e f_2 representam as frequências limítrofes de duas bandas de frequências de sequência dominante vizinhas.

A Figura 3 mostra o espectro e as bandas de frequência de sequência dominantede para um sinal com frequência fundamental de 60 Hz.

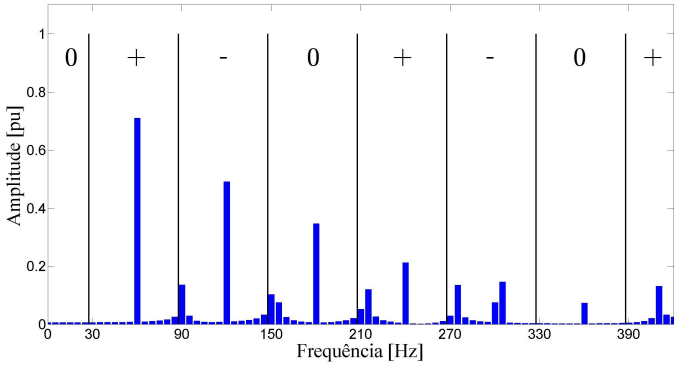

Figura 3. Bandas de frequências de sequência dominante aplicada no espectro.

Na Figura 3 para harmônicas de até 7ª ordem (420 Hz) foram obtidas 8 bandas de frequência de sequência dominante, sendo destas, 3 bandas de sequência positiva, 2 bandas de sequência negativa e 3 bandas de sequência zero. As componentes espectrais localizadas nas bandas, são agregadas resultando em uma única componente espectral e frequência equivalente para cada banda de frequência de sequência de fase dominante, a Figura 4 mostra o resultado do método de agrupamento aplicado aos espectro da Figura 3.

Na Figura 4 é possível observar, uma redução significante da quantidade de componentes espectrais após a aplicação

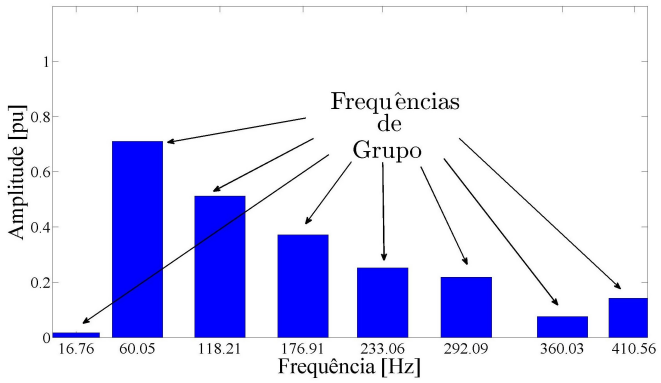

Figura 4. Amplitudes e frequências equivalentes das FG.

do método, isto é, na Figura 3 há aproximadamente 84 barras espectrais e esse resultado foi reduzido para cerca de apenas 8 barras espectrais.

2.3 Indicadores de distorção e energia do espectro

O IEC 61000-4-7 define o THD (do inglês, *Total Harmonic Distortio*) para os subgrupos de harmônicos e inter-harmônicos conforme em (9).

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{H} \left(\frac{G_{sg,n}}{G_{sg,1}} \right)^2} \tag{9}$$

Onde, $G_{sg,n}$ é o valor RMS do subgrupo harmônico de ordem n. A soma é feita até a componente harmônica H, sendo $G_{sg,1}$ o valor RMS do subgrupo da fundamental.

De maneira equivalente em (10), o indicador de distorção dos subgrupos inter-harmônicos é apresentado para este trabalho como TID (do inglês, *Total Interharmonic Distortion*).

$$TID = \sqrt{\sum_{n=2}^{IH} \left(\frac{G_{isg,n}}{G_{sg,1}} \right)^2} \tag{10}$$

Onde, $G_{isg,n}$ é o valor RMS do subgrupo inter-harmônico de ordem n. A soma é feita até a componente inter-harmônica IH, sendo $G_{sg,1}$ o valor RMS do grupo da fundamental.

A expressão simplificada para o cálculo da energia total do espectro é apresentada como mostra-se a seguir em (11).

$$Energia = \sqrt{\sum_{k=0}^{N_w/2} |C_k|^2} \tag{11}$$

Onde, N_w é o número de amostras da janela de tamanho de 200 ms. Nota-se que a energia é calculada para os valores em RMS e para metade do espectro devido à simetria da DFT. O cálculo da energia para os grupos e subgrupos é realizado substituindo os termos $N_w/2$ por n e os termos C_k por $G_{sg,n}$ e $G_{isg,n}$.

2.4 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade à amplitude e frequência foi desenvolvido para avaliar a resposta de cada método às variações de amplitude e frequência. Os métodos IEC 61000-4-7 e o Chang (Chang et al., 2004) são avaliados de forma comparativa com os parâmetros originais do sinal.

Um exemplo ilustrativo de como se dá a variação da amplitude e da frequência das componentes espectrais com o objetivo causar vazamento espectral é apresentado na Figura 5 e na Figura 6, respectivamente.

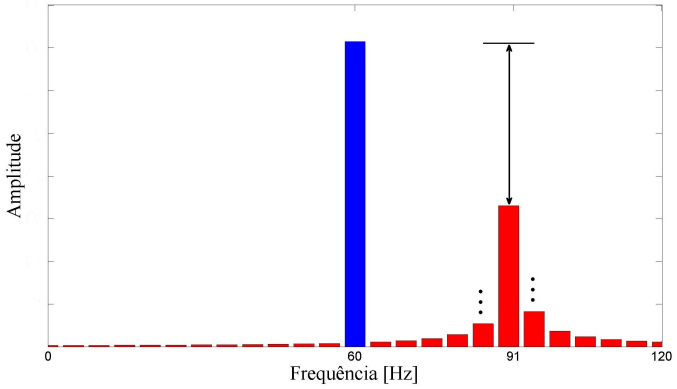

Figura 5. Representação gráfica da variação da amplitude da componente inter-harmônica.

Na Figura 5, a variação de amplitude é feita para uma frequência inter-harmônica fixada em 91 Hz, que por sua vez não é múltipla da resolução (5 Hz). A amplitude desta componentes espectral varia incrementalmente de 0% a 100% do valor da amplitude da componente fundamental (60 Hz), com passo incremental da variação de 1%.

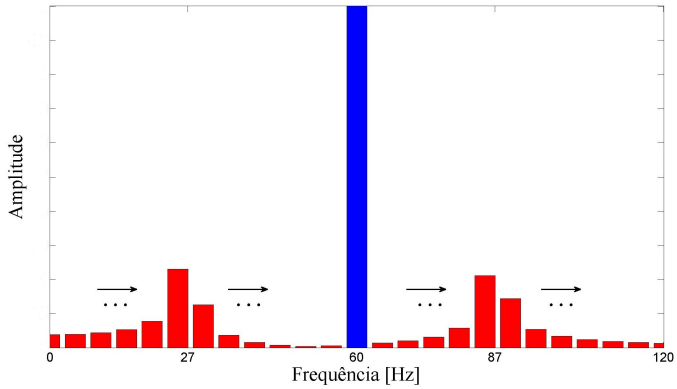

Figura 6. Representação gráfica da variação da frequência da componente inter-harmônica com intervalo de 3 Hz.

A Figura 6 mostra a dinâmica da variação da frequência com intervalo de 3 Hz. Neste exemplo, a amplitude da componente móvel foi fixada em 0.2% da componente fundamental.

De modo geral, o teste para amplitude e para frequência é detalhado conforme o fluxograma apresentado na Figura 7.

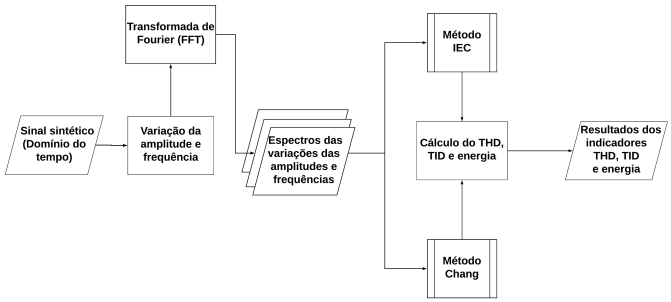

Figura 7. Fluxograma do teste de sensibilidade à amplitude e frequência.

No fluxograma é destacado cada etapa para obter os resultados dos indicadores THD, TID e energia do espectro de cada variação de amplitude e frequência para os métodos IEC 61000-4-7 e o Chang (Chang et al., 2004). A entrada do fluxograma são sinais sintéticos somente com harmônicas, porque na etapa de variação de amplitude e frequência é adicionada a componente inter-harmônica para a variação. Os métodos são aplicados simultaneamente, para cada variação de amplitude e frequência. Após a aplicação do agrupamento calculam-se os parámetros THD, TID e energia para o método IEC 61000-4-7, em quanto que para o método Chang são calculados apenas os THD e energia. Isto, em razão que o método Chang não prevê a presença de inter-harmônicas. Por fim, os resultados obtidos para cada método são comparados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os sinais sintéticos para avaliação dos métodos obedecem à soma de componentes harmônicas e inter-harmônicas, tal e como se apresenta em (12).

$$x(t) = \sum_{n_h=1}^{n_{h_{máx}}} A(n_h f_o) \sin\left(2\pi f_o n_h t + \phi_h\right) + \sum_{f_{ih}}^{f_{ih_{máx}}} A(f_{ih}) \sin\left(2\pi f_{ih} t + \phi_{ih}\right) \quad (12)$$

Onde, $A(n_h f_o)$ e $A(f_{ih})$ são as amplitudes harmônicas e inter-harmônicas, respectivamente. O n_h é ordem harmônica, f_o é frequência fundamental e f_{ih} é a frequência inter-harmônica. O ϕ_h e ϕ_{ih} são as fases harmônicas e inter-harmônicas.

O sinal de de referência para testes possui um valor de THD de 10%. Os valores dos parámetros deste sinal são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parámetros do sinal de teste.

n_h	$n_h f_o$ [Hz]	$A(n_h f_o)$ [pu]	ϕ_h[°]
1	60	1	0
3	180	0,08	0
5	300	0,06	0

3.1 Resultados do THD

Os resultados para o método IEC 61000-4-7 são apresentados na Fig. 8. Tratando-se de um teste a qual há variação tanto em frequência quanto em amplitude, os resultados foram mostrados em forma de gráfico em superfície 3D com as vistas superior e lateral esquerda.

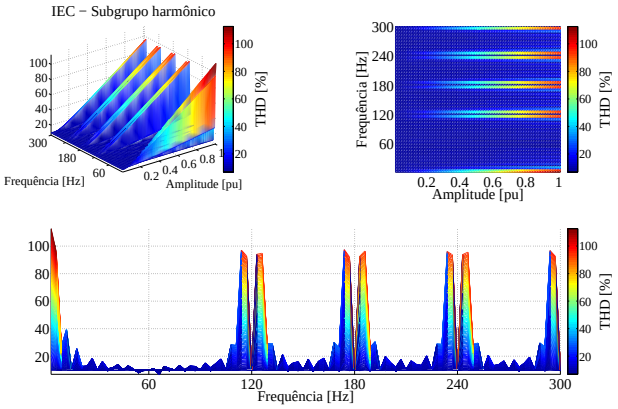

Figura 8. Resultados dos THD do método IEC - Subgrupo harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

Ao analisar os resultados sa Fig. 8, é possível destacar que os maiores valores de THD estão próximos à componente CC (0 Hz) e às harmônicas. Além disso, a presença de amplitudes com valores acima de 0,2 p.u. elevam os resultados do THD para acima de 20%, consequentemente, elevando as discrepâncias. A explicação por trás desses resultados está relacionada com a forte influência do vazamento espectral, especificamente, do tipo *long range leakage* causado pela inter-harmônicas próximas das componentes supracitadas. Os valores calculados pelos subgrupos harmônicos são muito diferentes nessa situação, o que faz gerar altos valores de THD.

No caso do resultado para região próxima à fundamental, ocorre que a presença de inter-harmônicas na região aumenta o valor da amplitude fundamental. O que significa que com amplitude da fundamental elevada e sabendo que as harmônicas permanecem com seus valores próximos aos originais, o resultado é a diminuição no THD, conforme a (9) que é a aplicação do THD com subgrupo harmônico. É possível também observar uma queda dos valores do THD nas regiões entre as harmônicas, isso ocorre porque nessas regiões as inter-harmônicas e, se houver, os vazamentos espectrais são agrupados pelos subgrupos inter-harmônicos que não fazem parte da quantificação das harmônicas e não fazem parte do cálculo do THD. Logo, os valores dos THD nessas regiões foram por volta de 10% a 20%, valores próximos ao valor original de referência.

Os resultados para o método Chang são mostrados na Fig. 9. Nota-se na Fig. 9 que os resultados possuem uma semelhança com os resultados do método IEC 61000-4-7 para a componente CC e as harmônicas. Por outro lado, na região entre as harmônicas o padrão crescente do THD é mantido, isso é devido o aumento da amplitude que ocorre para cada posição em frequência.

Na região próxima à fundamental os valores de THD são baixos e próximos ao original, assim como o IEC 61000-4-7 a justificativa está no aumento da amplitude da fundamental com aplicação do agrupamento Chang. Além disso, na Fig. 9 os resultados entre as frequências harmônicas possuem padrão crescente de THD a medida que a amplitude aumenta, o padrão é recorrente em toda

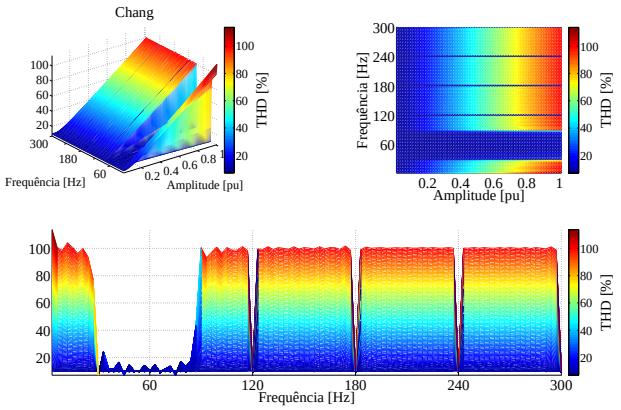

Figura 9. Resultados dos THD do método Chang ao longo do teste de sensibilidade.

essa região e, ao observar o método Chang (Fig. 3), nota-se que os limites dos agrupamentos abrangem as metades das regiões entre as harmônicas. Nesse sentido, esse padrão crescente se repete conforme observado para as frequências de 120 a 180 Hz, 180 a 240 Hz e 240 a 300 Hz, onde há vazamentos de curto e longo alcance (*short range leakage* e *long range leakage*). Portanto, a maior sensibilidade do método Chang está nas regiões entre as harmônicas e próximos à componente CC, sendo as inter-harmônicas com amplitudes acima de 0,1 pu.

3.2 Resultados do TID

sinal da Tabela 1 possui os valores originais do TID que mostram um perfil crescente conforme a amplitude aumenta para cada posição de frequência. Analisando o perfil em 3D da Fig. 10, percebe-se que a forma é um plano inclinado e é notório pela vista superior que os valores dos TID são ditados pelos valores das amplitudes, independem da variação em frequência.

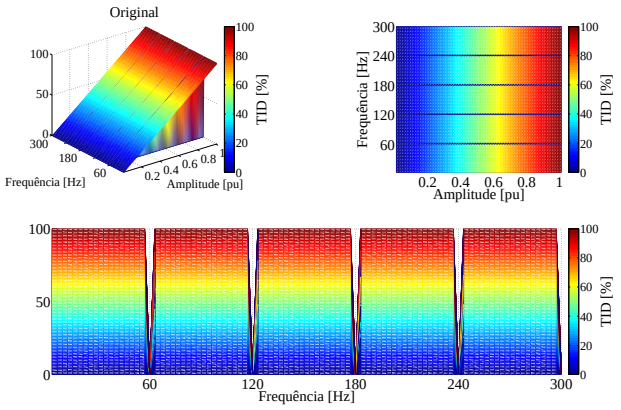

Figura 10. Valores dos TID original ao longo do teste de sensibilidade.

Os resultados para o método IEC 61000-4-7 - subgrupo inter-harmônico são mostrados na Fig. 11.

Observa-se da Fig. 11 que os valores próximos às componentes CC, fundamental e harmônicas são reduzidos, pelo fato da proximidade da inter-harmônica com as mesmas. O que implica em vazamentos do tipo longo alcance que espalham grande parte da energia para as regiões do subgrupos harmônicos e reduz em parcelas a energia para

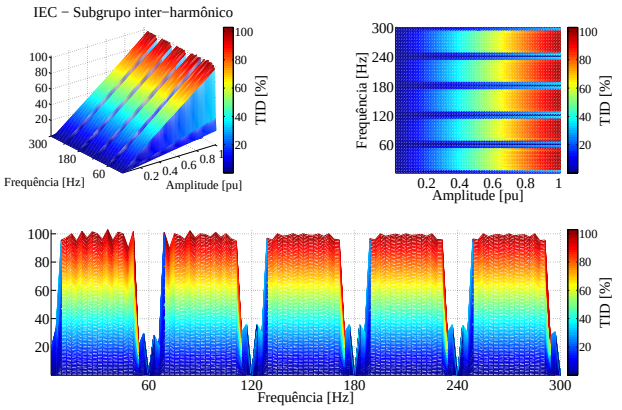

Figura 11. Resultados dos TID do método IEC - Subgrupo inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

o subgrupo inter-harmônico. Logo, com valores menores de subgrupo inter-harmônico, menores são os TID o que explica os valores reduzidos nas regiões em questão.

3.3 Resultados para a Energia do Espectro

A energia do espectro é calculada usando (11). Os valores originais da energia para o sinal do teste são apresentados na Fig. 12. Ao avaliar as energias originais, as regiões entre a componente CC, a fundamental e a 2ª harmônica (120 Hz) possuem oscilações de energia entorno do valor unitário de energia. As oscilações ocorrem com as amplitudes acima de 0,8 pu.

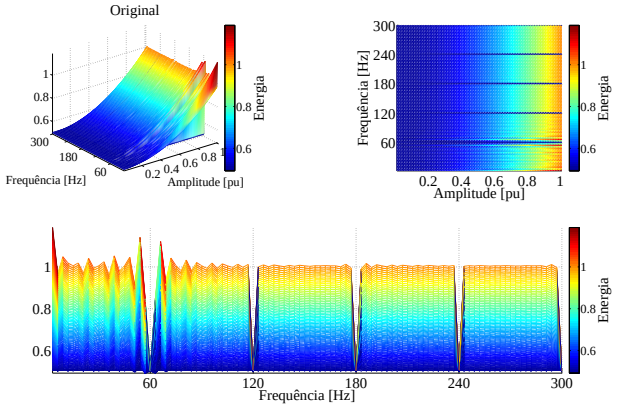

Figura 12. Valores das energias dos espectros originais ao longo do teste de sensibilidade.

Os resultados das energias para o método IEC 61000-4-7 - Subgrupo inter-harmônico são mostrados na Fig. 13.

Na Fig. 13, visualmente os resultados não apresentam diferenças nítidas em relação aos valores originas da Fig. 12. A seguir, os resultados da energia do espectro para o método Chang são mostrados pela Fig. 14.

Na Fig. 14 retrata os resultados semelhantes aos apresentados pelo método IEC (Fig. 13) e uma comparação visual com os valores originais não mostra diferenças nítidas.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado uma metodologia de teste de sensibilidade à amplitude e frequência realizados em

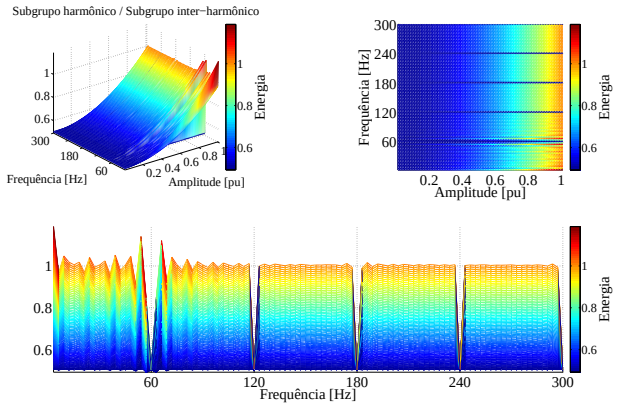

Figura 13. Resultados das energias dos espectros do método Na Fig. 13, visualmente os resultados não apresentam diferenças nítidas em relação aos valores originas da Fig. 12. - Subgrupo harmônico / inter-harmônico ao longo do teste de sensibilidade.

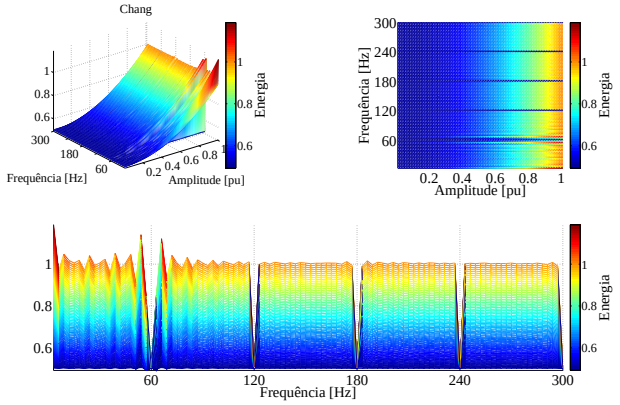

Figura 14. Resultados das energias dos espectros do método Chang ao longo do teste de sensibilidade.

sinais sintéticos, a fim de analisar os resultados de THD, TID e energia dos métodos de agrupamento IEC e Chang obtidos nas simulações. Foi visto que a realização dos testes tornou visível o perfil dos métodos com relação aos resultados teóricos e as possíveis condições (amplitude e frequência). Portanto, as devidas comparações foram feitas para os dois métodos a partir dos resultados de THD, TID e energia. Os resultados mostram que para a aplicação do método IEC quando há inter-harmônicas nas regiões próximas a componente CC e as harmônicas, os valores de THD apresentam maiores valores a medida que amplitude da inter-harmônica aumenta. Para os valores de TID a região mais suscetível abrange a componente fundamental, além da CC e das harmônicas. A energia do espectro é o único quase invariante com o teste de sensibilidade.

No método Chang, para medição de THD a única região menos sensível à presença de inter-harmônicas é a região próxima à fundamental, justamente na banda de frequência que inclui a fundamental (30 a 90 Hz). Nas demais regiões o nível sensibilidade está relacionado ao valor da amplitude da inter-harmônica, isto é, quanto maior o valor da amplitude maior a sensibilidade. Nessas regiões a frequência pouco interessa, pois pouco influencia e, portanto, a sensibilidade passa ser apenas com a amplitude. A respeito da energia, a interpretação é semelhante ao método IEC, sendo possível reduzir o erro da energia com a extensão do método de agrupamento.

As análises realizadas contribuem para especificar os limites de discrepâncias permitidos para quantificação adequada dos valores das harmônicas e inter-harmônicas, como também, das métricas de THD, TID e energia do espectro a partir dos métodos avaliados no escopo deste trabalho.

Os resultados decorrentes deste estudo abrem as portas para implementações futuras de métodos de agrupamento de componentes de frequência, no que diz respeito à avaliação da sua robustez. Também é sugerida esta análise para ter quantificar e estabelecer os limites individuais e total das distorções harmônicas e inter-harmônicas do sinal.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do Edital FAPDF 04/2017. TOA 1373/2017 e Processo: 193.001.474/2017.

REFERÊNCIAS

(2002). *International Standard 61000-4-7. Part 4-7: Testing and measurement techniques - general guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connect thereto*. IEC, Geneva.

Abada, C.C. (2018). *Comparative Analysis of the Results from two Different Frequency Grouping Methods on the Currents and Temperatures of an Induction Motor Submitted to Harmonics and Interharmonics - Laboratory Tests.* Master's thesis, Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília, Brasília-DF.

ABNT (2011). *NBR IEC 61000-4-30. Compatibilidade eletromagnética Parte 4-30: Técnicas de medições e ensaios - Métodos de medições de qualidade da energia.* Rio de Janeiro.

Bracale, A., Carpinelli, G., Leonowicz, Z., Lobos, T., and Rezmer, J. (2008). Measurement of iec groups and subgroups using advanced spectrum estimation methods. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 57(4), 672–681.

Chang, Y.N. et al. (2004). The estimation of interharmonics by group frequencies. In *2004 IEEE Region 10 Conference TENCON 2004.*, volume 3, 224–227.

de Oliveira, W.R. (2015). *Uma Contribuição para a Medição de Distorções Harmônicas e Inter-harmônicas em Instalações de Geração Fotovoltaica.* Master's thesis, Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade de Brasília, Brasília-DF.

Hui, J., Yang, H., Xu, W., and Liu, Y. (2012). A method to improve the interharmonic grouping scheme adopted by iec standard 61000-4-7. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 27(2), 971–979.

Lin, H.C. (2008). Inter-harmonic identification using group-harmonic weighting approach based on the fft. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 23(3), 1309–1319.

Lin, H., Huang, G.S., and Yih Liu, L. (2013). Non-stationary harmonic tracking using piecewise-overlapped group-harmonic algorithm. 3542–3547. doi: 10.23919/ECC.2013.6669113.

Lin, H., Hung Chen, C., and Yih Liu, L. (2011). Harmonics and interharmonics measurement using group-harmonic power minimizing algorithm. *Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, WCE 2011*, 2, 1300–1305.

Monteiro, H.L.M. et al. (2014). Comparison of interpolation methods in time and frequency domain for the estimation of harmonics and interharmonics according to iec standard. In *2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 1–5.

Oppenheim, A.V. and Schafer, R.W. (2010). *Discrete-time signal processing*. Series, 3 edition.

Yuan, X., Chen, B., Li, Q., and Wang, Z. (2014). Measurement method of harmonics and inter-harmonics with nonsynchronous sampling in iec framework. In *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, 123–128.